

การสร้างตัวกรองความถี่ชนิดแบนด์แคบโดยใช้วงจรถ่ายสัญญาณ Kalman  
บนตัวประมวลผลดิจิทัล

IMPLEMENTATION OF NARROW-BAND KALMAN FILTER WITH  
DIGITAL SIGNAL PROCESSOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-824-327-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างตัวกรองความถี่ชนิดแบนด์แคบโดยใช้วงจรรองสัญญาณ Kalman  
บนตัวประมวลผลดิจิทัล

IMPLEMENTATION OF NARROW-BAND KALMAN FILTER WITH  
DIGITAL SIGNAL PROCESSOR



พยุ่ง เดชอยู่  
PHAYUNG DESYOO

เลขหม.....  
เลขทะเบียน..... 47653  
วัน, เดือน, ปี..... 21 ส.ค. 2546

b.....  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2546  
ISBN 974-324-327-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IMPLEMENTATION OF NARROW-BAND KALMAN FILTER  
WITH DIGITAL SIGNAL PROCESSOR**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE  
MASTER OF ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2003**

**ISBN 974-324-327-5**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างตัวกรองความถี่ชนิดแบนด์แคบโดยใช้วงจรกรอง สัญญาณกาลมานบนตัวประมวลผลดิจิทัล
นักศึกษา	นายพุง เดชอยู่
รหัสประจำตัว	41061125
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการออกแบบและสร้างตัวกรองความถี่ชนิดแบนด์แคบโดยใช้กาลมานฟิลเตอร์ ในการวิจัยนี้ใช้ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 โดยตัวกรองความถี่ชนิดแบนด์แคบนี้มีจุดศูนย์กลางความถี่ (Center Frequency) อยู่ในช่วง 10 Hz ถึง 1.5 kHz การเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางความถี่ ทำได้โดยการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ของโมเดลชาวัน ที่มีโครงสร้างแบบ Normal from realization ผลการวิจัยพบว่าตัวกรองความถี่ชนิดแบนด์แคบสามารถทำงานได้เที่ยงตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title** Implementation of Narrow-Band Kalman Filter with  
Digital Signal Processor

**Student** Mr. Phayung Desyoo

**Student ID** 41061125

**Degree** Master Electrical Engineering

**Department** Telecommunication Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Year** 2003

**Thesis Advisor** Assoc.Prof.Dr.Kobchai Dejhan

### ABSTRACT

This thesis concerns about the design and implementation of narrow frequency band filter by using Kalman's theory and TMS320C31 as processor. The center frequency of this filter is between 10 Hz to 1.5kHz by changing coefficient of sinusoidal model in normal form realization and the results have been shown.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาของ รศ.ดร. กอบชัย เดชหาญ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้คอยเอาใจใส่ดูแลและเมตตาแก้ไขด้วยดีเสมอมา ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณพี่ เพื่อนๆ สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณ อาจารย์ สุรพันธ์ ยิ้มมั่น และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ ที่เอื้อเพื่อสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือในการทดลองขอขอบคุณพระอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆ ให้แก่ศิษย์ทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความสำคัญกับการศึกษาของลูกและให้การสนับสนุนเอาใจใส่ดูแลด้วยดีเสมอมา และขอบคุณภรรยาที่เป็นกำลังใจอันยิ่งใหญ่

ประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนอุทิศให้กับมารดาผู้ซึ่งได้จากลูกไปอย่างไม่มีวันกลับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย.....	1
1.3 ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีทางสถิติและสัญญาณ.....	3
2.1 ความน่าจะเป็น (Probability).....	3
2.2 ตัวแปรสุ่ม (random variable).....	4
2.3 ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวน(Mean and Variance).....	5
2.4 เส้นโค้งปกติ (Normal Curve).....	7
2.5 เวกเตอร์การสุ่มเกาส์เซียน (Gaussian Random Vector).....	9
2.6 การวัดเชิงเส้น (Linear Measurement).....	11
2.7 การสุ่มสัญญาณ.....	12
2.8 ความคลาดเคลื่อนของการประมวลผล.....	16
2.9 การแปลง Z.....	18
2.10 คุณสมบัติของการแปลง Z.....	21
2.11 การแปลง Z ในรูปเศษส่วน.....	23
2.12 ฟังก์ชันของระบบที่แปรตามเวลา.....	27
2.13 ผลตอบสนองความถี่ของระบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ตัวกรองความถี่แบบคิจิตอล	
3.1 ตัวกรองคิจิตอลแบบเอฟไออาร์.....	34
3.2 ตัวกรองคิจิตอลแบบไอไออาร์.....	36
3.3 ตัวกรองคาลมานฟิลเตอร์.....	40
3.4 คาลมานฟิลเตอร์ไม่ต่อเนื่อง.....	43
บทที่ 4 การออกแบบสร้างการกรองแบบคาลมาน	
4.1 การออกแบบข่านความถี่โดยโมเดลชายน้แบบ Coupled - Form .....	51
4.2 การออกแบบขนาดของความกว้างของแบนด์ ( $\Delta\omega$ ).....	53
4.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่แคบคาลมาน.....	58
4.4 การออกแบบคาลมานฟิลเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	61
4.5 การออกแบบคาลมานฟิลเตอร์บน TMS320C31.....	63
4.6 ผลทดลองที่สร้างจากโปรแกรม MATLAB.....	64
4.7 ผลการทดลองที่สร้างมาจาก TMS320C31.....	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
เอกสารอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก ก. การออกแบบค่านฮาร์ดแวร์.....	84
ภาคผนวก ข. โปรแกรมคาลมานฟิลเตอร์ .....	95
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความถี่สัญญาณต่อเนื่องและสัญญาณไม่ต่อเนื่อง ในกรณีที่มีการสุ่ม.....	16
2.2 Z Transform ของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง.....	23
3.1 แสดงผลของการคำนวณสถานะที่ 1 และสถานะที่ 2.....	63
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแบนด์ ( $\Delta\omega$ )และค่ารัศมี ( $r$ )และความถี่สุ่ม ( $f_s$ ) .....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ฟังก์ชันของเกาซ์.....	8
2.2 แสดงกราฟแจกแจงปกติ $x \sim N(0,1)$ .....	10
2.3 การสุ่มสัญญาณอนาลอก.....	13
2.4 ความคลาดเคลื่อนของราวด์ควอไตรเซชันและทรันเคท-ควอไตรเซชัน.....	17
2.5 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน.....	17
2.6 Pole – Zero Plot ของระบบ.....	23
2.7 ตำแหน่งการวาง Zero และ Pole.....	24
2.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Pole กับลำดับสัญญาณ.....	25
2.8 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Pole กับลำดับสัญญาณ.....	26
2.8 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Pole กับลำดับสัญญาณ.....	26
2.9 ผลตอบสนองความถี่ของระบบ $H(z) = \frac{z+1}{z}$ .....	32
2.10 ผลตอบสนองความถี่ของระบบ $y(n) = 0.9y(n-1) + x(n)$ .....	33
3.1 โครงสร้างแบบตรง .....	35
3.2 โครงสร้างแบบคลาสเคด .....	36
3.3 แสดงโครงสร้างของตัวกรองไอโออาร์แบบตรง I.....	37
3.4 แสดงโครงสร้างตัวกรองไอโออาร์แบบตรง II.....	38
3.5 โครงสร้างตัวกรองดิจิตอลแบบไอโออาร์ที่มีโครงสร้างในแบบขนาน.....	39
3.6 โครงสร้างย่อยของตัวกรองดิจิตอลแบบขนาน.....	39
3.7 การประมาณค่า $x_n$ จากการวัด $y_n$ ของสถานะ $n$ .....	48
3.8 ลำดับการคำนวณการกรองกาลมาน.....	48
4.1 แสดงโครงสร้างโมเดลชายน้แบบ Coupled – form.....	51
4.2 การวางตำแหน่งโพลและซีโร.....	53
4.3 ความสัมพันธ์ของแมกนิจูดและความถี่เทียบเคียง.....	54
4.4 เส้นตรงสัมผัสกับเส้นรอบวง เพื่อหาค่า G.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.5 รัศมี $r$ จากจุดศูนย์กลาง $0$ ไปสัมผัสกับเส้นรอบวง $1$ หน่วย.....	56
4.6 โครงสร้างของ แบบตรง.....	57
4.7 โพลีซาร์ทการประมวลผลการกรองคาลมาน.....	63
4.8 การกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองคาลมาน.....	64
4.9 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $100$ Hz.....	65
4.10 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $100$ Hz.....	65
4.11 การวางตำแหน่งโพลและซีโร ย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างเป็น $100$ Hz.....	66
4.12 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $10$ Hz.....	67
4.13 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างเป็น $10$ Hz.....	67
4.14 การวางตำแหน่งโพลและซีโร ย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างเป็น $10$ Hz.....	68
4.15 ไคอะแกรมการต่อ DSP เข้ากับสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต.....	68
4.16 การต่อสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเข้ากับบอร์ดและเครื่องมือวัดเข้ากับบอร์ด.....	69
4.17 วงจรการวัดจริงด้วย Dynamic Signal Analyzer Model 35665A .....	69
4.18 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $100$ Hz.....	70
4.19 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $100$ Hz.....	70
4.20 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $10$ Hz.....	71
4.21 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $10$ Hz.....	71
4.22 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $1$ Hz.....	72
4.23 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $1$ Hz.....	72
4.24 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $0.1$ Hz.....	73
4.25 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $0.1$ Hz.....	73
4.26 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $0.01$ Hz.....	74
4.27 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $0.01$ Hz.....	74
4.28 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $100$ Hz.....	75
4.29 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $100$ Hz.....	75
4.30 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $10$ Hz.....	76
4.31 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ $1$ kHz ความกว้างความถี่ $10$ Hz.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.32 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 1 Hz.....	77
4.33 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 1 Hz.....	77
4.34 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.1 Hz.....	78
4.35 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.1 Hz.....	78
4.36 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.01 Hz.....	79
4.37 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.01 Hz.....	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการประมวลผลสัญญาณอนาล็อกย่านความถี่ที่ต้องการความถูกต้อง และความเที่ยงตรงในย่านความถี่ 10 Hz – 1.5 kHz พบว่าเมื่อใช้อุปกรณ์ที่เป็น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำมาต่อเป็น วงจรกรองความถี่ผ่านแบบแบนด์แคปปัจจุบันนี้ ในการสร้างวงจรแบนด์แคปย่านความถี่ 1 – 100 Hz จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่เป็นแบบอนาล็อกให้ตรงกันค่าที่ได้จากการออกแบบ ซึ่งส่วนมากอุปกรณ์ที่ได้จากการคำนวณเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่มีอยู่นั้นอาจมีค่าได้ไม่ตรงตามที่คำนวณ และอาจเกิดออสซิลเลเตอร์ได้ เมื่อมีการเลือกค่า Quality factor ไม่เหมาะสม เพื่อการชดเชยค่าที่ผิดพลาดดังกล่าวจึงได้สร้างวงจรกรองสัญญาณคาสแมน เพื่อใช้ชดเชยค่าผิดพลาดและทำให้ประสิทธิภาพการกรองความถี่ของสัญญาณรบกวนได้ดีขึ้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วงจรกรองสัญญาณคาสแมนใช้เป็นการประมวลผลแบบดิจิทัล มาแทนการใช้วงจร แบบอนาล็อก ซึ่งสามารถเปลี่ยนค่าตามที่ได้จากคำนวณจากระบบไดนามิก และค่าพารามิเตอร์ สำหรับการประมวลผลสัญญาณตามย่านความถี่ผ่านแบบแคปนั้นจำเป็นต้อง ใช้ตัวประมวลผลที่เร็วซึ่งตัวประมวลผลนี้มีราคาแพงเมื่อมีขนาดหน่วยความจำเพิ่มมากขึ้นดังนั้น จึงใช้ตัวประมวลผล TMS320C31 มาขยายหน่วยความจำให้สามารถมีขนาดเป็น 256 กิโลไบต์

### 1.3 ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ทำการสร้างระบบขยายหน่วยความจำสำหรับการประมวลผลให้มีพื้นที่มากขึ้น ส่วนซอฟต์แวร์หรืออัลกอริทึมที่นำมาใช้ เพื่อทดสอบระบบการประมวลผลนี้จะใช้อัลกอริทึมตามทฤษฎีการกรองความถี่แบบคาสแมนและสเตทสเปท เพื่อเขียนระบบไดนามิกของสัญญาณสำหรับการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลจะใช้การส่งค่าไปทำงานโดยผ่านคอมพิวเตอร์แต่เมื่อเลือกความถี่ที่ต้องการแล้วก็จะ โปรแกรมลงบนหน่วยความจำที่อยู่บนส่วนของย่านนั้น

#### 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนของการศึกษาวิจัยเริ่มจากการศึกษาสถาปัตยกรรมของตัวประมวลผล TMS320C31 จากนั้นทำการออกแบบระบบการขยายหน่วยความจำเสร็จแล้วทำการทดลองสร้างตัวกรองสัญญาณดิจิทัลแบบแบนด์แคบด้วยตัวประมวลผลที่สร้างขึ้นและเปรียบเทียบผลกับโปรแกรมการจำลองการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีทางสถิติและสัญญาณ

### 2.1 ความน่าจะเป็น (Probability)[1,2,3]

ความน่าจะเป็นหมายถึง ตัวเลขที่แสดงถึงโอกาสการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจว่ามีโอกาสเกิดขึ้นได้มากน้อยเพียงใด การเลือกสิ่งของออกจากกล่องหรือการหยิบของจากเหตุการณ์หนึ่งนั้นเรียกว่า การสุ่ม (Random) และผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากเหตุการณ์หรือการทดลองหนึ่งเรียกว่า แซมเปิล สเปซ (Sample space) โดยความน่าจะเป็นซึ่งเกิดจากการหยิบจากเหตุการณ์หนึ่งนั้นสามารถหาได้จาก

$$P(A) = \frac{\text{ความเป็นไปได้ที่เลือกของจากเหตุการณ์ } A}{\text{ผลรวมทั้งหมดของจำนวนการเลือกที่เป็นไปได้}}$$

ความน่าจะเป็นของความพอใจที่จะเลือกจากเหตุการณ์ A หรือเหตุการณ์ B ใดๆอย่างหนึ่งนั้นสามารถเขียน ดังสมการที่ 2.1

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad (2.1)$$

ถ้าความน่าจะเป็นของการเลือกสิ่งที่น่าสนใจ จากเหตุการณ์ A และเหตุการณ์ B ที่เป็นอิสระต่อกัน ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมกัน สามารถเขียน ได้ดังสมการที่ 2.2

$$P(A \cap B) = P(A)P(B) \quad (2.2)$$

ความน่าจะเป็นจากการเลือกเหตุการณ์ A ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเลือกจากเหตุการณ์ B เรียกความน่าจะเป็นแบบนี้ว่า ความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Conditional Probability) เขียนได้ดังสมการที่ 2.3

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ตัวแปรสุ่ม (Random variable)[4,5]

ในกรณีของการสุ่มร่วมกับแรงดันไฟฟ้าต่อเนื่องหรือการเคลื่อนที่บางอย่างที่มีความน่าสนใจกว่ากรณีที่ตรงกันข้ามกับความไม่ต่อเนื่องในเรื่องของเส้นทางตัวแปรสุ่มเป็นฟังก์ชันหลักซึ่งวาดจุดทั้งหมดในแซมเปิล สเปซ(Sample space) ที่เป็นจำนวนจริง สำหรับตัวอย่างตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง  $x(t)$  อาจเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาเป็น  $x(t)$  ซึ่งหมายความว่าเวลาในบางจุด  $x(t)$  ควรจะบอกตำแหน่งความคาดหวัง (Expected position) ในกรณีตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์  $A$  หลังเหตุการณ์เป็นจำนวนจริง 0 เส้นคือ  $P(A)=0$  สามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็น ภายในบางช่วงเวลาได้ ฟังก์ชันนี้แสดงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มกำหนดเป็น (Cumulative distribution function) ดังสมการที่ 2.4

$$F_{\alpha}(X) = P(-\infty, X] \quad (2.4)$$

ฟังก์ชันนี้แสดงความน่าจะเป็นสะสมของตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง  $x$  ทั้งหมด จากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นคุณสมบัติของฟังก์ชันการกระจายสะสมคือ 1.  $F_{\alpha}(X) \rightarrow 0$  โดยที่  $X \rightarrow -\infty$  2.  $F_{\alpha}(X) \rightarrow 1$  โดยที่  $X \rightarrow +\infty$  3.  $F_{\alpha}(X)$  ไม่เพิ่มขึ้นตามฟังก์ชันของ  $X$  ในกรณีถ้าต้องการหาความหนาแน่นของฟังก์ชันสามารถทำการหาอนุพันธ์ดังสมการที่ 2.4 ซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density function) แสดงดังสมการที่ 2.5

$$f_x(X) = \frac{dF_x(x)}{dx} \quad (2.5)$$

ต่อไปให้คุณสมบัติของฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสม ความหนาแน่นฟังก์ชันมีคุณสมบัติต่อไปนี้คือ

1.  $f_x(X)$  เป็นฟังก์ชันบวก
2.  $\int_{-\alpha}^{\alpha} f_x(x) dx = 1$  เพราะฉะนั้นความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นช่วงเวลา  $[a, b]$  หาได้จากสมการที่(2.6)

$$P_x[a, b] = \int_a^b f_x(x) dx \quad (2.6)$$

## 2.3 ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวน (Mean and Variance)[4,5]

ค่าเฉลี่ยของจำนวนลำดับ จากการสุ่มจำนวน  $N$  ตัวจากตัวแปรสุ่ม  $x$  หาได้จากสมการที่ (2.7)

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N} \quad (2.7)$$

$\bar{X}$  = ค่าเฉลี่ย

$X_1, \dots, X_N$  = ตัวแปรสุ่ม

$N$  = จำนวนของตัวแปรสุ่ม

ในการบอกค่าสัญญาณที่ต่อเนื่องที่เป็นจำนวนอนันต์ของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงและการตอบสนองจากการเลือก ควรคาดหวังจากเหตุการณ์ที่พบจริง ค่าตัวแปรสุ่มนั้นเป็นอนันต์แต่ละครั้งจากความน่าจะเป็น  $n$  เมื่อเลือกเหตุการณ์  $X_1, \dots, X_n$  ค่าคาดหวังของตัวแปรสุ่มไม่ต่อเนื่องสามารถประมาณได้จากน้ำหนักความน่าจะเป็นเฉลี่ย ดังสมการที่ (2.8)

$$\bar{X} \approx \frac{(P_1N)_{x_1} + (P_2N)_{x_2} + \dots + (P_nN)_{x_n}}{N} \quad (2.8)$$

$\bar{X}$  = ค่าเฉลี่ย

$(P_1N)_{x_1}$  = ค่าคาดหวังที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์  $x_1$

$(P_nN)_{x_n}$  = ค่าคาดหวังที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์  $x_n$

ดังนั้นถ้าตัวแปรสุ่มทั้งหมด  $N$  ครั้ง ค่าความคาดหวังที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์  $x_1$  เมื่อมีค่าการสุ่มอนันต์สามารถหาความคาดหวังที่เกิดขึ้น ของตัวแปรการสุ่มไม่ต่อเนื่องจากสมการที่ (2.9)

$$E(X) = \sum_{i=1}^n P_i X_i \quad (2.9)$$

$P_1, \dots, P_n$  = ความน่าจะเป็นของการตอบสนอง

สำหรับค่าคาดหวังตัวแปรสุ่มที่ต่อเนื่องหาได้จากสมการที่ (2.10)

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xf_x(x)dx \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 ถ้าแทน  $x$  ด้วยตัวแปรสุ่มฟังก์ชันดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการของฟังก์ชันความคาดหวัง เป็นของการสุ่มไม่ต่อเนื่องและต่อเนื่อง ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12

$$E(g(x)) = \sum_{i=1}^n P_i g(x_i) \quad (2.11)$$

$$E(g(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) f_x(x) dx \quad (2.12)$$

ค่าความคาดหวังของตัวแปรสุ่มที่เป็น First statistical moment  $k^{th}$  คือ  $g(x) = x^k$  ดังนั้น First statistical moment  $k^{th}$  ของตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง  $x$  เขียนได้ดังสมการที่ 2.13

$$E(x^k) = \int_{-\infty}^{\infty} x^k f_x(x) dx \quad (2.13)$$

และถ้าเป็น Second moment ของตัวแปรสุ่มเขียนได้ดังสมการที่ 2.14

$$E(x^2) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f_x(x) dx \quad (2.14)$$

เมื่อให้  $g(x) = X - E(X)$  และใช้สมการที่ 2.14 จะได้ความแปรปรวนของสัญญาณจากค่าเฉลี่ยดังสมการที่ 2.15

$$\begin{aligned} \text{ความแปรปรวนร่วม } X &= E[(X - E(X))^2] \\ &= E(X^2) - E(X)^2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

ความแปรปรวนคือ คุณสมบัติการเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ย เมื่อเพิ่มหรือลดค่าตัวแปรสุ่มจะไม่ทำให้ค่าความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มเปลี่ยนแปลง เพียงแต่ค่าเฉลี่ยเปลี่ยนไปทางซ้ายหรือทางขวามือเท่านั้น รากของความแปรปรวนคือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.16

$$\sigma_x = \sqrt{\text{ความแปรปรวน } x} = \sqrt{\sigma_x^2} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 เส้นโค้งปกติ (Normal Curve)[4,5]

สมการเส้นโค้งกระจายปกติ สามารถเขียนเป็นรูปแบบแตกต่างกันหลายแบบ เมื่อต้องการหาเส้นโค้งกระจายความถี่ปกติ สมการที่ได้คือพื้นที่ใต้เส้นโค้งจะเท่ากับจำนวนของจุดสังเกตการกระจายจำนวน  $N$  โดยที่ค่าความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการกระจาย  $y$  หาได้จากฟังก์ชันของเกาส์ ดังสมการที่ 2.17 และแสดงดังภาพที่ 2.1

$$y = Ce^{-(x^2/2\sigma^2)} \quad (2.17)$$

และผลรวมของฟังก์ชันการกระจายจำนวน  $N$  หาได้จากสมการที่ 2.18

$$\int_{-\infty}^{+\infty} y dx = N \quad (2.18)$$

แทนค่า  $y$  จะได้ดังสมการที่ 2.19

$$C \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2/2\sigma^2} dx = N \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.17 ได้ค่าของ  $C$  ดังสมการที่ 2.20

$$C = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (2.20)$$

แทนค่าสมการที่ 2.20 ลงในสมการที่ 2.17 ดังสมการที่ 2.21

$$y = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad (2.21)$$

สังเกตที่จุด  $x$  จากค่าเฉลี่ย  $\mu$  จำนวน  $N$  สามารถเขียนสมการเส้นโค้งความถี่ปกติดังสมการที่ 2.22

$$y = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนเป็นฟังก์ชันการแจกแจงปกติ ที่มีพื้นที่ใต้เส้นโค้งเป็น 1 หน่วย และเรียกฟังก์ชันนั้นว่า นอร์มัลไลซ์ (Normalized) เขียนดังสมการที่ 2.23

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (2.23)$$

กำหนดให้

$p(x)$  = ความหนาแน่นความน่าจะเป็น

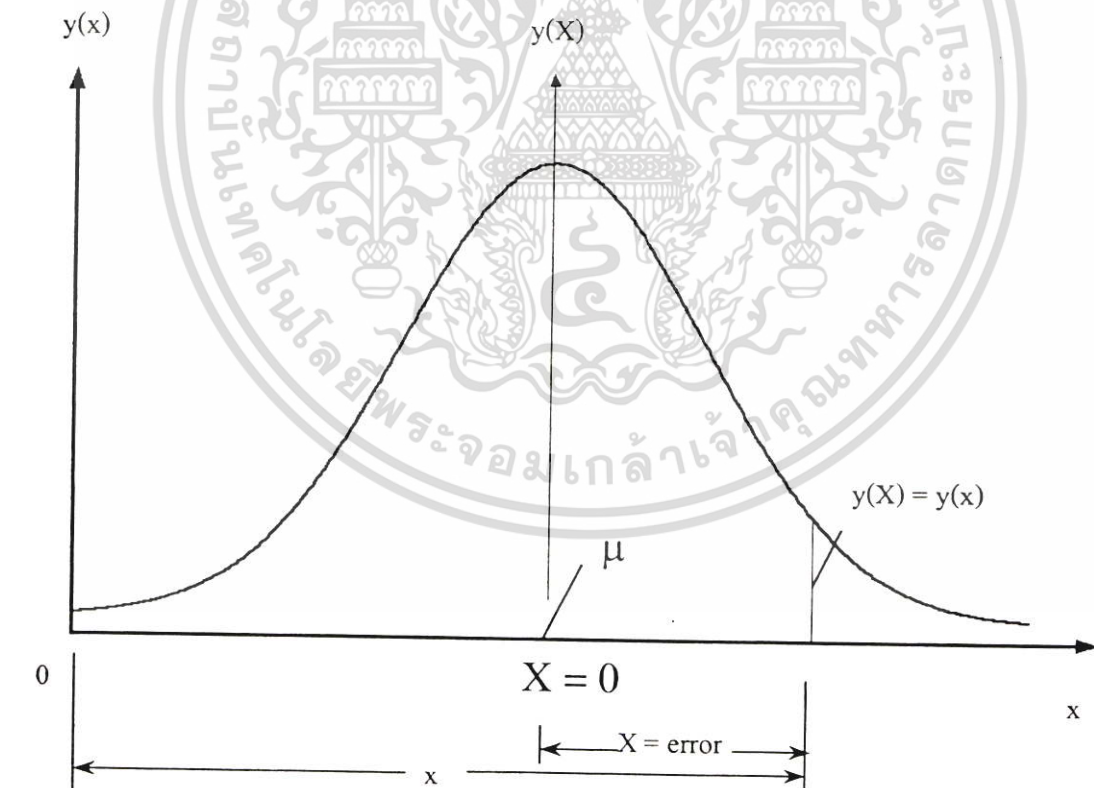
$y$  = เส้นโค้งแจกแจงความถี่ปกติ

$C$  = ค่าคงที่

$X$  = ความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ย

$\sigma$  = เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$y(X)$  = ความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่เกิดการคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 2.1 ฟังก์ชันของเกาส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 เวกเตอร์การสุ่มเกาส์เซียน ( Gaussian Random Vector)[1,2,4]

ตัวแปรสุ่ม  $x \in R^n$  เป็นเกาส์เซียน โดยมีความหนาแน่นดังสมการที่ 2.23 สามารถเขียนในรูปสมการเมื่อมีองค์ประกอบหลายตัวแปรอินพุตได้ดังสมการที่ 2.24

$$p(v) = (2\pi)^{n/2} (\det \Sigma)^{-1/2} \exp\left(-\frac{1}{2}(v - \bar{x})^T (\Sigma^{-1})(v - \bar{x})\right) \quad (2.24)$$

โดยให้  $\Sigma = \Sigma^T > 0, \bar{x} \in R^n$  แล้ว และค่า  $x$  เป็นการแจกแจงปกติเป็น  $x \sim N(\bar{x}, \Sigma)$  เมื่อให้ค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหวังของตัวแปรสุ่ม  $x$  ภายใต้เส้นโค้งปกติ สามารถหาค่านั้นได้ดังสมการที่ 2.25

$$\bar{x} = E(x) = \int v p(x) dv \quad (2.25)$$

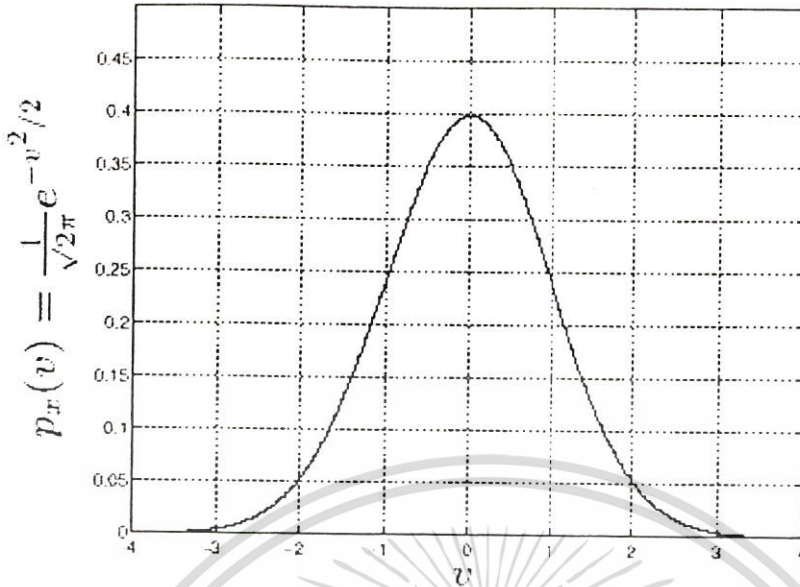
ให้  $\Sigma = \Sigma^T > 0$  เป็นเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Covariance Matrix) ของตัวแปร  $x$  ความแปรปรวนนั้นหาได้จากสมการที่ 2.26

$$\Sigma = E(x - \bar{x})(x - \bar{x})^T \quad (2.26)$$

$$= E(xx^T) - E(\bar{x}\bar{x}^T) \quad (2.27)$$

$$= \int (v - \bar{x})(v - \bar{x})^T p_x(v) dv \quad (2.28)$$

ความหนาแน่นของ  $x$  ที่มีการแจกแจงปกติ โดยมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และความแปรปรวนเป็น 1 เขียนเป็นรูปกราฟโค้งปกติได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดงกราฟแจกแจงปกติ  $x \sim N(0,1)$

ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของตัวแปรการสุ่มสเกล่า หาได้ดังสมการที่ 2.29 และสมการที่ 2.30 และค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม  $x_i$  หาได้จากสมการที่ 2.31 ดังนั้นเมื่อมีตัวแปร 2 ตัว คือ

$$E(x_i) = \bar{x} \quad (2.29)$$

$$E(x_i - \bar{x}_i)^2 = \Sigma_{ii} = P_{ii} \quad (2.30)$$

$$x_i = \sqrt{\Sigma_{ii}} \quad (2.31)$$

ดังนั้นเมื่อมีตัวแปรสุ่ม 2 ตัว จะหาค่าความแปรปรวนร่วมระหว่างตัวแปรสุ่ม  $x_i$  และตัวแปรสุ่ม  $x_j$  ได้ดังสมการที่ 2.32 และค่าสัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์  $\rho_{ij}$  (Correlation coefficient) ได้ดังสมการสมการที่ 2.33 และค่าของการเบี่ยงเบนกำลังสองเฉลี่ยหรือค่านอร์มนั้นได้ดังสมการที่ 2.34

$$E(x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)^T = \Sigma_{ij} = P_{ij} \quad (2.32)$$

$$\rho_{ij} = \frac{\Sigma_{ij}}{\sqrt{\Sigma_i \Sigma_j}} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E\|x - \bar{x}\|^2 = E\text{Tr}(x - \bar{x})(x - \bar{x})^T = \text{Tr}\Sigma = \sum_{i=1}^n \Sigma_{ii} \quad (2.34)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการดังกล่าว หาความสัมพันธ์ฟังก์ชันของสมการที่ 2.35 ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้น กำหนดให้  $x$  เป็นอินพุต  $b$  เป็นค่าคงที่ และ  $y$  เป็นเอาต์พุต ให้เมทริกซ์  $A \in R^{m \times n}$  และ  $b \in R^m$  โดย  $z$  เป็นเกาส์เซียน โดยค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันนี้ได้ดังสมการที่ 2.36

$$y = Ax + b \quad (2.35)$$

$$Ey = E(Ax + b) \quad (2.36)$$

$$= AE\bar{x} + b$$

$$= A\bar{x} + b$$

ค่าความแปรปรวนร่วมของสมการที่ 2.35 หาได้จากสมการที่ 2.37

$$\Sigma_y = E(z - \bar{z})(z - \bar{z})^T \quad (2.37)$$

$$= AE(x - \bar{x})(x - \bar{x})^T A^T$$

$$= A\Sigma_x A^T \quad (2.38)$$

## 2.6 การวัดเชิงเส้น (Linear Measurement)[2,4]

ระบบการวัดสัญญาณที่เป็นเชิงเส้น ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสัญญาณการวัดเชิงเส้นและส่วนสัญญาณรบกวน ซึ่งเขียนเป็นสมการเชิงเส้นดังสมการที่ 2.39

$$y = Ax + v \quad (2.39)$$

ในที่นี้ให้  $x$  เป็นสัญญาณที่ทำการวัดหรือประมาณค่า โดยที่  $x \in R^n$  และ  $y$  เป็นค่าที่ได้จากการวัด โดยที่  $y \in R^m$  และ เมทริกซ์  $A$  แสดงลักษณะของตัวตรวจจับ โดยที่  $A \in R^{m \times n}$  และ  $v$  เป็นการรบกวนของสัญญาณ สมมติให้  $x$  มีค่าเฉลี่ยเป็น  $\bar{x}$  มีความแปรปรวนร่วมเป็น  $\Sigma_x$  เขียนการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แจกแจงปกติได้เป็น  $x \sim N(\bar{x}, \Sigma)$  โดยที่  $N(\bar{x}, \Sigma)$  เป็นการแจกแจงปกติก่อน และ  $v$  มีค่าเฉลี่ย  $\bar{v}$  เป็นการแจกแจงรบกวนที่มีความแปรปรวนร่วมเป็น  $\Sigma_v$  ทั้งสัญญาณที่วัดและสัญญาณรบกวนเป็นอิสระต่อกัน สามารถเขียนเป็นการแจกแจงปกติ ดังนั้นเขียนเป็นสมการที่ 2.40

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \sim N\left(\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{v} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \Sigma_x & 0 \\ 0 & \Sigma_y \end{bmatrix}\right) \quad (2.40)$$

จากสมการที่ 2.40 จัดรูป ได้ดังสมการที่ 2.41

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

ดังนั้นจะได้สมการที่ 2.42

$$E \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ A\bar{x} + \bar{v} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

และจากสมการที่ 2.41 และสมการ 2.42 เขียนได้ดังสมการที่ 2.43 และ 2.44

$$E \begin{bmatrix} x - \bar{x} \\ y - \bar{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - \bar{x} \\ y - \bar{y} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_x & 0 \\ 0 & \Sigma_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}^T \quad (2.43)$$

$$= \begin{bmatrix} \Sigma_x & \Sigma_x A^T \\ A \Sigma_x & A \Sigma_x A^T + \Sigma_v \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

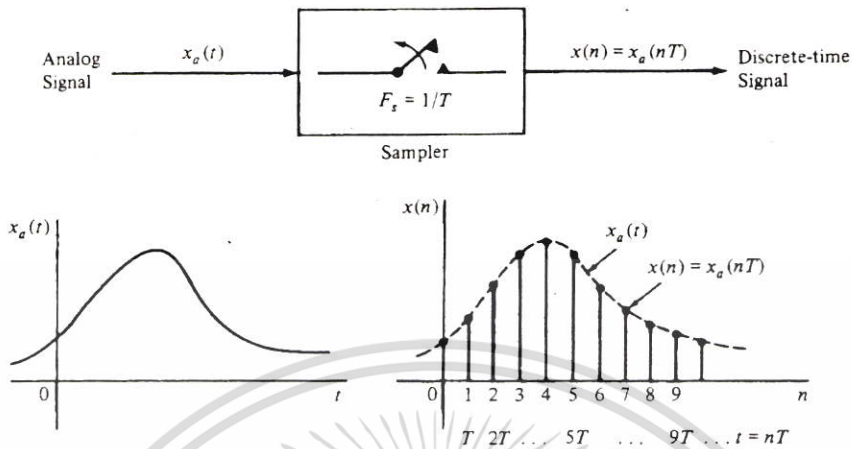
จะได้ค่าความแปรปรวนร่วมของการวัด  $y$  คือ  $A \Sigma_x A^T + \Sigma_v$  และ  $A \Sigma_x A^T$  เป็นความแปรปรวนร่วมของสัญญาณ และ  $\Sigma_v$  เป็นความแปรปรวนร่วมของสัญญาณรบกวน

## 2.7 การสุ่มสัญญาณ[1,2,4]

การเปลี่ยนสัญญาณจากสัญญาณต่อเนื่องกับเวลาให้เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องสามารถทำได้โดยการสุ่มสัญญาณ เมื่อกำหนด ให้  $x_n(t)$  เป็นสัญญาณอินพุตจากการสุ่ม ผลให้ได้สัญญาณที่ เอาต์พุตเป็น  $x_n(nT)$  ซึ่ง  $T$  คือช่วงเวลาการสุ่ม สำหรับการสุ่มสัญญาณอนาลอกซึ่งจะพิจารณาจากสัญญาณที่เป็นคาบหรือรูปแบบการสุ่ม สามารถเขียนเป็นสมการที่ 2.45 ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x(n) = x_a(nT) \quad -\infty < n < \infty \quad (2.45)$$



ภาพที่ 2.3 การสุ่มสัญญาณอนาล็อก

$x(n)$  เป็นสัญญาณอนาล็อกที่ทำการสุ่มทุกๆ  $T$  วินาที วิธีการดำเนินการดังภาพที่ 2.3 ระยะเวลาระหว่างการสุ่มเรียกว่าคาบการสุ่ม หรือ ช่วงเวลาการสุ่ม โดยเขียนสมการความสัมพันธ์ได้เป็น  $1/T = F_s$  ที่ซึ่ง  $F_s$  คือ อัตราการสุ่ม (การสุ่ม/วินาที) ระหว่างตัวแปรเวลา ( $t$ ) กับจำนวนครั้ง ( $n$ ) ของสัญญาณต่อเนื่องและสัญญาณเป็นไม่ต่อเนื่อง สามารถเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรเวลาที่คาบการสุ่ม  $T$  กับอัตราสุ่มเป็น  $F_s = 1/T$  ดังนั้นจะได้ผลตามสมการที่ 2.46

$$t = nT = \frac{n}{F_s} \quad (2.46)$$

เมื่อให้ความสัมพันธ์ของตัวแปรความถี่อนาล็อกเป็น  $F$  หรือ  $\Omega$  ตัวแปรความถี่ของสัญญาณไม่ต่อเนื่องเป็น  $f$  หรือ  $\omega$  สามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ของสัญญาณอนาลอกรูปไซน์ได้ดังสมการที่ 2.47

$$x_a(t) = A \cos(2\pi Ft + \theta) \quad (2.47)$$

เมื่อมีการสุ่มสัญญาณที่เป็นคาบขณะที่อัตราการสุ่ม  $F_s = \frac{1}{T}$  การสุ่ม/วินาที ได้ดังสมการที่ 2.48

$$x_a(nT) \equiv x(n) = A \cos(2\pi Ft + \theta) \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= A \cos\left(\frac{2\pi n F}{F_s}\right) \quad (2.49)$$

เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไซน์ไม่ต่อเนื่องตามสมการที่ 2.49 กับสมการที่ 2.50  
 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความถี่  $F$  กับ  $f$  ดังสมการที่ 2.51

$$x(n) = A \cos(2\pi f n + \theta) \quad -\infty < n < \infty \quad (2.50)$$

และ

$$f = \frac{F}{F_s} \quad (2.51)$$

หรือ

$$\omega = \Omega T \quad (2.52)$$

ความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.51 นั้นเรียกว่า ความถี่นอร์มัลไลซ์ (Normalized Frequency) ซึ่งสามารถหาตัวแปรความถี่  $f$  ได้จากตัวแปรความถี่  $F$  และความถี่สุ่ม  $F_s$  ย่านความถี่ของสัญญาณไซน์มีค่าเป็น  $-\infty < F < \infty$  หรือ  $-\infty < \Omega < \infty$  และความถี่ของสัญญาณไม่ต่อเนื่องเป็น  $-\frac{1}{2} < f < \frac{1}{2}$  หรือ  $-\pi < \omega < \pi$  จากสมการที่ 2.51 พบว่าความถี่ของสัญญาณไซน์ต่อเนื่อง เมื่อมี

อัตราการสุ่ม  $F_s$  อยู่ในย่าน  $-\frac{1}{2T} = \frac{F_s}{2} \leq F \leq \frac{F_s}{2} = \frac{1}{2T}$  หรือ  $-\frac{\pi}{T} = -\pi F_s \leq \Omega \leq \pi F_s = \frac{\pi}{T}$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสังเกตว่ามีความแตกต่างระหว่างสัญญาณต่อเนื่องกับเวลาและสัญญาณไม่ต่อเนื่องกับเวลาในแต่ละย่านความถี่ การสุ่มสัญญาณที่ต่อเนื่องใช้การกำหนดย่านความถี่ไม่จำกัด ที่เป็นตัวแปร  $F$  หรือ  $\Omega$  ไปเป็นย่านความถี่จำกัดที่เป็นตัวแปร  $f$  หรือ  $\omega$  ผลมาจากความถี่สูงสุดของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องเป็น  $\omega = \pi$  หรือ  $f = \frac{1}{2}$  ซึ่งยอมให้อัตราการสุ่ม  $F_s$  ครอบคลุมค่าสูงสุดของ  $F$  และ  $\Omega$  ดังสมการที่ 2.53 และ 2.54

$$F_{\max} = \frac{F_s}{2} = \frac{1}{2T} \quad (2.53)$$

$$\Omega_{\max} = \pi F_s = \frac{\pi}{T} \quad (2.54)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสุ่มสัญญาณไซน์ต่อเนื่องดังสมการที่ 2.55

$$x_a(t) = A\cos(2\pi F_0 t + \theta) \quad (2.55)$$

ให้อัตราการสุ่ม  $F_s = 1/T$  จะได้สมการที่ 2.56

$$x(n) = A\cos(2\pi f_0 n + \theta) \quad (2.56)$$

ที่ซึ่ง  $f_0 = F_0 / F_s$  คือความถี่สัมพัทธ์สัญญาณไซน์ ถ้าสมมุติให้  $[-F_s/2] \leq F_0 \leq [F_s/2]$  ความถี่  $f_0$  ของ  $x(n)$  อยู่ในย่าน  $-\frac{1}{2} \leq f_0 \leq \frac{1}{2}$  เป็นย่านของความถี่ไม่ต่อเนื่อง ในที่นี้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $F_0$  กับ  $f_0$  เป็น 1 ต่อ 1 และด้วยเหตุนี้สัญญาณอนาล็อก  $x_a(t)$  จากการสุ่ม  $x(n)$  ได้ดังสมการที่ 2.57 และสมการที่ 2.58

$$x_a(t) = A\cos(2\pi F_k t + \theta) \quad (2.57)$$

$$F_k = F_0 + kF_s \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.58)$$

อัตราการสุ่ม  $F_s$  และความถี่  $F_k$  เป็นความถี่ที่นอกเหนือจากความถี่พื้นฐาน (Fundamental) ที่ย่าน  $-F_s/2 \leq F \leq F_s/2$  ดังนั้นสัญญาณที่ได้จากการสุ่มดังสมการที่ 2.59

$$\begin{aligned} x(n) &\equiv x_a(nT) = A\cos\left(2\pi \frac{F_0 + kF_s}{F_s} n + \theta\right) \\ &= A\cos(2\pi n F_0 / F_s + \theta + 2\pi kn) \\ &= A\cos(2\pi f_0 n + \theta) \end{aligned} \quad (2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความถี่สัญญาณต่อเนื่องและสัญญาณไม่ต่อเนื่อง  
ในกรณีที่มีการสุ่ม

สัญญาณต่อเนื่องกับเวลา	สัญญาณไม่ต่อเนื่อง
$\Omega = 2\pi F$	$\omega = 2\pi f$
$\frac{\text{radians}}{\text{sec}} = \text{Hz}$	$\frac{\text{radians}}{\text{sample}} = \frac{\text{cycle}}{\text{sample}}$
$\omega = \Omega T, f = F / F_s$	$-\pi \leq \omega \leq \pi$
$\Omega = \omega / T, F = f \cdot F_s$	$-\frac{1}{2} \leq f \leq \frac{1}{2}$
$-\infty < \Omega < \infty$	$-\frac{\pi}{T} < \Omega < \frac{\pi}{T}$
$-\infty < F < \infty$	$-\frac{F_s}{2} < \Omega < \frac{F_s}{2}$

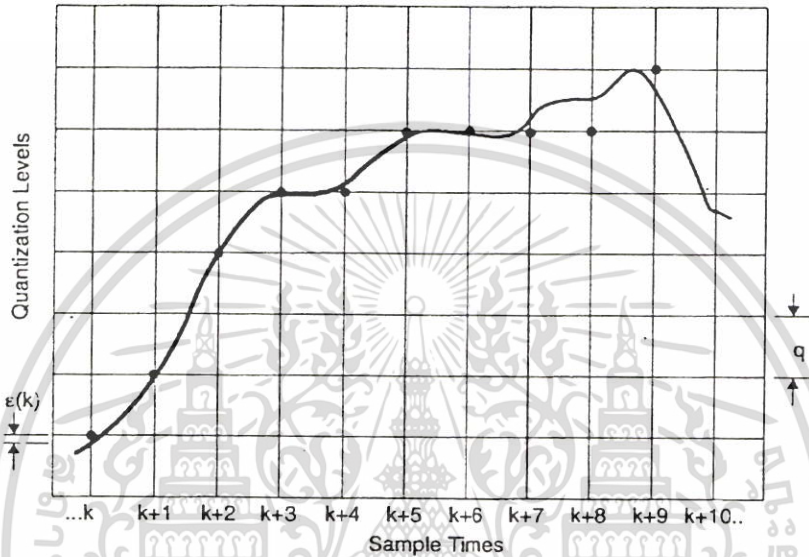
จากสมการที่ 2.56 เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง ซึ่งได้จากการสุ่ม ในสมการที่ 2.55 ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการแสดงสัญญาณรูปไซน์ที่ต่อเนื่องจำนวนไม่จำกัดภายหลังกการสุ่มด้วยสัญญาณไม่ต่อเนื่อง ถ้าให้สัญญาณที่มีลำดับสองนัย  $x(n)$  กับสัญญาณที่ต่อเนื่อง  $x_c(t)$  สามารถเขียนเป็นสมการของความถี่แยกออกได้เป็น  $F_k = F_0 + kF_s, -\infty < k < \infty$  จากความถี่  $F_0$  ภายหลังกการสุ่มและอะไลซึ่งของ  $F_0$  ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่อเนื่องและความถี่ไม่ต่อเนื่องแสดงดังตารางที่ 2.1

## 2.8 ความคลาดเคลื่อนของการประมวลผล[6,23,30]

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อรับสัญญาณมาจากอินพุต จะมีผลกับเอาต์พุตอย่างมากอันเนื่องมาจากความแปรปรวนร่วม (Covariance) ของเอาต์พุต สัญญาณที่มาจากภายนอกจะถูกส่งต่อเข้าไปอินพุตของตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล (A/D Converter) ซึ่งผลของการคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากจำนวนบิตของตัวแปลงสัญญาณแบบอนาลอกเป็นดิจิทัล ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital signal Processing, DSP) และสัญญาณที่ส่งออกไปที่เอาต์พุตของ ตัวแปลงจำนวนบิตของตัวแปลงสัญญาณแบบดิจิทัลเป็นอนาลอก (D/A Converter) ในส่วนของตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเมื่อมีการประมวลผลสัญญาณทางคณิตศาสตร์ เป็นลักษณะในรูปเมตริกซ์หรือเป็นการกระทำซ้ำๆของการคูณหรือการหาร มีผลให้จำนวนบิตเพิ่มขึ้นแต่ในตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลนั้นมีจำนวนบิตที่จำกัด จึงเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ขบวนการที่เปลี่ยนแอมพลิจูดของสัญญาณต่อเนื่องแบบไม่ต่อเนื่องกับเวลา เป็น สัญญาณดิจิทัลเรียกว่า ควอไตเซชัน (Quantization) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการแปลงสัญญาณนี้เรียกว่าความคลาดเคลื่อนควอไตเซชัน

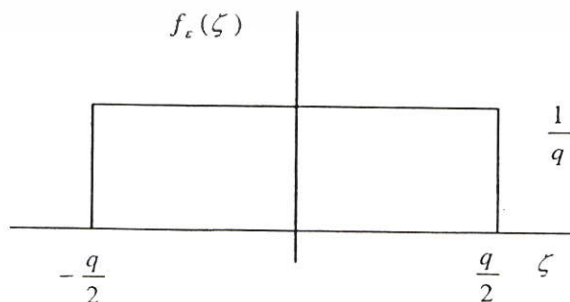
(Quantization error) หรือ การรบกวนควอไตเซชัน (Quantization noise) ความคลาดเคลื่อนไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควอไตรเซชันเป็นความแตกต่างระหว่างค่าควอไตรเซชันกับค่าการสุ่มความคลาดเคลื่อนควอไตรเซชันที่พิจารณาได้เป็น 2 แบบคือ 1. ความคลาดเคลื่อนราวด์ควอไตรเซชัน (Rounded Quantization error,  $q$ ) เป็นความแตกต่างระหว่างค่าจริงของควอไตรเซชันกับค่าไถ่ระดับจริง 2. ความคลาดเคลื่อนทรันเคท-ควอไตรเซชัน(Truncate Quantization error,  $\varepsilon$ ) คือค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงควอไตรเซชันกับค่าระดับต่ำสุดดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ความคลาดเคลื่อนของราวด์ควอไตรเซชันและทรันเคท-ควอไตรเซชัน

เนื่องจากความแตกต่างของระดับควอไตรเซชันเป็น  $q$  ความคลาดเคลื่อน  $\varepsilon$  ระหว่างสัญญาณที่ต่อเนื่องกับระดับควอไตรเซชัน มากที่สุดเป็น  $\pm q/2$  การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณมากกว่า  $q$  จากลำดับปัจจุบันถึงลำดับถัดไป โดยความคลาดเคลื่อน  $\varepsilon$  ขณะการสุ่มแต่ละตัวจะเป็นอิสระกันทางด้านสถิติ และมีความน่าจะเป็นอยู่ระหว่าง  $\pm q/2$  ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการคลาดเคลื่อนแสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน

จากภาพที่ 2.5 หาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน ( $\mu_\varepsilon$ ) ที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ 2.60

$$\begin{aligned}\mu_\varepsilon &= E\{\varepsilon\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \zeta f_\varepsilon(\zeta) d\zeta \\ &= \int_{q/2}^{q/2} \zeta \frac{1}{q} d\zeta \\ &= \frac{1}{q} \zeta^2 \Big|_{-q/2}^{q/2} = 0\end{aligned}\tag{2.60}$$

และความแปรปรวน ( $\sigma_\varepsilon^2$ ) ของการคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.61

$$\begin{aligned}\sigma_\varepsilon^2 &= E\{(\varepsilon - \mu_\varepsilon)^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} (\zeta - 0)^2 f_\varepsilon(\zeta) d\zeta = \int_{-q/2}^{q/2} (\zeta)^2 \frac{1}{q} d\zeta \\ &= \frac{1}{q} \left[ \frac{\zeta^3}{3} \right]_{-q/2}^{q/2} = \frac{1}{q} \left[ \frac{1}{3} (q/2)^3 - \frac{1}{3} (-q/2)^3 \right] \\ &= \frac{1}{3q} \left[ \frac{q^3}{8} + \frac{q^3}{8} \right] = \frac{q^2}{12}\end{aligned}\tag{2.61}$$

## 2.9 การแปลง Z[6,18,19,27,28]

### 2.9.1 นิยามของการแปลง Z

การแปลงแซด (Z Transform) ของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องสามารถนิยามอยู่ในรูปของอนุกรมอนันต์ (Power Series) ได้ดังสมการที่ 2.62 เรียกสมการที่ 2.62 นี้ว่า การแปลงแซดแบบตรง (Direct Z-Transform)

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}\tag{2.62}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $z$  เป็นตัวแปรเชิงซ้อน (Complex Variable)

$x(n)$  เป็นลำดับสัญญาณ (Sequence Signal)

แต่สำหรับ Causal System การแปลงแซดของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.63 เรียกสมการที่ 2.63 นี้ว่า One-Side Z-transform

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n)z^{-n} \quad (2.63)$$

การแปลงแซดของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง สามารถเขียนแทนได้อีกรูปแบบหนึ่งดังสมการที่ 2.64

$$X(z) = z\{x(n)\} \quad (2.64)$$

จากสมการที่ 2.62 และ 2.63 จะเห็นได้ว่าผลการแปลงแซด ก็คืออนุกรมอนันต์ ดังนั้นจะมีค่า  $z$  ที่ทำให้  $X(z)$  หาคำตอบได้เรียกค่า  $z$  นี้ว่า Region of Convergence (ROC) โดยค่า  $z$  นี้จะมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังเช่นการหา Z Transform ของสัญญาณ  $x(n) = \sin(n\omega T)u(n)$

จากสมการ  $\sin(x) = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j}$  และ  $\cos(x) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2}$

จากสมการที่ 2.62 จะได้  $X(z)$  ดังสมการที่ 2.65

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{e^{jn\omega T} - e^{-jn\omega T}}{2j} \right) z^{-n} \quad (2.65)$$

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left( \sum_{n=0}^{\infty} e^{jn\omega T} z^{-n} - \sum_{n=0}^{\infty} e^{-jn\omega T} z^{-n} \right)$$

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left( \sum_{n=0}^{\infty} (e^{j\omega T} z^{-1})^n - \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-j\omega T} z^{-1})^n \right) \quad (2.66)$$

จากสมการของอนุกรมอนันต์ที่ 2.67 ทำให้จัดสมการที่ 2.66 ได้ใหม่ดังสมการที่ 2.68

$$1 + A + A^2 + A^3 + A^4 + A^5 + \dots = \frac{1}{1-A} \quad |A| < 1 \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left[ \left( \frac{1}{1 - e^{j\omega T} z^{-1}} \right) - \left( \frac{1}{1 - e^{-j\omega T} z^{-1}} \right) \right] \quad (2.68)$$

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left[ \left( \frac{z}{z - e^{j\omega T}} \right) - \left( \frac{z}{z - e^{-j\omega T}} \right) \right]$$

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left[ \frac{(z^2 - ze^{-j\omega T})}{(z - e^{j\omega T})} - \frac{(z^2 - ze^{j\omega T})}{(z - e^{-j\omega T})} \right] \quad (2.69)$$

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left[ \frac{(ze^{j\omega T} - ze^{-j\omega T})}{(z - e^{j\omega T})(z - e^{-j\omega T})} \right]$$

$$X(z) = \frac{z}{2j} \left[ \frac{e^{j\omega T} - e^{-j\omega T}}{z^2 - ze^{j\omega T} - ze^{-j\omega T} + e^{j\omega T} e^{-j\omega T}} \right]$$

$$X(z) = \frac{z}{2j} \left[ \frac{e^{j\omega T} - e^{-j\omega T}}{z^2 - z(e^{j\omega T} + e^{-j\omega T}) + 1} \right]$$

$$X(z) = \frac{z \sin(\omega T)}{z^2 - 2z \cos(\omega T) + 1} \quad (2.70)$$

Z-Transform ของฟังก์ชันสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 Z Transform ของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง

SOME COMMON z-TRANSFORM PAIRS		
Sequence	Transform	ROC
1. $\delta[n]$	1	All $z$
2. $u[n]$	$\frac{1}{1-z^{-1}}$	$ z  > 1$
3. $-u[-n-1]$	$\frac{1}{1-z^{-1}}$	$ z  < 1$
4. $\delta[n-m]$	$z^{-m}$	All $z$ except 0 (if $m > 0$ ) or $\infty$ (if $m < 0$ )
5. $a^n u[n]$	$\frac{1}{1-az^{-1}}$	$ z  >  a $
6. $-a^n u[-n-1]$	$\frac{1}{1-az^{-1}}$	$ z  <  a $
7. $na^n u[n]$	$\frac{az^{-1}}{(1-az^{-1})^2}$	$ z  >  a $
8. $-na^n u[-n-1]$	$\frac{-az^{-1}}{(1-az^{-1})^2}$	$ z  <  a $
9. $[\cos \omega_0 n] u[n]$	$\frac{1 - [\cos \omega_0] z^{-1}}{1 - [2 \cos \omega_0] z^{-1} + z^{-2}}$	$ z  > 1$
10. $[\sin \omega_0 n] u[n]$	$\frac{[\sin \omega_0] z^{-1}}{1 - [2 \cos \omega_0] z^{-1} + z^{-2}}$	$ z  > 1$
11. $[r^n \cos \omega_0 n] u[n]$	$\frac{1 - [r \cos \omega_0] z^{-1}}{1 - [2r \cos \omega_0] z^{-1} + r^2 z^{-2}}$	$ z  > r$
12. $[r^n \sin \omega_0 n] u[n]$	$\frac{[r \sin \omega_0] z^{-1}}{1 - [2r \cos \omega_0] z^{-1} + r^2 z^{-2}}$	$ z  > r$
13. $\begin{cases} a^n, & 0 \leq n \leq N-1, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	$\frac{1 - a^N z^{-N}}{1 - az^{-1}}$	$ z  > 0$

## 2.10 คุณสมบัติของการแปลง Z [6,27,28]

### 2.10.1 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น (Linearity Property)

แสดงได้ดังสมการที่ 2.71

$$Z[ax_1(n) + bx_2(n)] = aX_1(z) + bX_2(z) \quad (2.71)$$

### 2.10.2 คุณสมบัติการเลื่อน (Shift Property)

กำหนดให้  $y(n) = x(n-m)$        $m \geq 0$

Z Transform ของ  $y(n) = Y(z)$  เขียนแทนได้ดังสมการที่ 2.72 และ 2.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n)z^{-n} \quad (2.72)$$

$$Y(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n-m)z^{-n} \quad (2.73)$$

กำหนดให้ระบบที่กำลังพิจารณาเป็นระบบแบบ Causal ดังนั้นสมการที่ 2.72 สามารถเขียนได้ใหม่ ดังสมการที่ 2.74 และ 2.75

$$Y(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n-m)z^{-n} \quad (2.74)$$

$$Y(z) = x(-m) + x(1-m)z^{-1} + x(2-m)z^{-2} + \dots + x(0)z^{-m} + x(1)z^{-(m+1)} + \dots$$

$$Y(z) = x(0)z^{-m} + x(1)z^{-(m+1)} + x(2)z^{-(m+2)} + \dots + x(n)z^{-(m+n)} \quad (2.75)$$

จัดสมการที่ 2.75 ใหม่โดยดึงตัวร่วม  $z^{-m}$  ออกจะได้

$$Y(z) = z^{-m} [x(0) + x(1)z^{-1} + x(2)z^{-2} + \dots + x(n)z^{-n}] \quad (2.76)$$

$$Y(z) = z^{-m} \sum_{n=0}^{\infty} x(n)z^{-n}$$

$$Y(z) = z^{-m} X(z) \quad (2.77)$$

### 2.10.3 คุณสมบัติการผสมผสาน (Convolution Property)

จากสมการ Convolution

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k)$$

$$y(n) = h(n) \otimes x(n)$$

ทำการแปลงแซด  $x(n), h(n)$  ให้เป็น  $X(z), H(z)$  จะได้การ Convolution ดังสมการที่ 2.78  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y(z) = H(z)X(z) \quad (2.78)$$

## 2.11 การแปลง Z ในรูปเศษส่วน[6,18,19,27,28]

สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง  $x(n)$  หรือระบบแบบไม่ต่อเนื่อง  $y(n)$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูป  $X(z)$  หรือ  $Y(z)$  ได้โดยการแปลงแซด ค่า  $X(z)$  หรือ  $Y(z)$  นี้เมื่อจัดให้อยู่ในรูปเศษส่วน (Rational) สามารถบอกรายละเอียดคุณลักษณะของสัญญาณและระบบได้

### 2.11.1 โพลและซีโร่ (Pole and Zero)

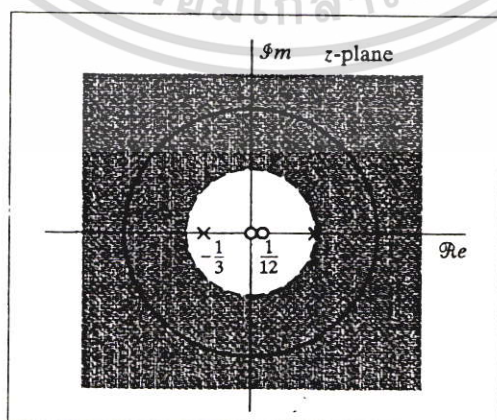
เป็นการนำค่า  $X(z)$  หรือ  $Y(z)$  ไปแก้สมการหาค่า  $z$  และนำคำตอบของ  $z$  ไป Plot ลง ในระนาบ  $z$  เชิงซ้อน (Complex  $z$  plane) ค่า  $z$  ที่เป็นคำตอบของเศษเรียกว่า zero แทนด้วย สัญลักษณ์  $\circ$  ค่า  $z$  ที่เป็นคำตอบของส่วนเรียกว่า Pole แทนด้วยสัญลักษณ์  $\times$

เช่นการเขียน Pole-Zero ของระบบ  $H(z) = \frac{12 - z^{-1}}{6 - z^{-1} - z^{-2}}$

จากสมการ  $H(z)$  กำหนดสามารถจัดสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.80

$$H(z) = \frac{2z(z - \frac{1}{12})}{(z - \frac{1}{2})(z + \frac{1}{3})} \quad (2.80)$$

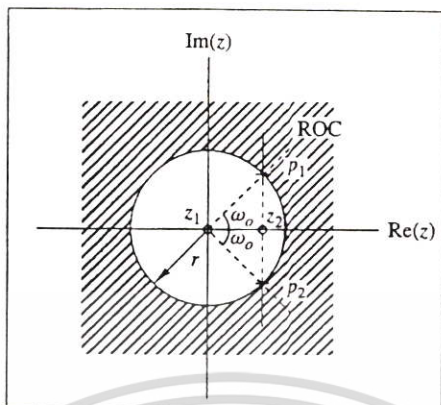
จากสมการที่ 2.80 พบว่า Zero จะอยู่ที่ตำแหน่ง 0 และ  $\frac{1}{12}$  ส่วน Pole นั้นจะอยู่ที่ตำแหน่ง  $\frac{1}{2}$  และ  $-\frac{1}{3}$  นำไปเขียนลงระนาบ  $z$  ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 Pole – Zero Plot ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นการหาสัญญาณ  $x(n]$  จากระนาบ  $z$  ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ตำแหน่งการวาง Zero และ Pole

จากภาพที่ 2.7 พบว่ามี Zero อยู่ 2 ตัว โดย  $Z_1$  อยู่ที่จุด Origin หรืออยู่ที่ตำแหน่ง 0 ส่วน  $Z_2$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $r \cos(\omega_0)$  เขียนได้ดังสมการที่ 2.81 และ 2.82

$$Z_1 = 0 \quad (2.81)$$

$$Z_2 = r \cos(\omega_0) \quad (2.82)$$

สำหรับ Pole จากภาพที่ 2.7 มีอยู่ 2 ตัวโดย  $P_1$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $re^{j\omega_0}$  ส่วน  $P_2$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $re^{-j\omega_0}$  เขียนได้ดังสมการที่ 2.83 และสมการที่ 2.84

$$P_1 = re^{j\omega_0} \quad (2.83)$$

$$P_2 = re^{-j\omega_0} \quad (2.84)$$

จากสมการที่ 2.83 – 2.84 นำไปเขียนเป็น  $X(z)$  ได้ดังสมการที่ 2.85 และ 2.86

$$X(z) = G \frac{(z - Z_1)(z - Z_2)}{(z - P_1)(z - P_2)} \quad (2.85)$$

$$X(z) = G \frac{(z - 0)(z - r \cos(\omega_0))}{(z - re^{j\omega_0})(z - re^{-j\omega_0})} \quad (2.86)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $G$  เป็นค่าคงที่ จัดสมการที่ 2.87 ได้ใหม่ดังสมการที่ 2.88

$$X(z) = G \left[ \frac{z(z - r \cos(\omega_0))}{(z - re^{j\omega_0})(z - re^{-j\omega_0})} \right]$$

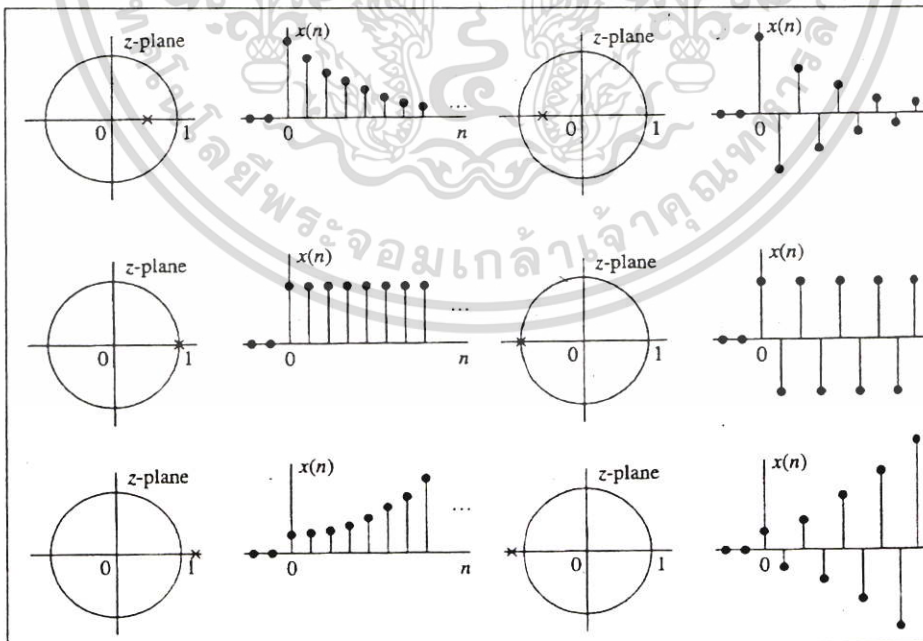
$$X(z) = G \left[ \frac{1 - rz^{-1} \cos(\omega_0)}{1 - 2rz^{-1} \cos(\omega_0) + r^2 z^{-2}} \right] \tag{2.87}$$

และจากตารางที่ 2.2 Z-Transform ของสมการที่ 2.87สามารถแปลงเป็น  $x(n)$  ได้ดังสมการที่ 2.88

$$x(n) = G[r^n \cos(\omega_0 n)u(n)] \tag{2.88}$$

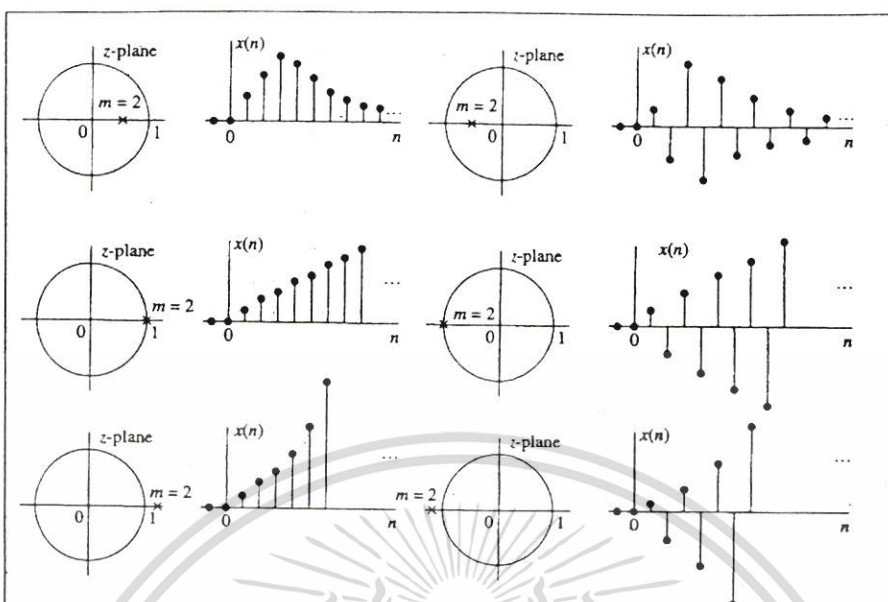
### 2.11.2 ลักษณะสัญญาณกับการวางตำแหน่งของ Pole

ตำแหน่งของ Pole ในระนาบ  $z$  สามารถบ่งบอกลักษณะของลำดับสัญญาณได้ซึ่งลักษณะของลำดับสัญญาณที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากการทำ Inverse Z-Transform สามารถเขียนได้ดังภาพที่ 2.8

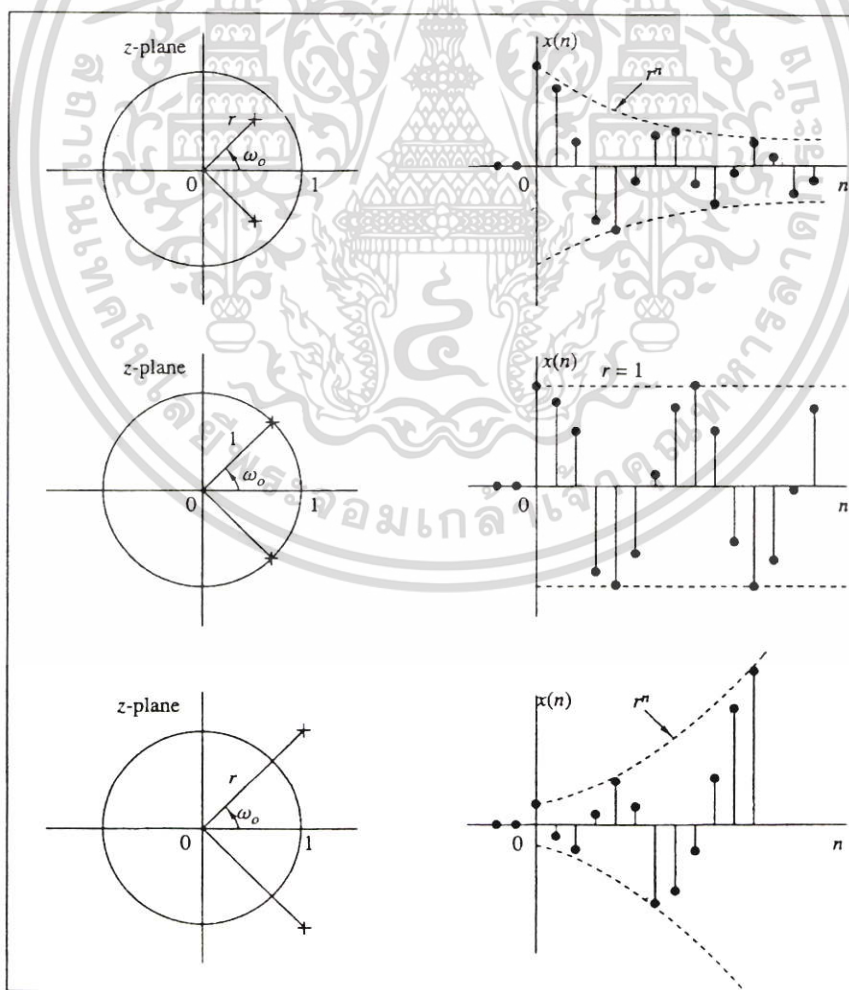


ภาพที่ 2.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Pole กับลำดับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

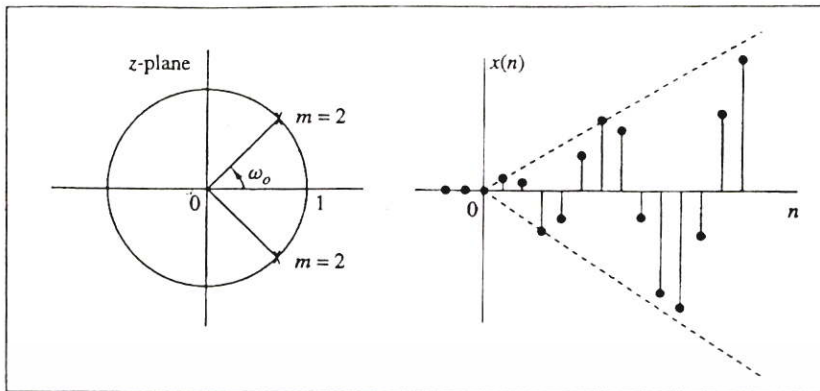


ภาพที่ 2.8 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Pole กับลำดับสัญญาณ



ภาพที่ 2.8 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Pole กับลำดับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Pole กับลำดับสัญญาณ

## 2.12 ฟังก์ชันของระบบที่แปรตามเวลา[6]

ในการหาผลตอบสนองทาง Output สามารถกระทำโดยใช้หลักการ Convolution ซึ่งการหาจะต้องทราบค่าของ  $x(n)$  และ  $h(n)$  แต่จากคุณสมบัติของ Z-Transform ทำให้การหาผลตอบสนองทาง Output หาได้จากสมการที่ 2.89

$$Y(z) = H(z)X(z) \quad (2.89)$$

เมื่อ  $Y(z)$  คือ z-transform ของ Output sequence  $y(n)$

$X(z)$  คือ z-transform ของ Input sequence  $x(n)$

$H(z)$  คือ z-transform ของ Unit sample response  $h(n)$

ดังนั้นถ้ารู้ค่า  $x(n)$  และ  $h(n)$  ก็สามารถหาค่า  $X(z)$  และ  $H(z)$  ได้โดยการแปลง  $z$  และเมื่อนำมาคูณกันดังสมการที่ 2.106 ก็จะได้  $Y(z)$  และสามารถหาค่า  $y(n)$  ได้โดยการแปลง  $z$  ผกผัน  $Y(z)$  และในทางกลับกันถ้ารู้ค่า  $x(n)$  และ  $y(n)$  ก็สามารถหาค่า  $H(z)$  ได้ดังสมการที่ 2.90

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (2.90)$$

เพื่อความชัดเจนจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของระบบนั้นอธิบายได้ 2 ลักษณะคือ  $h(n)$  และ  $H(z)$  โดย  $h(n)$  นั้นจะอธิบายถึงคุณสมบัติของระบบใน time-domain ส่วน  $H(z)$  จะอธิบายถึงคุณสมบัติใน z-domain ซึ่งแท้ที่จริงแล้ว  $H(z)$  และ  $h(n)$  นั้นเหมือนกันเพียงแต่อยู่กันคนละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

domain และโดยทั่วไปจะเรียก  $H(z)$  ในสมการที่ 2.90 ว่า ฟังก์ชันระบบ (System function) หรือ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

สำหรับระบบที่เป็นแบบ Linear constant-coefficient difference equation ดังสมการที่ 2.108 สามารถใช้คุณสมบัติของ z-transform เขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  ได้ดังสมการที่ 2.91 หรือฟังก์ชันแบบนี้เรียกว่า Autoregressive Moving Average หรือ ARMA

$$y(n) = -\sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad (2.91)$$

$$Y(z) = -\sum_{k=1}^N a_k Y(z)z^{-k} + \sum_{k=0}^M b_k X(z)z^{-k}$$

$$Y(z) \left( 1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k} \right) = X(z) \left( \sum_{k=0}^M b_k z^{-k} \right)$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}}$$

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad (2.92)$$

และระบบที่เป็นแบบ Non-recursive ดังสมการที่ 2.110 สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน ได้ดังสมการที่ 2.93 หรือบางครั้งเรียกฟังก์ชันนี้ว่า Moving Average หรือ MV

$$y(n) = \sum_{k=0}^M h(k)x(n-k) \quad (2.93)$$

$$Y(z) = \sum_{k=0}^M h(k)X(z)z^{-k}$$

$$Y(z) = X(z) \left( \sum_{k=0}^M h(k)z^{-k} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.13 ผลตอบสนองความถี่ของระบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา [5,6]

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  ดังสมการที่ 2.100

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots} \quad (2.100)$$

ในการหาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบแบบไม่ต่อเนื่องนั้นจะแทน  $z = e^{j\omega}$  ลงใน  $H(z)$  ดังสมการที่ 2.100

$$H(\omega) = \frac{b_0 + b_1 e^{-j\omega} + b_2 e^{-2j\omega} + \dots}{1 + a_1 e^{-j\omega} + a_2 e^{-2j\omega} + \dots} \quad (2.101)$$

$$H(\omega) = H_R(\omega) + H_I(\omega)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ 2.101 จะประกอบด้วยค่าที่เป็นจำนวนจริงและค่าที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งในการหาผลตอบสนองทางความถี่จะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ลักษณะคือ

### 2.13.1 ผลตอบสนองทางขนาด (Magnitude Response)

คำนวณได้โดยการหาค่าสัมบูรณ์ของสมการที่ 2.101 เขียนได้ดังสมการที่ 2.102

$$|H(\omega)| = \sqrt{H_R^2(\omega) + H_I^2(\omega)} \quad (2.102)$$

### 2.13.2 ผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response)

คำนวณได้จากสมการที่ 2.103 ซึ่งผลตอบสนองทางเฟสจะถูกแทนด้วย  $\Theta(\omega)$  หรือ  $\angle H(\omega)$

$$\Theta(\omega) = \angle H(\omega) = \tan^{-1} \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \quad (2.103)$$

เช่นการหาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบไม่ต่อเนื่องดังสมการที่ 2.104

$$H(z) = \frac{1+z}{z} \quad (2.104)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.13 ผลตอบสนองความถี่ของระบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา [5,6]

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  ดังสมการที่ 2.100

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots} \quad (2.100)$$

ในการหาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบแบบไม่ต่อเนื่องนั้นจะแทน  $z = e^{j\omega}$  ลงใน  $H(z)$  ดังสมการที่ 2.100

$$H(\omega) = \frac{b_0 + b_1 e^{-j\omega} + b_2 e^{-2j\omega} + \dots}{1 + a_1 e^{-j\omega} + a_2 e^{-2j\omega} + \dots} \quad (2.101)$$

$$H(\omega) = H_R(\omega) + H_I(\omega)$$

จะเห็นว่าสมการที่ 2.101 จะประกอบด้วยค่าที่เป็นจำนวนจริงและค่าที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนซึ่งในการหาผลตอบสนองทางความถี่จะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ลักษณะคือ

### 2.13.1 ผลตอบสนองทางขนาด (Magnitude Response)

คำนวณได้โดยการหาค่าสัมบูรณ์ของสมการที่ 2.101 เขียนได้ดังสมการที่ 2.102

$$|H(\omega)| = \sqrt{H_R^2(\omega) + H_I^2(\omega)} \quad (2.102)$$

### 2.13.2 ผลตอบสนองทางเฟส (Phase Response)

คำนวณได้จากสมการที่ 2.103 ซึ่งผลตอบสนองทางเฟสจะถูกแทนด้วย  $\Theta(\omega)$  หรือ  $\angle H(\omega)$

$$\Theta(\omega) = \angle H(\omega) = \tan^{-1} \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \quad (2.103)$$

เช่นการหาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบไม่ต่อเนื่องดังสมการที่ 2.104

$$H(z) = \frac{1+z}{z} \quad (2.104)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้  $z = e^{j\omega}$

$$H(\omega) = \frac{1+e^{j\omega}}{e^{j\omega}} = \frac{1}{e^{j\omega}} + 1$$

$$H(\omega) = 1 + e^{-j\omega} \quad (2.105)$$

และจากสมการ  $re^{j\omega} = r\cos(\omega) + jr\sin(\omega)$  ดังนั้นสมการที่ 2.105 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.106

$$H(\omega) = 1 + [\cos(-\omega) + j\sin(-\omega)]$$

$$H(\omega) = 1 + \cos(\omega) - j\sin(\omega) \quad (2.106)$$

จากสมการที่ 2.106 จะพบว่าส่วนที่เป็นจำนวนจริงคือ  $H_R(\omega) = 1 + \cos(\omega)$  และส่วนที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนคือ  $-\sin(\omega)$  ดังนั้นผลตอบสนองทางขนาดจะมีค่าดังสมการที่ 2.107

$$|H(\omega)| = \sqrt{[1 + \cos(\omega)]^2 + [-\sin(\omega)]^2}$$

$$|H(\omega)| = \sqrt{1 + 2\cos(\omega) + \cos^2(\omega) + \sin^2(\omega)}$$

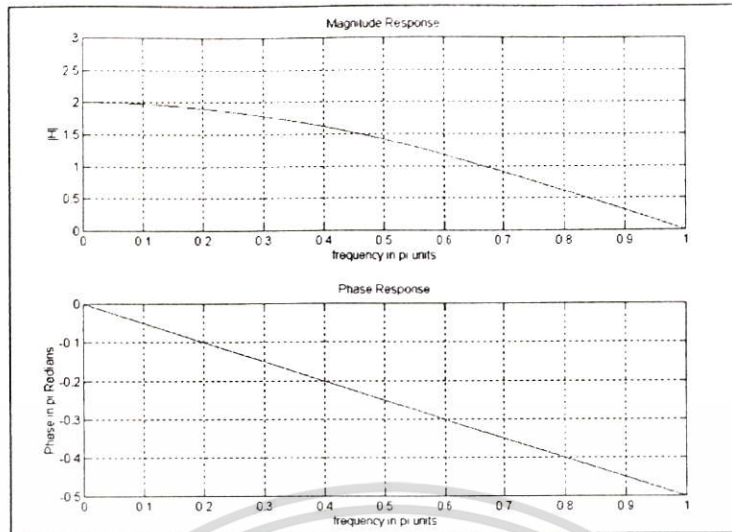
$$|H(\omega)| = \sqrt{2 + 2\cos(\omega)} \quad (2.107)$$

และผลตอบสนองทางเฟสเขียนได้จากสมการที่ 2.103 โดยนำค่าจำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อนจากสมการที่ 2.106 แสดงได้ดังสมการที่ 2.108

$$\Theta(\omega) = \angle H(\omega) = \tan^{-1} \frac{-\sin(\omega)}{1 + \cos(\omega)} \quad (2.108)$$

และจากสมการที่ 2.108 และ 2.109 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า  $\omega$  ในช่วง  $0 - \pi$  ทำให้เขียนกราฟผลตอบสนองความถี่ได้ดังภาพที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 ผลตอบสนองความถี่ของระบบ  $H(z) = \frac{z+1}{z}$

เช่นการหาผลตอบสนองความถี่จากสมการผลต่าง

$$y(n) = 0.9y(n-1) + x(n) \quad (2.109)$$

สมการที่ 2.109 สามารถแปลงให้เป็น  $H(z)$  ได้ดังสมการที่ 2.110

$$Y(z) = 0.9Y(z)z^{-1} + X(z)$$

$$Y(z) - 0.9Y(z)z^{-1} = X(z)$$

$$Y(z)[1 - 0.9z^{-1}] = X(z)$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 - 0.9z^{-1}} \quad (2.110)$$

แทนค่า  $z = e^{j\omega}$  ลงในสมการที่ 2.110

$$H(\omega) = \frac{1}{1 - 0.9e^{-j\omega}}$$

พิจารณาเฉพาะส่วน

$$1 - 0.9e^{-j\omega} = (1 - 0.9\cos\omega) + j0.9\sin\omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าสัมบูรณ์ดังสมการที่ 2.111 และมีมุมดังสมการที่ 2.112

$$|1 - 0.9e^{-j\omega}| = \sqrt{(1 - 0.9\cos\omega)^2 + (0.9\sin\omega)^2}$$

$$|1 - 0.9e^{-j\omega}| = \sqrt{1.81 - 1.8\cos\omega} \quad (2.111)$$

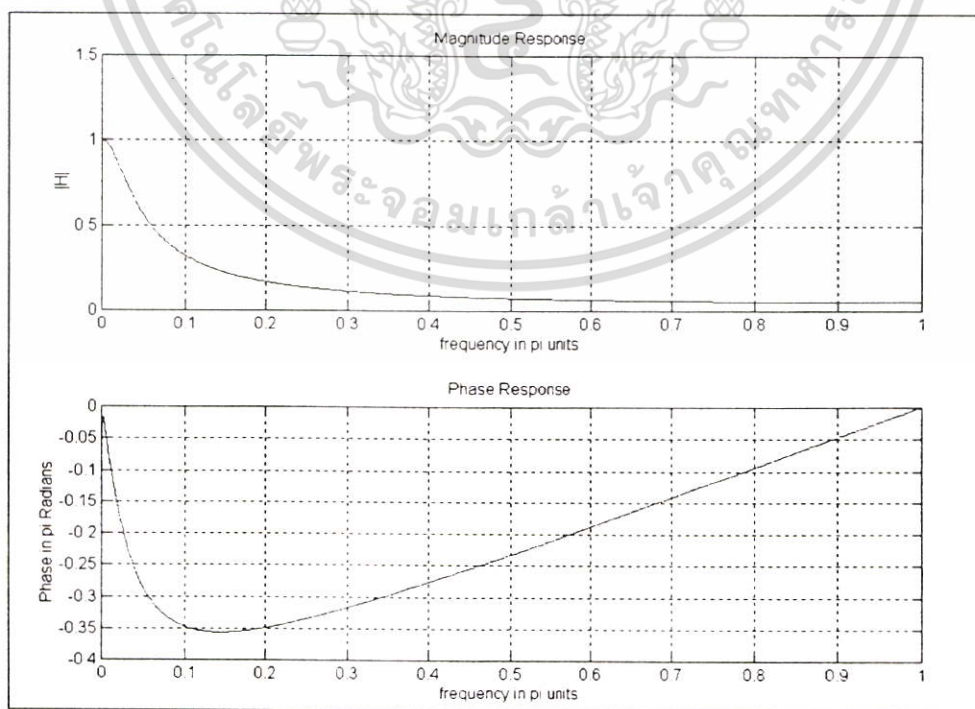
$$\angle(1 - 0.9e^{-j\omega}) = \tan^{-1} \frac{0.9\sin\omega}{1 - 0.9\cos\omega} \quad (2.112)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.109 จะมีค่า Magnitude Response ดังสมการที่ 2.113 และมี Phase Response ดังสมการที่ 2.114

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1.81 - 1.8\cos\omega}} \quad (2.113)$$

$$\Theta(\omega) = -\tan^{-1} \frac{0.9\sin\omega}{1.81 - 1.8\cos\omega} \quad (2.114)$$

นำไปเขียนเป็นกราฟผลตอบแทนของความถี่ได้ดังภาพที่ 2.10



**ภาพที่ 2.10** ผลตอบสนองความถี่ของระบบ  $y(n) = 0.9y(n-1) + x(n)$   
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ตัวกรองดิจิทัล

ลักษณะของตัวกรองแบบดิจิทัลแบ่งตามชนิดของการฟิลเตอร์ตามลักษณะของสมการเป็น 2 แบบ 1. นอนรีเคอร์ซีฟ การฟิลเตอร์แบบนี้ได้แก่ เอฟไออาร์ (FIR) 2. รีเคอร์ซีฟ ลักษณะการฟิลเตอร์แบบนี้ได้แก่ ไอไออาร์ (IIR) และคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter)

#### 3.1. ตัวกรองดิจิทัลแบบเอฟไออาร์ (Finite Impulse Response (FIR) Filter)

[6,18,20,27,28]

การจัดรูปแบบของการกรองแบบดิจิทัลตามสมการผลต่าง สามารถเขียนอยู่ในรูปผลคูณของสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องกับค่าหน่วยเวลา  $Z^{-1}$  และสมการนั้นเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการที่ 3.1

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^N b_k Z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^M a_k Z^{-k}} \quad (3.1)$$

ถ้าเป็นการกรองแบบตัวกรองนอนรีเคอร์ซีฟ (Non recursive) แล้วค่า สัมประสิทธิ์  $a_k$  จะมีค่าเป็นศูนย์ หรือเรียกการกรองแบบนี้ว่า เอฟไออาร์ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ 3.1 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.2 หรือสมการที่ 3.3

$$H(z) = b_0 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_N Z^{-N} \quad (3.2)$$

$$H(z) = \sum_{k=0}^{n-1} h(k) Z^{-k} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 2 สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันเอาต์พุตได้ดังสมการที่ 4

$$Y(z) = [b_0 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_N Z^{-N}] X(z) \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.2 นำไปจัดเทอมต่าง ๆ ใหม่และเขียนอยู่ในรูปสมการผลต่าง (Difference Equation) ได้ดังสมการที่ 3.5

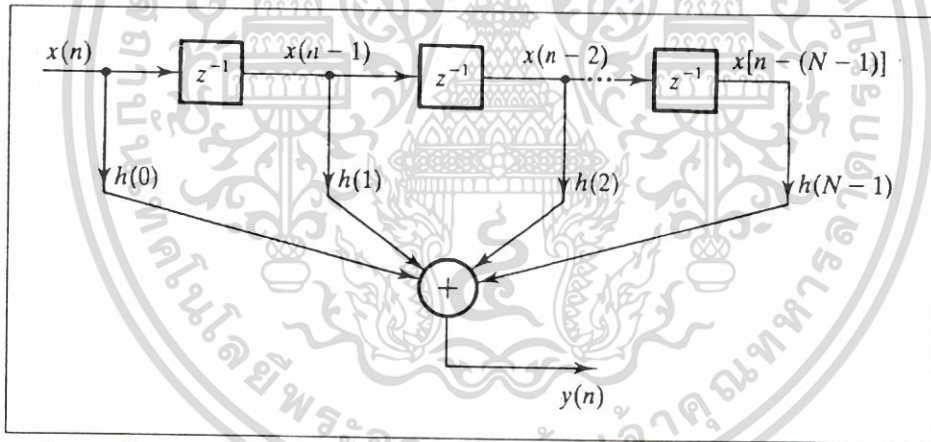
$$Y(n) = \sum_{k=0}^N b_k X(n-k) \quad (3.5)$$

หรือจากฟังก์ชันถ่ายโอนจะได้

$$H(z) = \sum_{k=0}^{n-1} h(k)Z^{-k}$$

$$Y(z) = h(0)x(z) + h(1)x(z)Z^{-1} + h(2)x(z)Z^{-2} + \dots + h(k)x(z)Z^{-k} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 สามารถนำมาเขียนเป็นโครงสร้างได้ดังภาพที่ 1 ซึ่งโครงสร้างในภาพที่ 1 เป็นโครงสร้างแบบตรง



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างแบบตรง

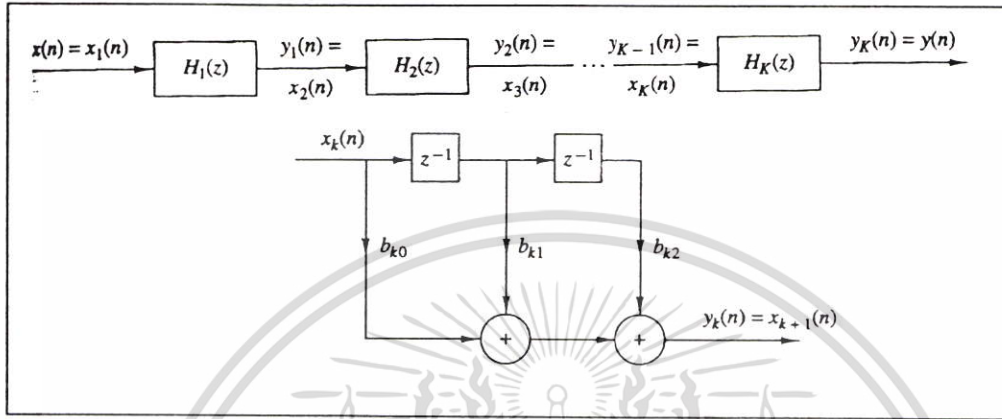
หรือจากสมการที่ 3 เขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่ 3.7

$$H(z) = b_{k0} + b_{k1}Z^{-1} + b_{k2}Z^{-2} \quad (3.7)$$

$$k = 1, 2, \dots, K$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $K$  เป็นจำนวนเต็มของ  $(M+1)/2$  และ สัมประสิทธิ์  $b_0$  ถูกกระจายจำนวน  $K$  ส่วน โดยที่สัมประสิทธิ์  $b_0 = b_{10}b_{20}...b_{K0}$  ซึ่งจากสมการที่ 7 สามารถเขียนให้เป็น โครงสร้างแบบคลาสเคด (Cascade-form) ได้ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างแบบคลาสเคด (Cascade form)

### 3.2 ตัวกรองดิจิทัลแบบไอไออาร์ (Infinite Impulse Response (IIR) Filter)[6,18,20,27,28]

จากสมการที่ 3.1 เป็นการกรองแบบตัวกรองรีเคอร์ซีฟ (Recursive) แล้วค่า สัมประสิทธิ์  $a_k$  และสัมประสิทธิ์  $b_k$  จะมีค่า หรือเรียกการกรองแบบนี้ว่า ไอไออาร์ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ 3.8

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1Z^{-1} + \dots + b_N Z^{-N}}{1 + a_1Z^{-1} + \dots + a_M Z^{-M}} \tag{3.8}$$

จากสมการที่ 3.8นำไปจัดเทอมต่างๆใหม่และเขียนอยู่ในรูปสมการผลต่าง (Difference Equation) ได้ดังสมการที่ 3.9

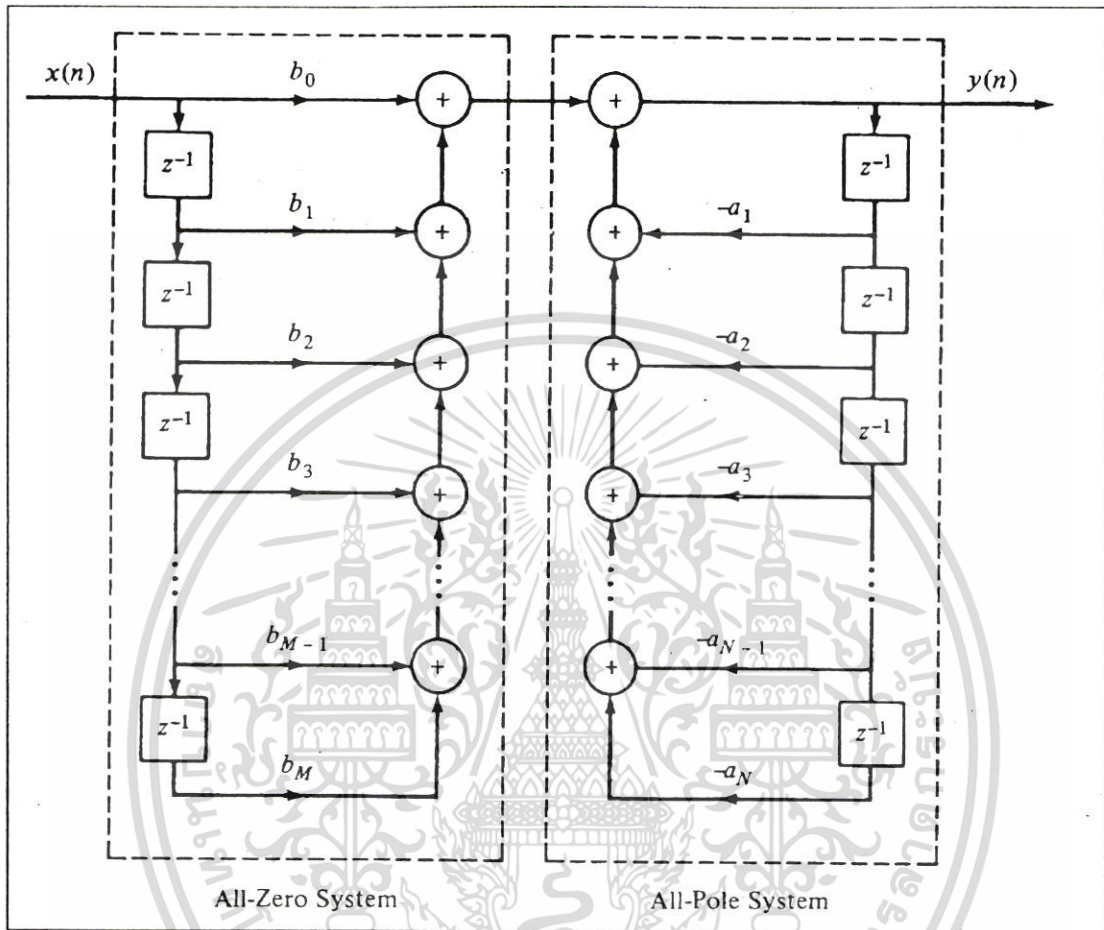
$$Y(z) = \sum_{K=0}^N b_K X(z)Z^{-K} - \sum_{K=1}^M a_K Y(z)Z^{-K}$$

$$Y(z) = b_0 X(z) + b_1 X(z)Z^{-1} + \dots + b_K X(z)Z^{-k} - a_1 Y(z)Z^{-1} - \dots - a_K Y(z)Z^{-k}$$

$$Y(n) = \sum_{k=0}^N b_k X(n-k) - \sum_{k=1}^M a_k Y(n-k) \tag{3.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.9 สามารถนำมาเขียนเป็นโครงสร้างได้ดังภาพที่ 3 ซึ่งโครงสร้างในภาพที่ 3.3 เป็นโครงสร้างแบบตรง I (Direct form I)



ภาพที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของตัวกรองไออาร์แบบตรง I

ถ้า นำ  $\frac{w(z)}{w(z)}$  คูณตลอดในสมการที่ 3.2 จะได้

$$H(z) = \frac{w(z)}{w(z)} \times \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_N Z^{-N}}{1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_M Z^{-M}}$$

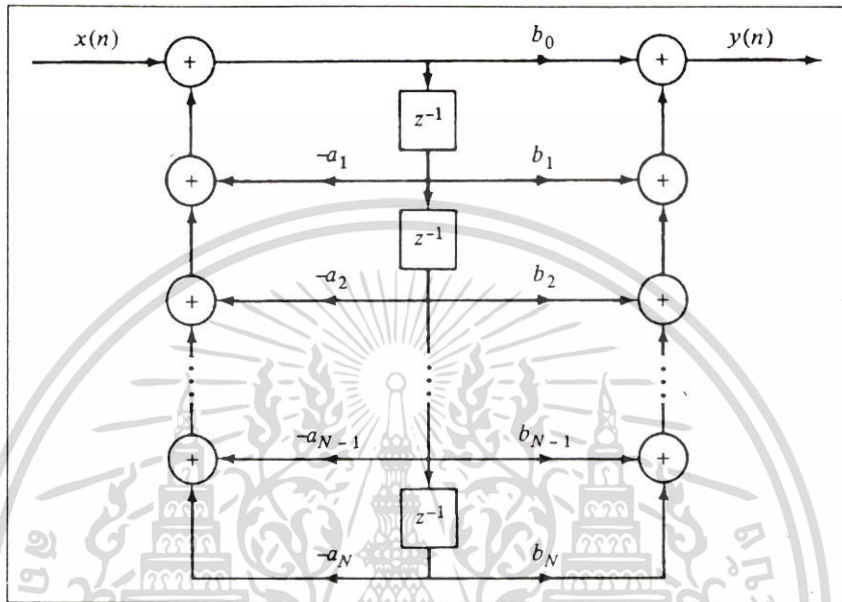
$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{w(z)}{w(z)} \times \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_N Z^{-N}}{1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_M Z^{-M}}$$

$$X(z) = w(z) + a_1 w(z) Z^{-1} + \dots + a_M w(z) Z^{-M}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

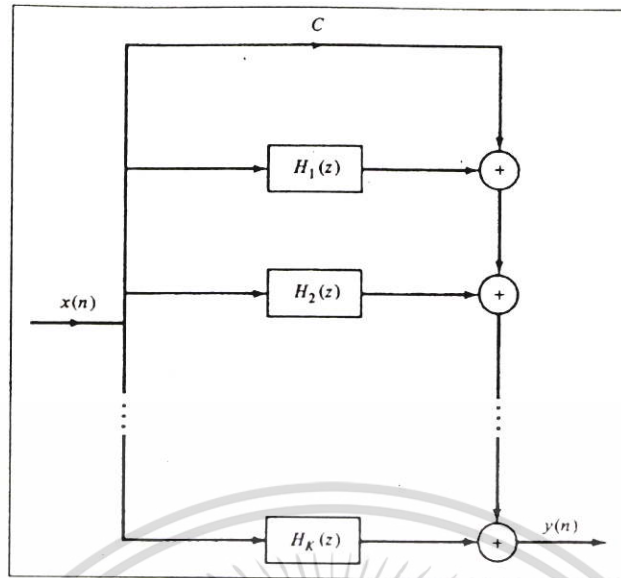
$$Y(z) = b_0w(z) + b_1w(z)Z^{-1} + \dots + b_Nw(z)Z^{-N} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.10 และสมการที่ 3.11 สามารถนำไปเขียนเป็นโครงสร้างได้ดังภาพที่ 3.4 โครงสร้างในภาพที่ 3.4 นี้เรียกว่าแบบตรง II (Direct form II)



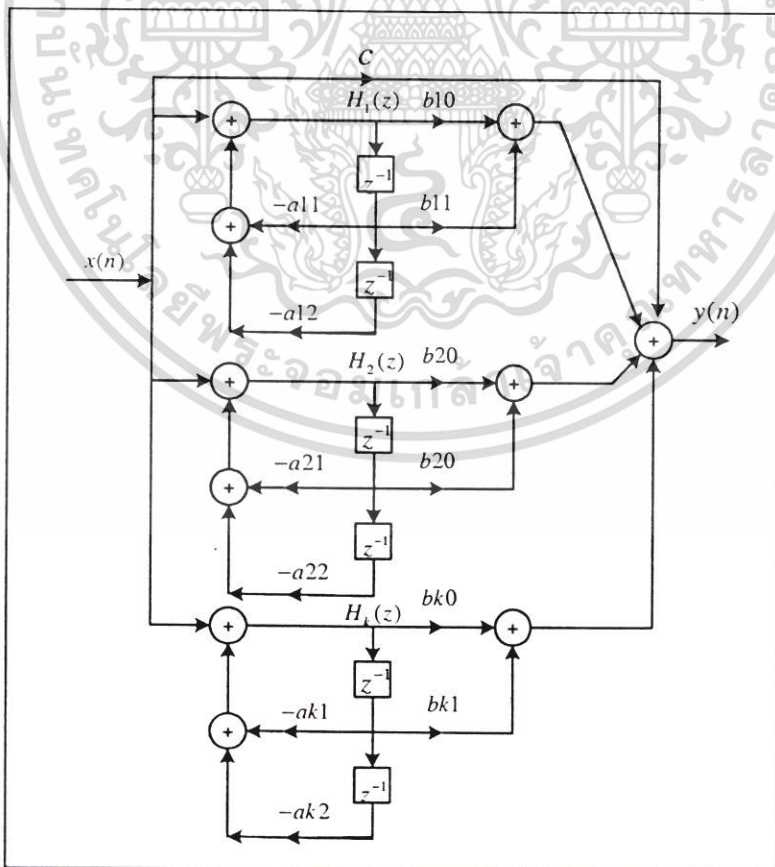
ภาพที่ 3.4 แสดงโครงสร้างตัวกรองไอโออาร์แบบตรง II

แต่เนื่องจากตัวกรองดิจิทัลที่มีโครงสร้างแบบตรง I เมื่อมีจำนวนลำดับเพิ่มขึ้น จะมีค่าย่านไดนามิก (Dynamic range) ของสัมประสิทธิ์มากขึ้นกล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์ในเทอม a จะมีค่ามากและสัมประสิทธิ์ในเทอม b จะมีค่าน้อยทำให้เป็นปัญหาอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใช้ตัวประมวลผลแบบจุดทศนิยมคงที่ (Fixed point) ดังนั้นในการทดลอง จึงได้มีการปรับโครงสร้างของตัวกรองดิจิทัลใหม่โดยจัดให้มีโครงสร้างเป็นแบบขนานดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างตัวกรองดิจิทัลแบบโอไออาร์ที่มีโครงสร้างในแบบขนาน

ในภาพที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าตัวกรองดิจิทัลแบบโอไออาร์ ที่มีโครงสร้างเป็นแบบขนานนี้จะประกอบด้วย  $H_1(z), H_2(z), \dots, H_k(z)$  และภายใน  $H(z)$  แต่ละตัวนี้จะมีโครงสร้างดังภาพที่ 3.6 ในการจัดโครงสร้างของตัวกรองดิจิทัลแบบโอไออาร์ ให้มีโครงสร้างเป็นแบบขนาน



ภาพที่ 3.6 โครงสร้างย่อยของตัวกรองดิจิทัลแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ตัวกรองคาลมานฟิลเตอร์ ( KALMAN FILTER)[10,11,12,13,14,15,16]

ตัวกรองคาลมานที่ใช้กันสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ 1.ตัวกรองคาลมานต่อเนื่อง (Continuous Kalman Filter,CKD) 2.ตัวกรองคาลมานต่อเนื่องเป็นช่วง(Continuous Discrete Kalman filter,CDKF) 3. ตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Kalman,DKF)ในที่นี้จะเริ่มต้นจะพิจารณาการประมาณค่าของปริมาณสเกลล่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาก่อน โดยให้  $x$  เป็นปริมาณสเกลล่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งมีสัญญาณรบกวนที่มีการแจกแจงเกาส์เฉื่อยเป็นศูนย์และมีความแปรปรวนเท่ากันกระทำอยู่ ให้  $n$  เป็นจำนวนครั้งของการวัด ดังนั้นการประมาณค่าที่ดีที่สุดสามารถหาจากค่าเฉลี่ยของ  $x$  และในการวัดแต่ละครั้งเป็น  $\hat{y}_i$  ซึ่งการประมาณค่าที่ดีที่สุดหลังจากวัดจำนวน  $n$  ครั้งเป็น  $\hat{x}_n$  เขียนได้ดังสมการที่ 3.12

$$\hat{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \quad (3.12)$$

จัดรูปสมการที่ 3.12 เป็นสมการที่ 3.13

$$n\hat{x}_n = \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.13 แทนค่า  $n$  ด้วย  $n+1$  ได้ดังสมการที่ 3.14

$$\begin{aligned} (n+1)\hat{x}_{n+1} &= \sum_{i=1}^{n+1} \hat{y}_i \\ &= \hat{y}_0 + \hat{y}_0 + \dots + \hat{y}_n + \hat{y}_{n+1} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$= \sum_{i=1}^{n+1} \hat{y}_i + \hat{y}_{n+1}$$

$$= n\hat{x}_n + \hat{y}_{n+1} \quad (3.15)$$

จากสมการที่ 3.15 จัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 3.16

$$\hat{x}_{n+1} = \frac{n}{n+1} \hat{x}_n + \frac{\hat{y}_{n+1}}{n+1} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้นำ  $-\frac{x_{n+1}}{n+1}$  และ  $+\frac{x_{n+1}}{n+1}$  บวกกับสมการที่ 3.16 เขียนการประมาณค่าใหม่ได้ดังสมการที่ 3.17

$$\hat{x}_{n+1} = \frac{n}{n+1} \hat{x}_n + \frac{\hat{y}_{n+1}}{n+1} + \frac{x_{n+1}}{n+1} - \frac{x_{n+1}}{n+1}$$

$$\hat{x}_{n+1} = \frac{(n+1)x_{n+1}}{n+1} + \frac{\hat{y}_{n+1}}{n+1} - \frac{x_{n+1}}{n+1}$$

$$\hat{x}_{n+1} = \hat{x}_n + \frac{1}{n+1} [\hat{y}_{n+1} - \hat{x}_n] \quad (3.17)$$

จากสมการที่ 3.17 ทำให้ได้ประมาณค่าใหม่  $\hat{x}_{n+1}$  จากการประมาณค่าเดิม  $\hat{x}_n$  บวกกับผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้ใหม่  $\hat{y}_{n+1}$  กับการประมาณค่าเดิม  $\hat{x}_n$  และคูณกับเฟคเตอร์  $\frac{1}{n+1}$  ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงการประมาณค่าใหม่จากการตรวจสอบ การประมาณค่าเป็นแนวความคิดของกาลมานเมื่อพิจารณาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าปริมาณสกลค่า  $x$  ไม่ต่อเนื่องกับเวลา โดยสมมุติมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณ  $x$  จากการวัดลำดับที่  $n$  เป็นลำดับที่  $n+1$  เขียนได้ดังสมการที่ 3.18

$$x_{n+1} = \Phi_n x_n + w_n \quad (3.18)$$

ให้  $w_n$  มีค่าการแจกแจงเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนกับการเปลี่ยนแปลงเวลาของปริมาณ  $x$  เขียนแทนด้วย  $\Phi_n$  และ  $w_n$  คือ สัญญาณรบกวนระบบ (Process Noise) เมื่อต้องการหาประมาณค่าของลำดับที่  $n$  แทนด้วย  $x_n$  จากการประมาณค่า  $\hat{x}_n$  นั้น การประมาณค่าที่ดีที่สุดของลำดับที่  $n$  แทนด้วย  $\hat{x}_{n+1}$  ได้จากการประมาณค่าก่อนลำดับที่  $n+1$  แทนด้วย  $\hat{x}_{n+1}$  ดังสมการที่ 3.19

$$\hat{x}_{n+1} = \Phi_n \hat{x}_n \quad (3.19)$$

ให้การประมาณค่า  $\hat{x}_n$  มีความแปรปรวนดังสมการที่ 3.18 โดยที่ค่าความแปรปรวนของ  $\hat{x}_{n+1}$  เป็น  $\Phi_n^2 P_n$  จากจุดเริ่มต้นของ  $\hat{x}_n$  และความแปรปรวนของการรบกวนดังสมการที่ 3.20 ดังนั้นเขียนความแปรปรวนประมาณค่า  $\hat{x}_{n+1}$  ดังสมการที่ 3.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_n = E\{w_n^2\} \quad (3.21)$$

$$P_{n+1} = \Phi_n^2 P_n + Q_n \quad (3.22)$$

สมการการวัดสเกลล่า  $y_{n+1}$  เป็นเชิงเส้นตาม  $\hat{x}_{n+1}$  ได้รับความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.23 และให้การวัดจริงดังสมการที่ 3.24

$$y_{n+1} = H_{n+1} x_{n+1} \quad (3.23)$$

$$y_{n+1} = H_{n+1} x_{n+1} + v_{n+1} \quad (3.24)$$

จากสมการที่ 3.24 ให้  $v_{n+1}$  เป็นการรบกวนจากการวัดที่มีค่าการแจกแจงเฉลี่ยเป็นศูนย์ ความแปรปรวนของการวัดหาได้จากสมการที่ 2.25

$$R_{n+1} = E\{v_{n+1}^2\} \quad (3.25)$$

การประมาณค่าลำดับที่  $n+1$  มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นขณะไม่แปรตามกับเวลาได้ดังสมการที่ 2.26

$$\hat{x}_{n+1} = \hat{x}_n + K_{n+1} [y_{n+1} - H_{n+1} \hat{x}_n] \quad (3.26)$$

หาค่าอัตราขยายคลาดमानโดยหาค่าความแปรปรวน  $P_{n+1}$  ค่าสุดของ  $\hat{x}_{n+1}$  ที่เกิดขึ้นไม่แน่นอนจากสมการที่ 3.26 ถ้าให้  $\Delta$  แทนการเปลี่ยนแปลงตั้งแปรเขียนการเปลี่ยนแปลง  $\hat{x}_{n+1}$  ดังสมการที่ 2.25 และความแปรปรวน  $P_{n+1}$  ที่ได้จากสมการที่ 2.27 ได้ดังสมการที่ 2.28

$$\Delta \hat{x}_{n+1} = (1 - K_{n+1} H_{n+1}) \Delta \hat{x}_n + K_{n+1} \Delta y_{n+1} \quad (3.27)$$

$$P_{n+1} = (1 - K_{n+1} H_{n+1})^2 P_n + K_{n+1}^2 R_{n+1} \quad (3.28)$$

คิฟเฟอร์เรนเซียลสมการที่ 2.28 เทียบกับ  $K_{n+1}$  ดังสมการที่ 2.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial P_{n+1}}{\partial K_{n+1}} = \frac{\partial}{\partial K_{n+1}} ((1 - K_{n+1} H_{n+1})^2 P_{n+1}(-) + K_{n+1}^2 R_{n+1}) \quad (3.29)$$

$$= \frac{\partial}{\partial K_{n+1}} ((1 - 2K_{n+1} H_{n+1} + K_{n+1}^2 H_{n+1}^2) P_{n+1} + K_{n+1}^2 R_{n+1})$$

$$= (-2H_{n+1} + 2K_{n+1} H_{n+1}^2) P_{n+1} + 2K_{n+1} R_{n+1} \quad (3.30)$$

เทียบสมการที่ 2.28 เท่ากับศูนย์ เพื่อหาค่าอัตราขยายกาลมาน  $K_{n+1}$  ได้ดังสมการที่ 2.29

$$K_{n+1} = \frac{PH_{n+1}}{(H_{n+1} P_{n+1} + R_{n+1})} \quad (3.31)$$

และค่าของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในลำดับที่  $n+1$  หาได้จากสมการที่ 2.30

$$P_{n+1} = (1 - K_{n+1} H_{n+1}) P_n \quad (3.30)$$

เมื่อระบบการวัดไม่เป็นเชิงเส้นแล้วสมการที่ 2.24 จะใช้สมการที่ 2.31 หาอัตราการเปลี่ยนแปลงของการประมาณค่า ซึ่งสมการนี้เรียกว่า เอ็กเทนเดด คาลมาน (Extended Kalman)

$$\Delta \hat{x}_{n+1} = (1 - K_{n+1} \frac{\partial}{\partial x_{n+1}} H(x_{n+1})) \Delta \hat{x}_{n+1} + K_{n+1} \Delta y_{n+1} \quad (3.32)$$

### 3.4 คาลมานฟิลเตอร์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Kalman, DKF) [12,13,14,15,16,17,21,26]

ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะตัวกรองคาลมานไม่ต่อเนื่องเท่านั้น เพราะตัวกรองคาลมานแบบไม่ต่อเนื่องมีความคลาดเคลื่อนความแปรปรวนร่วมน้อยกว่าตัวกรองคาลมานต่อเนื่อง และ ค่าเฉลี่ยดีกว่าแบบตัวกรองคาลมานต่อเนื่องเป็นช่วงตัวกรองคาลมานเป็นการหาค่าประมาณที่ดีที่สุดให้ระบบเชิงเส้นสโตคาสติกไม่ต่อเนื่องถูกควบคุมด้วยระบบไดนามิกดังสมการที่ 3.33

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{A} \mathbf{x}_n + \mathbf{B} \mathbf{u}_n + \mathbf{w}_n \quad (3.33)$$

ให้ระบบการวัด ดังสมการที่ 3.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{C}\mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n \quad (3.34)$$

ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนร่วม ของระบบและของระบบการวัดได้ดังสมการที่ 3.35

$$E\{\mathbf{w}\} = 0, E\{\mathbf{v}\} = 0, E\{\mathbf{w}\mathbf{w}^T\} = \mathbf{Q}, E\{\mathbf{v}\mathbf{v}^T\} = \mathbf{R}, E\{\mathbf{w}\mathbf{v}^T\} = 0 \quad (3.35)$$

สำหรับการหาค่าประมาณค่าที่ดีที่สุดของสถานะ  $\mathbf{x}$  ปัจจุบันนั้นต้องอาศัยค่าจากอดีตทำการคูณกับ สัมประสิทธิ์หรือได้มาจากความแปรปรวนร่วมของระบบ ซึ่งสามารถบอกสถานะที่เอาต์พุตได้ แต่ การประมาณค่าก่อนสถานะหนึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการทราบคุณสมบัติทางไดนามิกและความแปรปรวนร่วมของระบบและการวัดก่อน สมมติให้อินพุต  $\mathbf{x}$  เป็นสถานะ  $\mathbf{n}$  ซึ่งทราบค่าของขบวนการ ไดนามิกของระบบ และให้สถานะก่อนหน้าแทนด้วย  $\mathbf{n}-1$  ดังนั้นสามารถเขียนการประมาณค่าเอาต์พุตปัจจุบันจากสถานะอินพุตจากอดีต 1 ชั้น ดังสมการที่ 3.36

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{n-1} + \mathbf{B}u_{n-1} \quad (3.36)$$

จากนั้นเพิ่มการวัดด้านเอาต์พุตที่สถานะปัจจุบัน กำหนดให้เป็น สถานะ  $\mathbf{n}$  โดยกำหนดให้เป็นตัวแปร  $\mathbf{y}_n$  เรียกว่าเอาต์พุตที่สถานะ  $\mathbf{n}$  อย่างไรก็ตามค่าที่เหมาะสมสำหรับรวมเอาการประมาณค่าและการวัดให้ได้โครงสร้างใหม่ที่ดีที่สุดที่สุดของค่าจริง  $\mathbf{x}$  คือ ได้ดังสมการที่ 3.37

$$\hat{\mathbf{x}}_n = \bar{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}(\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\bar{\mathbf{x}}_n) \quad (3.37)$$

ในที่นี้จะทราบอย่างไรว่าเป็นค่าที่เหมาะสมของกาลมานฟิลเตอร์ จำเป็นต้องหาค่าอัตราขยายกาลมานหรือค่า  $\mathbf{K}$  ควรจะมีค่าเท่าไร ซึ่งจากการพิจารณาของเมตริกซ์  $\mathbf{K}$  ต้องเป็นพารามิเตอร์เปิดในตัวกรองแบบกาลมาน ดังนั้นจำเป็นจะต้องเลือกค่า  $\mathbf{K}$  ให้มีความคลาดเคลื่อนประมาณค่าภายหลังต่ำสุด (ในค่าที่คาดหวัง) ซึ่งหาค่าได้ดังสมการที่ 3.38

$$\mathbf{e}_n = \mathbf{x}_n - \hat{\mathbf{x}}_n \quad (3.38)$$

ในการหาค่าคาดหวังความแปรปรวนคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่สถานะปัจจุบันนั้นสามารถหาดังสมการที่ 3.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $E\{\mathbf{e}_n\mathbf{e}_n^T\} = E\{(\mathbf{x}_n - \hat{\mathbf{x}}_n)(\mathbf{x}_n - \hat{\mathbf{x}}_n)^T\}$  โปรดดูหน้าไปใช้ประโยชน์ (3.39) ในการคำนวณค่า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า  $\hat{x}_n$  ด้วยสมการที่ 3.36 ในสมการที่ 3.39 ได้ดังสมการที่ 3.40

$$= \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n - \mathbf{K}(\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n)) (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n - \mathbf{K}(\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n))^T \right\} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} &= \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} + \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{K}(\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n)) (\mathbf{K}(\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n))^T \right\} \\ &\quad - \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{K}(\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n))^T \right\} + \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{K}(\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n)) (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} \end{aligned} \quad (3.41)$$

จากสมการที่ 3.40 แทน  $\tilde{\mathbf{P}}_n = \mathbf{E} \left\{ \tilde{\mathbf{e}}_n \tilde{\mathbf{e}}_n^T \right\}$

$$\begin{aligned} &= \tilde{\mathbf{P}}_n + \mathbf{K} \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} \mathbf{K}^T - \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} \mathbf{K}^T \\ &\quad - \mathbf{K} \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} \end{aligned} \quad (3.42)$$

แทนค่าในสมการที่ 3.42 ด้วยสมการที่ 3.34 จะได้ดังสมการที่ 3.43 – สมการที่ 3.45

$$\begin{aligned} &= \tilde{\mathbf{P}}_n + \mathbf{K} \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{C}\mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{C}\mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} \mathbf{K}^T \\ &\quad - \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{C}\mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} \mathbf{K}^T - \mathbf{K} \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{C}\mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} &= \tilde{\mathbf{P}}_n + \mathbf{K} \mathbf{C} \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} \mathbf{C}^T \mathbf{K}^T + \mathbf{K} \mathbf{R} \mathbf{K}^T \\ &\quad - \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} \mathbf{C}^T \mathbf{K}^T - \mathbf{K} \mathbf{C} \mathbf{E} \left\{ (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n) (\mathbf{x}_n - \tilde{\mathbf{x}}_n)^T \right\} \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$= \tilde{\mathbf{P}}_n + \mathbf{K} \mathbf{C} \tilde{\mathbf{P}}_n \mathbf{C}^T \mathbf{K}^T + \mathbf{K} \mathbf{R} \mathbf{K}^T - \tilde{\mathbf{P}}_n \mathbf{C}^T \mathbf{K}^T - \mathbf{K} \mathbf{C} \tilde{\mathbf{P}}_n \quad (3.45)$$

ทำการดิฟเฟอเรนเชียลในสมการที่ 3.45 และเทียบสมการที่ได้จากการดิฟเฟอเรนเชียลเท่ากับ ศูนย์เพื่อหาค่าอัตราขยายกาลมาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = AxAx^T, \frac{\partial A}{\partial x} = 2xA^T \quad (3.46)$$

จากสมการที่ 3.46 สามารถหาค่าสมการที่ 3.45 ได้ดังสมการที่ 3.47 และ สมการที่ 3.48

$$\frac{\partial E\{e_n e_n^T\}}{\partial K} = 2C\tilde{P}_n C^T K^T + 2RK^T - C\tilde{P}_n - (\tilde{P}_n C^T)^T = 0$$

$$K^T = (C\tilde{P}_n C^T + R)^{-1} C\tilde{P}_n \quad (3.47)$$

$$K = \tilde{P}_n C^T (C\tilde{P}_n C^T + R)^{-1} \quad (3.48)$$

หาค่าการเปลี่ยนแปลงความแปรปรวนร่วมในสถานะ  $n$  หาได้จากสมการที่ 3.49

$$P_n = E\{e_n e_n^T\} \quad (3.49)$$

แทนค่า  $K$  เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพร้อมกับค่าอัตราขยายคาสมานในสถานะ  $n$  โดยแทนสมการที่ 3.45 ด้วยสมการที่ 3.48 ได้ดังสมการที่ 3.50 และสมการที่ 3.51

$$\begin{aligned} P_n &= \tilde{P}_n + KC\tilde{P}_n C^T K^T + KRK^T - \tilde{P}_n C^T K^T - KC\tilde{P}_n \\ &= \tilde{P}_n + K(C\tilde{P}_n C^T K^T + R)K^T - \tilde{P}_n C^T K^T - KC\tilde{P}_n \\ &= \tilde{P}_n + \tilde{P}_n C^T (C\tilde{P}_n C^T + R)^{-1} (C\tilde{P}_n C^T + R)(C\tilde{P}_n C^T + R)^{-1} C\tilde{P}_n \\ &\quad - \tilde{P}_n C^T (C\tilde{P}_n C^T + R)^{-1} C\tilde{P}_n - KC\tilde{P}_n \\ &= \tilde{P}_n + \tilde{P}_n C^T (C\tilde{P}_n C^T + R)^{-1} C\tilde{P}_n - \tilde{P}_n C^T (C\tilde{P}_n C^T + R)^{-1} C\tilde{P}_n - KC\tilde{P}_n \\ &= \tilde{P}_n + KC\tilde{P}_n \end{aligned} \quad (3.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{C})\tilde{\mathbf{P}}_n \quad (3.51)$$

หาค่าการเปลี่ยนแปลงความแปรปรวนร่วมสถานะ  $n+1$  ได้ดังสมการที่ 3.52

$$\tilde{\mathbf{P}}_{n+1} = \mathbf{E}\{\mathbf{e}_{n+1}\mathbf{e}_{n+1}^T\} = \mathbf{E}\{(\mathbf{x}_{n+1} - \hat{\mathbf{x}}_{n+1})(\mathbf{x}_{n+1} - \hat{\mathbf{x}}_{n+1})^T\} \quad (3.52)$$

แทนสมการที่ 3.52 ด้วยสมการที่ 3.49 ได้ดังสมการที่ 3.53

$$= \mathbf{E}\{(\mathbf{A}\mathbf{x}_n + \mathbf{B}\mathbf{u}_n + \mathbf{w}_n - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_n - \mathbf{B}\mathbf{u}_n)(\mathbf{A}\mathbf{x}_n + \mathbf{B}\mathbf{u}_n + \mathbf{w}_n - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_n - \mathbf{B}\mathbf{u}_n)^T\} \quad (3.53)$$

$$= \mathbf{E}\{(\mathbf{A}\mathbf{x}_n - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_n)(\mathbf{A}\mathbf{x}_n - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_n)^T + \mathbf{w}_n(\mathbf{A}\mathbf{x}_n - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_n)^T + (\mathbf{A}\mathbf{x}_n - \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_n)\mathbf{w}_n^T + \mathbf{w}_n\mathbf{w}_n^T\} \quad (3.54)$$

$$= \mathbf{A}\mathbf{E}\{(\mathbf{x}_n - \hat{\mathbf{x}}_n)(\mathbf{x}_n - \hat{\mathbf{x}}_n)^T\}\mathbf{A}^T + \mathbf{E}\{\mathbf{w}_n\mathbf{w}_n^T\} \quad (3.55)$$

แทนสมการที่ 3.54 ด้วยสมการที่ 3.49 ได้ความแปรปรวนร่วมสถานะ  $n+1$  ดังสมการที่ 3.56

$$\tilde{\mathbf{P}}_{n+1} = \mathbf{A}\mathbf{P}_n\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (3.56)$$

จากสมการที่ 3.36 ถึง สมการที่ 3.56 เป็นสมการคานมานฟิลเตอร์ไม่ต่อเนื่อง (The Discrete Kalman Filter Equations) ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นสมการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (The time update equations) ได้ดังสมการที่ 3.57 และสมการที่ 3.58 ส่วนที่สองเป็นสมการเปลี่ยนแปลงตามการวัด (The measurement update equations) ได้ดังสมการที่ 3.59 - 3.61 ซึ่งเขียนเป็นโคอะแกรมแสดงการประมาณค่าได้ดังภาพที่ 3.7 และลำดับขั้นการคำนวณของการกรองคาลมานแสดงดังภาพที่ 3.8

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{A}\mathbf{x}_{n-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{n-1} \quad (3.57)$$

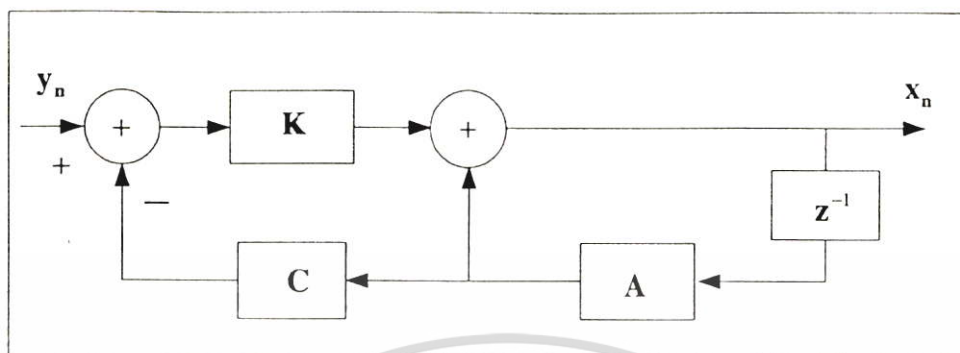
$$\tilde{\mathbf{P}}_{n+1} = \mathbf{A}_n\mathbf{P}_n\mathbf{A}_n^T + \mathbf{Q} \quad (3.58)$$

$$\mathbf{K} = \tilde{\mathbf{P}}_n\mathbf{C}^T(\mathbf{C}_n\tilde{\mathbf{P}}_n\mathbf{C}_n^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (3.59)$$

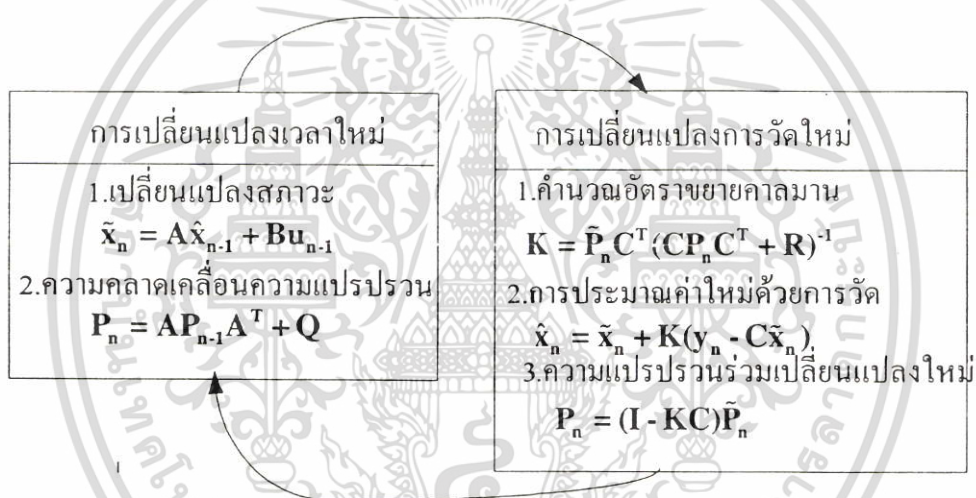
$$\hat{\mathbf{x}}_n = \hat{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}(\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_n) \quad (3.60)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรเชิงนี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_n = (I + KC)\bar{P}_n \tag{3.61}$$



ภาพที่ 3.7 การประมาณค่า  $x_n$  จากการวัด  $y_n$  ของสถานะ  $n$



ภาพที่ 3.8 ลำดับการคำนวณการกรองกาลมาน

จากการพิจารณาที่สมการที่ 3.57 ถึงสมการที่ 3.61 สรุปได้ว่า ถ้าการประมาณภายหลังของสัญญาณรบกวนมีค่าเป็นศูนย์อัตราขยายกาลมาน  $K = 0$  และถ้าสัญญาณรบกวนจากการวัดมีค่าเป็นศูนย์อัตราขยายกาลมาน  $K = C^{-1}$  โดยที่ตัวกรองกาลมานสามารถใช้ได้ดีกับระบบที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ 1. ขอมให้ประมาณค่าสถานะอดีต สถานะปัจจุบันและสถานะในอนาคต 2. ระบบต้องการรูปแบบของระบบไดนามิก (ที่ประมาณค่าน้อยๆ) 3. ต้องเป็นคิจิตอลฟิลเตอร์ที่สามารถสร้างขึ้นได้ 4. เป็นการประมาณค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบเชิงเส้น 5. ถ้าต้องการใช้กับระบบไม่เชิงเส้นแล้วจะเป็นใช้เอ็กเทนเดดกาลมาน (Extended Kalman) 6. กาลมานฟิลเตอร์สามารถคำนวณบางวิธีที่เป็นกับ Linear Quadratic Regulator ดังเช่น ระบบไดนามิกที่มีสมการดังสมการที่ 3.62 และระบบการวัดดังสมการที่ 3.63 และมีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนร่วมของระบบดังสมการที่ 3.64 ค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรปรวนร่วมของระบบและการวัดคังสมการที่ 3.65 การวัดที่สถานะ 1 และ 2 คังสมการที่ 3.66 ค่าเริ่มต้นของสมการส่งผ่านสถานะ ได้คังสมการที่ 3.67 และค่าความแปรปรวนเริ่มต้นคังสมการที่ 3.68 ให้หาค่าประมาณ  $\hat{x}_3$

$$x_n = x_{n-1} + w_{n-1} \quad (3.62)$$

$$z_n = x_n + v_n \quad (3.63)$$

$$E\{w\} = 0, E\{v\} = 0 \quad (3.64)$$

$$E\{ww^T\} = 1, E\{vv^T\} = 2 \quad (3.65)$$

$$y_1 = 2, y_2 = 3 \quad (3.66)$$

$$E\{x(0)\} = \hat{x}_0 = 1 \quad (3.67)$$

$$E\{[x(0) - \hat{x}_0][x(0) - \hat{x}_0]^T\} = P_0 = 10 \quad (3.68)$$

หาค่า  $\tilde{P}_n$  จากสมการที่ 3.21 หรือ สมการที่ 3.56 หรือสมการที่ 3.58 ได้คังสมการที่ 3.69

$$\tilde{P}_n = \tilde{P}_{n-1} + 1 \quad (3.69)$$

หาอัตราขยายคาลมานจากสมการที่ 3.30 ได้คังสมการที่ 3.70 และ สมการที่ 3.71

$$K = \frac{\tilde{P}_n C^T}{(C \tilde{P}_n C^T + R)} \quad (3.70)$$

$$K = \frac{P^{n-1} + 1}{P^{n-1} + 3} \quad (3.71)$$

หาค่าความแปรปรวนร่วมโดยแทนค่าในสมการที่ 3.51 หรือสมการที่ 3.61 ได้คังสมการที่ 3.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_n = \left[ 1 - \frac{P_{n-1} + 1}{P_{n-1} + 3} \right] (P_{n-1} + 1) \quad (3.72)$$

$$P_n = \frac{[(P_{n-1} + 3) - (P_{n-1} + 1)](P_{n-1} + 1)}{P_{n-1} + 3} \quad (3.73)$$

$$= \frac{2(P_{n-1} + 1)}{P_{n-1} + 3} \quad (3.74)$$

หาค่าประมาณในสภาวะถัดไปได้จากสมการที่ 3.25 หรือ สมการที่ 3.60 ได้ดังสมการที่ 3.75  
เมื่อ  $n = 1$

$$\begin{aligned} \hat{x}_n &= \tilde{x}_0 + \frac{P_0 + 1}{P_0 + 3} (2 - \tilde{x}_0) \\ &= 1 + \frac{11}{13} (2 - 1) = \frac{24}{13} \end{aligned} \quad (3.75)$$

เมื่อสภาวะ  $n = 2$  ทำการคำนวณจากสมการที่ 3.69 ถึงสมการที่ 3.745 ได้ผลดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงผลของการคำนวณสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2

$n$	$\tilde{P}_n$	$P_n$	$K_n$	$\hat{x}_n$
1	11	$\frac{22}{13}$	$\frac{11}{13}$	$\frac{24}{13}$
2	$\frac{45}{23}$	$\frac{70}{61}$	$\frac{131}{253}$	$\frac{49}{21}$

ค่าของ  $\hat{x}_3 = \frac{49}{21}$

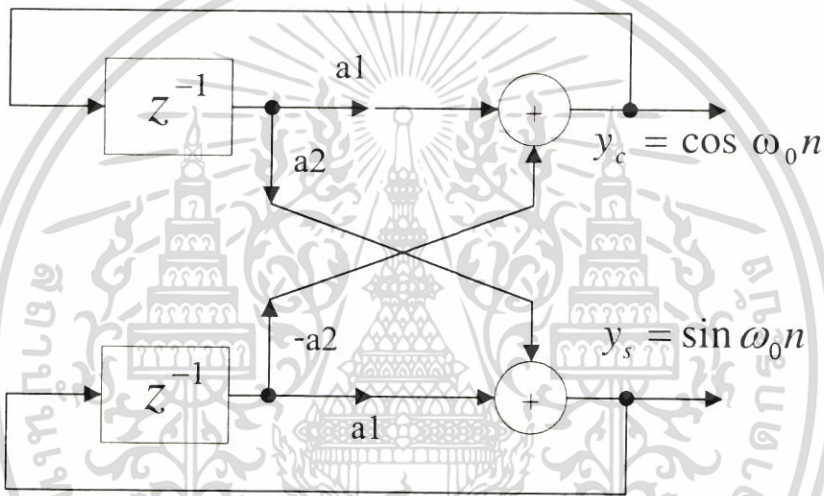
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบสร้างการกรองแบบคาถมาน

#### 4.1 การออกแบบย่านความถี่โดยโมเดลไซน์แบบ Coupled – Form[6,27]

จากทฤษฎีของคาถมานฟิลเตอร์ได้แยกส่วนต่างๆ ของสมการดังต่อไปนี้โดยกำหนดให้ระบบเป็นสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งการสร้างระบบเป็นดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แสดงโครงสร้างโมเดลไซน์แบบ Coupled – form

จากโครงสร้างรูปโมเดลไซน์แบบ Coupled - form สามารถสร้างเป็นสมการของระบบได้เป็นสมการที่ 4.1 ถึงสมการที่ 4.11

$$[a_1 x_1(z) + a_2 x_2(z) + W(z)] z^{-1} = x_1(z) \quad (4.1)$$

$$[a_1 x_1(n-1) + a_2 x_2(n-1) + W(n-1)] = x_1(n) \quad (4.2)$$

$$[-a_2 x_1(z) + a_1 x_2(z) + W(z)] z^{-1} = x_2(z) \quad (4.3)$$

$$[-a_2 x_1(n-1) + a_1 x_2(n-1) + W(n-1)] = x_2(n) \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระบบไดนามิกซ์ของระบบกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์ และระบบการวัดสามารถเขียนให้อยู่ในสมการเมตริกซ์ กำหนดดังสมการที่ (4.12) และ (4.13)

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ -a_2 & a_1 \end{bmatrix} X(n-1) + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} W = \begin{bmatrix} X_1(n) \\ X_2(n) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$y(n) = [1 \quad 0] * \begin{bmatrix} X_1(n) \\ X_2(n) \end{bmatrix} + R(n) \quad (4.6)$$

จากสมการที่ 4.5 นั้นค่าสัมประสิทธิ์ได้จากสมการที่ 4.7 - 4.9

$$a_1 = \cos \omega_0 \quad (4.7)$$

$$a_2 = \sin \omega_0 \quad (4.8)$$

$$\omega_0 = 2\pi \frac{f_N}{f_s} = 2\pi f \quad (4.9)$$

จากสมการที่ 4.7 - 4.9 กำหนดให้

$f$  = ความถี่เทียบเคียง (Normalized Frequency)

$f_s$  = ความถี่สุ่ม (Sampling Frequency)

$f_N$  = ความถี่ที่ต้องการ

สำหรับค่าความแปรปรวนอื่นเนื่องจากสัญญาณรบกวนนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของ A/D และขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของตัวประมวลผล กำหนดจากสมการที่ 4.13

$$Q, R = \frac{\left(\frac{1}{2^{b-1}}\right)^2}{12} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ 4.10 กำหนดให้

$R$  = ค่าความแปรปรวนร่วมของสัญญาณที่เกิดขึ้นขณะวัด

$Q$  = ค่าความแปรปรวนร่วมของระบบ

$b$  = จำนวนบิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง โดยใช้ A/Dขนาด 14 บิต และตัวประมวลผลขนาด 32 บิต ต้องการความถี่สัญญาณรูปไซน์ที่ความถี่ 10 Hz กำหนดความถี่สุ่มเป็น 7.878 kHz ดังนั้นต้องหาค่า  $a_1, a_2, Q, R$  และ  $\omega_0$  หาค่า  $\omega_0$  จากสมการที่ 4.9

$$\omega_0 = 2\pi f = 2\pi \frac{f_N}{f_s} = 2\pi \frac{10}{7.878 \times 10^3} \text{ rad/s}$$

หาค่า  $a_1$  และ  $a_2$  จากสมการที่ 4.7 และ 4.8

$$a_1 = \cos \omega_0$$

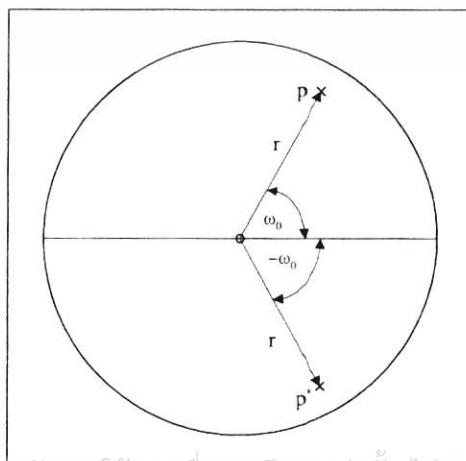
$$a_2 = \sin \omega_0$$

หาค่า  $Q, R$  จากสมการที่ 4.10

$$Q, R = \frac{\left(\frac{1}{2^{b-1}}\right)^2}{12}$$

#### 4.2 การออกแบบขนาดของความกว้างของแบนด์ ( $\Delta\omega$ ) [6,27,28]

การออกแบบตัวกรองตอบสนองบางความถี่ ทำได้โดยการวาง โพลอยู่ภายในวงกลม 1 หน่วย และให้มีค่าเป็นคอนจูเกตโพล ส่วนซีโรวางอยู่ที่จุดเริ่มต้นจำนวน 2 ตัว ซึ่งทำให้เกิดการตอบสนองที่มีความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalize) ความกว้างของแบนด์ ( $\Delta\omega$ ) กำหนดมาจากรัศมี  $r$  และ  $\omega$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**ภาพที่ 4.2** การวางตำแหน่งโพลและซีโร  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้  $\omega = \omega_0$  โดยให้โพล วางอยู่ด้านใน Unit circle ดังแสดงในภาพที่ 4.3 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างโพล  $p$  และรัศมี  $r$  ได้ดังสมการ

$$p = e^{j\omega_0} \quad (4.11)$$

โดยที่  $0 < r < 1$  และค่าคอนจูเกตของสมการที่ 1 สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 4.12

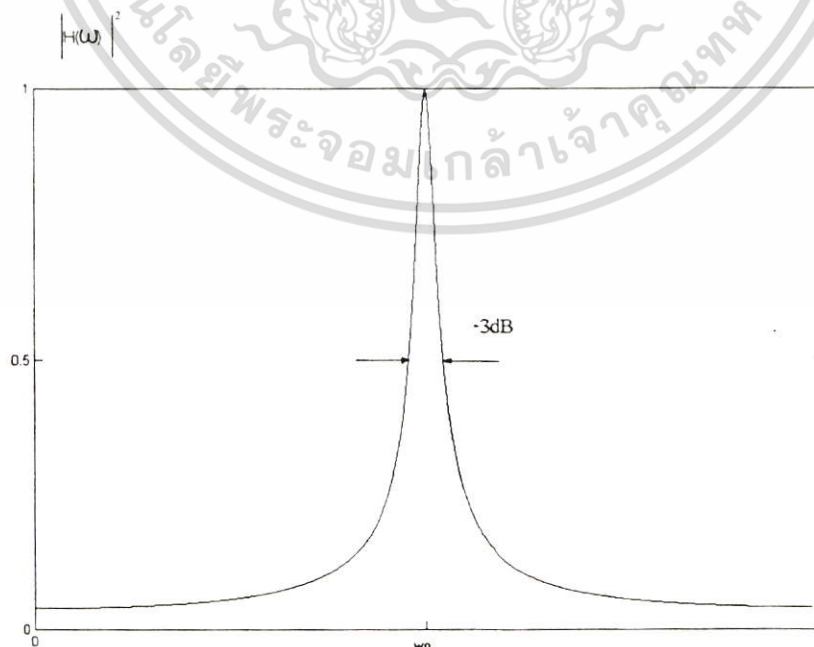
$$p = e^{-j\omega_0} \quad (4.12)$$

และค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชัน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4.13

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{G}{(1 - re^{j\omega_0} Z^{-1})(1 - re^{-j\omega_0} Z^{-1})} \\ &= \frac{G}{1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2}} \end{aligned} \quad (4.13)$$

ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $a_1$  และ  $a_2$  และ  $r$  และ  $\omega_0$  ดังสมการที่ 4.14

$$a_1 = -2r \cos \omega_0 \quad a_2 = r^2 \quad (4.14)$$



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของแมกนิจูดและความถี่เทียบเคียงนั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

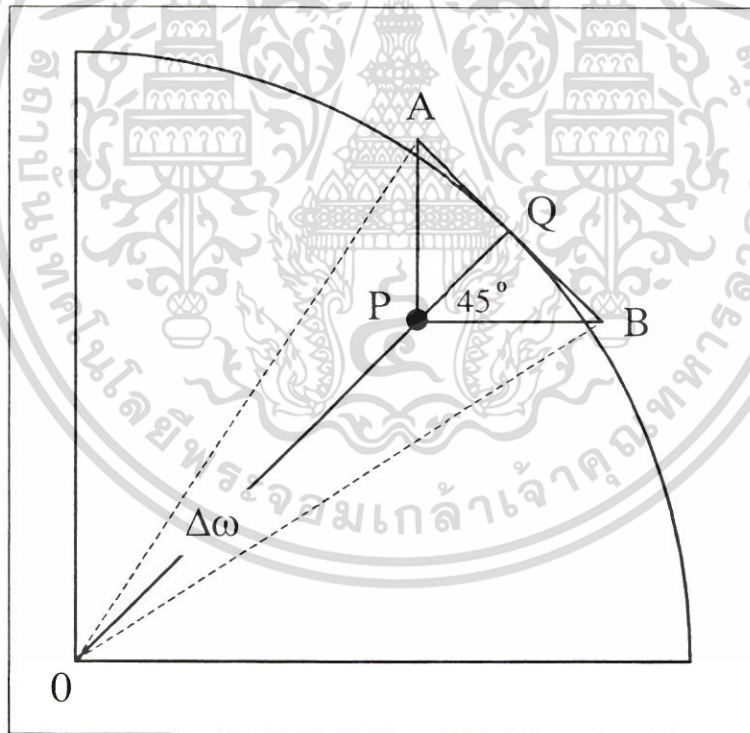
ค่าอัตราขยาย  $G$  กำหนดได้จากที่ค่าการกรองเทียบเคียง (Normalized filter) นั้น  $|H(\omega_0)| = 1$  ความถี่ที่ตอบสนองของฟิลเตอร์ สามารถกระจายได้โดยให้  $Z = e^{j\omega}$  แทนในสมการที่ 4.13 จะได้ดังสมการที่ 4.15

$$H(\omega) = \frac{G}{(1 - re^{j\omega_0}e^{-j\omega})(1 - re^{-j\omega_0}e^{-j\omega})} \quad (4.15)$$

$$= \frac{G}{1 + a_1e^{-j\omega} + a_2e^{-2j\omega}} \quad (4.16)$$

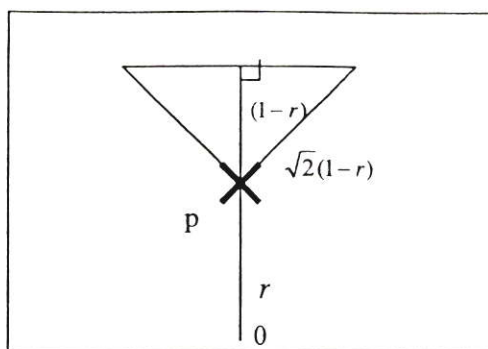
ซึ่งสามารถหาอัตราขยาย  $G$  ได้ดังสมการที่ 4.17

$$G = (1-r)\sqrt{1-2r\cos(2\omega_0)+r^2} \quad (4.17)$$



ภาพที่ 4.4 เส้นตรงสัมผัสกับเส้นรอบวง เพื่อหาค่า  $G$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 รัศมี  $r$  จากจุดศูนย์กลาง  $0$  ไปสัมผัสกับเส้นรอบวง 1 หน่วย

จากภาพที่ 4.5 เขียนเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงที่จุด  $Q$  สามารถใช้คุณสมบัติของ Trigonometry หาค่า  $r$  ได้ดังสมการที่ 4.18 จากคุณสมบัติของสามเหลี่ยมมุมฉากแสดงดังภาพที่ 4.6 จากสมการสามเหลี่ยมมุมฉากดังสมการที่ 4.18

$$d^2 + (1-r)^2 = 2(1-r)^2 \quad (4.18)$$

$$r = 1 - d \quad (4.19)$$

จากสมการที่ 4.18 และ 4.19 ให้ค่า  $d$  เป็นจุดสัมผัสเส้นรอบวงกลม 1 หน่วย ได้ดังสมการที่ 4.20

$$d = \frac{\left(\frac{\Delta\omega}{2}\right)}{f_s} 2\pi \quad (4.20)$$

แทนค่าสมการที่ 4.19 ในสมการที่ 4.20 ได้ดังสมการที่ 4.21

$$r = 1 - \frac{\Delta\omega}{f_s} \pi \quad (4.21)$$

จากสมการที่ 4.15 หาค่าการตอบสนองของขนาดความสูงได้จากสมการที่ 4.22

$$|H(\omega)|^2 = \frac{G^2}{(1 - 2r \cos(\omega - \omega_0) + R^2)(1 - 2r \cos(\omega + \omega_0) + r^2)} \quad (4.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

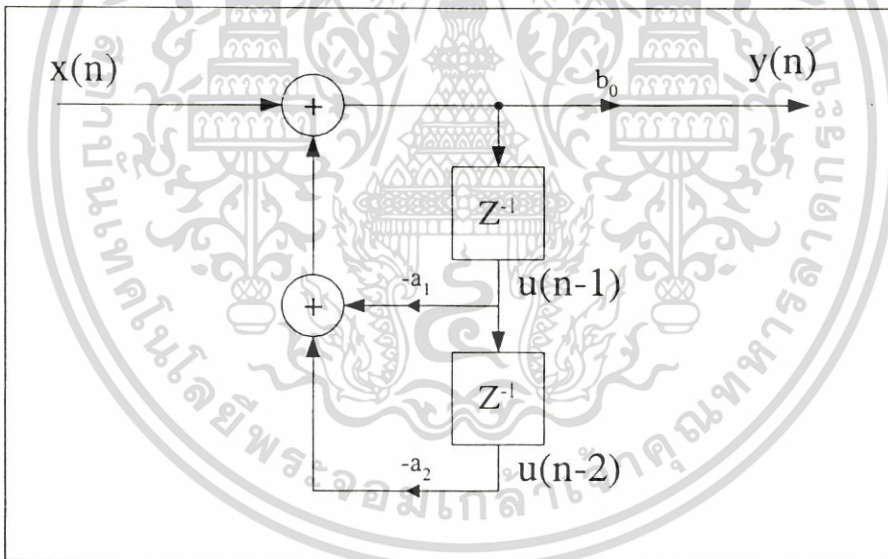
จากภาพที่ 4.4 ค่าความกว้างของย่านความถี่ ( $\Delta\omega$ ) เป็นความกว้างของความถี่ที่ค่าความสูงของแมกนิจูด ลดเป็นครึ่งหนึ่ง ดังนั้นขนาดย่านความถี่สามารถหาได้จากสมการที่ 4.23 และ 4.24

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{2} |H(\omega_0)|^2 = \frac{1}{2} \quad (4.23)$$

หรือ

$$20 \log_{10} \left| \frac{H(\omega)}{H(\omega_0)} \right| = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{2} \right) = -3dB \quad (4.24)$$

จากสมการที่ 4.6 สามารถเขียนเป็นแบบตรง (Direct form) ได้ดังภาพที่ 4.6 และจัดให้อยู่ในรูปของสเตทสเปทได้ดังสมการที่ 4.15



ภาพที่ 4.6 โครงสร้างของแบบตรง

จากโครงสร้างของ แบบตรงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 4.25 ถึงสมการที่ 4.27

$$s_1(n) = u(n-1), s_2(n) = u(n-2)$$

$$s(n+1) = x(n) - a_1 s_1(n) - a_2 s_2(n) \quad (4.25)$$

$$s_2(n+1) = s_1(n) \quad (4.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y(n) = b_0 x(n) - b_0 a_1 s_1(n) \quad (4.27)$$

จัดรูปแบบของสมการ โดยเขียนสมการได้ดังสมการที่ 4.28 และ 4.29

$$\begin{bmatrix} s_1(n+1) \\ s_2(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(n) \\ s_2(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} x(n) \quad (4.28)$$

$$y(n) = [c_1 \quad c_2] \begin{bmatrix} s_1(n) \\ s_2(n) \end{bmatrix} + b_0 x(n) \quad (4.29)$$

$$c_k = b_k - b_0 a_k \quad 1 \leq k \leq 2$$

ดังนั้นจากสมการที่ 4.28 และ 4.29 เขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ 4.30 และ 4.31

$$s(n) = \begin{bmatrix} s_1(n) \\ s_2(n) \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$c_k = b_k - b_0 a_k, C_1 = [c_1 \quad c_2], D_1 = b_0 \quad (4.31)$$

จากสมการที่ 4.30 และ 4.31 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4.32 และ 4.33

$$s(n+1) = A_1 s(n) + B_1 x(n) \quad (4.32)$$

$$y(n) = C_1 s(n) + D_1 x(n) \quad (4.33)$$

### 4.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่แคบคาบมาน

การออกแบบมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าความถี่ที่ต้องการ
2. กำหนดค่าความถี่สุ่ม
3. กำหนดย่านความกว้างความถี่ที่ต้องการ
4. หาค่าพารามิเตอร์ ( $r$ ) ตามสมการที่ 4.21
5. หาค่าความถี่นอร์มัลไลซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. หาค่าพารามิเตอร์  $a_1, a_2$
7. เขียนฟังก์ชันในรูปสเตสเปท ดังสมการที่ 4.30
8. กำหนดค่าความแปรปรวนเนื่องจากรวด ( $R$ ) และความแปรปรวนระบบค่า ( $Q$ )
9. นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้มาเขียนโปรแกรมตามไฟล์ซาร์ทของกาลมานฟิลเตอร์ ดังเช่นการหาค่าพารามิเตอร์ของความถี่แบบแบนด์แคบของความถี่ 1 kHz สามารถหาได้ต่อไปนี่

1. กำหนดให้ความถี่ ที่ต้องการ เป็น 1 kHz
2. ความถี่สุ่มเท่ากับ 8 kHz
3. ย่านความกว้างความถี่ 10 Hz

$$\Delta\omega = 10 \text{ Hz} \quad f_s = 8000 \text{ Hz} \quad f = 1000 \text{ Hz}$$

4. จากสมการที่ 4.21

$$r = 1 - \frac{\Delta\omega}{f_s} \pi$$

$$r = 1 - \frac{10}{8000} \pi = 0.9961$$

5.  $\omega_0 = \frac{f}{f_s} \times 2\pi$

$$= \omega_0 = \frac{1000}{8000} \times 2\pi = \frac{\pi}{4} = 0.7854$$

6. จากสมการที่ 4.14

$$a_1 = 2r \cos \omega_0 = 2 \times 0.9961 \times \cos(0.7854)$$

$$= 1.4087$$

$$a_2 = r^2 = 0.9961^2$$

$$= 0.9922$$

7. แทนค่า  $a_1$  และ  $a_2$  ลงในสมการที่ 4.30 ได้  $A_1$  และ  $B_1$  และหาค่า  $C_1$  จากสมการที่ 4.31

$$A_1 = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.4087 & -0.9922 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า  $C_1$  จากสมการที่ 4.31 โดยค่า  $b_1$  และ  $b_2$  ของสมการที่ 4.30 หาได้จากสมการที่ 2.100 หรือ จากสมการที่ 4.17 คือ

$$b_1 = (1 - 0.9961)\sqrt{1 - 2(0.9961)\cos(2 \times 0.7854) + 0.9961^2}$$

$$b_0 = 0, b_2 = 0$$

$$c_1 = (b_1 - b_0 a_1) = (0.0055 - 0), c_2 = 0$$

$$C_1 = [c_1 \quad c_2] = [0.0055 \quad 0], D = 0$$

8. กำหนดค่าความแปรปรวนเนื่องจากการวัด ( $R$ ) และความแปรปรวนระบบค่า ( $Q$ ) จากสมการที่ 2.61 และสมการที่ 4.10

$$Q, R = \frac{\left(\frac{1}{2^{b-1}}\right)^2}{12}$$

ถ้าจำนวนบิต A/D เป็น 14 บิต และการประมวลผลที่มีขนาด 32 บิต ดังนั้นได้ความแปรปรวนของระบบเป็น

$$Q = \frac{\left(\frac{1}{2^{31}}\right)^2}{12} = 2.36848 \times 10^{-15}$$

ความแปรปรวนของการวัดเป็น

$$R = \frac{\left(\frac{1}{2^{13}}\right)^2}{12} = 1.2418 \times 10^{-11}$$

9. นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้มาเขียน โปรแกรมตาม โฟซาทของคาลมานฟิลเตอร์ดังภาพที่

4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การออกแบบกาลมานฟิลเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB

กำหนดขนาดของแมกนิจูด ความถี่กลาง ความถี่สุม ย่านความถี่ที่ต้องการ โดยป้อนเข้าทางด้านอินพุตของโปรแกรม

```
A = input('Side of Amplitude = ');
F = input('Center Frequency = ');
Fs = input('Sampling Frequency = ');
bw = input('Band wind Frequency = ');
```

คำนวณหาค่า ความถี่เทียบเคียง จากสมการที่ 4.9

$$w = (2 * \pi * F) / F_s;$$

คำนวณหาค่ารัศมี  $r$  จากสมการที่ 4.21

$$r_1 = 1 - ((bw / F_s) * \pi);$$

คำนวณหาค่าความแปรปรวนเนื่องจากรวด ( $R$ ) และความแปรปรวนระบบค่า ( $Q$ ) จากสมการที่ 4.30 ซึ่งได้มาจากขนาดของ A/D 14 บิตและส่วนประมวลผลเป็น 32 บิต ทำให้ได้ค่าดังนี้

$$Q_0 = 2.36848e-15;$$

$$R_0 = 1.2418E-11;$$

คำนวณหาค่า  $G$  จากสมการที่ 4.17

$$b_0 = (1 - r_1) * \sqrt{1 + r_1^2 - 2 * r_1 * \cos(2 * w)}$$

จัดรูปแบบให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนของการกรองแบบแบนด์แคปได้เป็น

$$a = [b_0 \quad 0];$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = [1 - 2*r1*cos(w) r1^2];$$

เปลี่ยนฟังก์ชันถ่ายโอนให้อยู่ในรูปแบบของสมการสเตตสเปทโดยใช้ฟังก์ชัน

$$[A,B,H,D] = tf2ss(a,b)$$

จากนั้นคำนวณหาค่าเอาต์พุตตามรูปแบบของสมการคาสมานฟิลเตอร์โดยให้สัญญาณที่ป้อนเข้าเป็น  $yy(i)$  ซึ่งมีสัญญาณรบกวนคลื่นไซน์ร่วมกับสัญญาณรบกวน

$$xn1 = A*x_1 - u_3*data2 - u_2*data1 - yy(i);$$

ค่าความแปรปรวนร่วมหาได้จากสมการที่ 3.26

$$P1 = A*P*A' + Q;$$

ค่า อัตราขยายคาสมาน (Kalman Gain) หาได้จากสมการที่ 3.22 หรือ สมการที่ 3.27

$$K = (P1*H')/(H*P1*H' + R0);$$

ค่าที่ได้จากการวัด รวมกับความแปรปรวนที่ได้จากการวัดหาได้จากสมการที่ 3.14

$$mm = H*xn1 + R0;$$

ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณค่าภายหลังต่ำสุด หาได้จากสมการที่ 3.18

$$E = yy(i) - mm;$$

การวัดให้ได้โครงสร้างใหม่ที่ต่ำที่สุดของค่าจริง หาได้จากสมการที่ 3.17

$$x_p = xn1 + K*(e);$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นใหม่ ( $P$ ) เนื่องจากค่าความแปรปรวนเดิมและอัตราขยายคาสมาน ( $K$ ) หาได้จากสมการที่ 3.23

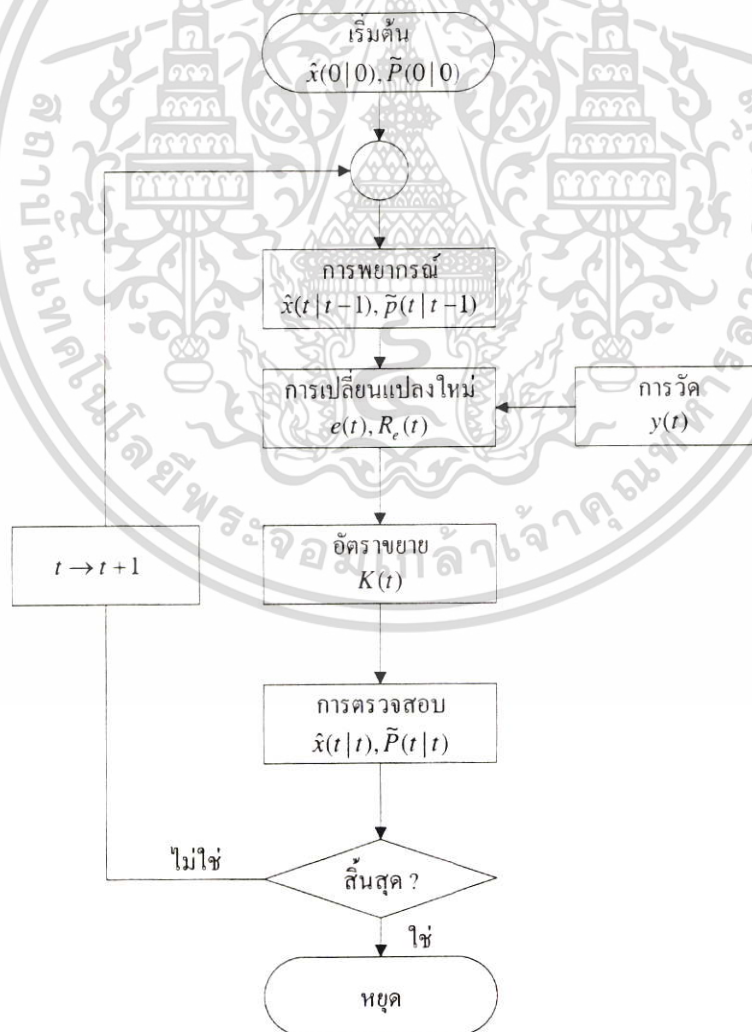
$$P = P1 - K*H*P1;$$

มีการป้อนกลับจากเอาต์พุตปัจจุบันส่งไปยังอินพุตที่จะเป็นก่อนหน้า

$$x_l = x_p;$$

#### 4.5 การออกแบบคาสมานฟิลเตอร์บน TMS 320C31 [7,23]

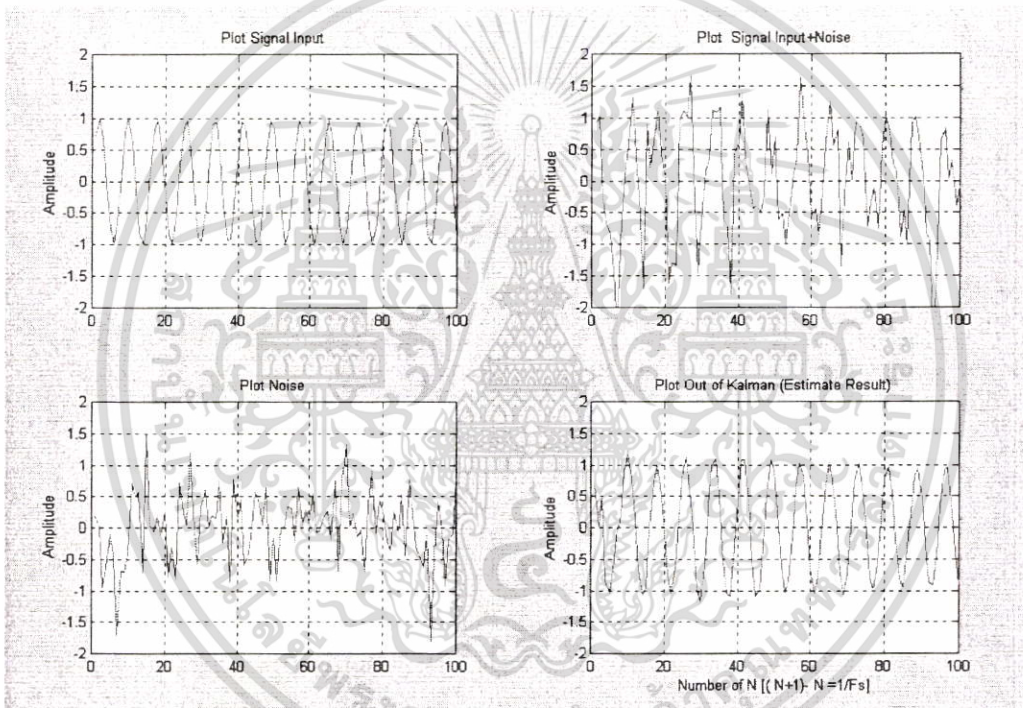
การออกแบบบนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลเขียนเป็นไฟล์ซาร์ทดังภาพที่ 4.7 โปรแกรมการทำงานของตัวกรองความถี่แบบแบนด์แคบแสดงที่ภาคผนวก ข



เอกสารภาพที่ 4.7 ไฟล์ซาร์ทการประมวลผลตัวกรองคาสมานเขาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 ผลทดลองที่สร้างจากโปรแกรม MATLAB [26]

จากการใช้โปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรที่กำเนิดสัญญาณรูปไซน์ ร่วมกับสัญญาณรบกวน แล้วใส่ค่าสมการลงไปใช้อัลกอริทึมของคาลมาน ผลของการทดสอบตามสมการที่ 3. โดยเขียนสมการสัญญาณไซน์ ด้านบนด้านซ้าย เป็นสัญญาณอินพุต และสัญญาณรบกวนด้านล่างซ้าย รวมกันแล้วจะได้เป็นสัญญาณดังภาพด้านบนขวา และสัญญาณภายหลังจากการใช้อัลกอริทึมของสมการคาลมานฟิลเตอร์ตามโพลีชาร์ท ดังภาพที่ 4.7 จะได้เอาต์พุตเป็นดังด้านล่างขวาของภาพที่ 4.8 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแบนด์ ( $\Delta\omega$ ) และค่ารัศมี ( $r$ ) และความถี่ ( $f_s$ ) ดังตารางที่ 4.1

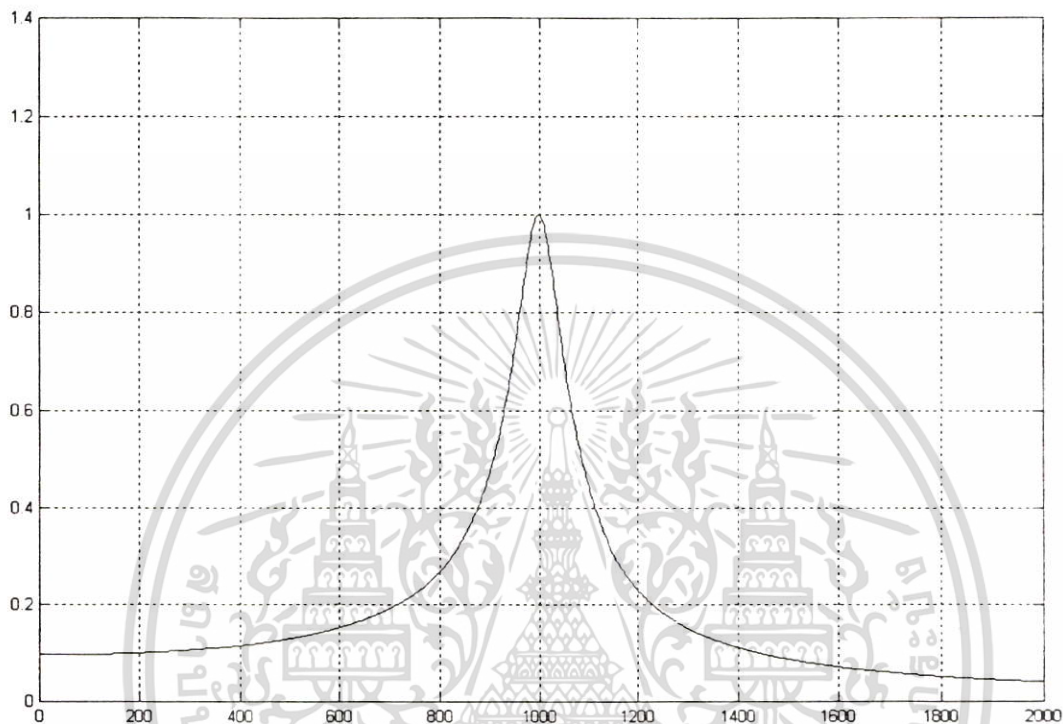


ภาพที่ 4.8 การกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองคาลมาน

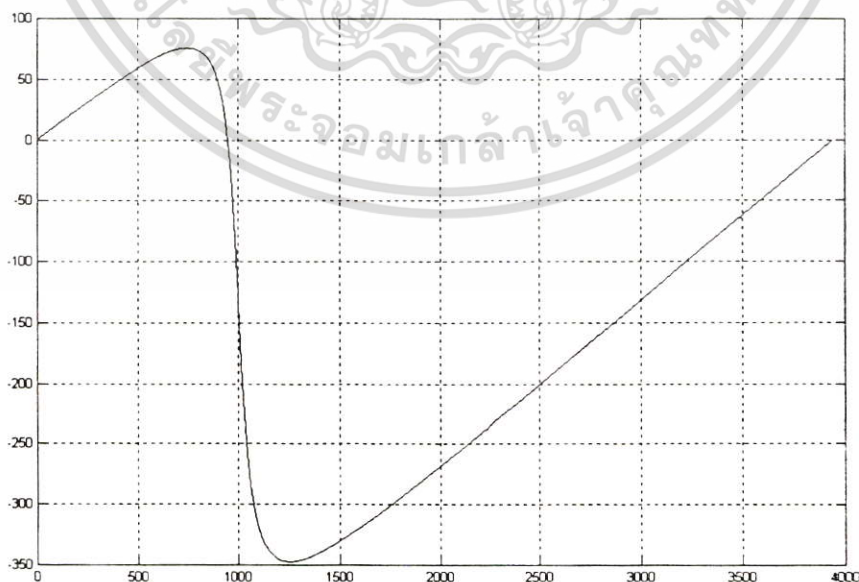
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 ผลตอบสนองทางขนาด และ ผลตอบสนองทางเฟส ย่านความถี่ 1 kHz ที่ความกว้าง เป็น 100 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 7891.41\text{kHz} \quad Bw = 100\text{Hz} \quad r = 0.960190$$



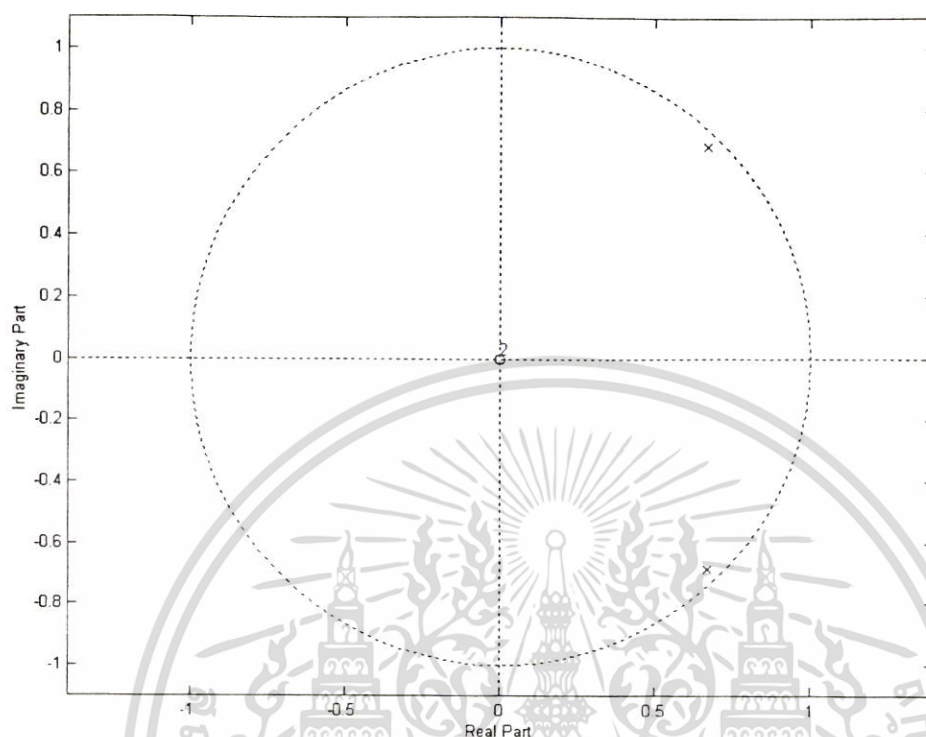
ภาพที่ 4.9 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 100 Hz



ภาพที่ 4.10 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 100 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.2 ตำแหน่งของ โพลและซีโร ที่ย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 100 Hz



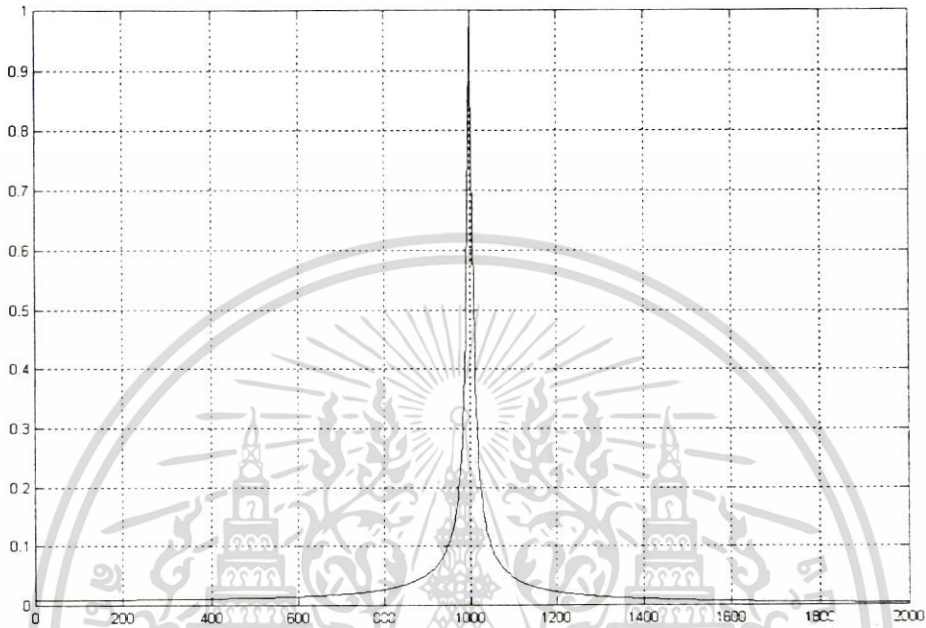
ภาพที่ 4.11 การวางตำแหน่งโพลและซีโร ย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างเป็น 100 Hz

$$r = 0.960190$$

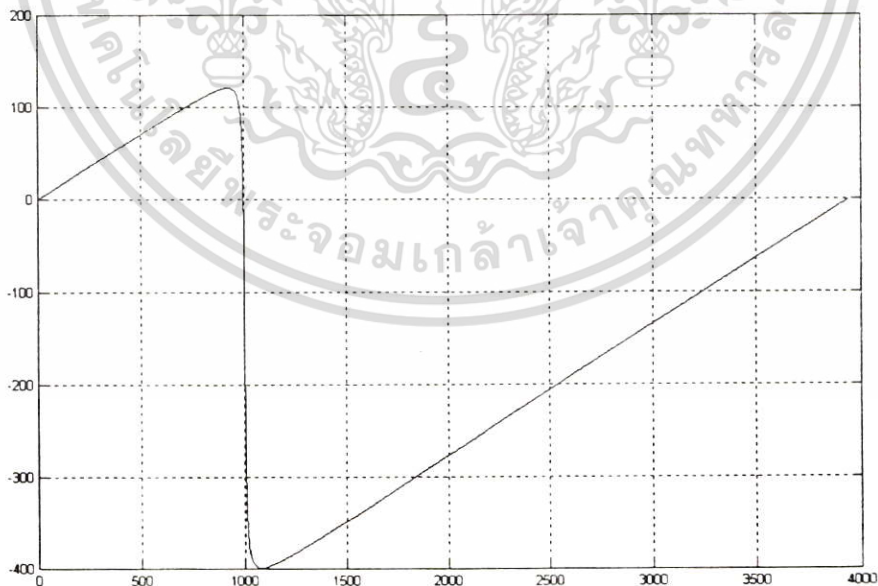
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 ผลตอบสนองทางขนาด และผลตอบสนองทางเฟส ย่านความถี่ 1 kHz ที่ความกว้าง  
เป็น 10 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 7891.41\text{kHz} \quad Bw = 10\text{Hz} \quad r = 0.996019$$



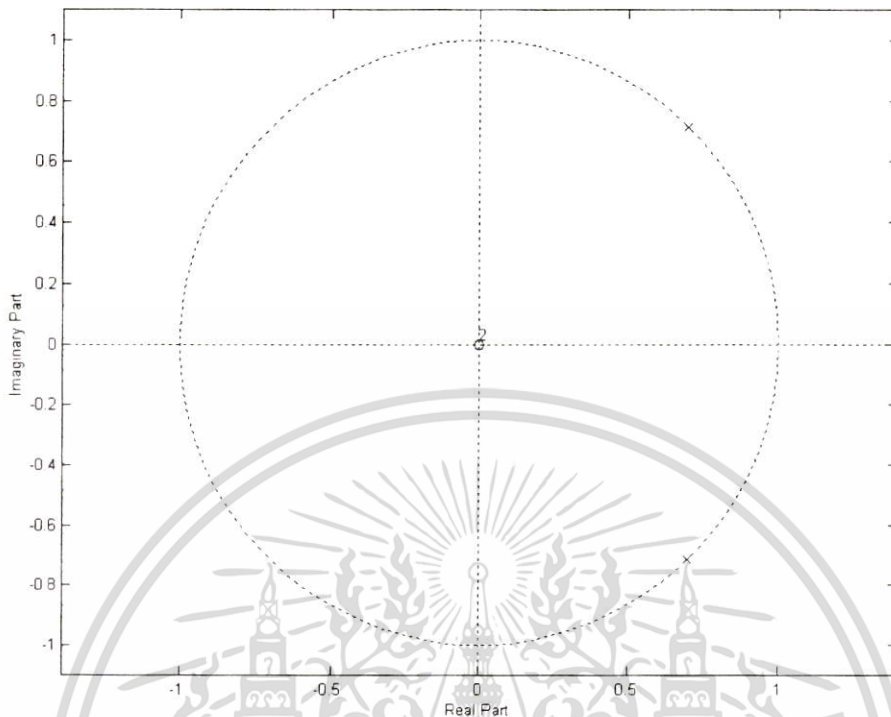
ภาพที่ 4.12 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 10 Hz



ภาพที่ 4.13 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างเป็น 10 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

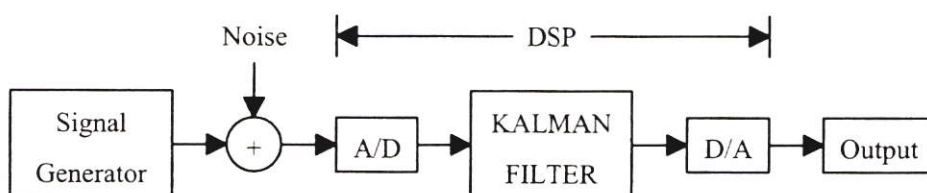
#### 4.6.4 ตำแหน่งของ โพลและซีโร ที่ย่านความถี่ 1 kHz ย่านความถี่ 10 Hz



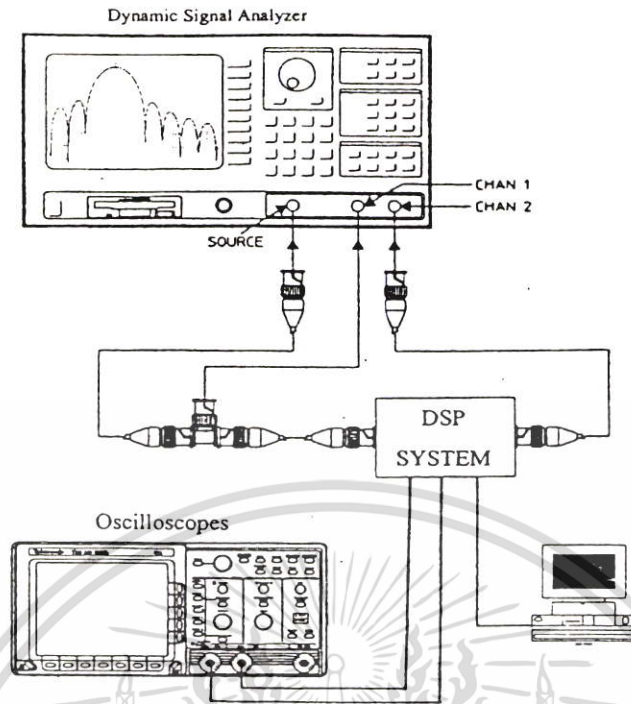
ภาพที่ 4.14 การวางตำแหน่ง โพลและซีโร ย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างเป็น 10 Hz  
 $r = 0.996019$

#### 4.7 ผลการทดลองที่สร้างมาจาก TMS320C31 [7,21]

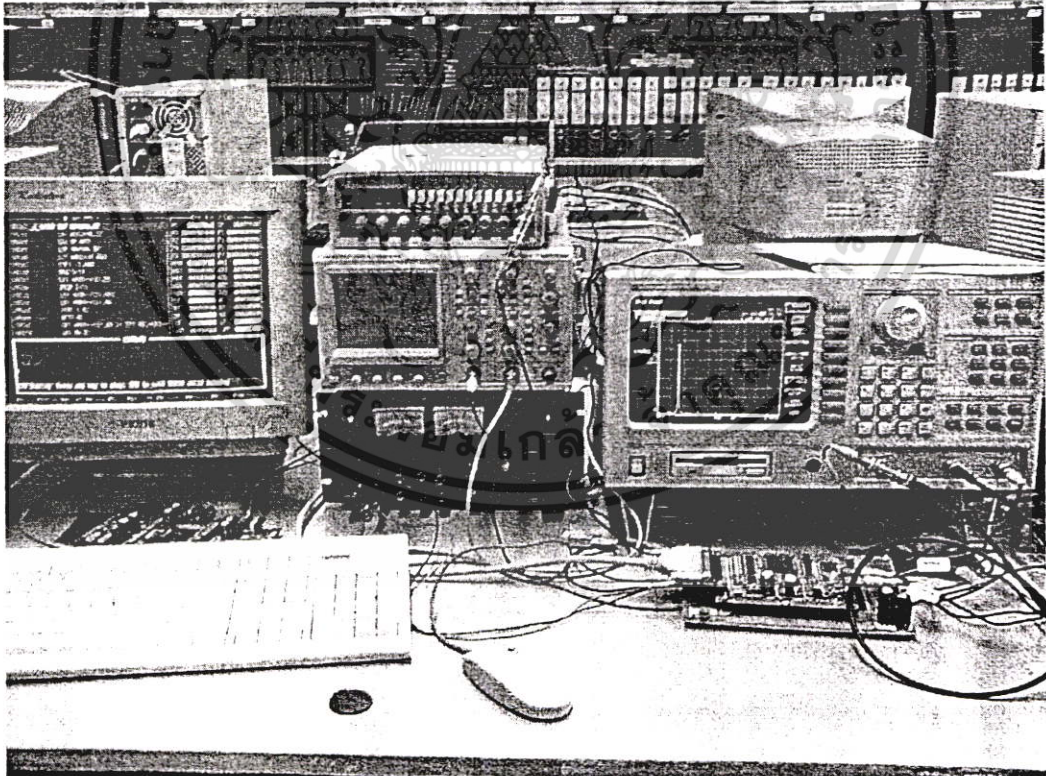
จากภาพที่ 4.15 เป็นไดอะแกรมของการต่อ บอร์ด DSPTMS320C31 เข้ากับสัญญาณอินพุต (รายละเอียดการสร้างบอร์ดแสดงที่ภาคผนวก ก) โดยสัญญาณนี้จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ร่วมกับสัญญาณรบกวนต่อเข้ากับอินพุตของส่วนของการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล และต่อเอาต์พุตเข้ากับอินพุตของส่วนประมวลผลคาลมานฟิลเตอร์ และต่อออกไปยังส่วนที่จะแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกโดยต่อไปยังส่วนของเอาต์พุตซึ่งเครื่องมือวัด ภาพที่ 4.16 แสดงการต่ออุปกรณ์เข้ากับเครื่องมือ และวงจรการวัดจริงด้วย Dynamic Signal Analyzer Model 35665A แสดงดังภาพที่ 4.17



เอกภาพที่ 4.15 ไดอะแกรมการต่อ DSP เข้ากับสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 การต่อสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตเข้ากับบอร์ดและเครื่องมือวัดเข้ากับบอร์ด

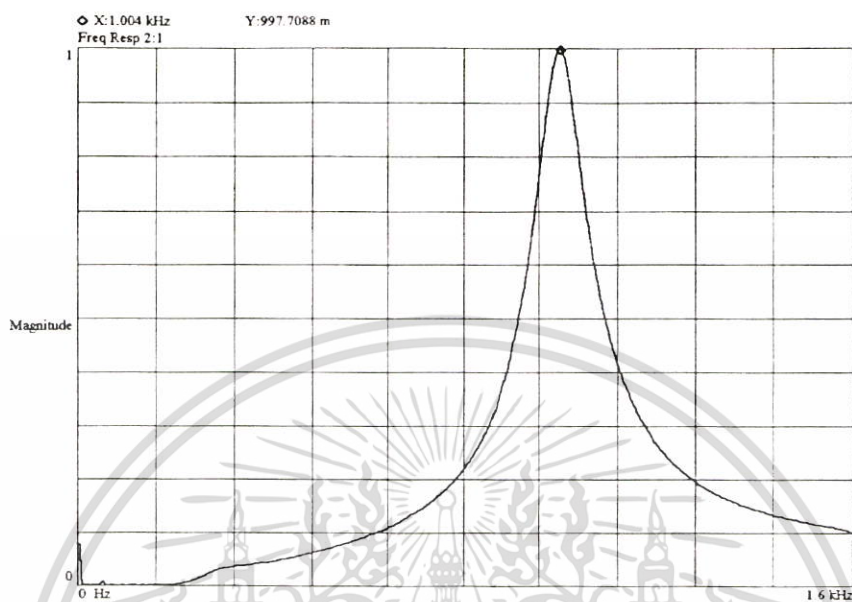


ภาพที่ 4.17 วงจรการวัดจริงด้วย Dynamic Signal Analyzer Model 35665A

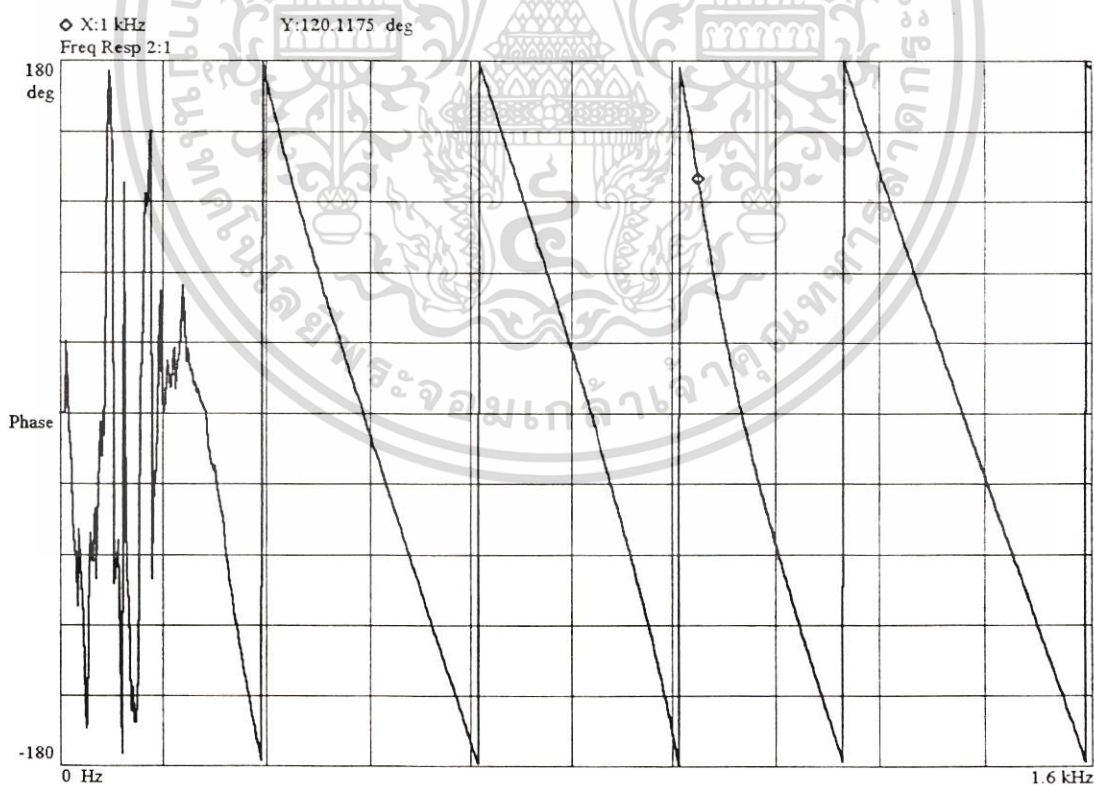
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.1 ผลตอบสนองขนาด และผลตอบสนองเฟส ที่ความถี่ 1 kHz ที่ความกว้างเป็น 100 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 7891.41\text{kHz} \quad Bw = 100\text{Hz} \quad r = 0.960190$$



ภาพที่ 4.18 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 100 Hz

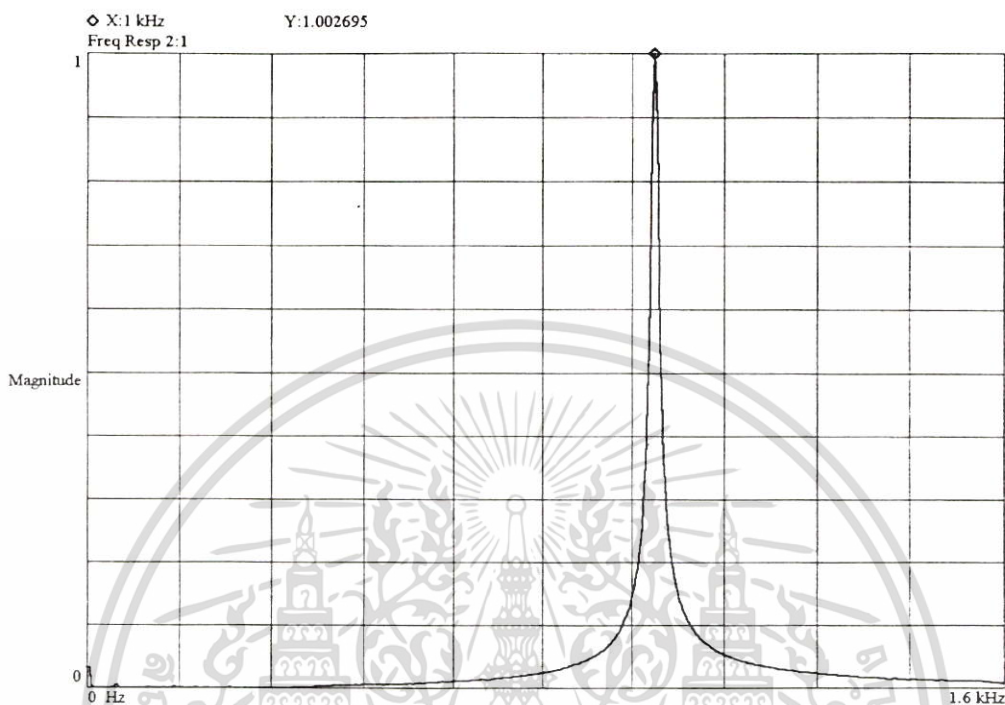


ภาพที่ 4.19 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 100 Hz

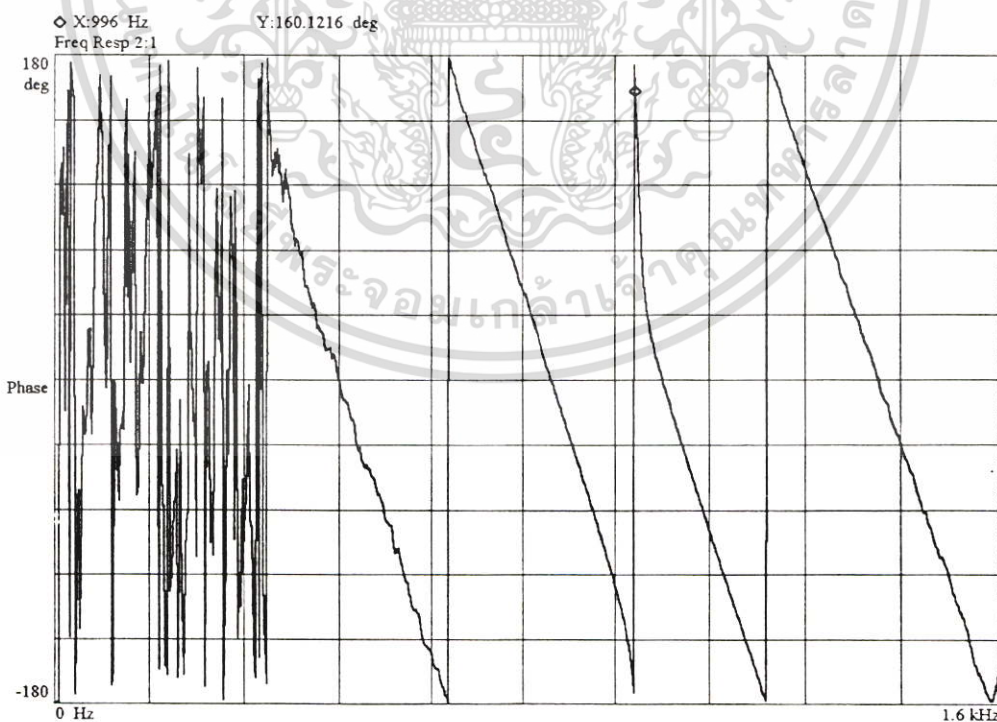
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 ผลตอบสนองทางขนาดและผลตอบสนองเฟส ที่ความถี่ 1 kHz ที่ความกว้างเป็น 10Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 7891.41\text{kHz} \quad B_w = 10\text{Hz} \quad r = 0.996019$$



ภาพที่ 4.20 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 10 Hz

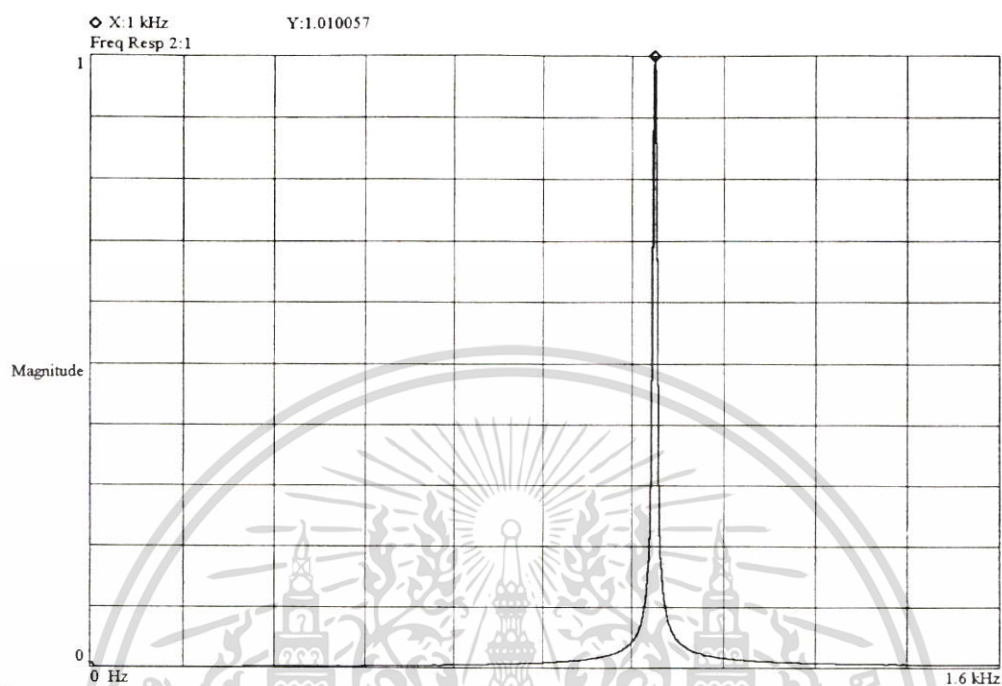


ภาพที่ 4.21 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 10 Hz

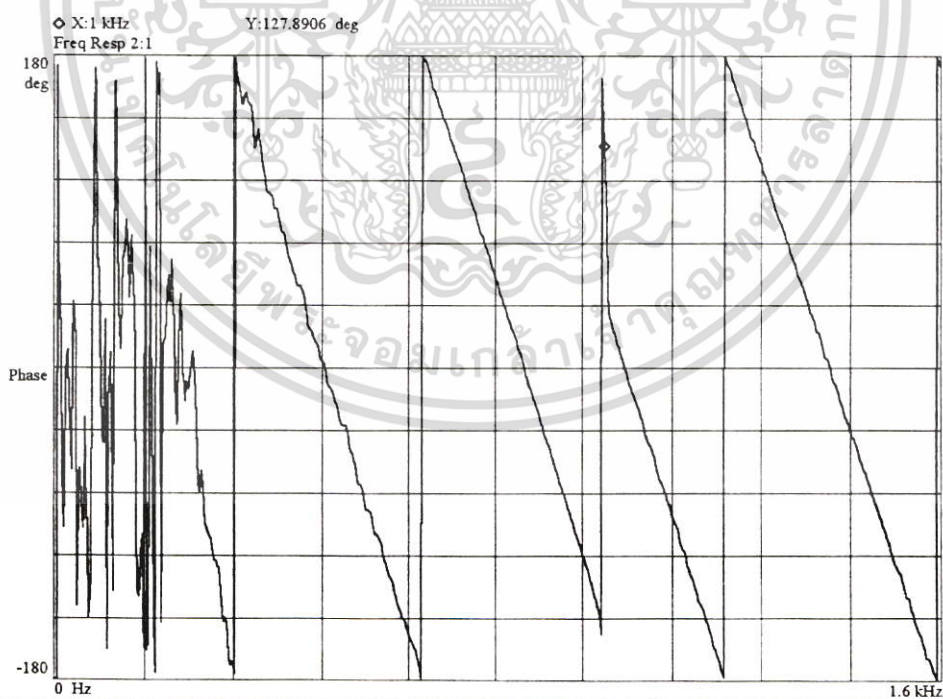
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.7.3 ผลตอบสนองความถี่ และ เฟส ที่ความถี่ 1 kHz ที่ความกว้างเป็น 1 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 7891.41\text{kHz} \quad B_w = 1\text{Hz} \quad r = 0.996019$$



ภาพที่ 4.22 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 1 Hz

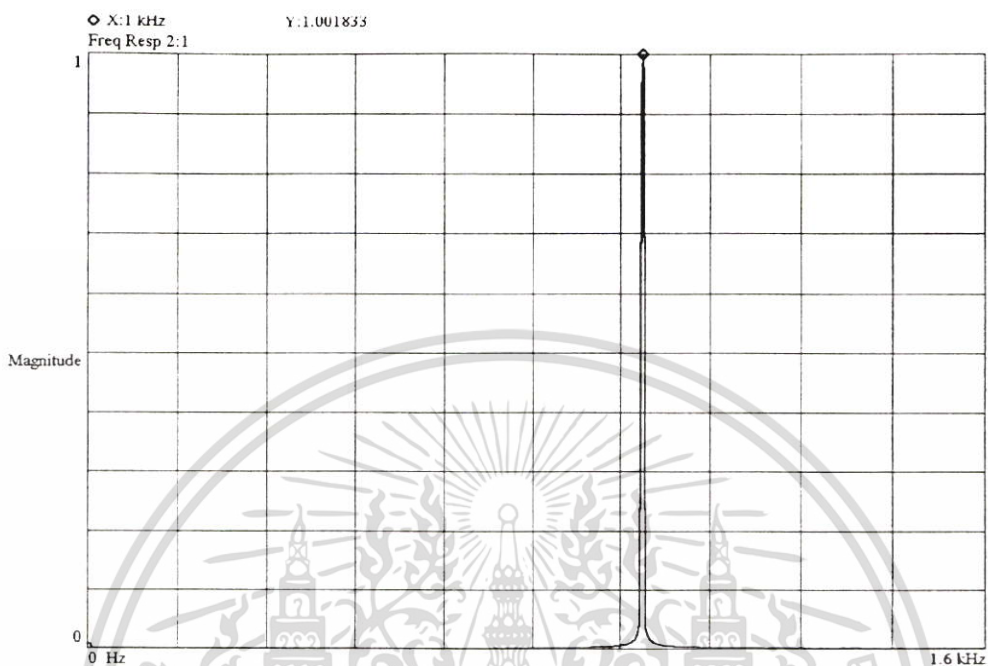


ภาพที่ 4.23 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 1 Hz

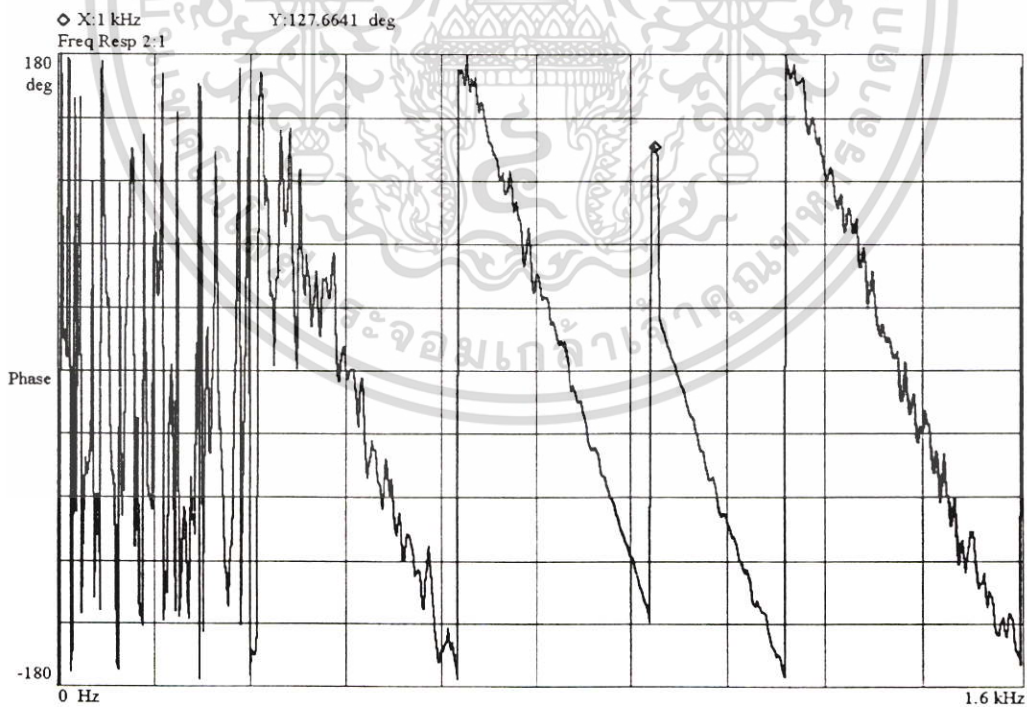
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.4 ผลของผลตอบสนองความถี่และเฟส ที่ความถี่ 1 kHz ที่ความกว้างเป็น 0.1 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 7891.41\text{kHz} \quad Bw = 0.1\text{Hz} \quad r = 0.999960$$



ภาพที่ 4.24 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.1 Hz

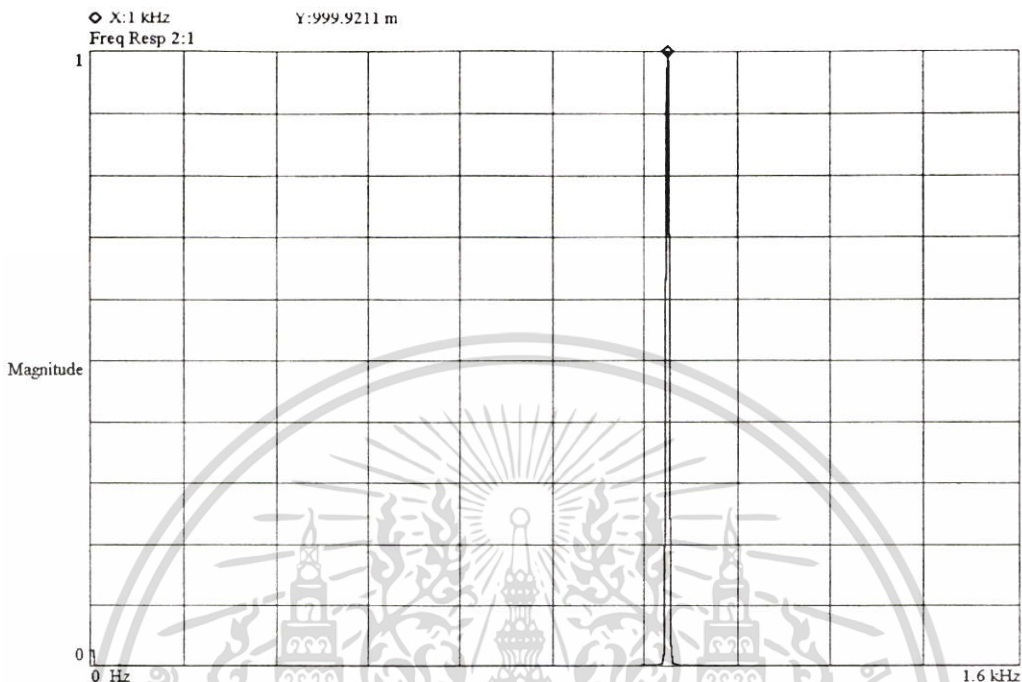


ภาพที่ 4.25 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.1 Hz

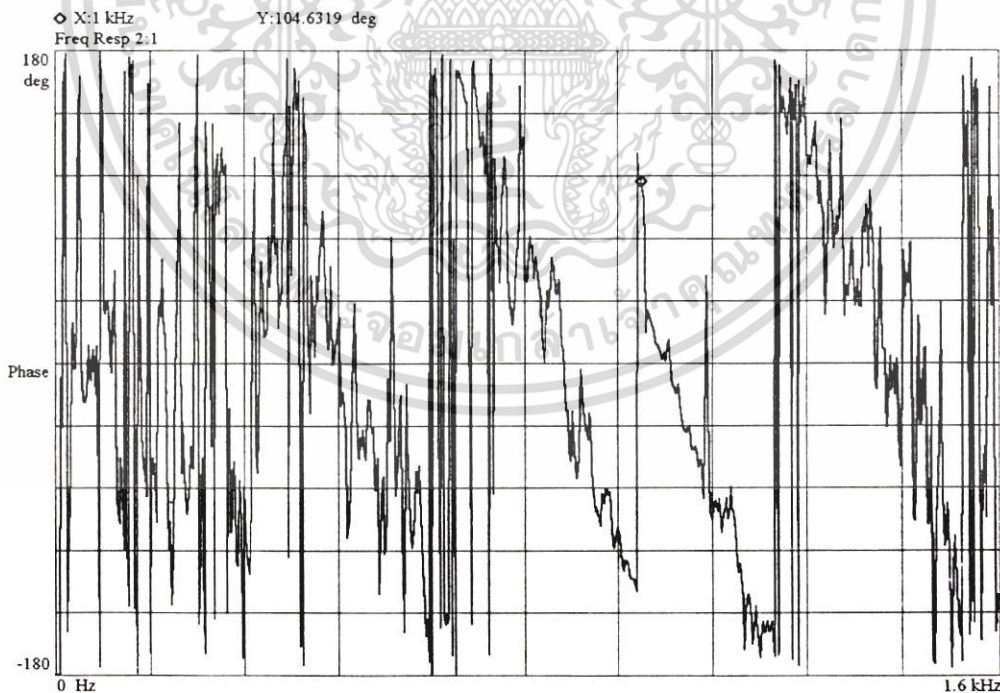
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.5 ผลของผลตอบสนองความถี่ และเฟส ที่ความถี่ 1 KHz ที่ความกว้างเป็น 0.01 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 7891.41\text{kHz} \quad Bw = 0.01\text{Hz} \quad r = 0.999996$$



ภาพที่ 4.26 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.01 Hz

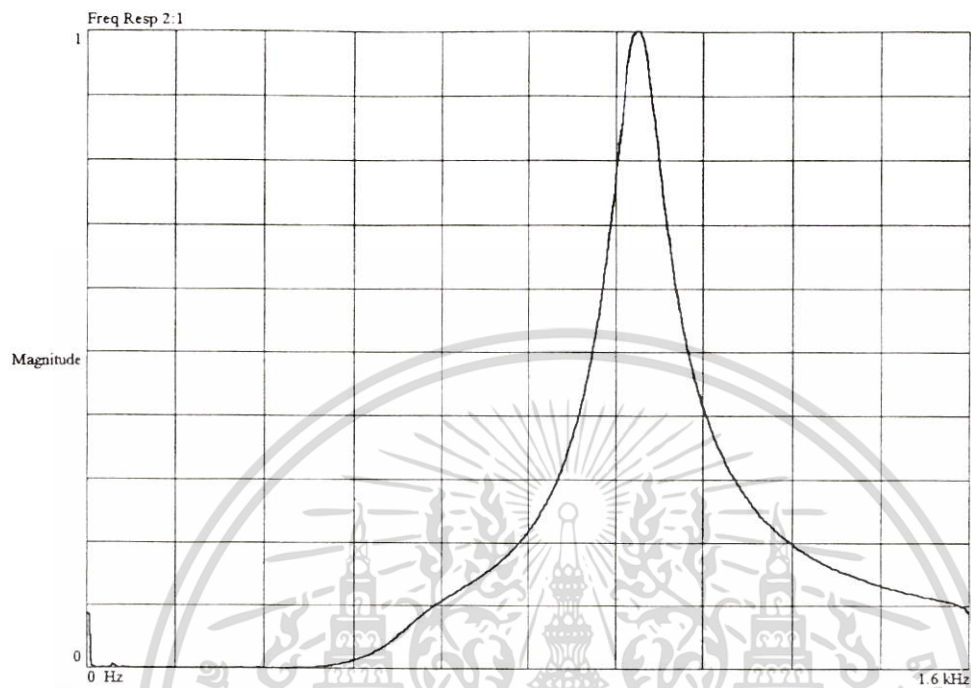


ภาพที่ 4.27 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.01 Hz

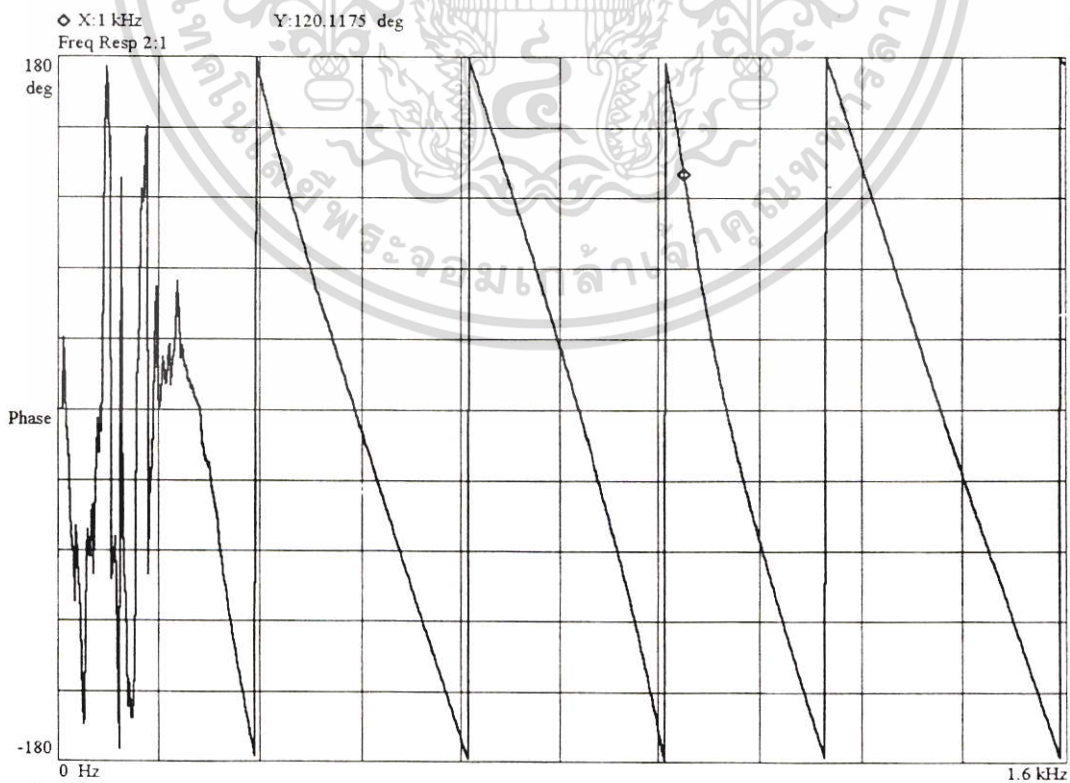
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.6 ผลตอบสนองขนาด และผลตอบสนอง เฟส ที่ความถี่ 1 kHz ที่ความกว้างเป็น 100 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 20,161.29\text{Hz} \quad Bw = 100\text{Hz} \quad r = 0.984418$$



ภาพที่ 4.28 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 100 Hz

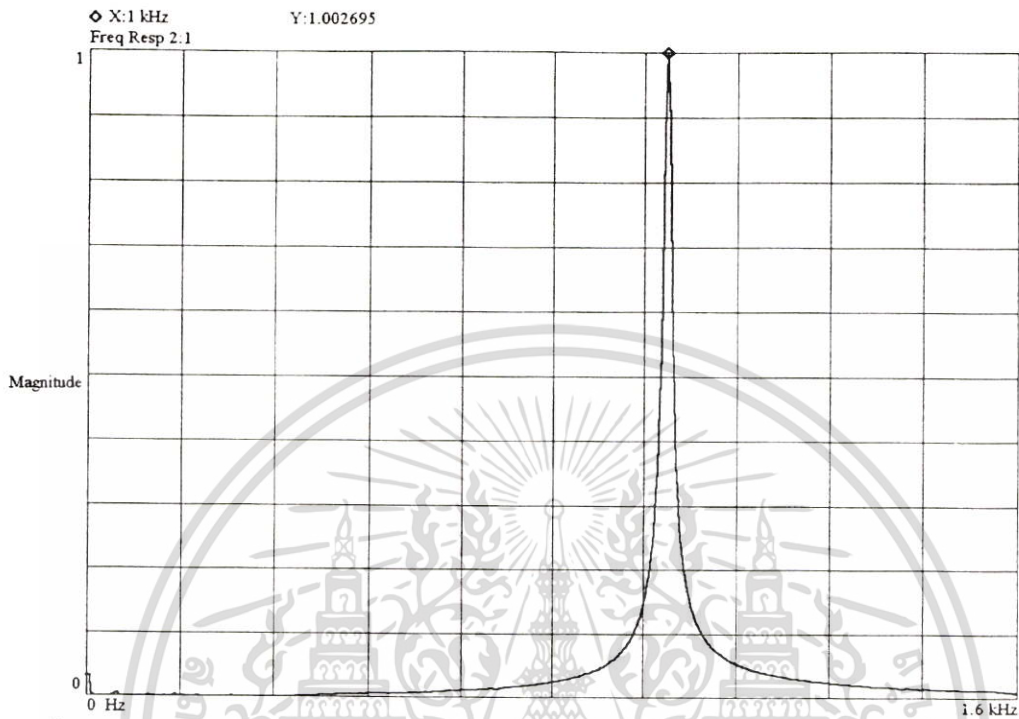


ภาพที่ 4.29 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 100 Hz

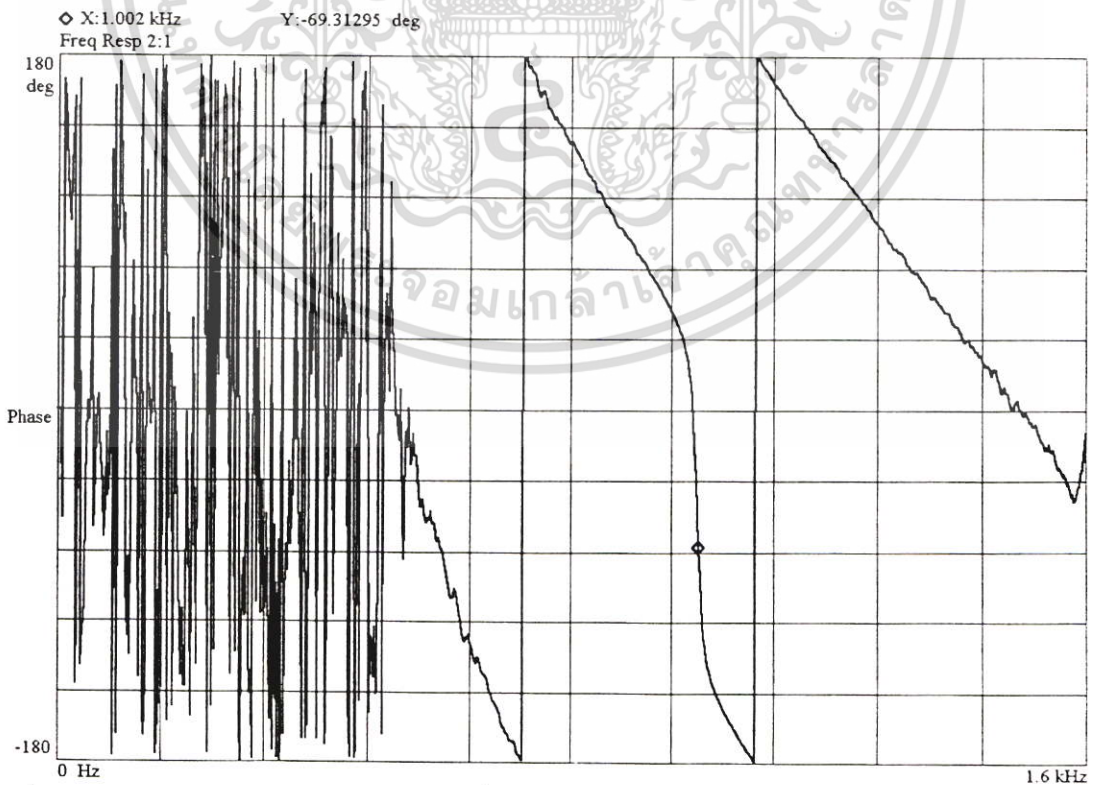
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นได้โปรดใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.7 ผลตอบสนองขนาด และผลตอบสนอง เฟส ที่ความถี่ 1 kHz ที่ความกว้างเป็น 10 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 20,161.29\text{Hz} \quad Bw = 10\text{Hz} \quad r = 0.998442$$



ภาพที่ 4.30 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 10 Hz

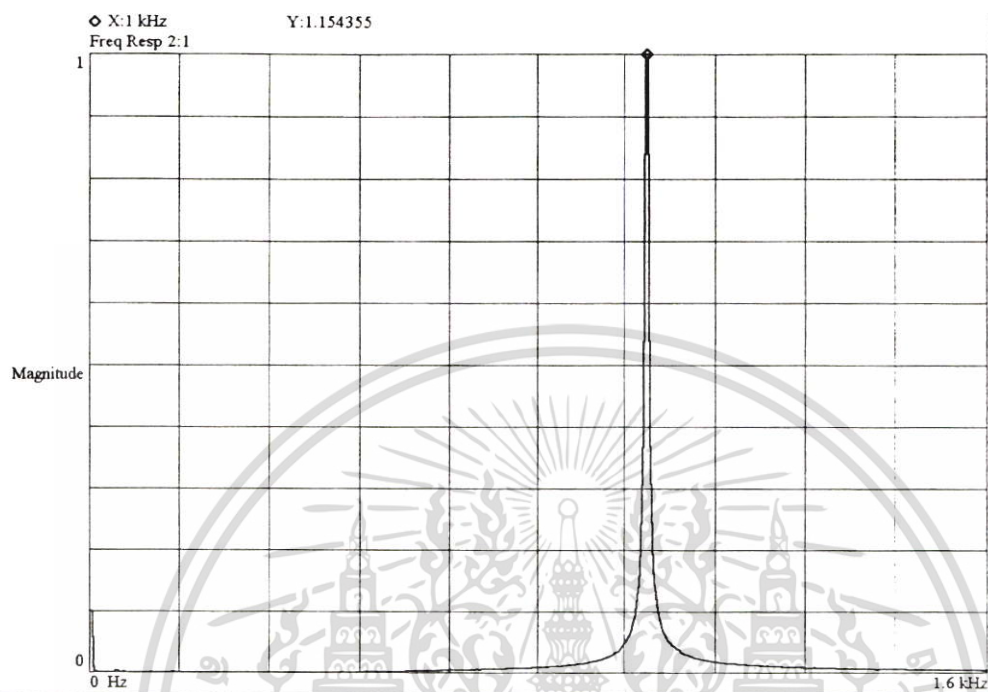


ภาพที่ 4.31 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 10 Hz

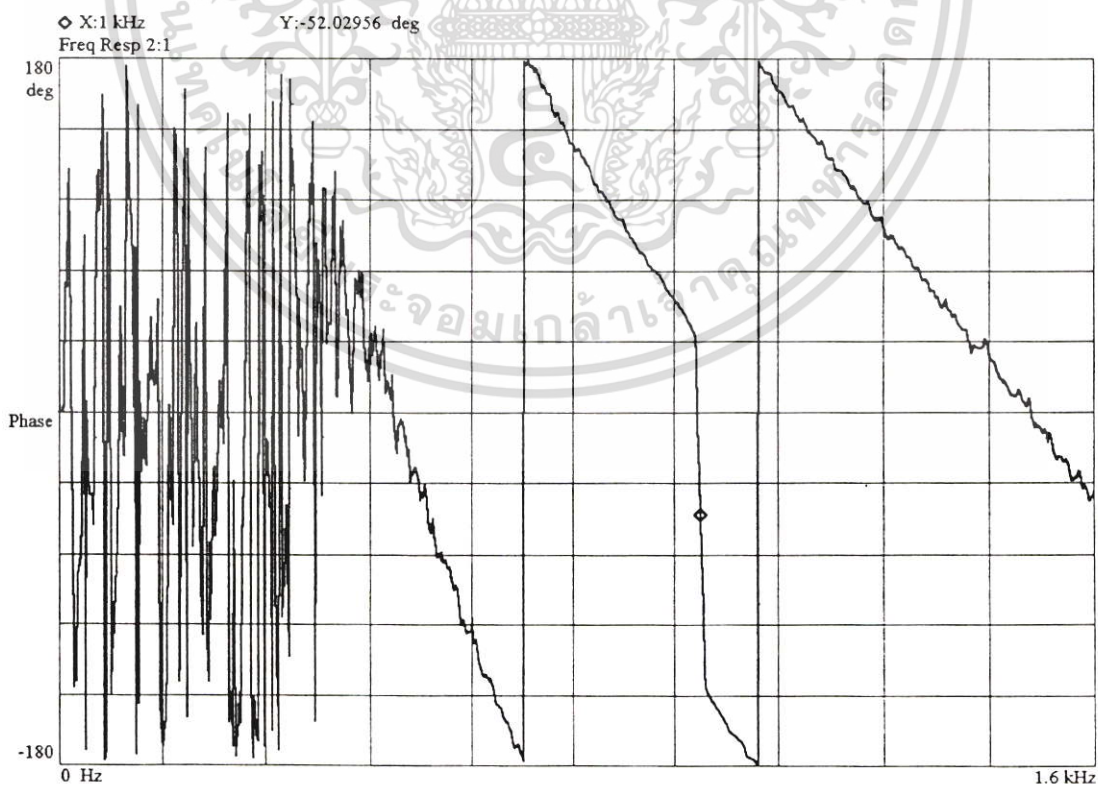
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.8 ผลตอบสนองขนาด และผลตอบสนอง เฟส ที่ความถี่ 1 kHz ที่ความกว้างเป็น 1 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 20,161.29\text{Hz} \quad Bw = 1\text{Hz} \quad r = 0.999844$$



ภาพที่ 4.32 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 1 Hz

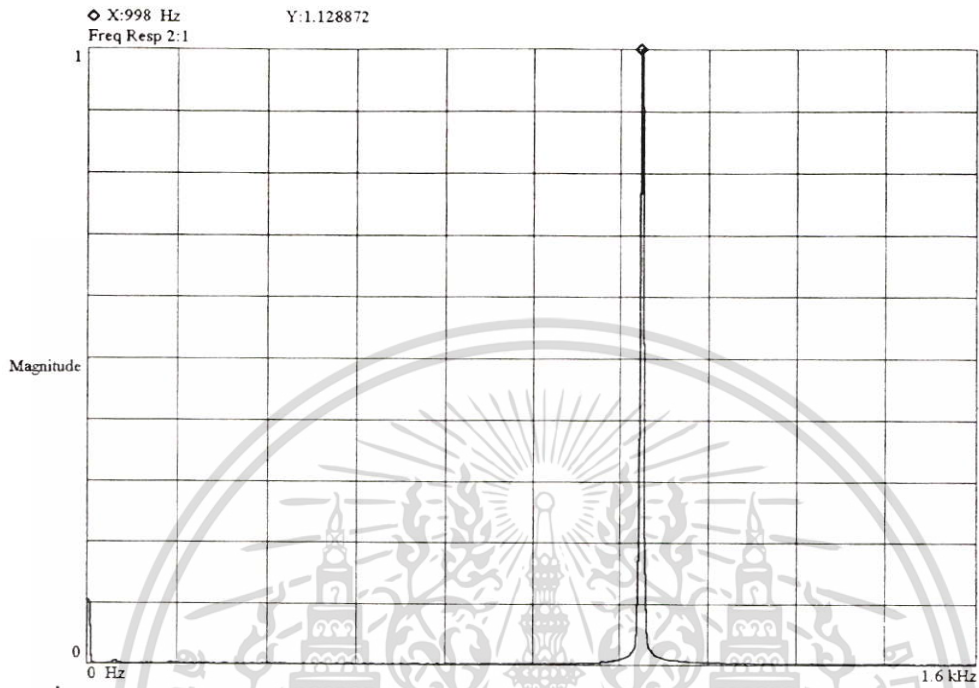


ภาพที่ 4.33 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 1 Hz

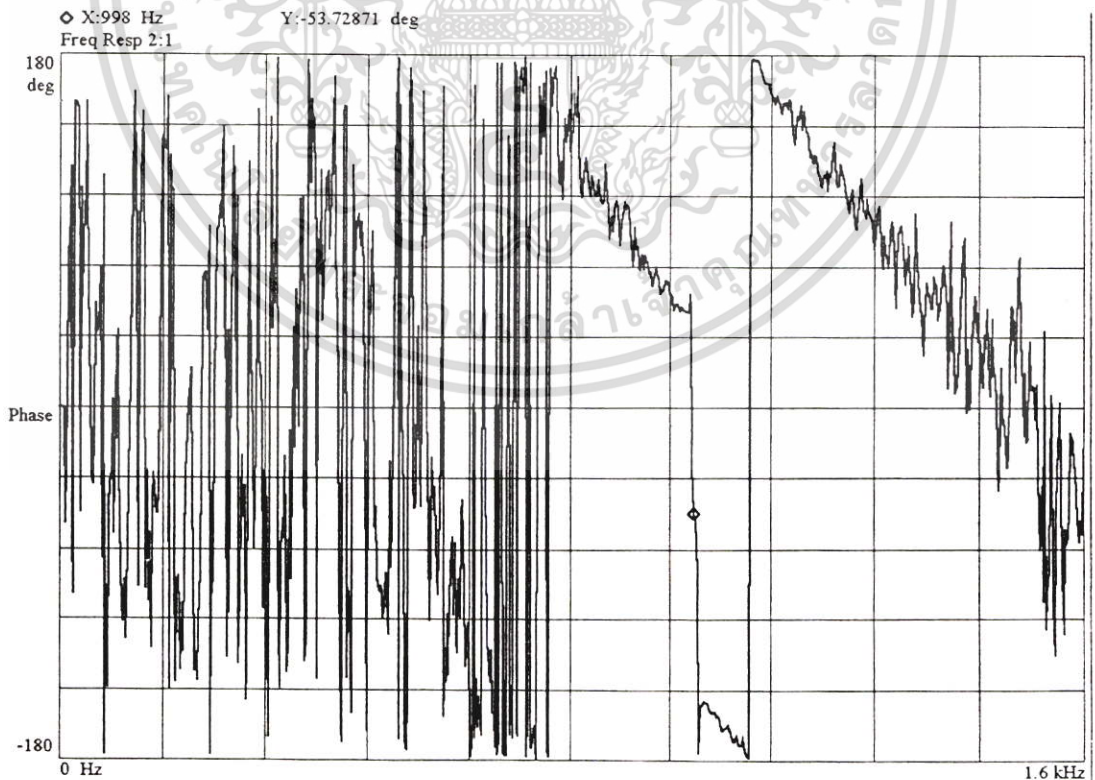
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.9 ผลตอบสนองขนาด และผลตอบสนอง เฟส ที่ความถี่ 1 kHz ที่ความกว้างเป็น 0.1 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 20,161.29\text{Hz} \quad Bw = 0.1\text{Hz} \quad r = 0.999984$$



ภาพที่ 4.34 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.1 Hz

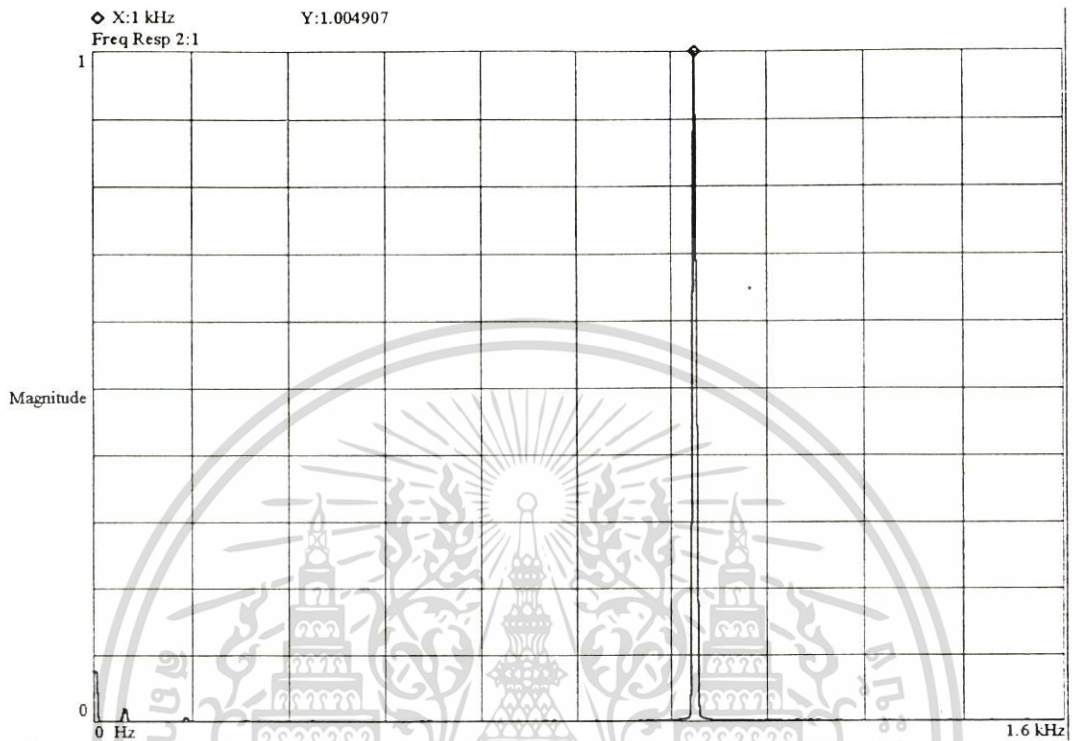


ภาพที่ 4.35 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.1 Hz

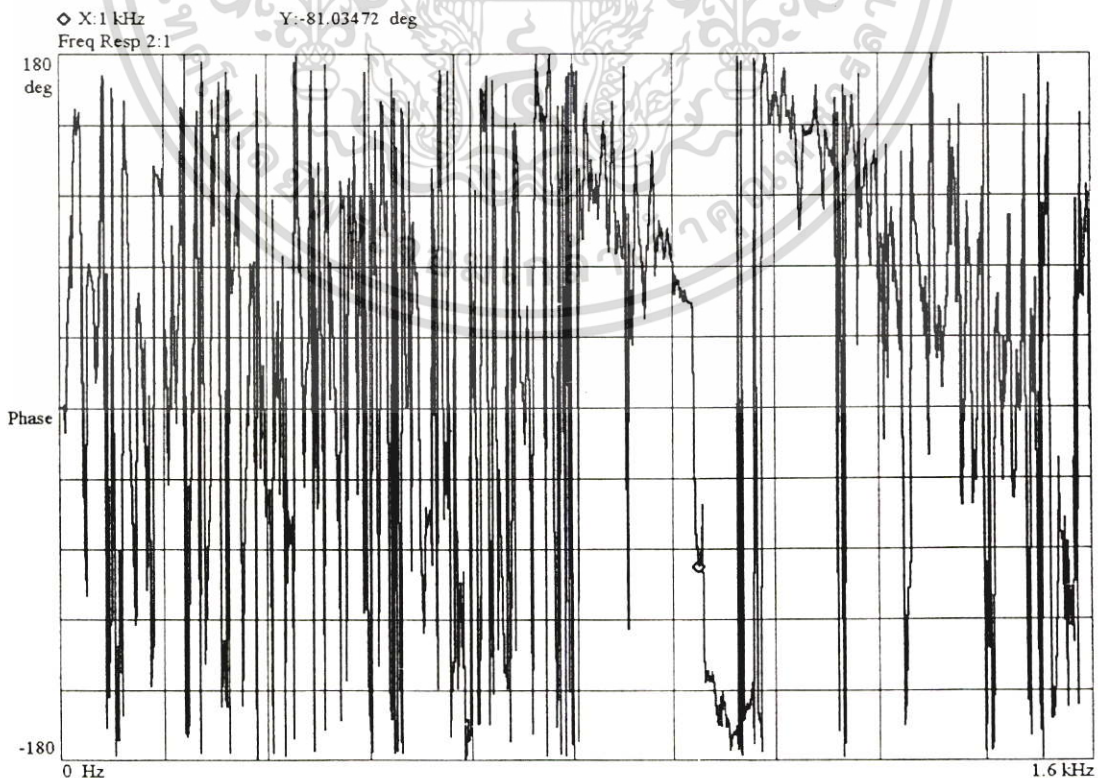
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.10 ผลตอบสนองขนาด และผลตอบสนอง เฟส ที่ความถี่ 1 kHz ที่ความกว้างเป็น 0.01 Hz

$$f_c = 1\text{kHz} \quad f_s = 20,161.29\text{Hz} \quad Bw = 0.01\text{Hz} \quad r = 0.999998$$



ภาพที่ 4.36 ผลตอบสนองทางขนาดย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.01 Hz



เอกสารภาพที่ 4.37 ผลตอบสนองทางเฟสย่านความถี่ 1 kHz ความกว้างความถี่ 0.01 Hz ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแบนด์ ( $\Delta\omega$ ) และค่ารัศมี ( $r$ ) และความถี่ ( $f_s$ )

ความถี่ ( $f_s$ ) เป็น 7891.41 Hz		ความถี่ ( $f_s$ ) เป็น 20161.29 Hz	
ความกว้างแบนด์	รัศมี ( $r$ )	ความกว้างแบนด์	รัศมี ( $r$ )
0.01	0.999996	0.01	0.999998
0.1	0.999960	0.1	0.999984
1	0.999602	1	0.999844
2	0.999204	2	0.999688
3	0.998806	3	0.999533
4	0.998408	4	0.999377
5	0.998009	5	0.999221
6	0.997611	6	0.999065
7	0.997213	7	0.998909
8	0.996815	8	0.998753
9	0.996417	9	0.998598
10	0.996019	10	0.998442
50	0.980095	50	0.992209
60	0.976114	60	0.990651
70	0.972133	70	0.989092
80	0.968152	80	0.987534
90	0.964171	90	0.985976
100	0.960190	100	0.984418

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ความถี่แบบแบนด์แคบสามารถสร้างได้จากสมการที่เป็นแบบโมเดลชายนันในแบบ คัพเปิ้ล และแบบตรง โดยทั้งสองแบบกำหนดความถี่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์นั้นได้จากการวางตำแหน่งของโพลและซีโรภายในวงกลม 1 หน่วย พบว่าเมื่อวางซีโรอยู่ที่จุดเริ่มต้นและตำแหน่งของโพลเข้าใกล้วงกลม 1 หน่วย ยิ่งใกล้วงกลม 1 หน่วยแล้วจะมีผลให้ความกว้างแบนด์แคบลง นอกจากนี้แล้วจะทำให้ผลการตอบสนองทางขนาดทางเอาต์พุตมีค่าใกล้อินพุตมากขึ้น และผลการตอบสนองทางเฟสจะเป็นเชิงเส้น แต่เมื่อมีการเปลี่ยนซีโรจากจุดเริ่มต้นไปตามแนวรัศมีของโพลแล้วจะมีผลทำให้เฟสไม่เป็นเชิงเส้นและการตอบสนองทางขนาด จะมีค่าสูงมากขึ้นตัวกรองคาสมาทฟิลเตอร์ช่วยให้การประมาณค่าจากอินพุตที่รับเข้ามาแล้ว ทำการคำนวณหาค่าอัตราขยายคาสมาทที่เหมาะสมสำหรับปรับให้ได้ตามโมเดลหรือฟังก์ชันโอนถ่ายของระบบนั้น อัตราขยายคาสมาทแปรผกผันกับความแปรปรวนร่วมระบบการวัดเมื่อสัญญาณรบกวนเป็นศูนย์ และอัตราขยายคาสมาทจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อความแปรปรวนร่วมคลาดเคลื่อนก่อนหน้าประมาณค่าเป็นศูนย์ซึ่งทำให้เอาต์พุตของลำดับขั้นต่อไปมีสัญญาณเหมือนกับอินพุตหรือ โมเดลรูปเดิมหรือประมาณค่าเดียวกัน

ดังนั้นจากการวางตำแหน่งโพลและซีโรเป็นส่วนกำหนดความถี่ ความถี่ ขนาดและเฟสของสัญญาณ สัญญาณรบกวนจะถูกกำจัดโดยการประมาณค่าอัตราขยายคาสมาท สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางขนาดของสัญญาณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงซีโรนั้น ผู้วิจัยเข้าใจว่าน่าจะมีการปรับปรุงและดำเนินการต่อไปได้แต่ในการวิจัยนี้มีได้กล่าวถึงไว้ การลดทอนสัญญาณรบกวนจะดีขึ้นสามารถปรับจากขนาดของความแปรปรวนร่วมการวัด และความแปรปรวนร่วมของระบบ ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้คงจะมีประโยชน์สำหรับผู้สนใจ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. B. Kenedyand and A. M. Neville, Basic Statistical Methods for Engineers and Scientists, Harper & Row Publishers, Inc., 1986.
- [2] P. G. Hoel, Introduction to mathematical statistics, John Wiley & Sons Inc., 1971.
- [3] ศันสนีย์ สุภากา, ความน่าจะเป็นและสถิติประยุกต์สำหรับวิศวกรสำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2539.
- [4] R. E. Mortensen, Random Signals and Systems, John Wiley & Sons, Inc.,
- [5] Brian, D. O. Andersonand, J. B. Moore, Optimal Filter, Prentice-Hall, 1979.
- [6] J. G. Proakisand, D. G. Manolakis, Digital Signal Processing, Prentice Hall ,1996
- [7] TMS320C3X User's Guide, Texas Instrument Inc., Dallas, Tx, 1997.
- [8] P. D. Hanlonand, P. S. Maybeck, " Characterization of Kalman filter residuals in the presence of Mismodeling", IEEE Trans Aerospace and Electronic system, Vol. 36, No. 1, Jan., 2000.
- [9] S. Haykin and L. Li, " Modified Kalman Filtering, "IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 42, No. 5, May., 1994.
- [10] C. M. Kwanand and F. L. Lewis, "A Note on Kalman Filtering," IEEE Trans. Education, Vol. 42, No. 3, Aug., 1999.
- [11] D. Guo, H. Chen and Y. Dai, " A Novel adaptive Kalman Filtering Algorithm for Arma Signal," IEEE Conference on Computer and Communication Systems, Sep., 1990 Hongkong.
- [12] P. Grohanand and S. Marcos, " Structures and Performances of Several Adaptive Kalman Equalizers," IEEE Digital Signal Processing, Sep. 1996.
- [13] B. S. Chenand and Y.L. Chen, "Multirate Modeling of AR/MA Stochastic Signals and Its Application to the Combined Estimation-Interpolation Problem," IEEE Trans. Signal Processing , Vol. 43, No. 10, Oct.,1995.
- [14] P.J. Hargrave, "A Tutorial Introduction to Kalman Filtering," IEE Colloquim on Kalman Filter Introduction Applications and developments, 1989.
- [15] G. Chen, "A Simple Treatment for Suboptimal Kalman Filtering in case Measurement Data Missing," IEEE Trans Aerospace and Electronic System, Vol. 26, No. 2 Mar., 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] M.Harashima, L.A.Ferrariand P.V. Sankar, "Spline Approximation Using Kalman Filter State Estimation," IEEE Trans. Circuit and System, Vol 44, No. 5, May 1997.
- [17] G.Doblinger, "An Adaptive Kalman Filter for the Enhancement of noisy AR signal," IEEE International Symposium on 05/31/1998-06/03/1998, Volume: 5, 31 May-3 June 1998
- [18] A. Nehorai and P. Stoica, "Adaptive algorithms for constrained ARMA signals in the presence of noise," IEEE Trans. Acoust., Speechand Signal Processing, Vol. ASSP-36, pp. 1282-1291, Aug. 1988.
- [19] วัลลภ สุระกำพลธร, การประมวลผลสัญญาณเชิงเลขสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2533.
- [20] เอก ไชยสวัสดิ์, สัญญาณและระบบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538.
- [21] ไพรัช ชัยพงษ์, การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลคอนการออกแบบวงจรกรองดิจิทัลศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2535.
- [22] R.G. Brown, P.Y.C Hwang, "Introduction to Random Signals and Applied Kalman filter," 1997.
- [23] Texas Instruments, "Minimizing Quantization Effects Using the TMS320 Digital Signal Processor Family," 1994.
- [24] Texas Instruments, "TMS320C3x DSP Starter Kit,"1996.
- [25] F.L. Lewis, "Optimal Estimation with an Introduction to Stochastic Control Theory," School of Electrical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, 1986.
- [26] J.V. Candy, "Signal Processing Yhe Model-Based Approach," Lawrence Livermore National Laboratory and University of Santa Clara, USA, 1986.
- [27] M.S. Grewal, A.P. Andrews, Kalman Filtering theory and practice using Matlab, John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [28] S.J. Orfanidis, Introduction Signal Processing, Prentice Hall International Inc.,1996.
- [29] B. Porat, A Course in Digital Signal Processing, John Wiley & Sons, Inc.,1997.
- [30] G.F. Franklin, J. D. Powell and M.L. Workman, Digital control of dynamic system, Addison Wesley Publishing Company, Inc.,1990

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

## การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์

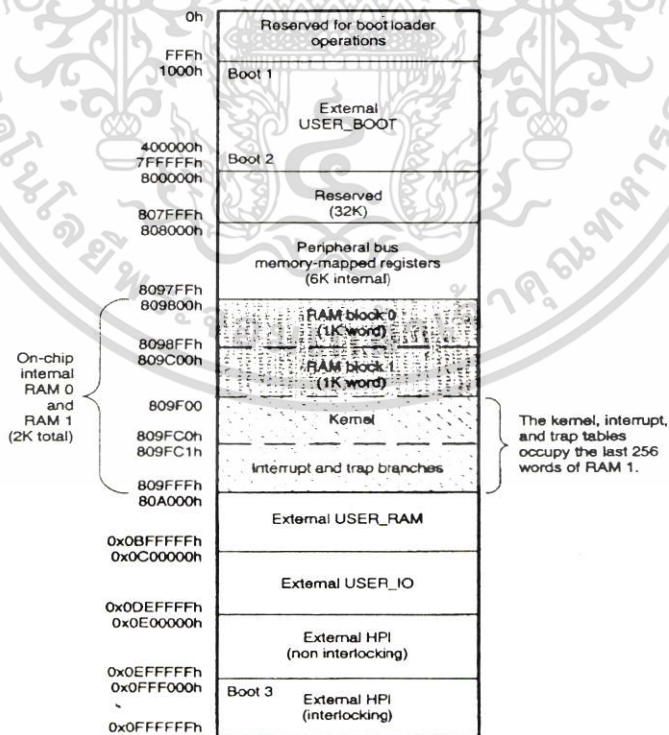


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

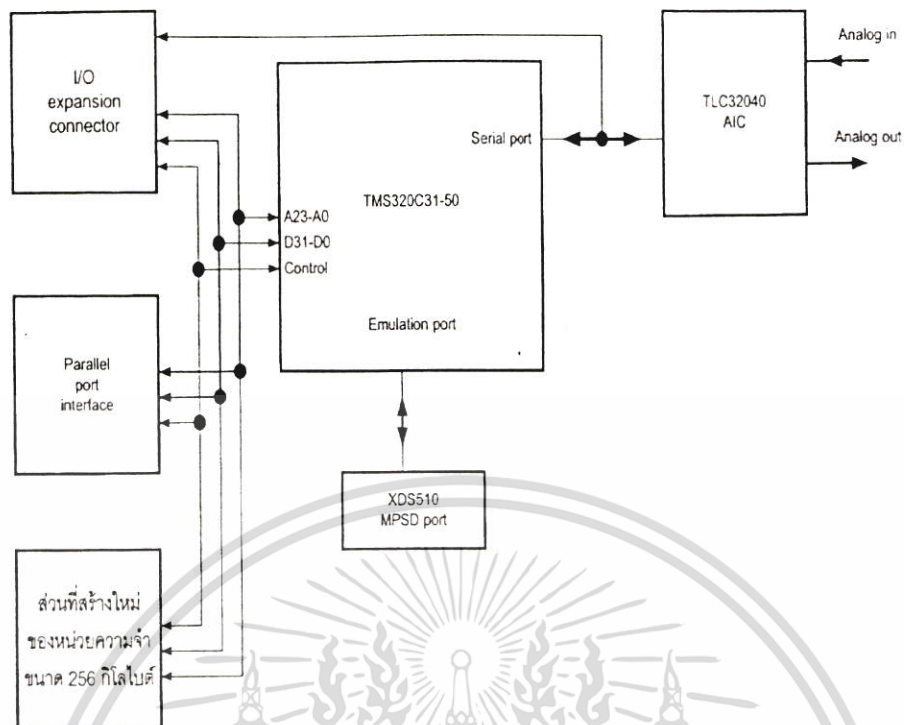
### การขยายหน่วยความจำ

จากแผนที่หน่วยความจำของ Starter kit TMS320C31 ดังภาพภาคผนวกที่ 1 ประกอบด้วยหน่วยความจำภายใน หน่วยความจำภายนอก และส่วนที่เป็นพื้นที่พอร์ท ส่วนเป็นหน่วยความจำแรมที่อยู่ภายในมีอยู่ 2 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีขนาด 1 กิโลเวิร์ด (32 บิต) และตำแหน่งของข้อมูลชุดที่ 1 อยู่ในช่วงตั้งแต่ตำแหน่ง 809800H ถึง 809C00H และข้อมูลชุดที่ 2 อยู่ระหว่าง 809C00H ถึง 809FC0H เมื่อเป็นแบบไมโครโปรเซสเซอร์สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกได้จาก 00000H ถึง 7FFFFFFH หรือ จาก 80A000H ถึง FFFFFFFH และเมื่อเป็นไมโครคอมพิวเตอร์แล้วจะสามารถขยายจาก 10000H ถึง 7FFFFFFH หรือจาก 80A000H ถึง FFFFFFFH จากพื้นที่ของหน่วยความจำดังกล่าว ได้ใช้หน่วยความจำที่เป็นแรม ที่ขยายเพิ่มเป็น 256 กิโลไบต์ โดยใช้ตำแหน่ง 10000H - 1FFFFFFH โดยสัญญาณที่ใช้สำหรับการต่อของ TMS320C31 นั้นคือต่อกับขาตำแหน่ง ขาข้อมูล และขาควบคุมแสดงดังภาพภาคผนวกที่ 2 ไดอะแกรม TMS320C31 และส่วนขยายหน่วยความจำขนาด 256 กิโลไบต์



ภาพภาคผนวกที่ 1 แผนที่หน่วยความจำ ของ Starter kit TMS320C31

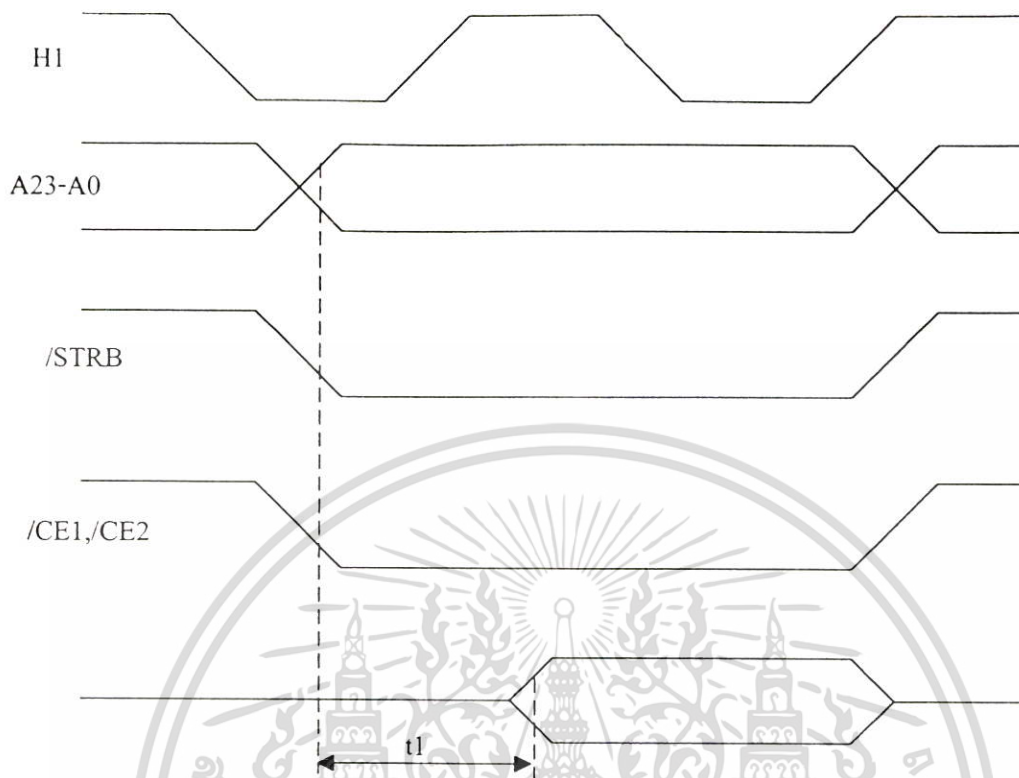
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพภาคผนวกที่ 2 แสดงไคอะแกรม TMS320C31 และส่วนขยายหน่วยความจำขนาด 256 กิโลไบต์

จากไคอะแกรมสามารถสร้างเป็นวงจรได้ดังภาพภาคผนวกที่ 2 ในการออกแบบจำเป็นต้องเลือกขนาดแรมให้เหมาะสม โดยพิจารณาจากสัญญาณที่จะทำงานก็คือสัญญาณ  $\overline{\text{STRB}}$  และสัญญาณตำแหน่ง (Address) ที่อยู่ในช่วงใช้งานสำหรับการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก เมื่อเป็นการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำภายนอกนั้นสามารถใช้สัญญาณตำแหน่งและสัญญาณ R/W ทำงานที่สภาวะลอจิกสูงร่วมกับสัญญาณ  $\overline{\text{STRB}}$  โดยนำสัญญาณทั้งสามเป็นอินพุทให้กับอุปกรณ์ลอจิกเกต (IC9) และต่อเอาท์พุท (/CE1,/CE2) ของอุปกรณ์ลอจิกเกต เข้ากับอินพุท /CE ของหน่วยความจำภายนอกที่เป็นแรม (IC1-IC8) ส่วนสัญญาณ R/W ต่อกับขา /W ของหน่วยความจำภายนอก และสัญญาณ R/W ต่อกับอินเวอร์เตอร์แล้วนำเอาท์พุทที่ได้ต่อเข้ากับขา /OE ของหน่วยความจำภายนอก ช่วงเวลาของการเข้าถึงข้อมูล t1 (Access Time) ของ DSP TMS320C31 ประมาณ 50 ns ดังนั้นความเร็วของการเข้าถึงข้อมูลของหน่วยความจำภายนอกที่ต้องการต่อรวมจะต้องมีความเร็วกว่าช่วงเวลาการเข้าถึงข้อมูลของ DSP TMS320C31 เวลาของการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำภายนอกแสดงดังภาพภาคผนวกที่ 3 และสมการของอุปกรณ์ลอจิกเกตสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



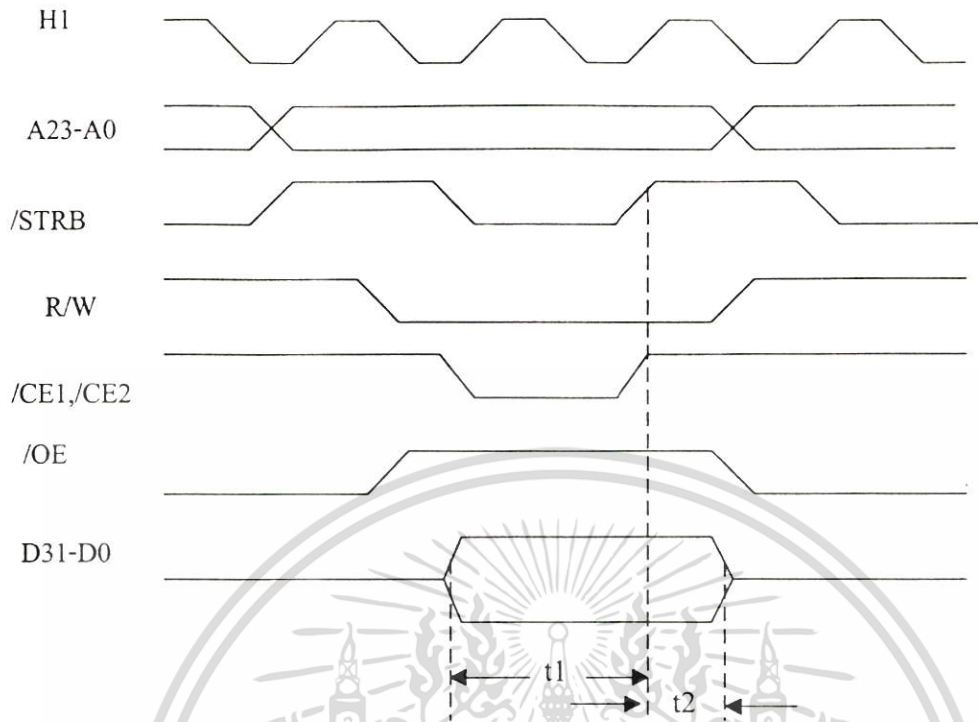
ภาพภาคผนวกที่ 3 เวลาสำหรับอ่านหน่วยความจำภายนอก

$$/CE1 = /STRB * A23 * A22 * A21 * A20 * A19 * A18 * A17 * A16 * A15 \quad (1)$$

$$/CE2 = /STRB * A23 * A22 * A21 * A20 * A19 * A18 * A17 * A16 * A15 \quad (2)$$

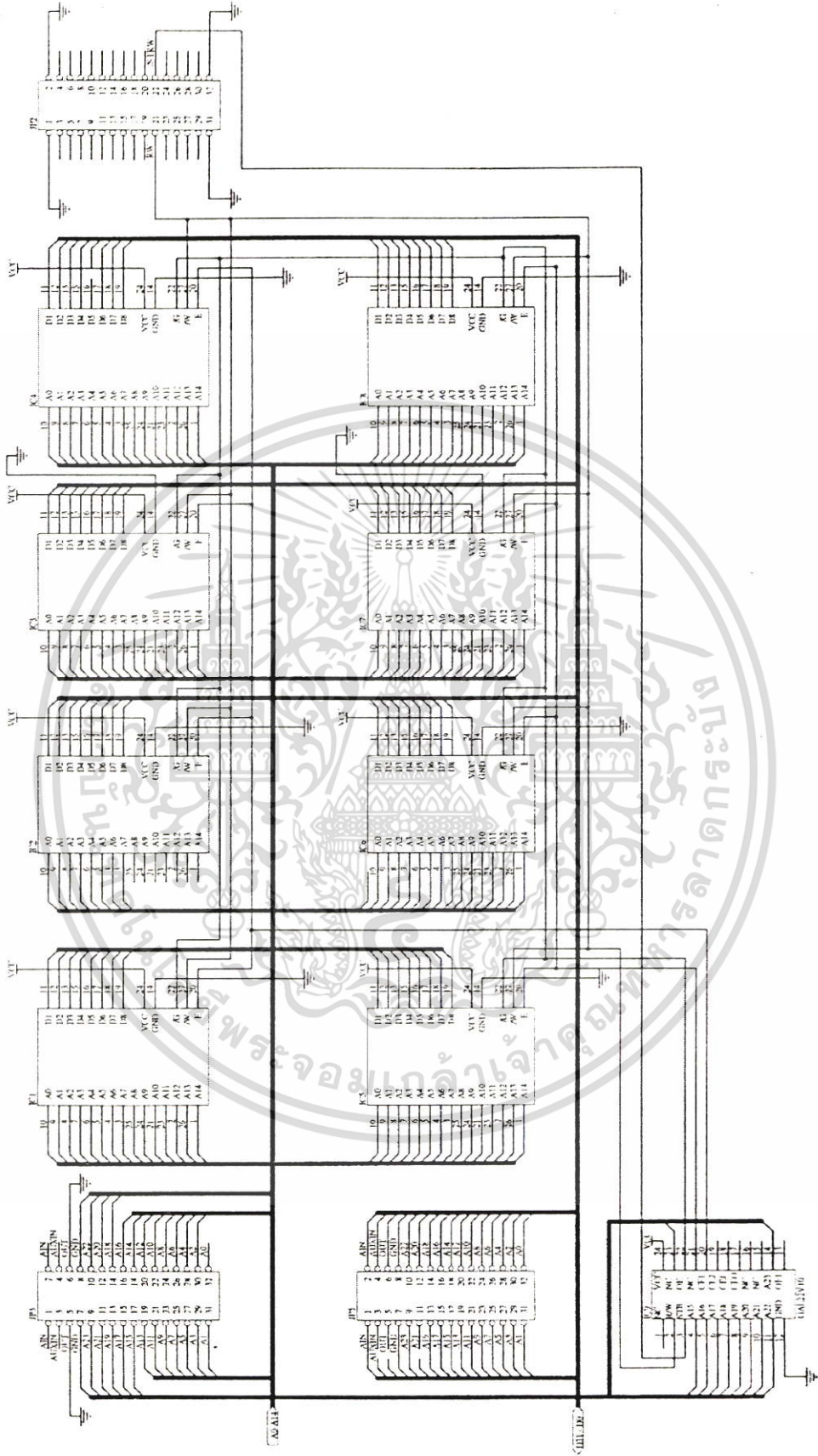
$$OEF = /RW \quad (4)$$

เมื่อมีทำการเขียนข้อมูลเกิดขึ้นทำให้สัญญาณที่ทำงานก็คือสัญญาณ R/W อยู่ในสภาวะลอจิกโล ดังนั้นจึงนำสัญญาณตำแหน่ง และสัญญาณ STRB และสัญญาณ R/W มาทำการแอนดด้วยกัน แล้วนำสัญญาณเอาต์พุต (/CE1, CE2) ที่ได้ต่อเข้ากับขา /CS ของหน่วยความจำภายนอก เวลาสำหรับข้อมูลคงสภาวะไว้เป็นเวลาของ  $t1$  เป็น 50 ns และเวลา  $t2$  เป็น 20 ns เวลาการทำงานของ การเขียนลงหน่วยความจำ แสดงได้ดังภาพภาคผนวกที่ 4 และ สัญญาณความถี่สุ่ม ของโปรแกรมกาลมานแสดงดังภาพภาคผนวกที่ 10 และภาพภาคผนวกที่ 11



ภาพภาคผนวกที่ 4 เวลาสำหรับเขียนหน่วยความจำ

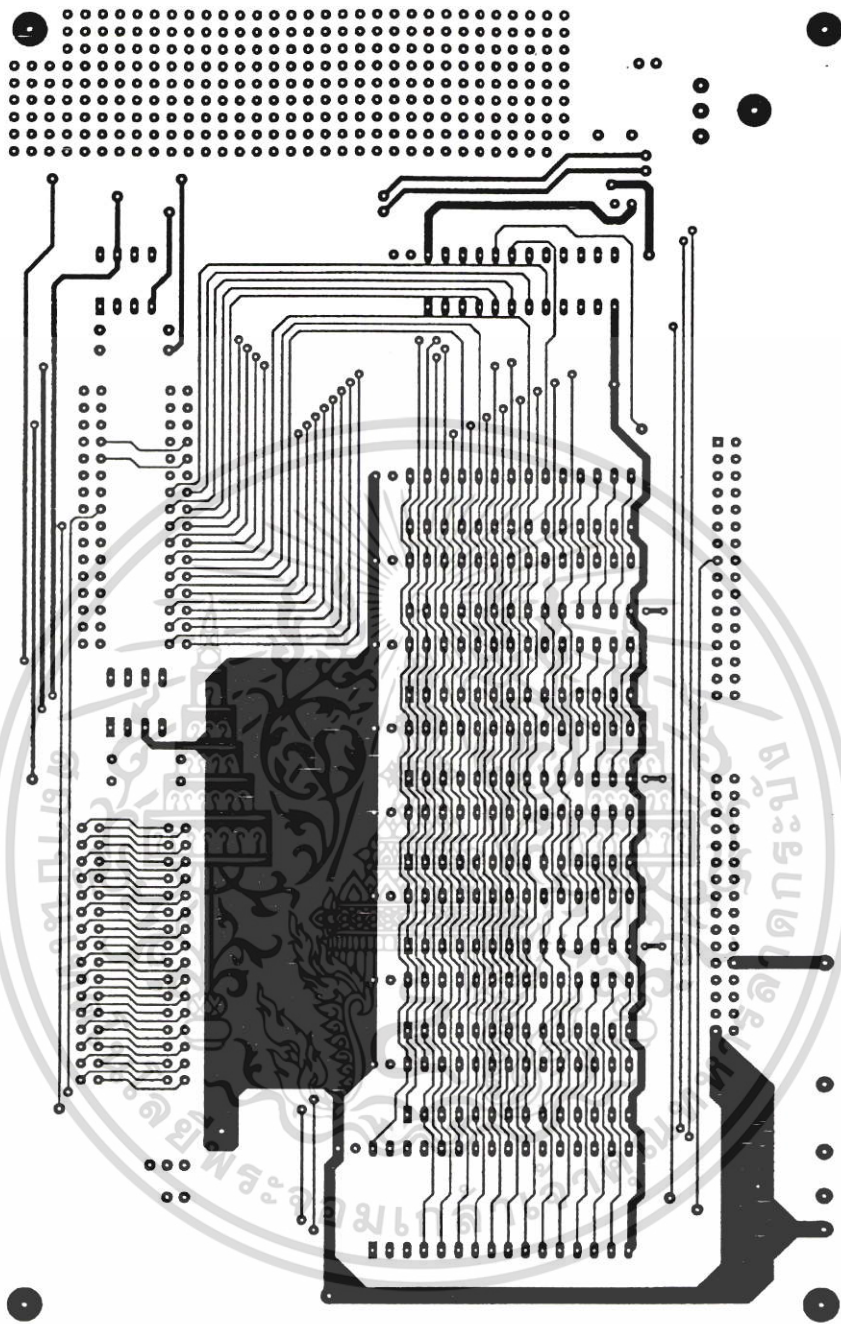
การติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกบางครั้งพบว่าอุปกรณ์ภายนอกมีความเร็วช้ากว่า DSP TMS320C31 เมื่อทำงานร่วมกันแล้วอาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ดังนั้น DSP TMS320C31 จึงได้มีการสร้างระบบสถานะการรอคอย (Wait-State) ในสถานะนี้จะมีผลกับบัสปฐมภูมิ บัสส่วนขยาย และมีการกำหนดความต้านทานด้วยการควบคุมจากสัญญาณความพร้อม โดยสถานะการรอคอยนั้นสามารถสร้างได้จากภายในด้วยการเขียนโปรแกรมควบคุม หรือจากภายนอกโดยการป้อนสัญญาณสถานะลอจิกโลเข้าที่ขาไรดี (Ready) ของ TMS320C31 แต่ในส่วนของฮาร์ดแวร์ที่สร้างนี้ไม่มีการต่อสัญญาณความพร้อมจากภายนอก โดยใช้เป็นการกำหนดด้วยโปรแกรมเท่านั้น



ภาพภาคผนวกที่ 5 จอจรรยาหน่วยความจำของ TMS320C31

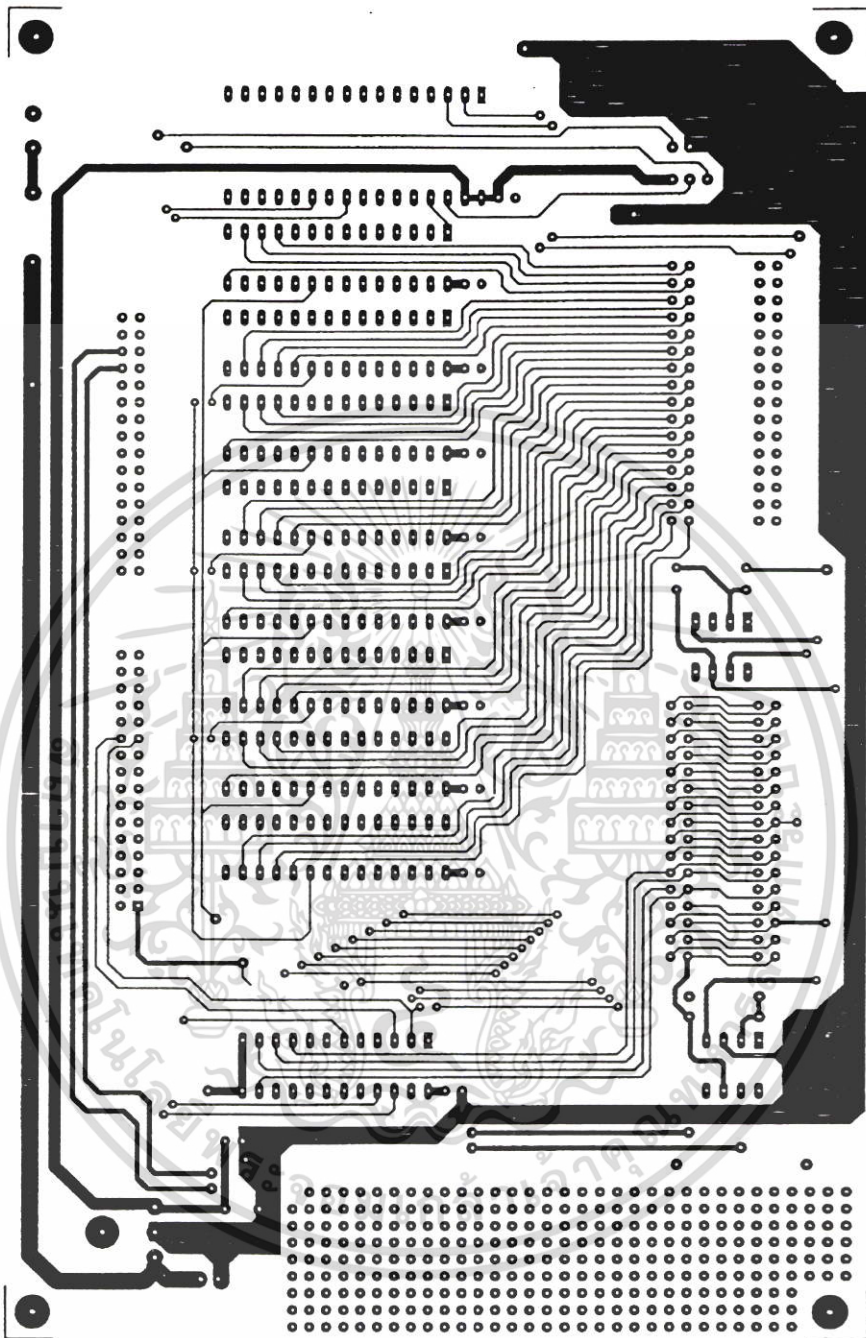
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





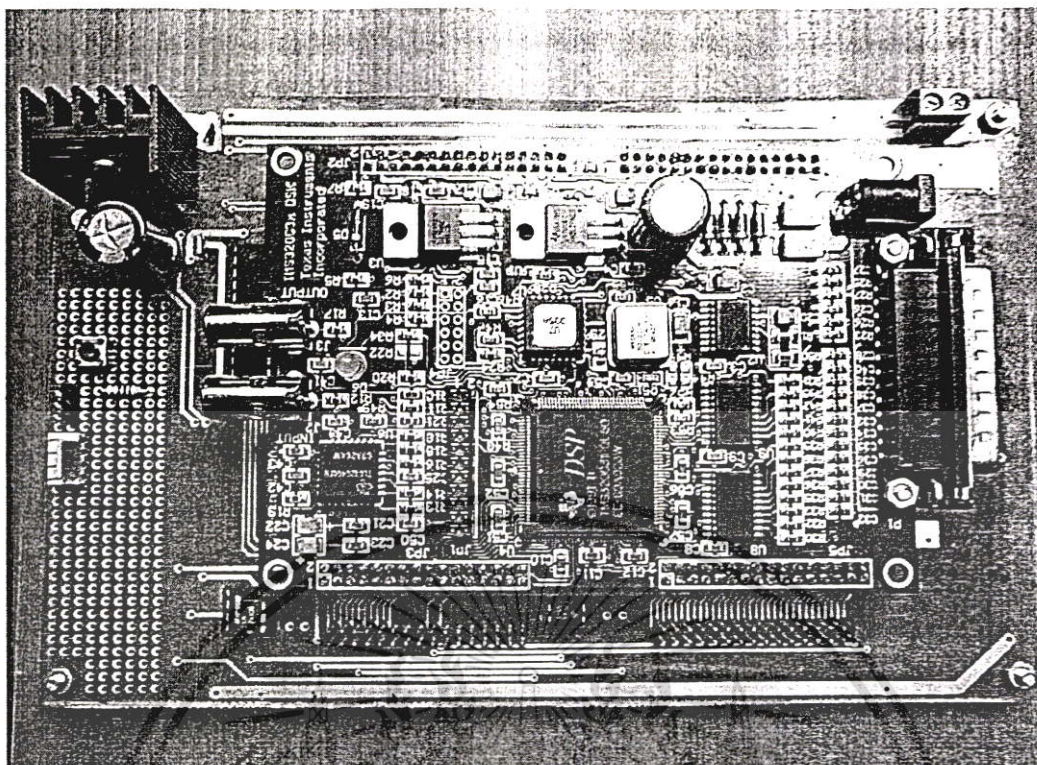
ภาพภาคผนวกที่ 7 ด้านบนแผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายหน่วยความจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



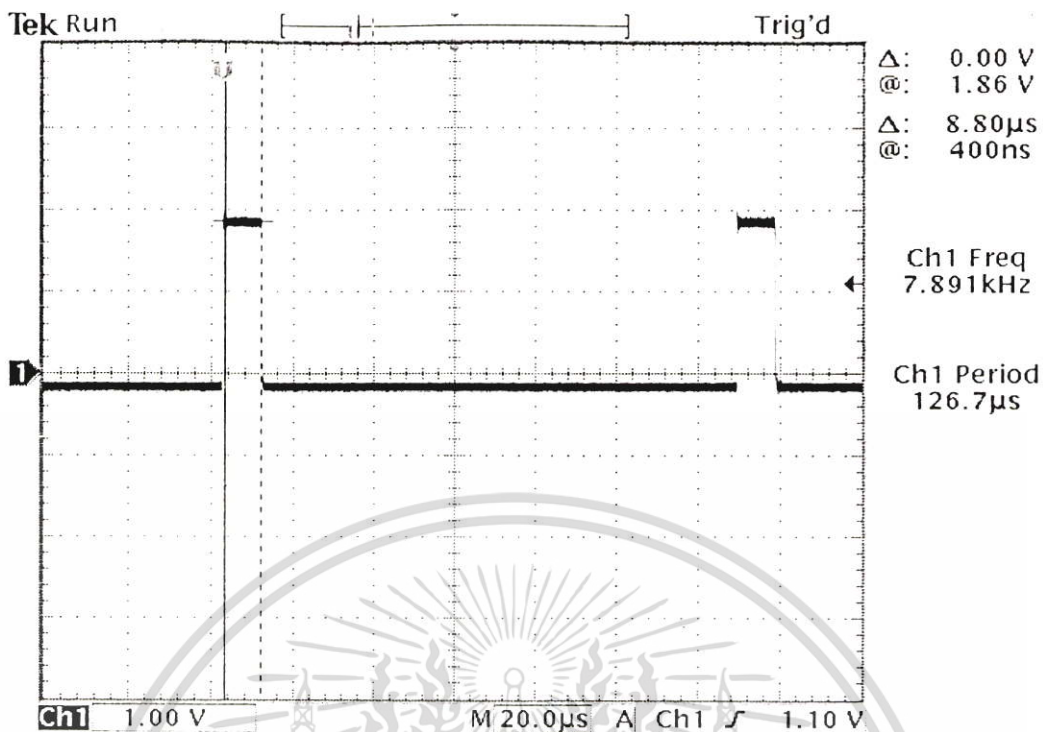
ภาพภาคผนวกที่ 8 ด้านล่างแผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรถายหน่วยความจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



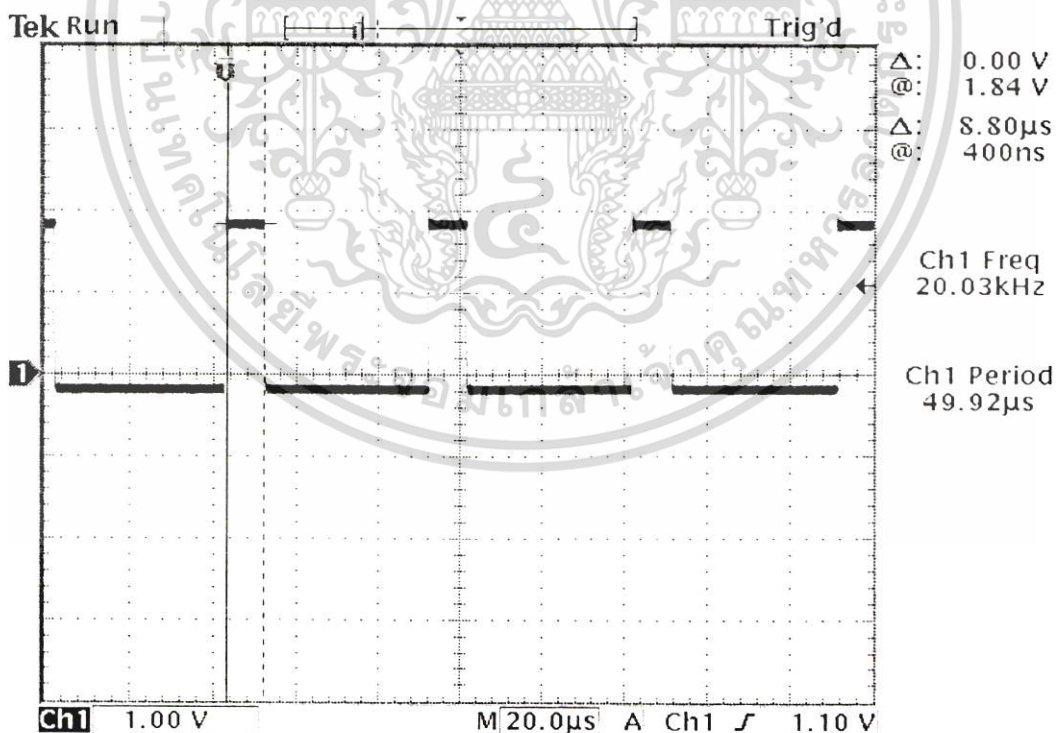
ภาพภาคผนวกที่ 9 วงจรที่ประกอบ TMS320C31 เข้ากับส่วนขยายหน่วยความจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



25 Apr 2003 16:12:58

ภาพภาคผนวกที่ 10 สัญญาณความถี่สุ่ม 7891 Hz ของโปรแกรมกาลมาน



25 Apr 2003 16:12:22

ภาพภาคผนวกที่ 11 สัญญาณความถี่สุ่ม 20.03 kHz ของโปรแกรมกาลมาน

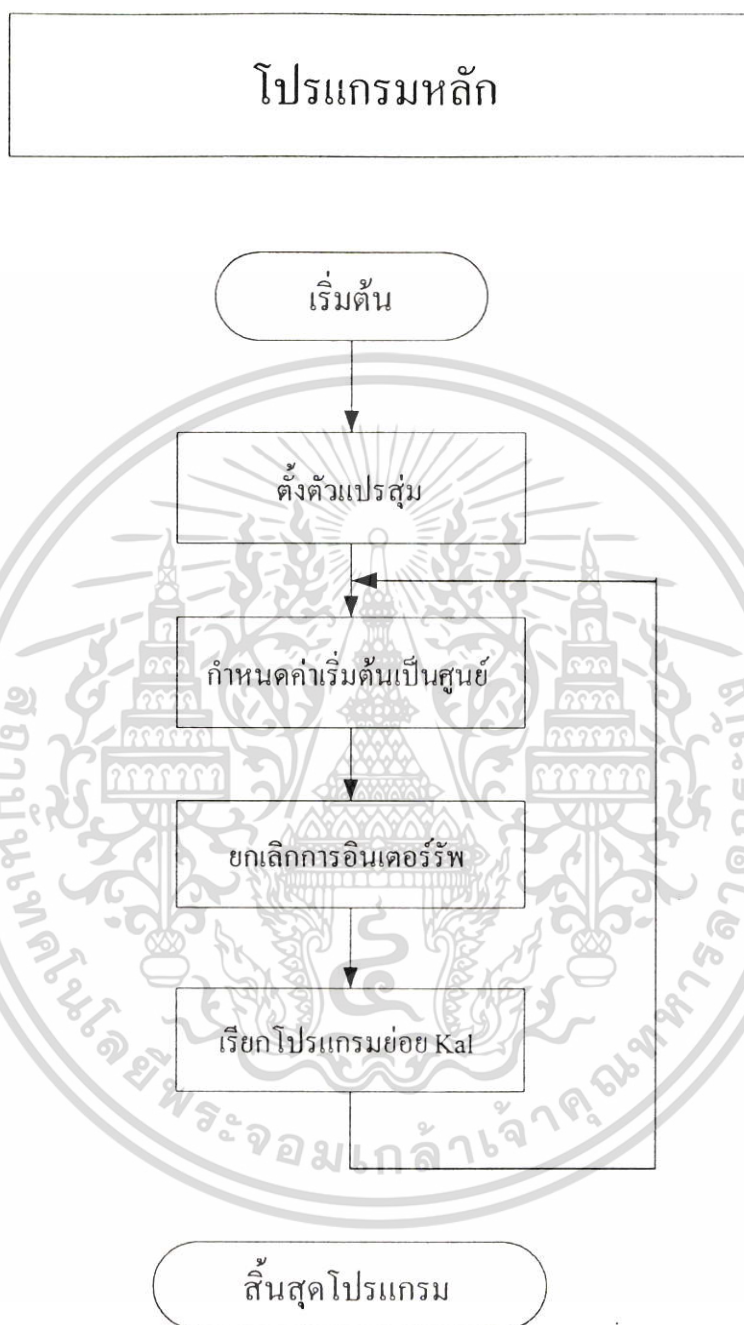
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

## โปรแกรมคาลมานฟิลเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพภาคผนวกที่ 12 โฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมหลักกาลมาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### ภาพภาคผนวกที่ 13 โฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมย่อยคาลมาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int AICSEC[4] = {0x162C,0x1,0x4892,0x67}; /*AIC data for Fs = 8 kHz */
int data_in, data_out,data;          /*declare global variables*/
float data_in1,data_out1;
static float data2,data3,Y1;
int i,a,j;
void c_int05()                        /*XINT0 interrupt routine */
{
    data_in = UPDATE_SAMPLE(data_out); /*update sample to SP0 AIC*/
    data_out1 = data_in;              /*loop input to output */
}
main()
{
    AICSET_I();                       /*configure SP0 of AIC */
    data2 = 0;
    for (;;) {
        asm(" IDLE ");
        data_out = kal(data_out1,a00,a11,a22,a33,h00,h11,r,q00,q11,q22,q33,D);
    }
}

kal(float data1,float A0,float A1,float A2,float A3,float h0,float h1,float R,float Q0,float Q1,float
Q2,float Q3,float D)
{
    float AT0,AT1,AT2,AT3;
    float ht0,ht1;
    float pp0,pp1,pp2,pp3,c,c1;
    float p10,p11,p12,p13;
    float Y;
    float data;
    float xp0,xp1;
    static float p0 = 5,p1 = 0,p2 = 0,p3 = 1,k0,k1,x0 = 1,x1 = 0,data3 = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ht0 = h0; ht1 = h1;
xp0 = (A0*x0) + (A1*x1) + data2;
xp1 = (A2*x0) + (A3*x1) + data2;
pp0 = ((A0*p0) + (A1*p2));
pp1 = ((A0*p1) + (A1*p3));
pp2 = ((A2*p0) + (A3*p2));
pp3 = ((A2*p1) + (A3*p3));
p10 = (pp0*AT0) + (pp1*AT2) + Q0;
p11 = (pp0*AT1) + (pp1*AT3) + Q1;
p12 = (pp2*AT0) + (pp3*AT2) + Q2;
p13 = (pp2*AT1) + (pp3*AT3) + Q3;
c1 = (((h0*p10) + (h1*p12))*ht0) + (((h0*p11) + (h1*p13))*ht1);
c = 1/(c1+R);
k0 = c*((p10*ht0) + (p11*ht1));
k1 = c*((p12*ht0) + (p13*ht1));
Y = (h0*xp0) + (h1*xp1) + D;
x0 = xp0 + (k0*(data1 - Y));
x1 = xp1 + (k1*(data1 - Y));
p0 = p10 - ((k0*h0)*p10) + ((k0*h1)*p12);
p1 = p11 - ((k0*h0)*p11) + ((k0*h1)*p13);
p2 = p12 - ((k1*h0)*p10) + ((k1*h1)*p12);
p3 = p13 - ((k1*h0)*p11) + ((k1*h1)*p13);
data2 = data1;
Y = Y/0.235476;
return(Y);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TMS320C3x/4x COFF Assembler Version 5.00 Fri Apr 25 17:02:48 2003

```

1
;*****
2      ;* TMS320C3x/4x ANSI C Code Generator          Version 5.00 *
3      ;* Date/Time created: Fri Apr 25 16:21:09 2003      *
4
;*****
5      .regalias      ; enable floating point register aliases
6      0000000b fp     .set  ar3
7      0000000b FP     .set  ar3
8
;*****
9      ;* GLOBAL FILE PARAMETERS                      *
10     ;*
11     ;* Optimization      : Always Choose Smaller Code Size      *
12     ;* Memory            : Small Memory Model                  *
13     ;* Float-to-Int      : Normal Conversions (round toward -inf) *
14     ;* Multiply          : in Software (32 bits)                *
15     ;* Memory Info       : Unmapped Memory Exists              *
16     ;* Repeat Loops     : Use RPTB for ALL Loops -- Disallow RPTS *
17     ;* Calls             : Normal Library ASM calls            *
18     ;* Debug Info       : No Debug Info                       *
19
;*****
20     ;      H:\DSP\C3XTOOLS\AC30.EXE kal1.c C:\WINDOWS\TEMP\kal1.if
21
22 00000000      .sect  ".cinit"
23 00000000 00000001      .field  1,32
24 00000001 00000000-      .field  _PBASE+0,32
25 00000002 00808000      .field  8421376,32      ; _PBASE @ 0
26
27 00000000      .sect  ".text"

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

28
29     .global _PBASE
30 00000000     .bss  _PBASE,1
31 00000000     .sect  ".text"
32
33     .global _AICSET
34
;*****
35     ;* FUNCTION NAME: _AICSET *
36     ;* *
37     ;* Architecture : TMS320C30 *
38     ;* Calling Convention : Stack Parameter Convention *
39     ;* Function Uses Regs : r0,r1,ar0,ar1,ir0,st *
40     ;* Regs Saved : *
41     ;* Stack Frame : Full (Frame Pointer in AR3) *
42     ;* Total Frame Size : 2 Call + 0 Parm + 1 Auto + 0 SOE = 3 bytes *
43
;*****
44 00000000     _AICSET:
45 00000000 0f2b0000     push  fp
46 00000001 50280000-     ldiu  @_PBASE+0,ar0
47 00000002 50600001     ldiu  1,r0
48 00000003 15400028     sti   r0,*+ar0(40)
49 00000004 506003c1     ldiu  961,r0
50 00000005 50280000-     ldiu  @_PBASE+0,ar0
51 00000006 500b0014     ldiu  sp,fp

52 00000007 15400020     sti   r0,*+ar0(32)
53 00000008 02740001     addi  1,sp
54 00000009 08780062     LDI   00000062h,IOF
55 0000000a 50600000     ldiu  0,r0
56 0000000b 15400301     sti   r0,*+fp(1)

```

เอกสารที่ 56 0000000b 15400301 หรือกับ sti ใช้ r0,\*+fp(1) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

57 0000000c 50400301    ldiu   *+fp(1),r0
58 0000000d 04e0005a    cmpi   90,r0
59 0000000e 6a0a0006    bge    L3          ; Branch
60                                     ; Branch Occurs to L3
61 0000000f          L2:
62 0000000f 50600001    ldiu   1,r0
63 00000010 02400301    addi   *+fp(1),r0
64 00000011 15400301    sti    r0,*+fp(1)
65 00000012 50400301    ldiu   *+fp(1),r0
66 00000013 04e0005a    cmpi   90,r0
67 00000014 6a07fffa    blt    L2          ; Branch
68                                     ; Branch Occurs to L2
69 00000015          L3:
70 00000015 50280000-   ldiu   @_PBASE+0,ar0
71 00000016 50600131-   ldiu   305,r0
72 00000017 15400042    sti    r0,*+ar0(66)
73 00000018 50280000-   ldiu   @_PBASE+0,ar0
74 00000019 15400043    sti    r0,*+ar0(67)
75 0000001a 50280000-   ldiu   @_PBASE+0,ar0
76 0000001b 50200023-   ldiu   @CL1,r0
77 0000001c 15400040    sti    r0,*+ar0(64)
78 0000001d 50280000-   ldiu   @_PBASE+0,ar0
79 0000001e 50600000    ldiu   0,r0
80 0000001f 15400048    sti    r0,*+ar0(72)
81 00000020 10780006    OR     00000006h,IOF
82 00000021 15400301    sti    r0,*+fp(1)
83 00000022 50400301    ldiu   *+fp(1),r0
84 00000023 04e00004    cmpi   4,r0

85 00000024 6a0a0014    bge    L8          ; Branch

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

86                                     ; Branch Occurs to L8
87 00000025      L4:
88 00000025 50280000-   ldiu  @_PBASE+0,ar0
89 00000026 50600002   ldiu  2,r0
90 00000027 02c00040   and   *+ar0(64),r0
91 00000028 6a05fffc   beq   L4          ; Branch
92                                     ; Branch Occurs to L4
93 00000029 50600003   ldiu  3,r0
94 0000002a 15400048   sti   r0,*+ar0(72)
95 0000002b      L6:
96 0000002b 50280000-   ldiu  @_PBASE+0,ar0
97 0000002c 50600002   ldiu  2,r0
98 0000002d 02c00040   and   *+ar0(64),r0
99 0000002e 6a05fffc   beq   L6          ; Branch
100                                     ; Branch Occurs to L6
101 0000002f 50290024-   ldiu  @CL2,ar1
102 00000030 50510301   ldiu  *+fp(1),ir0
103 00000031 50600001   ldiu  1,r0
104 00000032 50414100   ldiu  *+ar1(ir0),r1
105 00000033 15410048   sti   r1,*+ar0(72)
106 00000034 02400301   addi  *+fp(1),r0
107 00000035 15400301   sti   r0,*+fp(1)
108 00000036 50400301   ldiu  *+fp(1),r0
109 00000037 04e00004   cmpi  4,r0
110 00000038 6a07ffec   blt   L4          ; Branch
111                                     ; Branch Occurs to L4
112 00000039      L8:
113 00000039 50510b01   ldiu  *-fp(1),ir0
114 0000003a 68200011   bud   ir0
115 0000003b 0c800000   nop
116 0000003c 18740003   subi  3,sp        ; unsigned

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

118                                     ; Branch Occurs to ir0
119
120
121 0000003e          .sect  ".text"
122
123          .global _AICSET_I
124
;*****
125          ;* FUNCTION NAME: _AICSET_I          *
126          ;*                               *
127          ;* Architecture      : TMS320C30    *
128          ;* Calling Convention : Stack Parameter Convention *
129          ;* Function Uses Regs :          *
130          ;* Regs Saved       :          *
131          ;* Stack Frame      : Compact (No Frame Pointer) *
132          ;* Total Frame Size : 1 Call + 0 Parm + 0 Auto + 0 SOE = 1 byte *
133
;*****
134 0000003e          _AICSET_I:
135 0000003e 62000000' call  _AICSET
136                                     ; Call Occurs
137 0000003f 08770000 LDI   00000000h,IF
138 00000040 10760010 OR    00000010h,IE
139 00000041 10752000 OR    00002000h,ST
140 00000042 78800000      rets
141                                     ; Return From Subroutine
142
143
144 00000043          .sect  ".text"
145
146          .global _UPDATE_SAMPLE

```

147 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*\*\*\*\*

```

148      ;* FUNCTION NAME: _UPDATE_SAMPLE      *
149      ;*                                     *
150      ;* Architecture      : TMS320C30      *
151      ;* Calling Convention : Stack Parameter Convention      *
152      ;* Function Uses Regs : r0,ar0,st      *
153      ;* Regs Saved      :                  *
154      ;* Stack Frame      : Full (Frame Pointer in AR3)      *
155      ;* Total Frame Size : 2 Call + 1 Parm + 1 Auto + 0 SOE = 4 bytes      *

```

156

```

157 00000043      _UPDATE_SAMPLE:
158 00000043 0f2b0000      push      fp
159 00000044 500b0014      ldiu     sp,fp
160 00000045 02740001      addi     1,sp
161 00000046      L13:
162 00000046 50280000-      ldiu     @_PBASE+0,ar0
163 00000047 50600002      ldiu     2,r0
164 00000048 02c00040      and      *+ar0(64),r0
165 00000049 6a05ffff      beq      L13      ; Branch
166      ; Branch Occurs to L13
167 0000004a 50400b02      ldiu     *-fp(2),r0
168 0000004b 03e00002      ash      2,r0
169 0000004c 15400048      sti      r0,*+ar0(72)
170 0000004d 50280000-      ldiu     @_PBASE+0,ar0
171 0000004e 5040004c      ldiu     *+ar0(76),r0
172 0000004f 03e00010      ash      16,r0
173 00000050 03e0ffee      ash      -18,r0      ;asr
174 00000051 15400301      sti      r0,*+fp(1)
175 00000052 50480b01      ldiu     *-fp(1),ar0
176 00000053 68200008      bud      ar0
177 00000054 0c800000      nop

```

178 00000055 18740003 subi 3,sp ; unsigned

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

179 00000056 504bc300    ldiu   *fp,fp
180                                     ; Branch Occurs to ar0
181
182
183
184 00000003          .sect ".cinit"
185 00000003 00000001    .field    1,32
186 00000004 00000001-  .field    _a00+0,32
187 00000005 0032fb2b    .word     00032FB2BH ; float 1.3982900000000000e+00
188                                     ; _a00 @ 0
189
190 00000057          .sect ".text"
191
192          .global _a00
193 00000001          .bss     _a00,1
194
195 00000006          .sect ".cinit"
196 00000006 00000001    .field    1,32
197 00000007 00000002-  .field    _a11+0,32
198 00000008 ff80342b    .word     0FF80342BH ; float -9.9920400000000000e-01
199                                     ; _a11 @ 0
200
201 00000057          .sect ".text"
202
203          .global _a11
204 00000002          .bss     _a11,1
205
206 00000009          .sect ".cinit"
207 00000009 00000001    .field    1,32
208 0000000a 00000003-  .field    _a22+0,32
209 0000000b 00000000    .word     00000000H ; float 1.0000000000000000e+00

```

210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

211
212 00000057      .sect  ".text"
213
214      .global _a22
215 00000003      .bss   _a22,1
216
217 0000000c      .sect  ".cinit"
218 0000000c 00000001 .field  1,32
219 0000000d 00000004- .field  _a33+0,32
220 0000000e 80000000 .word   080000000H ; float 0.0000000000000000e+00
221      ; _a33 @ 0
222
223 00000057      .sect  ".text"
224
225      .global _a33
226 00000004      .bss   _a33,1
227
228 0000000f      .sect  ".cinit"
229 0000000f 00000001 .field  1,32
230 00000010 00000005- .field  _h00+0,32
231 00000011 f51528f2 .word   0F51528F2H ; float 5.6900000000000000e-04
232      ; _h00 @ 0
233
234 00000057      .sect  ".text"
235
236      .global _h00
237 00000005      .bss   _h00,1
238
239 00000012      .sect  ".cinit"
240 00000012 00000001 .field  1,32
241 00000013 00000006- .field  _h11+0,32
242 00000014 80000000 .word   080000000H ; float 0.0000000000000000e+00

```

```

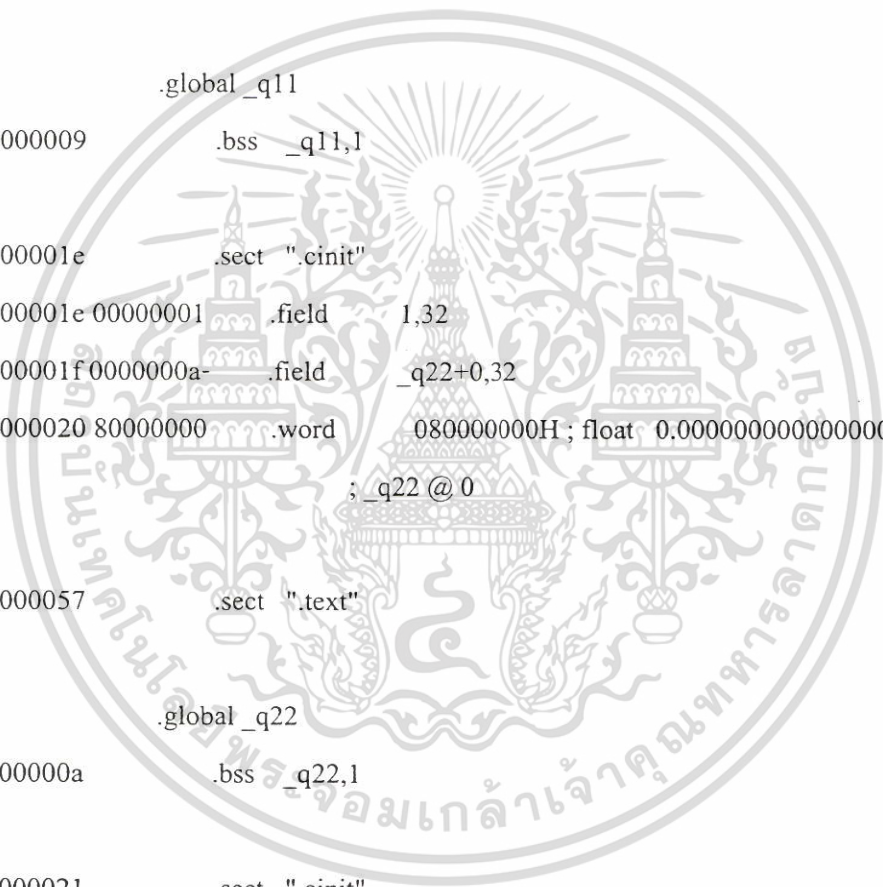
243                                     ;_h11 @ 0
244
245 00000057          .sect ".text"
246
247          .global _h11
248 00000006          .bss  _h11,1
249
250 00000015          .sect ".cinit"
251 00000015 00000001  .field  1,32
252 00000016 00000007- .field  _D+0,32
253 00000017 80000000  .word   080000000H ; float 0.0000000000000000e+00
254                                     ;_D @ 0
255
256 00000057          .sect ".text"
257
258          .global _D
259 00000007          .bss  _D,1
260
261 00000018          .sect ".cinit"
262 00000018 00000001  .field  1,32
263 00000019 00000008- .field  _q00+0,32
264 0000001a cf2aaad5  .word   0CF2AAAD5H ; float 2.368484757860000e-15
265                                     ;_q00 @ 0
266
267 00000057          .sect ".text"
268
269          .global _q00
270 00000008          .bss  _q00,1

```

```

271
272 0000001b      .sect ".cinit"
273 0000001b 00000001      .field      1,32
274 0000001c 00000009-      .field      _q11+0,32
275 0000001d 80000000      .word       080000000H ; float 0.0000000000000000e+00
276
                ;_q11 @ 0
277
278 00000057      .sect ".text"
279
280      .global _q11
281 00000009      .bss _q11,1
282
283 0000001e      .sect ".cinit"
284 0000001e 00000001      .field      1,32
285 0000001f 0000000a-      .field      _q22+0,32
286 00000020 80000000      .word       080000000H ; float 0.0000000000000000e+00
287
                ;_q22 @ 0
288
289 00000057      .sect ".text"
290
291      .global _q22
292 0000000a      .bss _q22,1
293
294 00000021      .sect ".cinit"
295 00000021 00000001      .field      1,32
296 00000022 0000000b-      .field      _q33+0,32
297 00000023 cf2aad5      .word       0CF2AAAD5H ; float 2.368484757870000e-15
298
                ;_q33 @ 0
299
300 00000057      .sect ".text"
301

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

302          .global _q33
303 0000000b      .bss  _q33,1
304
305 00000024      .sect  ".cinit"
306 00000024 00000001  .field  1,32
307 00000025 0000000c- .field  _rr+0,32
308 00000026 e22aa86f  .word   0E22AA86FH ; float  1.2417000000000000e-09
309
310                ;_rr @ 0
311
312
313
314 0000000c      .bss  _rr,1
315
316 00000027      .sect  ".cinit"
317 00000027 00000004  .field  IR_1,32
318 00000028 0000000d- .field  _AICSEC+0,32
319 00000029 0000162c  .field  5676,32 ; _AICSEC[0] @ 0
320 0000002a 00000001  .field  1,32 ; _AICSEC[1] @ 32
321 0000002b 00004892  .field  18578,32 ; _AICSEC[2] @ 64
322 0000002c 00000067  .field  103,32 ; _AICSEC[3] @ 96
323 00000004 IR_1: .set  4
324
325 00000057      .sect  ".text"
326
327          .global _AICSEC
328 0000000d      .bss  _AICSEC,4
329 00000057      .sect  ".text"
330
331          .global _c_int05
332

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;*****
333      ;* FUNCTION NAME:  _c_int05                *
334      ;*                                     *
335      ;* Architecture   : TMS320C30            *
336      ;* Calling Convention : Stack Parameter Convention *
337      ;* Function Uses Regs : f0,r0,sp         *
338      ;* Regs Saved      : f0,r0,ar0,sp,pc    *
339      ;* Stack Frame     : Compact (No Frame Pointer) *
340      ;* Total Frame Size : 1 Call + 0 Parm + 0 Auto + 3 SOE = 4 bytes *
341

```

```

;*****

```

```

342 00000057      _c_int05:
343 00000057 0f350000      push    st
344 00000058 0f200000      push    r0
345 00000059 0fa00000      pushf   f0
346 0000005a 0f280000      push    ar0
347 0000005b 50200020-      ldiu   @_data_out+0,r0
348 0000005c 0f200000      push    r0
349 0000005d 62000043      call   _UPDATE_SAMPLE
350                                     ; Call Occurs
351 0000005e 1520001a-      sti    r0,@_data_in+0
352 0000005f 05a0001a-      float  @_data_in+0,f0
353 00000060 18740001      subi   1,sp      ; unsigned
354 00000061 14200022-      stf   f0,@_data_out1+0
355 00000062 0e280000      pop    ar0
356 00000063 0ea00000      popf   f0
357 00000064 0e200000      pop    r0
358 00000065 0e350000      pop    st
359 00000066 78000000      reti
360 00000067 0c800000      nop
361 00000068 0c800000      nop

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
363 ; Return From Interrupt
```

```
364
```

```
365
```

```
366 0000006a .sect ".text"
```

```
367
```

```
368 .global _main
```

```
369
```

```
*****
```

```
370 ;* FUNCTION NAME: _main *
```

```
371 ;*
```

```
372 ;* Architecture : TMS320C30 *
```

```
373 ;* Calling Convention : Stack Parameter Convention *
```

```
374 ;* Function Uses Regs : f0,r0,sp *
```

```
375 ;* Regs Saved :
```

```
376 ;* Stack Frame : Compact (No Frame Pointer) *
```

```
377 ;* Total Frame Size : 1 Call + 0 Parm + 0 Auto + 0 SOE = 1 byte *
```

```
378
```

```
*****
```

```
379 0000006a _main:
```

```
380 0000006a 6200003e' call _AICSET_I
```

```
381 ; Call Occurs
```

```
382 0000006b 40608000 ldfu 0.0000000000e+00,f0
```

```
383 0000006c 1420001b- stf f0,@_data2+0
```

```
384 0000006d L19:
```

```
385 0000006d 06000000 IDLE
```

```
386 0000006e 40200007- ldfu @_D+0,f0
```

```
387 0000006f 0fa00000 pushf f0
```

```
388 00000070 4020000b- ldfu @_q33+0,f0
```

```
389 00000071 0fa00000 pushf f0
```

```
390 00000072 4020000a- ldfu @_q22+0,f0
```

```
391 00000073 0fa00000 pushf f0
```

```
392 00000074 40200009- ldfu @_q11+0,f0
```

```

393 00000075 0fa00000    pushf    f0
394 00000076 40200008-    ldfu    @_q00+0,f0
395 00000077 0fa00000    pushf    f0
396 00000078 4020000c-    ldfu    @_rr+0,f0
397 00000079 0fa00000    pushf    f0
398 0000007a 40200006-    ldfu    @_h11+0,f0
399 0000007b 0fa00000    pushf    f0
400 0000007c 40200005-    ldfu    @_h00+0,f0
401 0000007d 0fa00000    pushf    f0
402 0000007e 40200004-    ldfu    @_a33+0,f0
403 0000007f 0fa00000    pushf    f0
404 00000080 40200003-    ldfu    @_a22+0,f0
405 00000081 0fa00000    pushf    f0
406 00000082 40200002-    ldfu    @_a11+0,f0
407 00000083 0fa00000    pushf    f0
408 00000084 40200001-    ldfu    @_a00+0,f0
409 00000085 0fa00000    pushf    f0
410 00000086 40200022-    ldfu    @_data_out1+0,f0
411 00000087 0fa00000    pushf    f0
412 00000088 6200008d'   call    _kal
413
                                ; Call Occurs
414 00000089 6a20ffe1   bud     L19
415 0000008a 0c800000   nop
416 0000008b 15200020-   sti    r0,@_data_out+0
417 0000008c 1874000d   subi   13,sp          ; unsigned
418
                                ; Branch Occurs to L19
419
420
421
422 0000002d           .sect ".cinit"
423 0000002d 00000001   .field 1,32
424 0000002e 00000011-   .field _p0$1+0,32

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อประโยชน์ส่วนตนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

425 0000002f 02200000 .word 002200000H ; float 5.000000000000000e+00
426 ;_p0$1 @ 0
427
428 0000008d .sect ".text"
429
430 00000030 .sect ".cinit"
431 00000030 00000001 .field 1,32
432 00000031 00000012- .field _p1$2+0,32
433 00000032 80000000 .word 080000000H ; float 0.000000000000000e+00
434 ;_p1$2 @ 0
435
436 0000008d .sect ".text"
437
438 00000033 .sect ".cinit"
439 00000033 00000001 .field 1,32
440 00000034 00000013- .field _p2$3+0,32
441 00000035 80000000 .word 080000000H ; float 0.000000000000000e+00
442 ;_p2$3 @ 0
443
444 0000008d .sect ".text"
445
446 00000036 .sect ".cinit"
447 00000036 00000001 .field 1,32
448 00000037 00000014- .field _p3$4+0,32
449 00000038 00000000 .word 000000000H ; float 1.000000000000000e+00
450 ;_p3$4 @ 0
451
452 0000008d .sect ".text"
453
454 00000039 .sect ".cinit"
455 00000039 00000001 .field 1,32
456 0000003a 00000017- .field _x0$7+0,32

```

```

457 0000003b 00000000 .word 00000000H ; float 1.0000000000000000e+00
458 ;_x0$7 @ 0
459
460 0000008d .sect ".text"
461
462 0000003c .sect ".cinit"
463 0000003c 00000001 .field 1,32
464 0000003d 00000018- .field _x1$8+0,32
465 0000003e 80000000 .word 08000000H ; float 0.0000000000000000e+00
466 ;_x1$8 @ 0
467
468 0000008d .sect ".text"
469
470 0000003f .sect ".cinit"
471 0000003f 00000001 .field 1,32
472 00000040 00000019- .field _data3$9+0,32
473 00000041 80000000 .word 08000000H ; float 0.0000000000000000e+00
474 ;_data3$9 @ 0
475
476 0000008d .sect ".text"
477 0000008d .sect ".text"
478
479 .global _kal
480

```

```

;*****

```

```

481 ;* FUNCTION NAME: _kal *
482 ;* *
483 ;* Architecture : TMS320C30 *
484 ;* Calling Convention : Stack Parameter Convention *
485 ;* Function Uses Regs : f0,r0,f1,r1,f2,f3,f4,f5,f6,f7,ar0,st,rs *
486 ;* Regs Saved : r4,r5,f6,f7 *
487 ;* Stack Frame : Full (Frame Pointer in AR3) *

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

488 ;\* Total Frame Size : 2 Call + 13 Parm + 25 Auto + 4 SOE = 44 bytes \*  
489

\*\*\*\*\*

```

490 0000008d   _kal:
491 0000008d 0f2b0000   push   fp
492 0000008e 500b0014   ldiu   sp,fp
493 0000008f 02740019   addi   25,sp
494 00000090 0f240000   push   r4
495 00000091 0f250000   push   r5
496 00000092 0fa60000   pushf  f6
497 00000093 0fa70000   pushf  f7
498 00000011   .bss   _p0$1,1
499 00000012   .bss   _p1$2,1
500 00000013   .bss   _p2$3,1
501 00000014   .bss   _p3$4,1
502 00000015   .bss   _k0$5,1
503 00000016   .bss   _k1$6,1
504 00000017   .bss   _x0$7,1
505 00000018   .bss   _x1$8,1
506 00000019   .bss   _data3$9,1
507 00000094 50200025- ldiu   @CL3,r0
508 00000095 50080000   ldiu   r0,ar0
509 00000096 15400315   sti    r0,*+fp(21)
510 00000097 5060ffff   ldiu   -1,r0
511 00000098 1540c000   sti    r0,*ar0
512 00000099 40260013- ldfu   @_p2$3+0,f6
513 0000009a 40250014- ldfu   @_p3$4+0,f5
514 0000009b 40000006   ldfu   f6,f0
515 0000009c 14400316   stf    f0,*+fp(22)
516 0000009d 40000005   ldfu   f5,f0
517 0000009e 14400317   stf    f0,*+fp(23)
518 0000009f 40400b03   ldfu   *-fp(3),f0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

519 000000a0 40220011-	ldfu	@_p0\$1+0,f2
520 000000a1 14400318	stf	f0,*+fp(24)
521 000000a2 40210012-	ldfu	@_p1\$2+0,f1
522 000000a3 40040002	ldfu	f2,f4
523 000000a4 40030001	ldfu	f1,f3
524 000000a5 0a420b03	mpyf	*-fp(3),f2
525 000000a6 40400316	ldfu	*+fp(22),f0
526 000000a7 0a410b03	mpyf	*-fp(3),f1
527 000000a8 0a400b06	mpyf	*-fp(6),f0
528 000000a9 0a460b04	mpyf	*-fp(4),f6
529 000000aa 14400316	stf	f0,*+fp(22)
530 000000ab 20820602	addf3	f2,f6,f2
531 000000ac 40400317	ldfu	*+fp(23),f0
532 000000ad 14420307	stf	f2,*+fp(7)
533 000000ae 0a400b06	mpyf	*-fp(6),f0
534 000000af 0a450b04	mpyf	*-fp(4),f5
535 000000b0 14400317	stf	f0,*+fp(23)
536 000000b1 20810501	addf3	f1,f5,f1
537 000000b2 40400b05	ldfu	*-fp(5),f0
538 000000b3 14400319	stf	f0,*+fp(25)
539 000000b4 40450318	ldfu	*+fp(24),f5
540 000000b5 14450301	stf	f5,*+fp(1)
541 000000b6 40450316	ldfu	*+fp(22),f5
542 000000b7 40420301	ldfu	*+fp(1),f2
543 000000b8 14410308	stf	f1,*+fp(8)
544 000000b9 40010002	ldfu	f2,f1
545 000000ba 0a440b05	mpyf	*-fp(5),f4
546 000000bb 20840504	addf3	f4,f5,f4
547 000000bc 40450317	ldfu	*+fp(23),f5
548 000000bd 0a430b05	mpyf	*-fp(5),f3
549 000000be 40400b06	ldfu	*-fp(6),f0
550 000000bf 20830503	addf3	f3,f5,f3

551 000000c0 40470b04	ldfu	*-fp(4),f7
552 000000c1 40450319	ldfu	*+fp(25),f5
553 000000c2 1443030a	stf	f3,*+fp(10)
554 000000c3 14400304	stf	f0,*+fp(4)
555 000000c4 14440309	stf	f4,*+fp(9)
556 000000c5 14470303	stf	f7,*+fp(3)
557 000000c6 40000007	ldfu	f7,f0
558 000000c7 14450302	stf	f5,*+fp(2)
559 000000c8 40460304	ldfu	*+fp(4),f6
560 000000c9 40070005	ldfu	f5,f7
561 000000ca 40040000	ldfu	f0,f4
562 000000cb 40030006	ldfu	f6,f3
563 000000cc 0a460308	mpyf	*+fp(8),f6
564 000000cd 0a43030a	mpyf	*+fp(10),f3
565 000000ce 0a410307	mpyf	*+fp(7),f1
566 000000cf 0a400308	mpyf	*+fp(8),f0
567 000000d0 0a450309	mpyf	*+fp(9),f5
568 000000d1 20800001	addf3	f1,f0,f0
569 000000d2 20830305	addf3	f5,f3,f3
570 000000d3 0a470307	mpyf	*+fp(7),f7
571 000000d4 0a44030a	mpyf	*+fp(10),f4
572 000000d5 0a420309	mpyf	*+fp(9),f2
573 000000d6 01c00b0a	addf	*-fp(10),f0
574 000000d7 20810402	addf3	f2,f4,f1
575 000000d8 01c30b0d	addf	*-fp(13),f3
576 000000d9 20820607	addf3	f7,f6,f2
577 000000da 40250018-	ldfu	@_x1\$8+0,f5
578 000000db 14430310	stf	f3,*+fp(16)
579 000000dc 1440030d	stf	f0,*+fp(13)
580 000000dd 01c20b0b	addf	*-fp(11),f2
581 000000de 01c10b0c	addf	*-fp(12),f1
582 000000df 40260017-	ldfu	@_x0\$7+0,f6

583	000000e0	1442030e	stf	f2,*+fp(14)
584	000000e1	1441030f	stf	f1,*+fp(15)
585	000000e2	40030000	ldfu	f0,f3
586	000000e3	40070005	ldfu	f5,f7
587	000000e4	40040006	ldfu	f6,f4
588	000000e5	40400310	ldfu	*+fp(16),f0
589	000000e6	14400316	stf	f0,*+fp(22)
590	000000e7	40400b07	ldfu	*-fp(7),f0
591	000000e8	14400318	stf	f0,*+fp(24)
592	000000e9	40400b08	ldfu	*-fp(8),f0
593	000000ea	14400319	stf	f0,*+fp(25)
594	000000eb	40400316	ldfu	*+fp(22),f0
595	000000ec	0a400b08	mpyf	*-fp(8),f0
596	000000ed	14400316	stf	f0,*+fp(22)
597	000000ee	40400318	ldfu	*+fp(24),f0
598	000000ef	14400305	stf	f0,*+fp(5)
599	000000f0	40400319	ldfu	*+fp(25),f0
600	000000f1	0a410b08	mpyf	*-fp(8),f1
601	000000f2	14400306	stf	f0,*+fp(6)
602	000000f3	0a430b07	mpyf	*-fp(7),f3
603	000000f4	20800103	addf3	f3,f1,f0
604	000000f5	40410316	ldfu	*+fp(22),f1
605	000000f6	0a420b07	mpyf	*-fp(7),f2
606	000000f7	20820102	addf3	f2,f1,f2
607	000000f8	0a420306	mpyf	*+fp(6),f2
608	000000f9	0a400305	mpyf	*+fp(5),f0
609	000000fa	20800200	addf3	f0,f2,f0
610	000000fb	1440030c	stf	f0,*+fp(12)
611	000000fc	40600000	ldfu	1.0000000000e+00,f0
612	000000fd	0a460b03	mpyf	*-fp(3),f6
613	000000fe	0a440b05	mpyf	*-fp(5),f4
614	000000ff	0a470b06	mpyf	*-fp(6),f7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โรงเรียนได้รับจากบริษัทเอกชนเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

615 00000100 20840704    addf3  f4,f7,f4
616 00000101 0a450b04    mpyf   *-fp(4),f5
617 00000102 20850506    addf3  f6,f5,f5
618 00000103 14450313    stf    f5,*+fp(19)
619 00000104 14440314    stf    f4,*+fp(20)
620 00000105 40410b09    ldfu   *-fp(9),f1
621 00000106 01c1030c    addf   *+fp(12),f1
622 00000107 62000000!   call   DIV_F30
623                                     ; Call Occurs
624 00000108 40440306    ldfu   *+fp(6),f4
625 00000109 40020004    ldfu   f4,f2
626 0000010a 40410305    ldfu   *+fp(5),f1
627 0000010b 40030001    ldfu   f1,f3
628 0000010c 0a41030d    mpyf   *+fp(13),f1
629 0000010d 0a44030e    mpyf   *+fp(14),f4
630 0000010e 20810401    addf3  f1,f4,f1
631 0000010f 0a420310    mpyf   *+fp(16),f2
632 00000110 0a43030f    mpyf   *+fp(15),f3
633 00000111 20830203    addf3  f3,f2,f3
634 00000112 1440030b    stf    f0,*+fp(11)
635 00000113 0a43030b    mpyf   *+fp(11),f3
636 00000114 40400314    ldfu   *+fp(20),f0
637 00000115 0a400b08    mpyf   *-fp(8),f0
638 00000116 14230016-   stf    f3,@_k1$6+0
639 00000117 0a41030b    mpyf   *+fp(11),f1
640 00000118 40470b08    ldfu   *-fp(8),f7
641 00000119 14210015-   stf    f1,@_k0$5+0
642 0000011a 40410b07    ldfu   *-fp(7),f1
643 0000011b 40450313    ldfu   *+fp(19),f5
644 0000011c 40020001    ldfu   f1,f2
645 0000011d 0a450b07    mpyf   *-fp(7),f5
646 0000011e 20800005    addf3  f5,f0,f0

```

647 0000011f 40050001	ldfu	f1,f5
648 00000120 40030001	ldfu	f1,f3
649 00000121 40040007	ldfu	f7,f4
650 00000122 0a210015-	mpyf	@_k0\$5+0,f1
651 00000123 01c00b0e	addf	*-fp(14),f0
652 00000124 0a220015-	mpyf	@_k0\$5+0,f2
653 00000125 0a250016-	mpyf	@_k1\$6+0,f5
654 00000126 14400311	stf	f0,*+fp(17)
655 00000127 40000004	ldfu	f4,f0
656 00000128 0a200015-	mpyf	@_k0\$5+0,f0
657 00000129 14400318	stf	f0,*+fp(24)
658 0000012a 40000004	ldfu	f4,f0
659 0000012b 0a200016-	mpyf	@_k1\$6+0,f0
660 0000012c 14400319	stf	f0,*+fp(25)
661 0000012d 40400318	ldfu	*+fp(24),f0
662 0000012e 0a400310	mpyf	*+fp(16),f0
663 0000012f 40060004	ldfu	f4,f6
664 00000130 0a270015-	mpyf	@_k0\$5+0,f7
665 00000131 0a42030e	mpyf	*+fp(14),f2
666 00000132 0a41030d	mpyf	*+fp(13),f1
667 00000133 14400318	stf	f0,*+fp(24)
668 00000134 1941030d	subrf	*+fp(13),f1
669 00000135 40400319	ldfu	*+fp(25),f0
670 00000136 0a47030f	mpyf	*+fp(15),f7
671 00000137 0a40030f	mpyf	*+fp(15),f0
672 00000138 20870701	addf3	f1,f7,f7
673 00000139 40440311	ldfu	*+fp(17),f4
674 0000013a 1942030e	subrf	*+fp(14),f2
675 0000013b 40410318	ldfu	*+fp(24),f1
676 0000013c 20810102	addf3	f2,f1,f1
677 0000013d 14400319	stf	f0,*+fp(25)
678 0000013e 0a45030d	mpyf	*+fp(13),f5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งคืนลิขสิทธิ์ให้กับท่านเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

679 0000013f 19440b02	subrf	*-fp(2),f4
680 00000140 0a230016-	mpyf	@_k1\$6+0,f3
681 00000141 40020000	ldfu	f0,f2
682 00000142 1945030f	subrf	*+fp(15),f5
683 00000143 0a240015-	mpyf	@_k0\$5+0,f4
684 00000144 20820205	addf3	f5,f2,f2
685 00000145 0a43030e	mpyf	*+fp(14),f3
686 00000146 01c40313	addf	*+fp(19),f4
687 00000147 19430310	subrf	*+fp(16),f3
688 00000148 14240017-	stf	f4,@_x0\$7+0
689 00000149 40400311	ldfu	*+fp(17),f0
690 0000014a 14220013-	stf	f2,@_p2\$3+0
691 0000014b 19400b02	subrf	*-fp(2),f0
692 0000014c 0a260016-	mpyf	@_k1\$6+0,f6
693 0000014d 50790000	ldiu	0,rs
694 0000014e 0a460310	mpyf	*+fp(16),f6
695 0000014f 0a200016-	mpyf	@_k1\$6+0,f0
696 00000150 01c00314	addf	*+fp(20),f0
697 00000151 20830603	addf3	f3,f6,f3
698 00000152 14200018-	stf	f0,@_x1\$8+0
699 00000153 14230014-	stf	f3,@_p3\$4+0
700 00000154 14270011-	stf	f7,@_p0\$1+0
701 00000155 50480315	ldiu	*+fp(21),ar0
702 00000156 14210012-	stf	f1,@_p1\$2+0
703 00000157 1559c000	sti	rs,*ar0
704 00000158 40400311	ldfu	*+fp(17),f0
705 00000159 0b810000	negf	f0,f1
706 0000015a 05010001	fix	f1,r1
707 0000015b 05000000	fix	f0,r0
708 0000015c 0c010001	negi	r1,r1
709 0000015d 54000001	ldile	r1,r0

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

711 0000015f 50490b01    ldiu   *-fp(1),ar1
712 00000160 0ea60000    popf   f6
713 00000161 0e250000    pop    r5
714 00000162 68200009    bud    ar1
715 00000163 0e240000    pop    r4
716 00000164 1874001b    subi   27,sp      ; unsigned
717 00000165 504bc300    ldiu   *fp,fp
718
           ; Branch Occurs to ar1
719
720
721
722    .global _data_in
723 0000001a    .bss   _data_in,1
724 0000001b    .bss   _data2,1
725
726    .global _data
727 0000001c    .bss   _data,1
728
729    .global _a
730 0000001d    .bss   _a,1
731
732    .global _i
733 0000001e    .bss   _i,1
734
735    .global _j
736 0000001f    .bss   _j,1
737
738    .global _data_out
739 00000020    .bss   _data_out,1
740
741    .global _data_in1

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

743
744         .global _data_out1
745 00000022         .bss  _data_out1,1
746
;*****
747         ;* CONSTANT TABLE                                *
748
;*****
749 00000000         .sect  ".const"
750 00000023         .bss  CL1,1
751 00000024         .bss  CL2,1
752 00000025         .bss  CL3,1
753
754 00000042         .sect  ".cinit"
755 00000042 00000003 .field  3,32
756 00000043 00000023- .field  CL1+0,32
757 00000044 0e970300 .field  244777728,32
758 00000045 0000000d- .field  _AICSEC,32
759 00000046 00c10000 .field  12648448,32
760
761 00000166         .sect  ".text"
762
;*****
763         ;* UNDEFINED EXTERNAL REFERENCES                *
764
;*****
765         .global DIV_F30

```

No Errors, No Warnings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. พยุง เดชอยู่ สุรพันธ์ ยิ้มมั่น และ กอบชัย เดชหาญ, “ชุดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ 8031 แบบอิสระจากโปรแกรมเมอร์,” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 35 ,หน้าที่327-344,3-5 กุมภาพันธ์ 2540
2. พยุง เดชอยู่ สุรพล ศรีบุญทรง ชูชาติ โพธิสาร, “การเขียนโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วยแผ่นภาพ;” การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 หน้าที่ 936-937 ,19 ตุลาคม 2541
3. พยุง เดชอยู่ ชัยวุฒิ อาริย์พัฒนกุล และ ชัยกร แซ่มั่ม, “การชดเชยสัญญาณล็อกโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS – 96;” การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, หน้าที่ 1144 – 1145,20 – 22 ตุลาคม 2542
4. สายน้ำฝน หอมจันทร์ สุรพันธ์ ยิ้มมั่น พยุง เดชอยู่ และ กอบชัย เดชหาญ, “การสร้างตัวกรองเชิงเลขหลายแถบความถี่,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 17,ฉบับที่ 2, หน้า 114 - 119, มิถุนายน 2543
5. พยุง เดชอยู่ พิศิษฐ์ โรจน์ทองคำ ธนเทพ มณีนพผล ณรงค์ ธรรมภูติ และวีระเชษฐ์ จันทร์เงิน, “ตัวกรองความถี่ FIR แบบโปรแกรมได้,” การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่27, หน้าที่358, 16-18 ตุลาคม 2544
6. พยุง เดชอยู่ สุรพันธ์ ยิ้มมั่น และ กอบชัย เดชหาญ, “การสร้างตัวกรองความถี่ชนิดแบนแคบโดยใช้กาลมานฟิลเตอร์บนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัล,” วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 114 - 119, มิถุนายน 2544
7. พยุง เดชอยู่ สุรพันธ์ ยิ้มมั่น วัชรพงศ์ หินจิตร ชีระ ดีอุดมวงษ์ และสุกัญญา แพรสมบูรณ์, “ตัวกรองเชิงเลขแบนนอตซ์,” การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่27, หน้าที่740, 24-26 ตุลาคม 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายพวง เดชอยู่ เกิดเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ.2510 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษา  
ครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2539

ปี พ.ศ. 2532 เข้ารับราชการตำแหน่งพนักงานวิทยาศาสตร์ 2 ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรม  
และอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
บางซื่อ กรุงเทพ ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งพนักงานวิทยาศาสตร์ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้