



ดิจิทัลฟิลเตอร์ฮาร์ดแวร์

DIGITAL FILTER HARDWARE IMPLEMENTATION



โดย

นางสาวปวีณา จิ่งสิริพรชัย

นางสาวพรพรรณ เกரியงเกษม

ชื่อเรียกหนังสือ... ฝพ ๑๙๖๐.๒๕๔๑

เลขทะเบียน..... 040379

วัน เดือน ปี..... 11.๓๓.๕๙

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๔๑

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านราคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

040379

ดิจิทัลฟิลเตอร์ฮาร์ดแวร์

DIGITAL FILTER HARDWARE IMPLEMENTATION

โดย

นางสาวปวีณา จິงสิริพรชัย 38014287

นางสาวพรพรรณ เกรียงเกษม 38014327

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. วิภา แสงพิลิตธิ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **ดิจิทัลฟิลเตอร์ฮาร์ดแวร์**

DIGITAL FILTER HARDWARE IMPLEMENTATION

ผู้จัดทำ

1. นางสาวปวีณา จึงศิริพรชัย 38014287
2. นางสาวพรพรรณ เกรียงเกษม 38014327

.....*(ชื่อ นามสกุล)*..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์วิชา แสงฟิลิทรี่)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิจิทัลฟิลเตอร์ฮาร์ดแวร์
DIGITAL FILTER HARDWARE IMPLEMENTATION

โดย นางสาววิณา จิ่งสิริพรชัย 38014287
นางสาวพรพรรณ เกรียงเกษม 38014327

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์วิภา แสงพิสิทธิ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติของดิจิทัลฟิลเตอร์ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างเป็นวงจรในส่วนของฮาร์ดแวร์ โดยในเบื้องต้นจะทำการศึกษารูปแบบดิจิทัลฟิลเตอร์ที่มีการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ และนำเอาโครงสร้างฟิลเตอร์ที่ได้มาทำการสร้างเป็นวงจร ซึ่งจะมีการนำสัญญาณอินพุตที่เป็นอนาล็อกมาผ่านวงจรแซมปลิ่งและโฮลด์ วงจรคูณ วงจรบวก วงจรหน่วงเวลา แล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ โดยจะนำสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรที่ออกแบบมาเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณ โดยคอมพิวเตอร์

ABSTRACT

This project about structure and characteristic of digital filter. In order to design and implement hardware, first we study about digital filter design computer processing and use this structure to produce circuit. Second analog input signal will pass through sampling and hold circuit, multiplying circuit, summary circuit and time delay circuit. The output signal from design circuit is compared with output signal from calculation by a computer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ	3
2.1 ชนิดและลำดับของสัญญาณ	3
2.2 ทฤษฎีการแซมปลิง	9
2.3 ระบบและคุณสมบัติของระบบ	10
2.4 ผลตอบสนองของชนิดแซมเปิล	11
2.5 ผลตอบสนองทางความถี่	12
2.6 รีเคอร์ซีฟฟิลเตอร์	13
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	16
3.1 การออกแบบ Lowpass filter	16
3.2 การออกแบบ Highpass filter	21
3.3 การออกแบบ Bandpass filter	26
3.4 การออกแบบ Bandreject filter	31
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	36
บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป	57
กิตติกรรมประกาศ	58
หนังสืออ้างอิง	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ชนิดของสัญญาณ	4
รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมการประมวลผลสัญญาณ	4
รูปที่ 2.3 Unit sample (Unit impulse)	5
รูปที่ 2.4 Constant sequence	5
รูปที่ 2.5 Unit step sequence	6
รูปที่ 2.6 Linear sequence	6
รูปที่ 2.7 Unit sample sequence	7
รูปที่ 2.8 Unit step sequence	7
รูปที่ 2.9 Weighted sample sequence	7
รูปที่ 2.10 Real exponential sequence	8
รูปที่ 2.11 Complex unit exponential sequence	9
รูปที่ 2.12 การแซมปลิงในอุดมคติ	9
รูปที่ 2.13 ระบบลิเนียร์ไทม์อินแวร์เรียนท์	10
รูปที่ 2.14 กราฟคุณลักษณะ ideal LP	13
รูปที่ 3.1 การออกแบบ Lowpass filter	18
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรม Lowpass filter	19
รูปที่ 3.3 วงจร Lowpass filter	20
รูปที่ 3.4 การออกแบบ Highpass filter	23
รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรม Highpass filter	24
รูปที่ 3.6 วงจร Highpass filter	25
รูปที่ 3.7 การออกแบบ Bandpass filter	28
รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรม Bandpass filter	29
รูปที่ 3.9 วงจร Bandpass filter	30
รูปที่ 3.10 การออกแบบ Bandreject filter	33
รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรม Bandreject filter	34
รูปที่ 3.12 วงจร Bandreject filter	35
รูปที่ 4.1 สัญญาณอินพุทและสัญญาณแซมปลิง	36
รูปที่ 4.2 สัญญาณอินพุทและสัญญาณ Delay 1	37
รูปที่ 4.3 สัญญาณอินพุทและสัญญาณ Delay 2	37
รูปที่ 4.4 สัญญาณอินพุทและสัญญาณ Delay 3	38
รูปที่ 4.5 สัญญาณอินพุทและสัญญาณ Delay 4	38

รูปที่ 4.6	สัญญาณอินพุตความถี่ 502.9 Hz และสัญญาณเอาต์พุต	39
รูปที่ 4.7	สัญญาณอินพุตความถี่ 1.874 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	39
รูปที่ 4.8	สัญญาณอินพุตความถี่ 2.98 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	40
รูปที่ 4.9	กราฟคุณลักษณะ lowpass filter ผลจากวงจร	41
รูปที่ 4.10	กราฟคุณลักษณะ lowpass filter ผลจากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์	42
รูปที่ 4.11	สัญญาณอินพุตความถี่ 498.3 Hz และสัญญาณเอาต์พุต	43
รูปที่ 4.12	สัญญาณอินพุตความถี่ 1.995 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	43
รูปที่ 4.13	สัญญาณอินพุตความถี่ 3.636 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	44
รูปที่ 4.14	สัญญาณอินพุตความถี่ 4.589 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	44
รูปที่ 4.15	กราฟคุณลักษณะ highpass filter ผลจากวงจร	45
รูปที่ 4.16	กราฟคุณลักษณะ highpass filter ผลจากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์	46
รูปที่ 4.17	สัญญาณอินพุตความถี่ 1.202 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	47
รูปที่ 4.18	สัญญาณอินพุตความถี่ 2 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	47
รูปที่ 4.19	สัญญาณอินพุตความถี่ 2.516 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	48
รูปที่ 4.20	สัญญาณอินพุตความถี่ 3.202 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	48
รูปที่ 4.21	สัญญาณอินพุตความถี่ 3.698 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	49
รูปที่ 4.22	กราฟคุณลักษณะ bandpass filter ผลจากวงจร	50
รูปที่ 4.23	กราฟคุณลักษณะ bandpass filter ผลจากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์	51
รูปที่ 4.24	สัญญาณอินพุตความถี่ 997 Hz และสัญญาณเอาต์พุต	52
รูปที่ 4.25	สัญญาณอินพุตความถี่ 2.01 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	52
รูปที่ 4.26	สัญญาณอินพุตความถี่ 2.791 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	53
รูปที่ 4.27	สัญญาณอินพุตความถี่ 3.347 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	53
รูปที่ 4.28	สัญญาณอินพุตความถี่ 4.31 kHz และสัญญาณเอาต์พุต	54
รูปที่ 4.29	กราฟคุณลักษณะ bandreject filter ผลจากวงจร	55
รูปที่ 4.30	กราฟคุณลักษณะ bandreject filter ผลจากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตั้มประสิทธิ lowpass prototype Butterworth	14
ตารางที่ 2.2 Butterworth digital lowpass prototype filters	15
ตารางที่ 2.3 การแปลงความถี่คิติดอลฟิลเตอร์	15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การกรองความถี่ (Filtering) เป็นแขนงหนึ่งของการประมวลผลของสัญญาณ (Signal processing) ซึ่งเราจะต้องทำความเข้าใจความหมายของคำที่เกี่ยวข้องต่อไปนี้คือ

สัญญาณ (Signal) คือ ฟังก์ชันที่แทนความหมายของข้อมูล (Data) หรือข่าวสาร (Information) ซึ่งเป็นขนาดทางกายภาพ (Physical quantity) ที่สามารถวัดได้ (Measurable) สัญญาณอาจเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้หลายตัวแปร ซึ่งขนาดของสัญญาณอาจจะเปลี่ยนไปตามเวลา (Time) ความถี่ (Frequency) และระยะทาง (Distance) เป็นต้น

ตัวแปรอิสระที่ใช้เขียนเป็นคณิตศาสตร์แทนความหมายของสัญญาณ อาจจะเป็นตัวแปรที่ต่อเนื่อง (Continuous) หรือไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ก็ได้ ดังนั้นการประมวลผลสัญญาณจึงแบ่งชนิดของสัญญาณออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. สัญญาณอนาล็อกหรือสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางแกนเวลา (Analog or Continuous Signal) คือ สัญญาณที่มีความต่อเนื่องทั้งในแกนเวลาและขนาดของสัญญาณ คณิตศาสตร์พื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์คือ สมการอนุพันธ์เชิงเส้นโดยใช้ลาปลาซทรานส์ฟอร์มช่วยแก้ปัญหา

2. สัญญาณดิจิทัลหรือสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางแกนเวลา (Digital or Discrete Signal) คือ สัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทั้งในแกนเวลาและขนาดของสัญญาณ คณิตศาสตร์พื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์คือ สมการผลต่างเชิงเส้นโดยใช้ Z-transform ช่วยแก้ปัญหา

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) หมายถึง การแทนสัญญาณต่างๆ ด้วยลำดับของตัวเลขและสัญลักษณ์ และทำการประมวลผลลำดับเหล่านี้ออกมา วิธีการประมวลผลอาจจะมีจุดประสงค์แตกต่างกัน เช่น การประมวลผลคุณสมบัติของสัญญาณ หรือการแปลงสัญญาณหนึ่งให้ไปอยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเหมาะสมในการพิจารณาวิเคราะห์มากกว่าสัญญาณเดิม

ขอบข่ายหรือสาขาของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลได้พัฒนาขึ้นอย่างมากมายและได้ช่วยขยายพื้นฐานทางทฤษฎีในสาขาอื่นอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งการกรองสัญญาณดิจิทัล (Digital Filter) ก็เป็นแขนงหนึ่งของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

การกรองสัญญาณดิจิทัล (Digital Filter) คือ กระบวนการคำนวณ (Computation Process) หรือ อัลกอริทึม (Algorithm) ซึ่งสัญญาณดิจิทัลหรือลำดับของสัญญาณอินพุท (Input) ถูกแปลงให้เป็นลำดับของตัวเลขใหม่ที่เรียกว่า สัญญาณเอาต์พุทดิจิทัล (Output Digital Signal) กระบวนการคำนวณอาจจะเป็นการกรองความถี่ต่ำ (Lowpass Filter) การกรองความถี่สูง (Highpass Filter) การหาค่าอนุพันธ์ (Derivative) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Filter หมายถึง อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมซึ่งเป็นองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ หรือเรียกรวมกันว่า สเปกตรัมความถี่ ให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการได้ ดังนั้น Digital Filter จะหมายถึง ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลที่ทำให้สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณดิจิทัลเปลี่ยนแปลงไป

การกรองสัญญาณดิจิทัลเป็นการประมวลผลสัญญาณอันหนึ่งที่มีความสำคัญ โดยที่สัญญาณดิจิทัลมักจะเกี่ยวเนื่องกับการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) และลดความเพี้ยนของสัญญาณ

การกรองสัญญาณดิจิทัลเป็นกระบวนการที่ดัดแปลงสเปกตรัมของสัญญาณให้มีสเปกตรัมเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการหรือกำหนดให้ ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มค่าหรือลดทอนค่าขนาดของสัญญาณในแถบความถี่ที่กำหนดให้ออกไป หรือทำการแยกสัญญาณในแถบความถี่ที่ต้องการออกมาใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

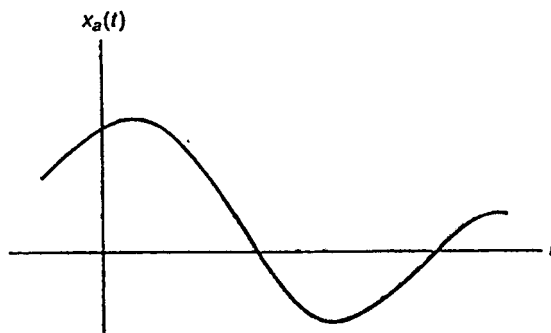
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ชนิดและลำดับของสัญญาณ

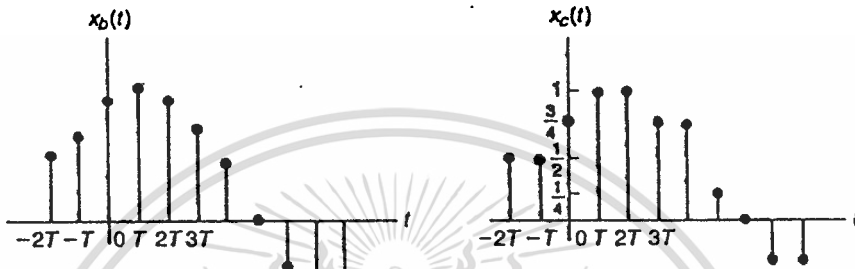
2.1.1 ชนิดของสัญญาณ

การประมวลผลสัญญาณของระบบใดๆ สัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลง 5 ลักษณะ ดังนี้

- 1) สัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลาและแอมพลิจูด หรือเรียกว่า สัญญาณอนาล็อก (Analog signal)
- 2) สัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลาแต่มีความต่อเนื่องทางแอมพลิจูด หรือเรียกว่า สัญญาณแซมเปิล (Sampled signal)
- 3) สัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลาและแอมพลิจูด หรือเรียกว่า สัญญาณดิจิทัล (Digital signal)
- 4) สัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลาและแอมพลิจูดด้วยซิมพลิฟายด์ หรือเรียกว่า อนาล็อกแซมเปิล (Sampled analog) ซึ่งเป็นเอาต์พุตของวงจรแซมปลิงและโฮลด์ (Sampling and Hold)
- 5) สัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลาแต่ไม่มีความต่อเนื่องทางแอมพลิจูด ซึ่งเป็นเอาต์พุตของวงจรดิจิทัล-อนาล็อก คอนเวอร์เตอร์ (Digital to Analog Converter)

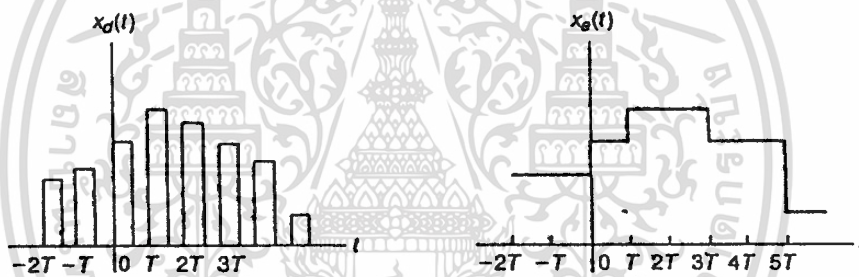


(a) Analog signal (continuous-time)



(b) Sampled signal (discrete-time)

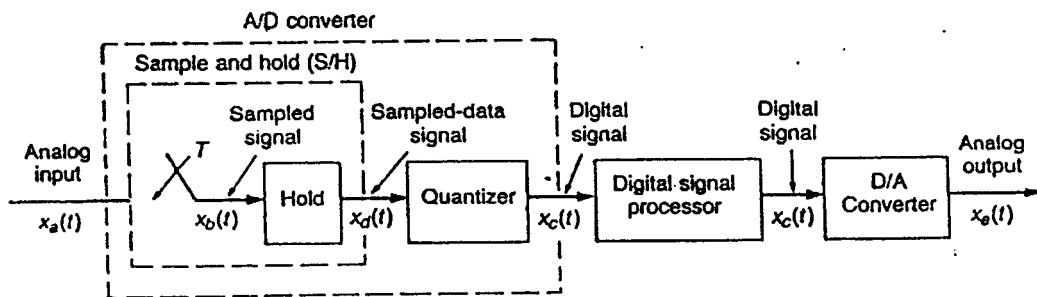
(c) Digital signal (discrete-time)



(d) Sampled-data signal (continuous-time)

(e) D/A output signal (continuous-time)

รูปที่ 2.1 ชนิดของสัญญาณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

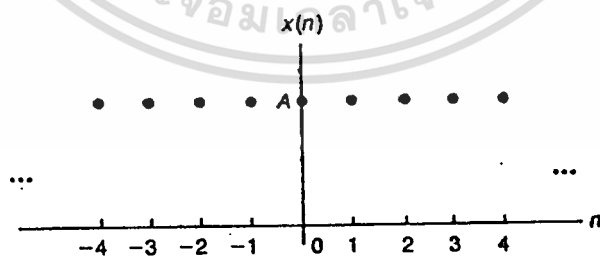
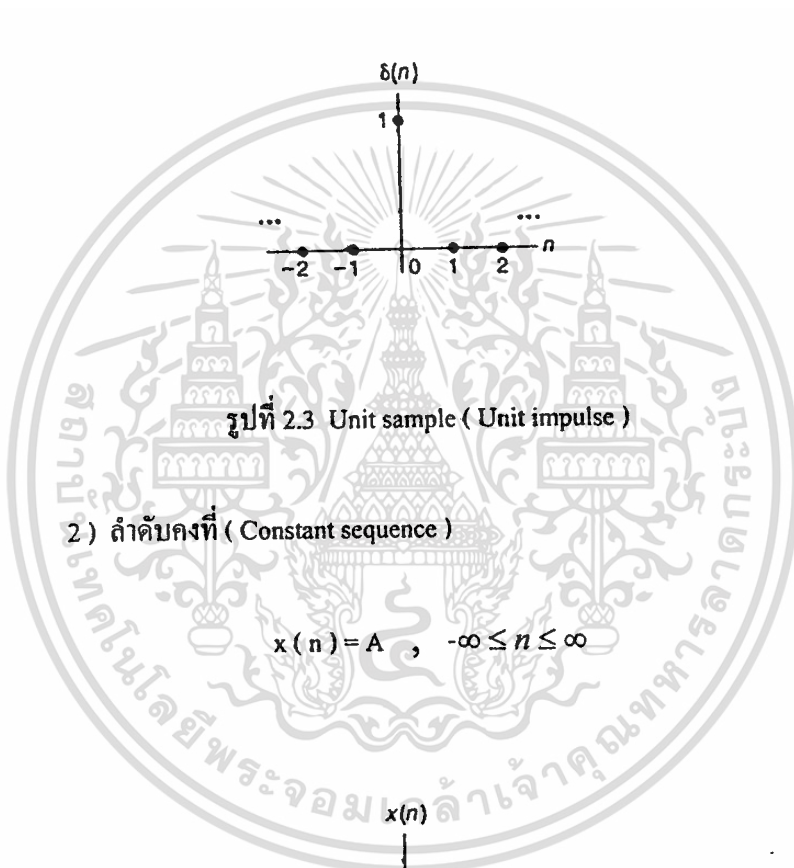
รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมการประมวลผลสัญญาณ

2.1.2 ลำดับของสัญญาณ

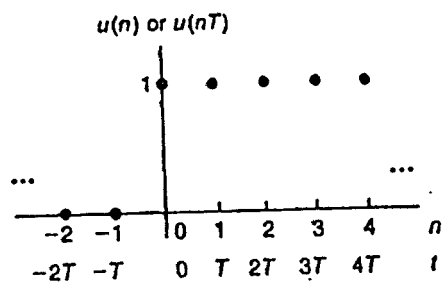
- ลำดับพื้นฐาน

1) ลำดับยูนิตแซมเปิล (Unit sample sequence) หรือ ลำดับยูนิตอิมพัลส์ (Unit impulse sequence)

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}$$

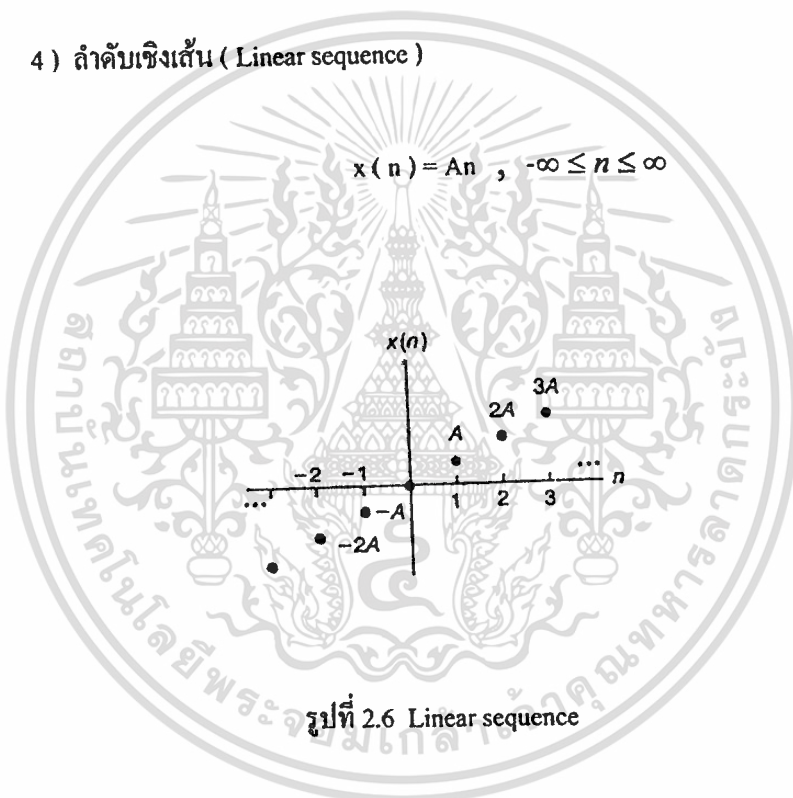


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง $u(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases}$ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 Unit step sequence

4) ลำดับเชิงเส้น (Linear sequence)



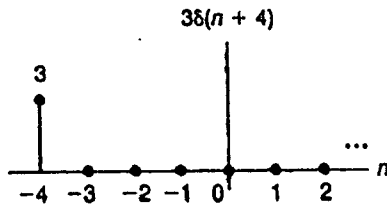
รูปที่ 2.6 Linear sequence

- ลำดับที่มีการเลื่อนตำแหน่ง

1) ซีฟเชมเบิลและสเต็ปซีควเอน (Shifted sequence and step sequence)

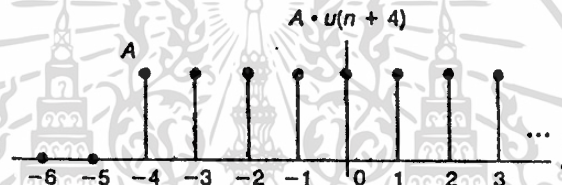
$$\text{shifted unit sample sequence } \delta(n - n_0) = \begin{cases} 1 & , n = n_0 \\ 0 & , n \neq n_0 \end{cases}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 Unit sample sequence

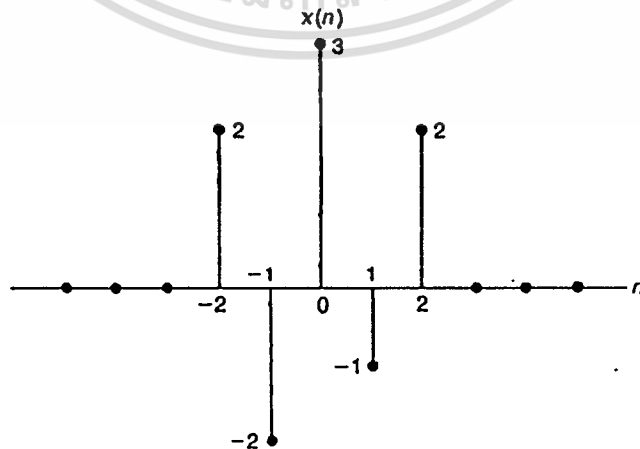
$$\text{shifted unit step sequence } u(n - n_0) = \begin{cases} 1, & n \geq n_0 \\ 0, & n < n_0 \end{cases}$$



รูปที่ 2.8 Unit step sequence

2) เวทขั้มของซึฟยูนิตแซมเปิล (Weighted sum of shifted unit sample)

$$x(n) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} x(m)\delta(n-m)$$



รูปที่ 2.9 Weighted sample sequence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่งไปขอปัญหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

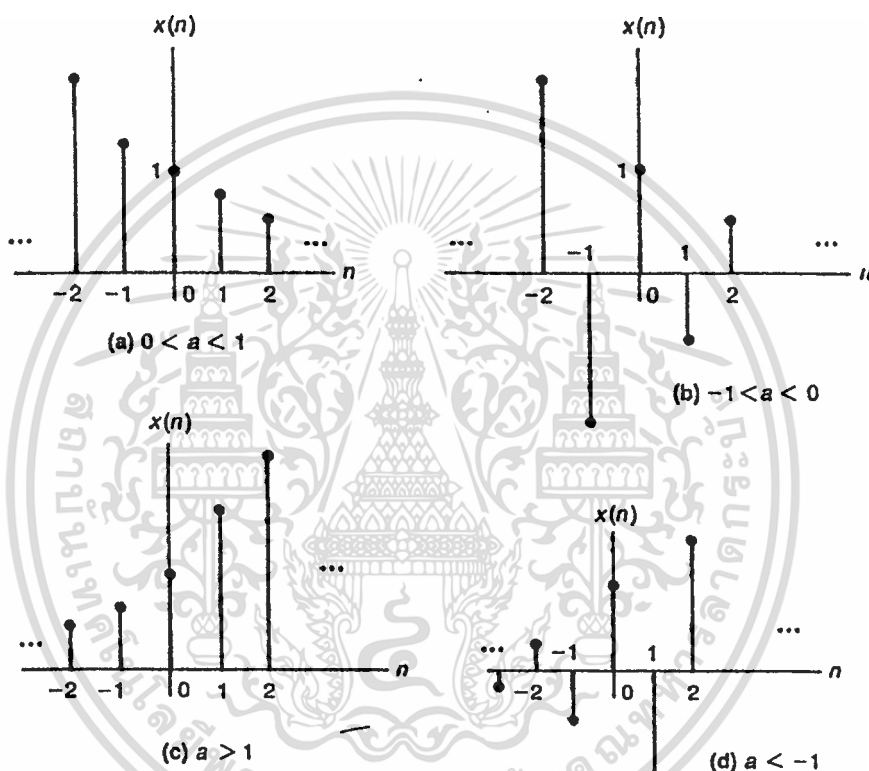
- ลำดับเอ็กโปเนนเชียลและซายน์ฟูเซอร์คอส

1) ลำดับเอ็กโปเนนเชียลค่าจริง (Real exponential sequence)

$$x(n) = a^n, \quad -\infty \leq n \leq \infty$$

พิจารณาเฉพาะ $n \geq 0$ จะได้

$$x(n) = a^n u(n)$$



รูปที่ 2.10 Real exponential sequence

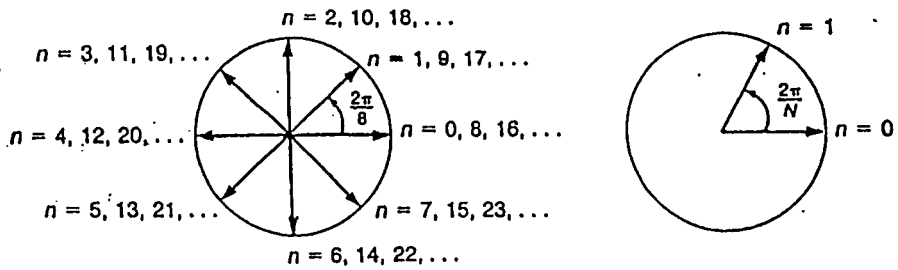
2) ลำดับยูนิตเอ็กโปเนนเชียลเชิงซ้อน (Complex unit exponential sequence)

$$p(n) = e^{j(2\pi/N)n}$$

N คือ คาบของลำดับ

n คือ จำนวนแซมเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

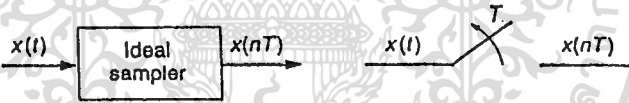


รูปที่ 2.11 Complex unit exponential sequence

2.2 ทฤษฎีการแซมปลิง

การแซมปลิงสัญญาณใดๆทำได้โดยให้สัญญาณเข้าสู่วงจร ideal sampler หรือแทนได้ด้วยสวิตช์

ในวงจร



รูปที่ 2.12 การแซมปลิงในอุดมคติ

สัญญาณอินพุตแซมเปิล $x(t) = A\cos(\omega t + \phi) = A\cos(2\pi f t + \phi)$

สัญญาณเอาต์พุตแซมเปิลที่จุดแซมปลิง $t = n T$

$$x(nT) = A\cos(\omega T n + \phi) = A\cos(2\pi f T n + \phi)$$

$$x(n) = A\cos(\theta n + \phi)$$

โดยที่

$$\theta = \omega T = 2\pi f T = 2\pi f / f_s$$

θ คือ ความถี่ดิจิทัล มีค่า $0 \leq \theta < \pi$

f คือ ความถี่สัญญาณใดๆ

f_s คือ ความถี่แซมปลิง มีค่า $f_s > 2f$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ระบบและคุณสมบัติของระบบ

2.3.1 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ถ้าคําคับอินพุตใดๆ $x_1(n)$ และ $x_2(n)$ เมื่อป้อนเข้าสู่ระบบจะได้คําคับเอาต์พุต $y_1(n)$ และ $y_2(n)$ ถ้าคําคับอินพุตเป็น $x_3(n)$

$$x_3(n) = \infty_1 x_1(n) + \infty_2 x_2(n)$$

จะได้คําคับเอาต์พุต $y_3(n)$

$$y_3(n) = \infty_1 y_1(n) + \infty_2 y_2(n)$$

โดยที่ ∞_1 และ ∞_2 คือ ค่าคงที่เชิงซ้อน และต้องเป็นจริงสำหรับทุกค่าของ n จะกล่าวได้ว่าเป็นระบบเชิงเส้น

2.3.2 ไข่มอนแวนร์เรี่ยนท์ (Time-Invariance)

ถ้าคําคับอินพุต $x_1(n)$ และคําคับเอาต์พุต $y_1(n)$

ถ้าคําคับอินพุตเป็น $x_2(n) = x_1(n - n_0)$

จะได้เอาต์พุต $y_2(n) = y_1(n - n_0)$

สำหรับทุกค่าของ n และ $x_1(n)$ และ n_0 ใดๆถูกเรียกว่า ไข่มอนแวนร์เรี่ยนท์

2.3.3 ระบบลิเนียร์ไข่มอนแวนร์เรี่ยนท์ (Linear Time-Invariant (LTI) Systems)

ระบบที่มีคุณสมบัติเชิงเส้นและไข่มอนแวนร์เรี่ยนท์ จะเป็นระบบ LTI (linear time-invariant)



รูปที่ 2.13 ระบบลิเนียร์ไข่มอนแวนร์เรี่ยนท์

ระบบลิเนียร์ไข่มอนแวนร์เรี่ยนท์ (LTI) อาจอธิบายได้โดย difference equation

$$y(n) = a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2) + \dots + a_N y(n-N) + b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + \dots + b_L x(n-L)$$

โดยที่ a และ b คือ ค่าคงที่จริง

N คือ ค่า delay ของเอาต์พุต $y(n)$

L คือ ค่า delay ของอินพุต $x(n)$

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

เรียกว่า Recursive system เพราะเอาต์พุตขึ้นอยู่กับค่าเอาต์พุตก่อนหน้า

ถ้าเอาต์พุตของระบบขึ้นอยู่กับอินพุตเท่านั้น เรียกว่า Nonrecursive system ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา $y(n) = \sum_{k=0}^{k=L} b_k x(n-k)$ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ผลตอบสนองยูนิตแซมเปิล (Unit Sample Response)

Unit sample response เป็นลำดับเอาต์พุตเมื่อป้อนอินพุต $x(n) = \delta(n)$ ให้กับระบบ ถ้าทราบ unit sample response ของระบบจะสามารถหาผลตอบสนองของลำดับอินพุตใดๆได้

พิจารณาระบบ nonrecursive

$$y(n) = \sum_{k=0}^{k=L} b_k x(n-k)$$

อินพุตเป็น unit sample

$$x(n) = \delta(n) = \begin{cases} 1 & , n = 0 \\ 0 & , n \neq 0 \end{cases}$$

เอาต์พุตถูกเรียกว่า unit sample response แสดงแทนด้วย $h(n)$

นั่นคือ $y(n) = h(n)$ ถ้า $x(n) = \delta(n)$

จะได้ $y(n) = h_n = \begin{cases} b_n & , n = 0, 1, 2, \dots, L \\ 0 & , n < 0 \end{cases}$

$$h(n) = \sum_{k=0}^L b_k \delta(n-k) = \sum_{k=0}^L h(k) \delta(n-k)$$

เรียกระบบนี้ว่า finite impulse response (FIR) systems

สำหรับ $n \geq L+1$, unit sample response จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

พิจารณาระบบ recursive

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

อินพุตเป็น unit sample ดังนั้น unit sample response คือ

$$h(n) = \sum_{k=1}^{k=N} C_k (r_k)^n u(n) + \sum_{k=0}^{k=L-N} A_k \delta(n-k)$$

โดยที่ r_k 's คือ ลำดับเอ็กโปเนนเชียล

$\delta(n-k)$'s คือ shifted samples

C_k 's , A_k 's คือ ค่าคงที่

unit sample response ของระบบที่ไม่เข้าใกล้ศูนย์ เรียกระบบนี้ว่า infinite impulse response (IIR) systems และเมื่อทราบ unit sample response ก็จะสามารถหาเอาต์พุตของระบบได้จากผลรวมของ unit sample response คูณด้วยลำดับของอินพุต ซึ่งเรียกว่า Convolution Summation ดังสมการ

$$y(n) = \sum_{m=0}^{m=n} h(m)x(n-m) = \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} x(m)h(n-m)$$

ลำดับอินพุต $x(n)$ เป็นระบบ LTI มี unit sample response , $h(n)$ เอาต์พุตจะถูกกำหนดด้วย

$$y(n) = x(n) * h(n)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response)

ผลตอบสนองทางความถี่ คือ การหาการเปลี่ยนแปลงของแอมป์ลิจูดและเฟสของเอาต์พุตเมื่อ เปลี่ยนความถี่ของอินพุตและแอมป์ลิจูดและเฟสของอินพุตคงที่

ถ้าลำดับอินพุต $x(n) = \cos(\theta n) = \frac{1}{2} [e^{j\theta n} + e^{-j\theta n}]$

จาก convolution $y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)x(n-m)$

และอินพุตเป็น $x(n) = e^{j\theta n}$

ได้
$$\begin{aligned} y(n) &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)e^{j\theta(n-m)} \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)e^{j\theta n} e^{-j\theta m} \\ &= e^{j\theta n} \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)e^{-j\theta m} \\ &= x(n) \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)e^{-j\theta m} \end{aligned}$$

ให้ $H(e^{j\theta}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)e^{-j\theta m}$

เรียก $H(e^{j\theta})$ ว่าผลตอบสนองความถี่ (frequency response)

ดังนั้น $y(n) = x(n)H(e^{j\theta})$

โดยที่ $x(n) = e^{j\theta n}$, $-\infty \leq n \leq \infty$

การหาผลตอบสนองความถี่สามารถหาได้จาก difference equation โดยจาก

$$y(n) - \sum_{k=1}^N a_k y(n-k) = \sum_{k=0}^L b_k x(n-k)$$

ถ้า $x(n) = e^{j\theta n}$ และอินพุตถูก delay ไป K sample จะได้

$$x(n-k) = e^{j\theta(n-k)} = e^{j\theta n} e^{-j\theta k}$$

$$y(n-k) = H(e^{j\theta}) e^{j\theta n} e^{-j\theta k}$$

$$\text{แทน } H(e^{j\theta}) e^{j\theta n} - \sum_{k=1}^N a_k H(e^{j\theta}) e^{j\theta n} e^{-j\theta k} = \sum_{k=0}^L b_k e^{j\theta n} e^{-j\theta k}$$

$$H(e^{j\theta}) \left[1 - \sum_{k=1}^N a_k e^{-j\theta k} \right] e^{j\theta n} = e^{j\theta n} \left[\sum_{k=0}^L b_k e^{-j\theta k} \right]$$

$$H(e^{j\theta}) = \frac{\sum_{k=0}^L b_k e^{-j\theta k}}{1 - \sum_{k=1}^N a_k e^{-j\theta k}}$$

เมื่อทำการพล็อตกราฟผลตอบสนองความถี่จะได้เป็นกราฟคุณลักษณะของฟิลเตอร์ ซึ่งจะเป็น

เอกสารหรือแบนด์พาสขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ a_k , b_k ใน difference equation

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 รีเคอร์ซีฟฟิลเตอร์ (Recursive Filter)

พื้นฐานการออกแบบ Recursive Filter มาจากการออกแบบ analog filter ทราเนเฟอร์ฟังก์ชันของ analog filter คือ

$$H(s) = \frac{k(s^L + b_{L-1}s^{L-1} + \dots + b_1s + b_0)}{s^N + a_{N-1}s^{N-1} + \dots + a_1s + a_0}$$

N คือ อันดับของฟิลเตอร์ , K คือ ค่าคงที่ (จำนวนจริง) , L มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ N ฟิลเตอร์มี 3 ชนิด คือ บัตเตอร์เวิร์ธ (Butterworth) , เชฟปีเชฟ (Chebyshev) , อีลิปติก (Elliptic)

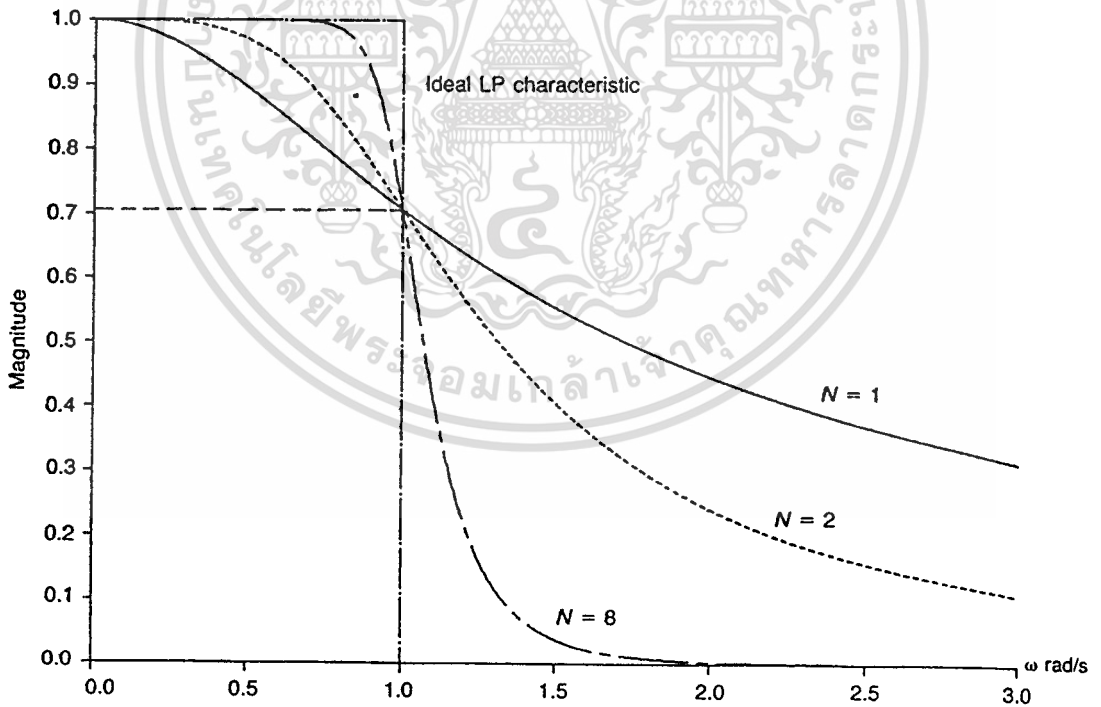
ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะ Butterworth

Butterworth lowpass filter มีทรานเฟอร์ฟังก์ชัน คือ

$$|H_{LP}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\omega/\omega_c)^{2N}}$$

N คือ อันดับของฟิลเตอร์ ω_c คือ ความถี่คัทออฟ ถ้าความถี่คัทออฟ เท่ากับ 1 เรียกว่า prototype lowpass filter

$$|H_{LP}(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2N}}$$



(a) Magnitude

รูปที่ 2.14 กราฟคุณลักษณะ ideal LP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์ของ lowpass prototype Butterworth กำหนดได้จากตาราง

BUTTERWORTH PROTOTYPE COEFFICIENTS

N	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
1	∞							
2	1.4141	1.0000						
3	2.0000	2.0000	1.0000					
4	2.6131	3.4142	2.6131	1.0000				
5	3.2361	5.2361	5.2361	3.2361	1.0000			
6	3.8637	7.4641	9.1416	7.4641	3.8637	1.0000		
7	4.4940	10.0978	14.5918	14.5918	10.0978	4.4940	1.0000	
8	5.1258	13.1371	21.8462	25.6884	21.8462	13.1371	5.1258	1.0000

$$H_{LP_p}(s) = \frac{1}{1 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_Ns^N}$$

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์ lowpass prototype Butterworth

จากทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ lowpass prototype สามารถแปลงเป็นทรานเฟอร์ฟังก์ชันของฟิลเตอร์แบบต่างๆได้โดยการแทนค่า s ใหม่ ดังนี้

1. lowpass prototype เป็น lowpass filter

$$H_{LP}(s) = H_{LP_p}(s) \Big|_{s=s/\omega_c}$$

2. lowpass prototype เป็น highpass filter

$$H_{HP}(s) = H_{LP_p}(s) \Big|_{s=\omega_c/s}$$

3. lowpass prototype เป็น bandpass filter

$$H_{BP}(s) = H_{LP_p}(s) \Big|_{s=(s^2 + \omega_c^2)/B_s}$$

4. lowpass prototype เป็น bandreject filter

$$H_{BR}(s) = H_{LP_p}(s) \Big|_{s=B_s/(s^2 + \omega_c^2)}$$

เมื่อได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของอนาล็อกฟิลเตอร์ จะหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของดิจิตอลฟิลเตอร์

โดยการแปลงจาก s โดเมนเป็น z โดเมน ดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{LP_p}(z) = H_{LP_p}(s) \Big|_{s=\frac{z-1}{z+1}}$$

BUTTERWORTH DIGITAL LOWPASS PROTOTYPE FILTERS

<i>N</i>	$H_{LP}(z)$	zeros	poles
1	$\frac{0.5(z + 1)}{z}$	$z = -1$	$z = 0$
2	$\frac{0.293(z + 1)^2}{z^2 + 0.173}$	$z_{1,2} = -1$	$z_{1,2} = 0.414e^{\pm j\pi/2}$
3	$\frac{0.167(z + 1)^3}{z(z^2 + 0.333)}$	$z_{1-3} = -1$	$z_1 = 0$ $z_{2,3} = 0.577e^{\pm j\pi/2}$
4	$\frac{0.094(z + 1)^4}{z^4 + 0.486z^2 + 0.018}$	$z_{1-4} = -1$	$z_{1,2} = 0.201e^{\pm j\pi/2}$ $z_{3,4} = 0.667e^{\pm j\pi/2}$ $z_1 = 0$
5	$\frac{0.0528(z + 1)^5}{z(z^4 + 0.633z^2 + 0.056)}$	$z_{1-5} = -1$	$z_{2,3} = 0.314e^{\pm j\pi/2}$ $z_{4,5} = 0.731e^{\pm j\pi/2}$

ตารางที่ 2.2 Butterworth digital lowpass prototype filters

สามารถแปลงเป็นฟิลเตอร์แบบต่างๆ ด้วยการแทนค่า *Z* ใหม่ตามตาราง

DIGITAL FILTER FREQUENCY TRANSFORMATIONS

Type	Transformation Replace <i>z</i> in LP digital prototype with the expression listed below	Design Constants
1. Lowpass	$\frac{z - \alpha}{1 - \alpha z}$	$\alpha = \frac{\sin(\theta_c/2 - \theta'_c/2)}{\sin(\theta_c/2 + \theta'_c/2)}$
2. Highpass	$-\frac{z - \alpha}{1 - \alpha z}$	$\alpha = \frac{\cos(\theta_c/2 - \theta'_c/2)}{\cos(\theta_c/2 + \theta'_c/2)}$
3. Bandpass	$-\frac{z^2 - \frac{2\alpha k}{k+1}z + \frac{k-1}{k+1}}{1 - \frac{2\alpha k}{k+1}z + \frac{k-1}{k+1}z^2}$	$\alpha = \frac{\cos(\theta'_u/2 + \theta'_l/2)}{\cos(\theta'_u/2 - \theta'_l/2)}$ $k = \tan \frac{\theta_c}{2} \cot(\theta'_u/2 - \theta'_l/2)$
4. Bandstop	$\frac{z^2 - \frac{2\alpha}{1+k}z + \frac{1-k}{1+k}}{1 - \frac{2\alpha}{1+k}z + \frac{1-k}{1+k}z^2}$	$\alpha = \frac{\cos(\theta'_u/2 + \theta'_l/2)}{\cos(\theta'_u/2 - \theta'_l/2)}$ $k = \tan \frac{\theta_c}{2} \tan(\theta'_u/2 - \theta'_l/2)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ตารางที่ 2.3 การแปลงความถี่ดิจิทัลฟิลเตอร์

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

3.1 การออกแบบ Lowpass filter

ต้องการความถี่คัทออฟที่ 0.375π ที่ความถี่ 0.65π ลดทอน 30 dB จากตารางที่ 2.3

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\sin(\theta_c / 2 - \theta_c' / 2)}{\sin(\theta_c / 2 + \theta_c' / 2)} \\ &= \frac{\sin(\pi / 4 - 3\pi / 16)}{\sin(\pi / 4 + 3\pi / 16)} \\ &= 0.199 \end{aligned}$$

หาอันดับฟิลเตอร์จาก

$$\begin{aligned} N &= \frac{\log[(10^{-k_1/10} - 1)/(10^{-k_2/10} - 1)]}{2 \log[\omega_1 / \omega_2]} \\ k_1 &= \text{อัตราขยายที่ความถี่คัทออฟ} = -3 \text{ dB} \\ k_2 &= \text{อัตราขยายที่ความถี่ลดทอน} = -30 \text{ dB} \\ \omega &= 2/T \tan(\theta/2) \\ T &= \text{คาบเวลาในการแซมปลิง ให้เท่ากับ 1} \\ \omega_1 &= 2 \tan(\theta_1/2) \\ &= 2 \tan(0.375\pi/2) = 1.336 \\ \omega_2 &= 2 \tan(\theta_2/2) \\ &= 2 \tan(0.65\pi/2) = 3.264 \\ N &= \frac{\log[(10^{3/10} - 1)/(10^{30/10} - 1)]}{2 \log[1.336/3.264]} \\ &= 3.861 \approx 4 \end{aligned}$$

ได้อันดับฟิลเตอร์ เท่ากับ 4 จากตารางที่ 2.3 และ 2.2 จะได้

$$\begin{aligned} H_{LP}(z) &= \frac{0.094(z+1)^4}{z^4 + 0.486z^2 + 0.018} \Bigg|_{z=\frac{z-0.199}{1-0.199z}} \\ &= \frac{0.038z^4 + 0.152z^3 + 0.228z^2 + 0.152z + 0.038}{z^4 - 0.982z^3 + 0.789z^2 - 0.242z + 0.038} \end{aligned}$$

แปลงในรูปสมการผลต่างจะได้

$$\begin{aligned} y(n) &= 0.038x(n) + 0.152x(n-1) + 0.228x(n-2) \\ &\quad + 0.152x(n-3) + 0.038x(n-4) + 0.982y(n-1) \\ &\quad - 0.789y(n-2) + 0.242y(n-3) - 0.038y(n-4) \end{aligned}$$

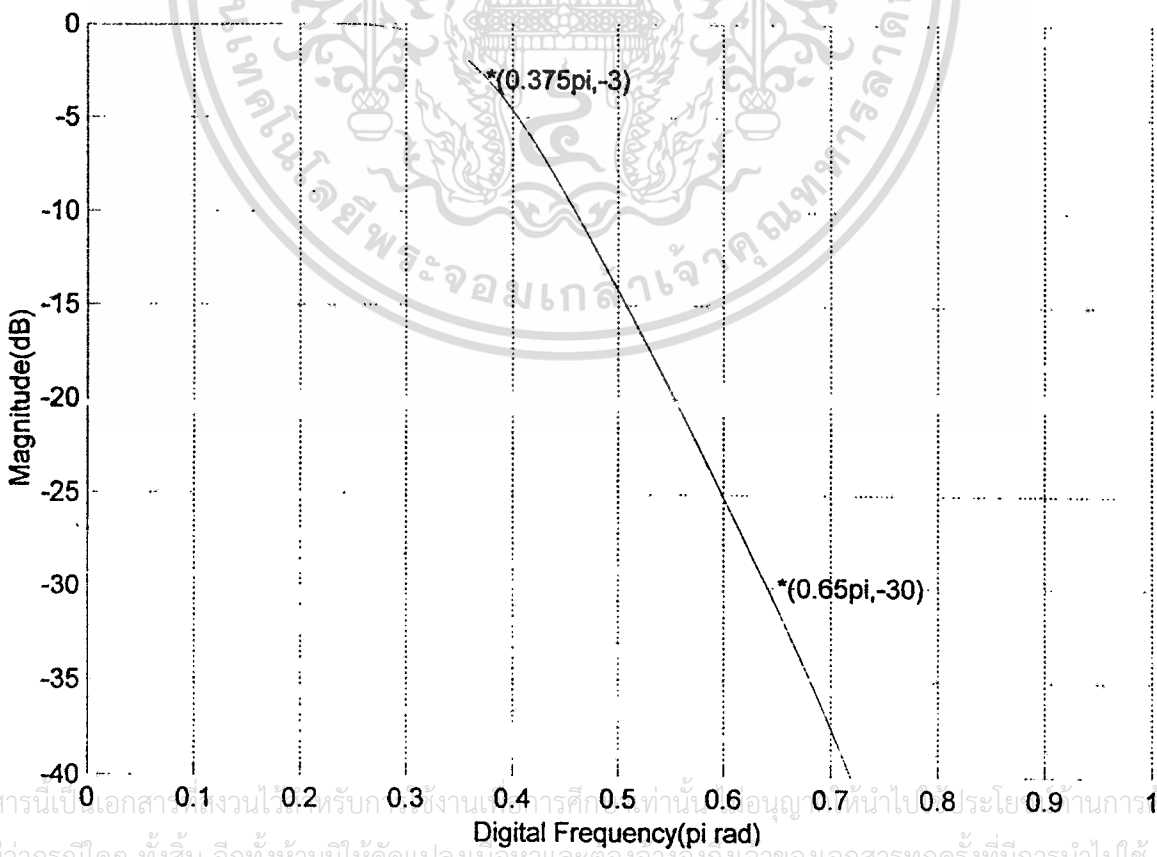
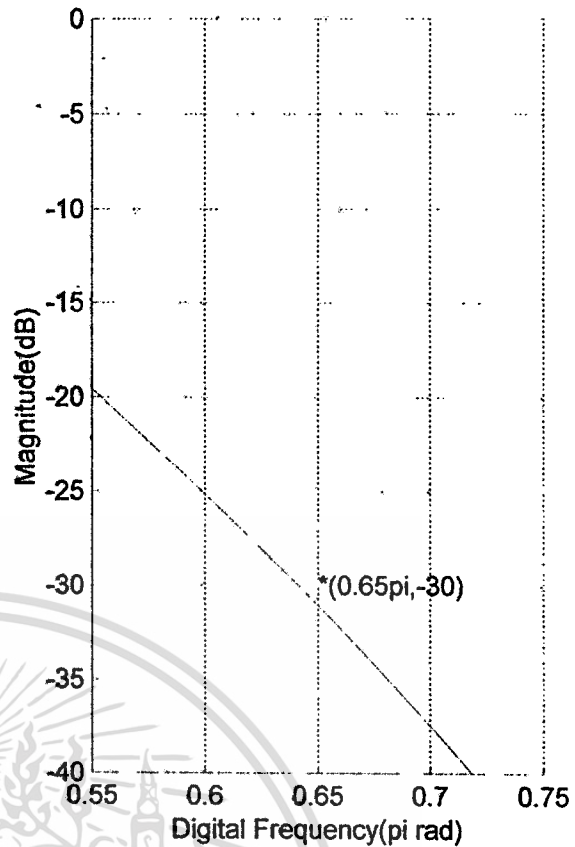
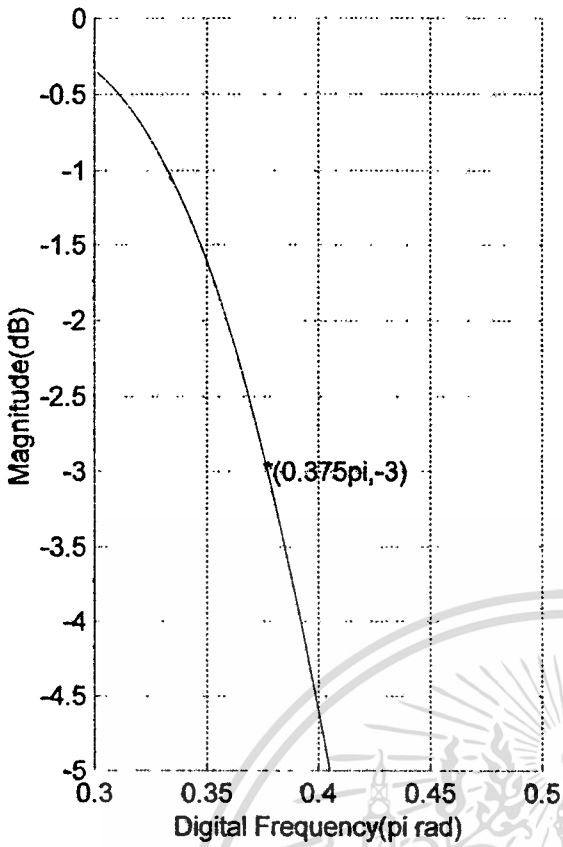
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลโดยใช้ Matlab เขียนโปรแกรมได้ดังนี้

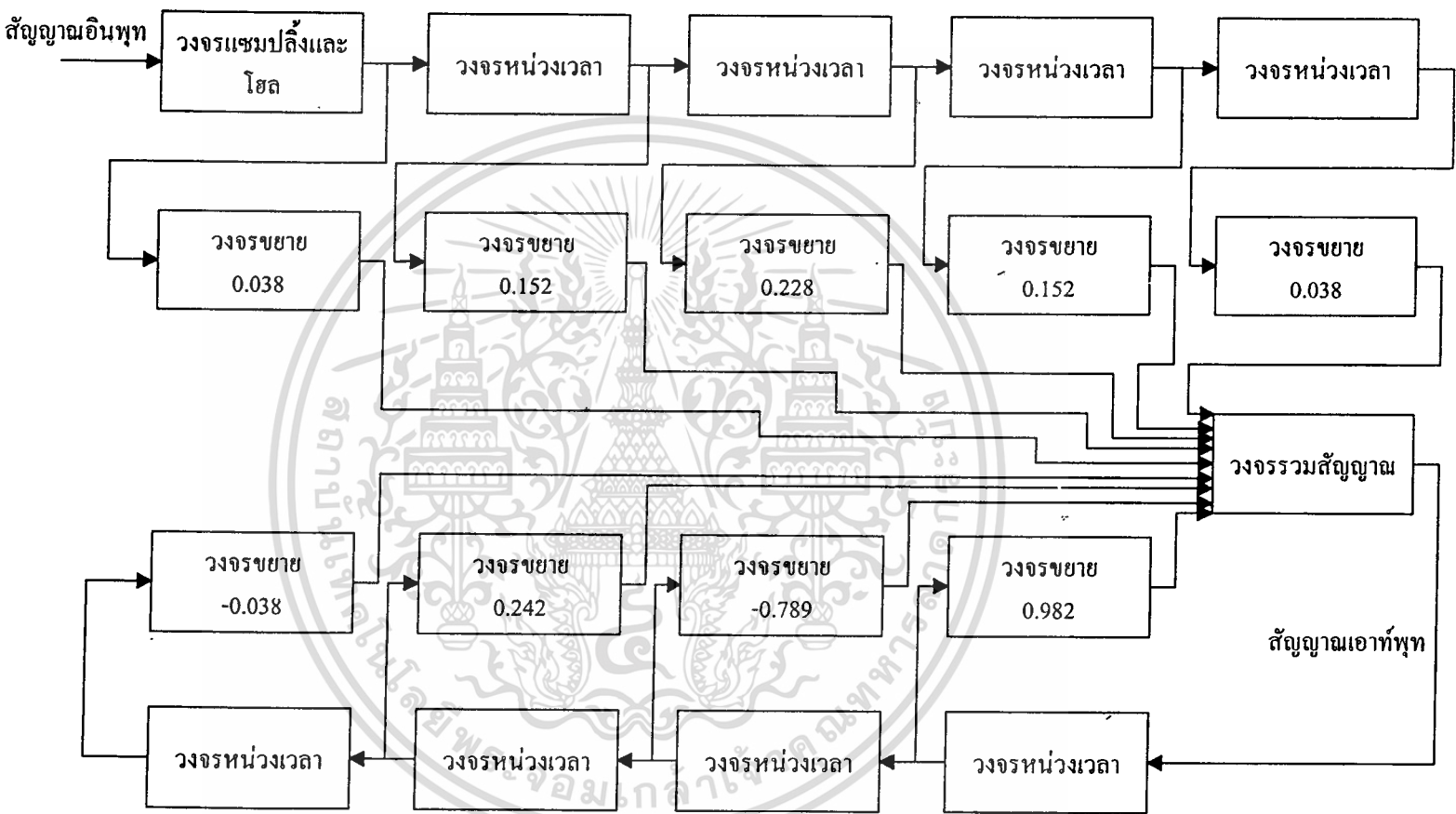
```
w=0:0.01:5
for a=1:length(w);
s=exp(i*2*pi*w(a)/10);
h(a)=(0.038*s^4+0.152*s^3+0.228*s^2+0.152*s+0.038)/
(s^4-0.982*s^3+0.798*s^2-0.242*s+0.038));
f=abs(h);
end;
y=20*log10(f);
z=(2*pi*w)/10/pi;
plot(z,y);
hold on;grid on;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(212);hold on;grid on;
plot(z,y);axis([0 1 -40 0]);
xlabel('Digital Frequency(pi rad)');
ylabel('Magnitude(dB)');
text(0.375,-3,'*(0.375pi,-3)');
text(0.65,-30,'*(0.65pi,-30)');
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

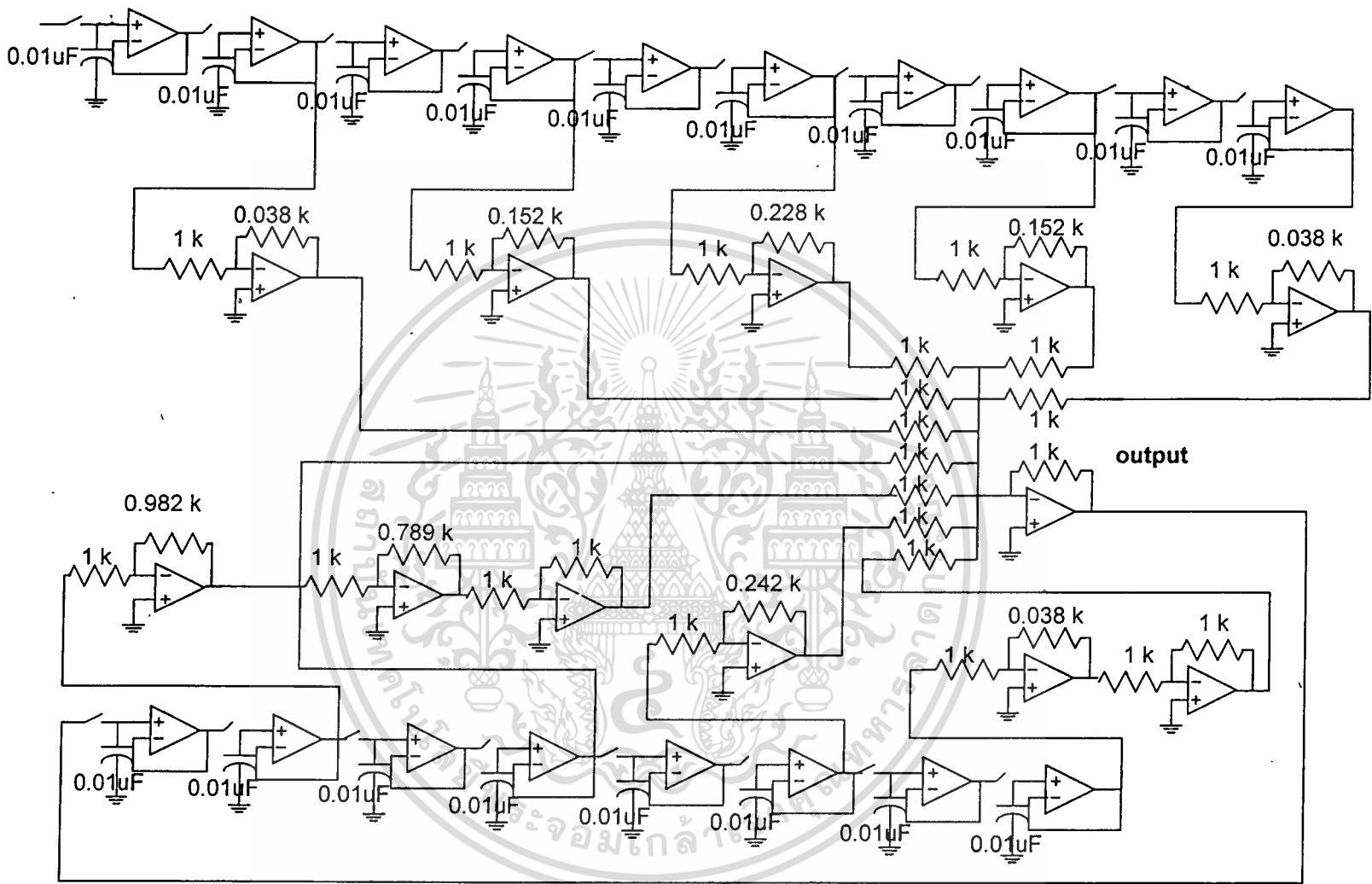


เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้งาน การศึกษานัน อนุญ หน้าไป 0.8 ประโย 0.9 บ้านการ 1
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 3.1 การออกแบบ Lowpass filter



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรม Lowpass filter

รูปที่ 3.3 3905 Lowpass filter



3.2 การออกแบบ Highpass filter

ต้องการความถี่คัทออฟที่ 0.7π ที่ความถี่ 0.45π ลดทอน 30dB จากตารางที่ 2.3

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\cos(\theta_c/2 - \theta'_c/2)}{\cos(\theta_c/2 + \theta'_c/2)} \\ &= \frac{\cos(\pi/4 - 7\pi/20)}{\cos(\pi/4 + 7\pi/20)} \\ &= -3.078\end{aligned}$$

หาอันดับฟิลเตอร์จาก

$$N = \frac{\log[(10^{-k_1/10} - 1)/(10^{-k_2/10} - 1)]}{2 \log[\omega_2/\omega_1]}$$

$$k_1 = \text{อัตราขยายที่ความถี่คัทออฟ} = -3 \text{ dB}$$

$$k_2 = \text{อัตราขยายที่ความถี่ลดทอน} = -30 \text{ dB}$$

$$\omega = 2/T \tan(\theta/2)$$

$$T = \text{คาบเวลาในการแซมปลิง ให้เท่ากับ 1}$$

$$\omega_1 = 2 \tan(\theta_1/2)$$

$$= 2 \tan(0.7\pi/2) = 3.925$$

$$\omega_2 = 2 \tan(\theta_2/2)$$

$$= 2 \tan(0.45\pi/2) = 1.708$$

$$N = \frac{\log[(10^{3/10} - 1)/(10^{30/10} - 1)]}{2 \log[1.708/3.925]}$$

$$= 3.93 \approx 4$$

ได้อันดับฟิลเตอร์ เท่ากับ 4 จากตารางที่ 2.3 และ 2.2 จะได้

$$\begin{aligned}H_{HP}(z) &= \frac{0.094(z+1)^4}{z^4 + 0.486z^2 + 0.018} \Bigg|_{z = \frac{z+3.078}{1+3.078z}} \\ &= \frac{0.24z^4 - 0.96z^3 + 1.44z^2 - 0.96z + 0.24}{z^4 + 6.33z^3 + 16.67z^2 + 20.5z + 13.03}\end{aligned}$$

แปลงในรูปสมการผลต่างจะได้

$$\begin{aligned}y(n) &= 0.24x(n) - 0.96x(n-1) + 1.44x(n-2) \\ &\quad - 0.96x(n-3) + 0.24x(n-4) - 6.33y(n-1) \\ &\quad - 16.67y(n-2) - 20.5y(n-3) - 13.03y(n-4)\end{aligned}$$

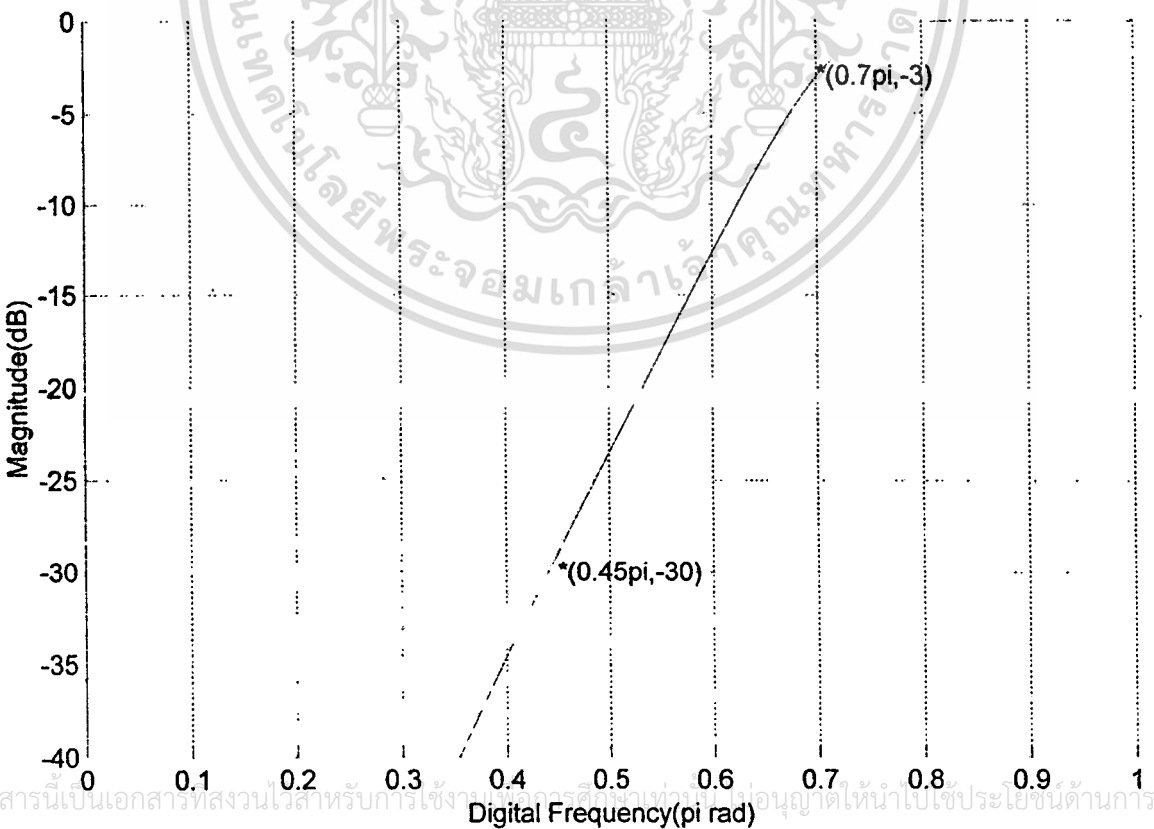
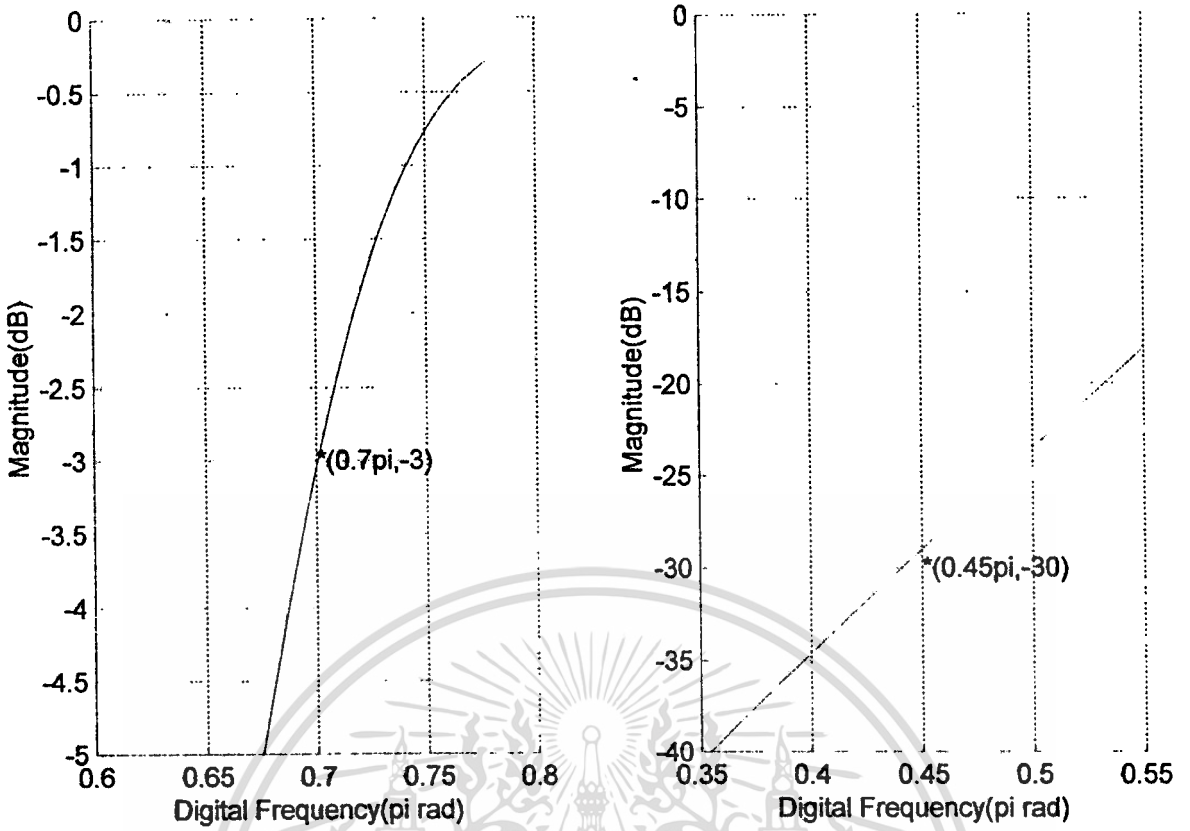
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลโดยใช้ Matlab เขียนโปรแกรมได้ดังนี้

```
w=0:0.01:5
for a=1:length(w);
s=exp(i*2*pi*w(a)/10);
h(a)=(0.24*s^4-0.96*s^3+1.44*s^2+20.96*s+0.24)/
(s^4+6.33*s^3+16.67*s^2+20.5*s+13.03));
f=abs(h);
end;
y=20*log10(f);
z=((2*pi*w)/10)/pi;
plot(z,y);
hold on;grid on;
#####
subplot(212);hold on;grid on;
plot(z,y);axis([0 1 -40 0]);
xlabel('Digital Frequency(pi rad)');
ylabel('Magnitude(dB)');
text(0.7,-3,'*(0.7pi,-3)');
text(0.45,-30,'*(0.45pi,-30)');
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

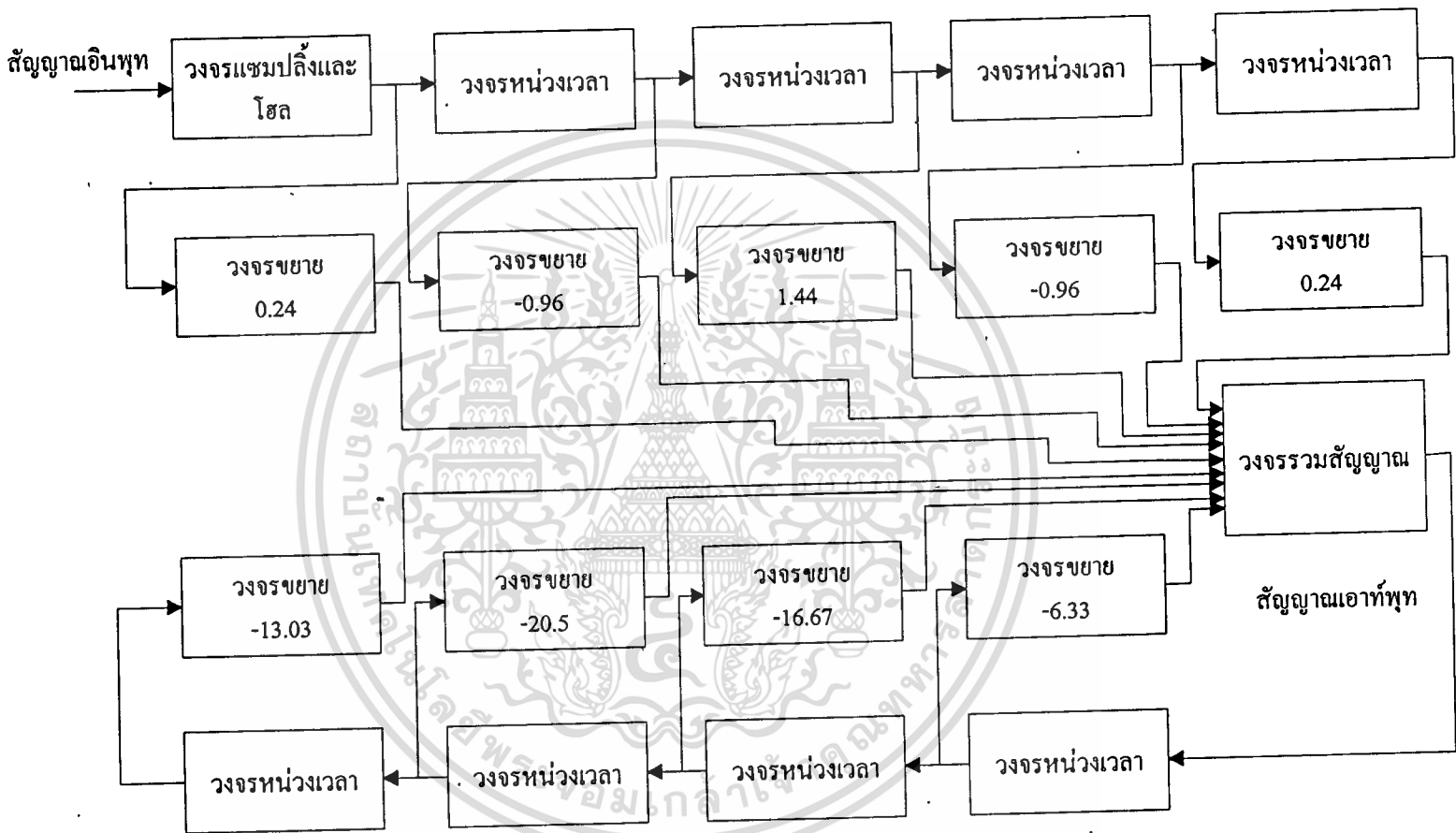


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

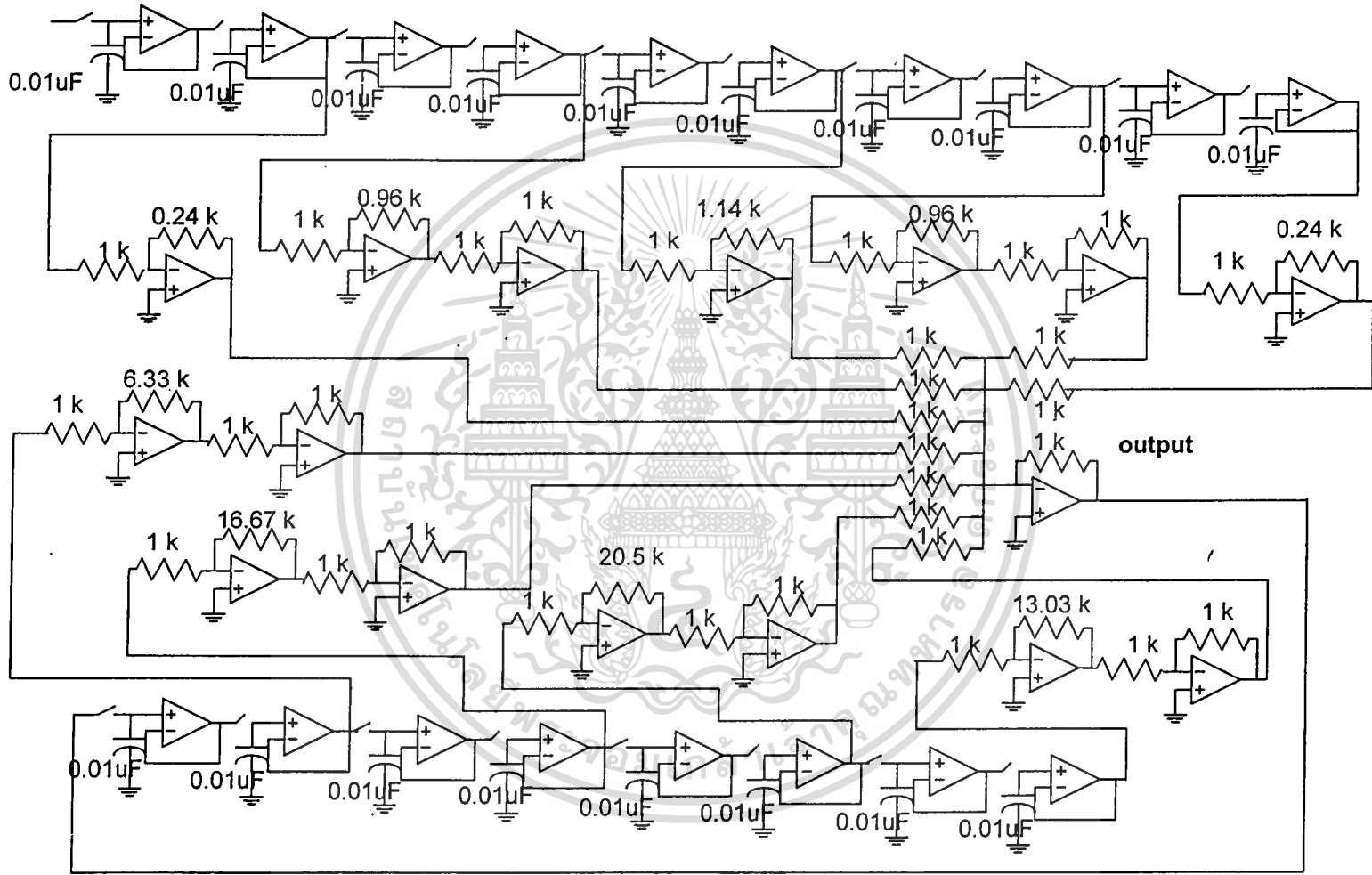
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 การออกแบบ Highpass filter

รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรม Highpass filter



input



سٲٲ 3.6 ٲٲٲٲ Highpass filter

3.3 การออกแบบ Bandpass filter

ต้องการความถี่ lower cutoff ที่ 0.4π ความถี่ upper cutoff ที่ 0.65π ที่ความถี่ 0.15π และ 0.9π ลดทอน 30 dB และจากตารางที่ 2.3

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\cos(\theta'_u / 2 + \theta'_l / 2)}{\cos(\theta'_u / 2 - \theta'_l / 2)} \\ &= \frac{\cos(4\pi / 20 + 6.5\pi / 20)}{\cos(4\pi / 20 - 6.5\pi / 20)} \\ &= -0.084 \\ k &= \tan \theta_c / 2 \cot(\theta'_u / 2 - \theta'_l / 2) \\ &= \cot(0.125\pi) \\ &= 2.414\end{aligned}$$

หาอันดับฟิลเตอร์จาก

$$\begin{aligned}N &= \frac{\log[(10^{-k_1/10} - 1)/(10^{-k_2/10} - 1)]}{2 \log[1/\omega_r]} \\ k_1 &= \text{อัตราขยายที่ความถี่คัทออฟ} = -3 \text{ dB} \\ k_2 &= \text{อัตราขยายที่ความถี่ลดทอน} = -30 \text{ dB} \\ \omega &= 2/T \tan(\theta/2) \\ T &= \text{คาบเวลาในการแซมปลิง ให้เท่ากับ 1} \\ \omega_1 &= 2 \tan(\theta_1/2) = 2 \tan(0.15\pi/2) = 0.48 \\ \omega_2 &= 2 \tan(\theta_2/2) = 2 \tan(0.9\pi/2) = 12.628 \\ \omega_l &= 2 \tan(\theta_l/2) = 2 \tan(0.4\pi/2) = 1.453 \\ \omega_u &= 2 \tan(\theta_u/2) = 2 \tan(0.65\pi/2) = 3.264 \\ \omega_r &= \min\{|A|, |B|\} \\ A &= \frac{(-\omega_1^2 + \omega_l \omega_u)/[\omega_1(\omega_u - \omega_l)]}{[-(0.48)^2 + (1.453 \times 3.264)]} = 5.193 \\ &= \frac{[0.48(3.264 - 1.453)]}{[0.48(3.264 - 1.453)]} \\ B &= \frac{(\omega_2^2 - \omega_l \omega_u)/[\omega_2(\omega_u - \omega_l)]}{[(12.628)^2 - (1.453 \times 3.264)]} = 6.766 \\ &= \frac{[12.628 \times (3.264 - 1.453)]}{[12.628 \times (3.264 - 1.453)]} \\ \omega_r &= |A| = 5.193 \\ N &= \frac{\log[(10^{3/10} - 1)/(10^{30/10} - 1)]}{2 \log[1/5.193]} \\ &= 1.796 \approx 2\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากท่านใดเห็นสมควรให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{BP}(z) = \frac{0.293(z+1)^2}{z^2 + 0.173} \bigg|_{z = -\frac{z^2 + 0.119z + 0.414}{1 + 0.119z + 0.414z^2}}$$

$$= \frac{0.097z^4 - 0.195z^2 + 0.097}{z^4 + 0.247z^3 + 0.959z^2 + 0.135z + 0.334}$$

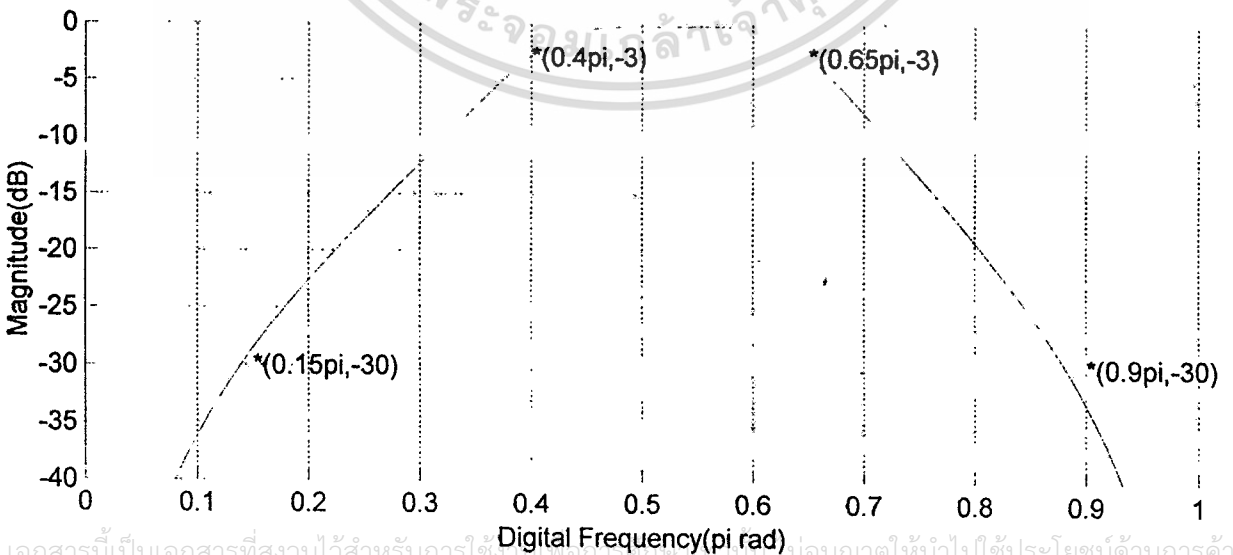
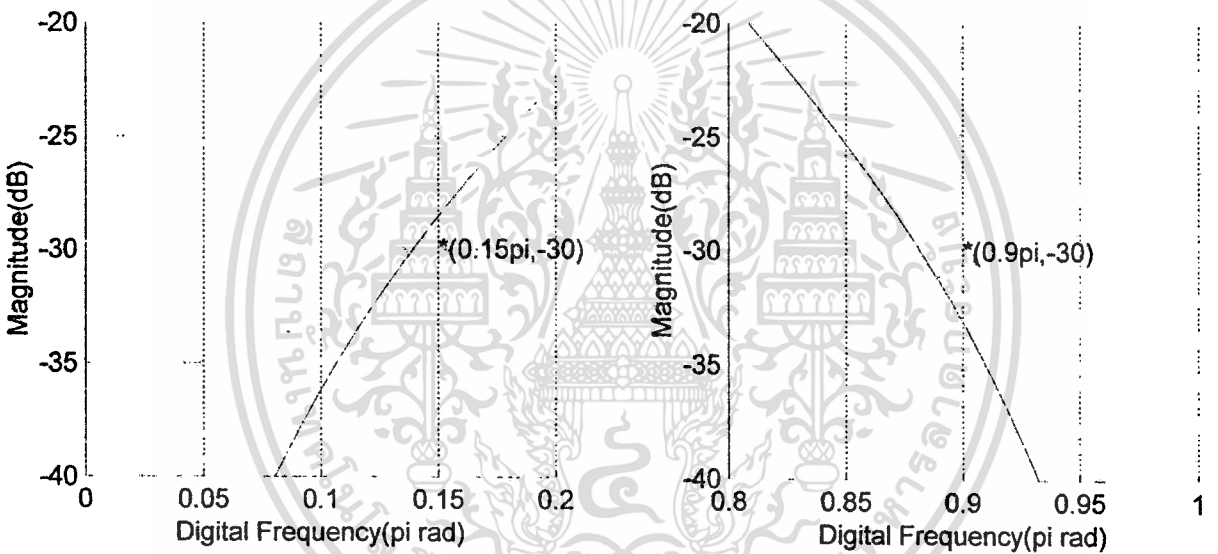
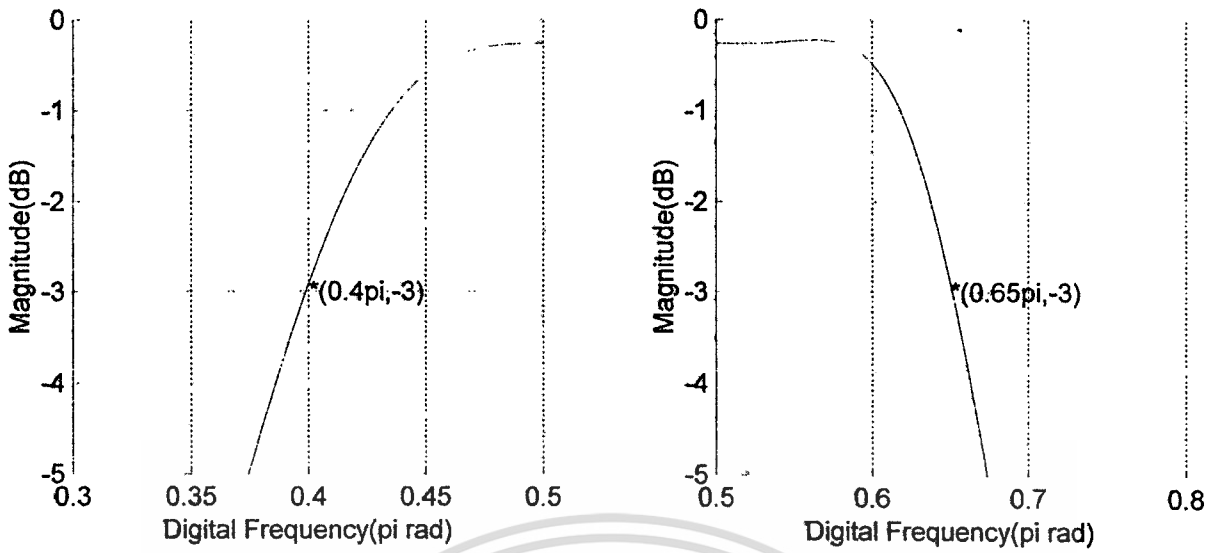
แปลงในรูปสมการผลต่างจะได้

$$y(n) = 0.097x(n) - 0.195x(n-2) + 0.097x(n-4) \\ - 0.247y(n-1) - 0.959y(n-2) - 0.135y(n-3) \\ - 0.334y(n-4)$$

จากการใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลโดยใช้ Matlab เขียนโปรแกรมได้ดังนี้

```
w=0:0.01:5
for a=1:length(w);
s=exp(i*2*pi*w(a)/10);
h(a)=( (0.097*s^4-0.195*s^2+0.097)/
(s^4+0.247*s^3+0.959*s^2+0.135*s+0.344) );
f=abs(h);
end;
y=20*log10(f);
z=((2*pi*w)/10)/pi;
hold on;grid on;
subplot(313);hold on;grid on;
plot(z,y);axis([0 1 -40 0]);
xlabel('Digital Frequency(pi rad)');
ylabel('Magnititude(dB)');
text(0.4,-3,'*(0.4pi,-3)');
text(0.65,-3,'*(0.65pi,-3)');
text(0.15,-30,'*(0.15pi,-30)');
text(0.9,-30,'*(0.9pi,-30)');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

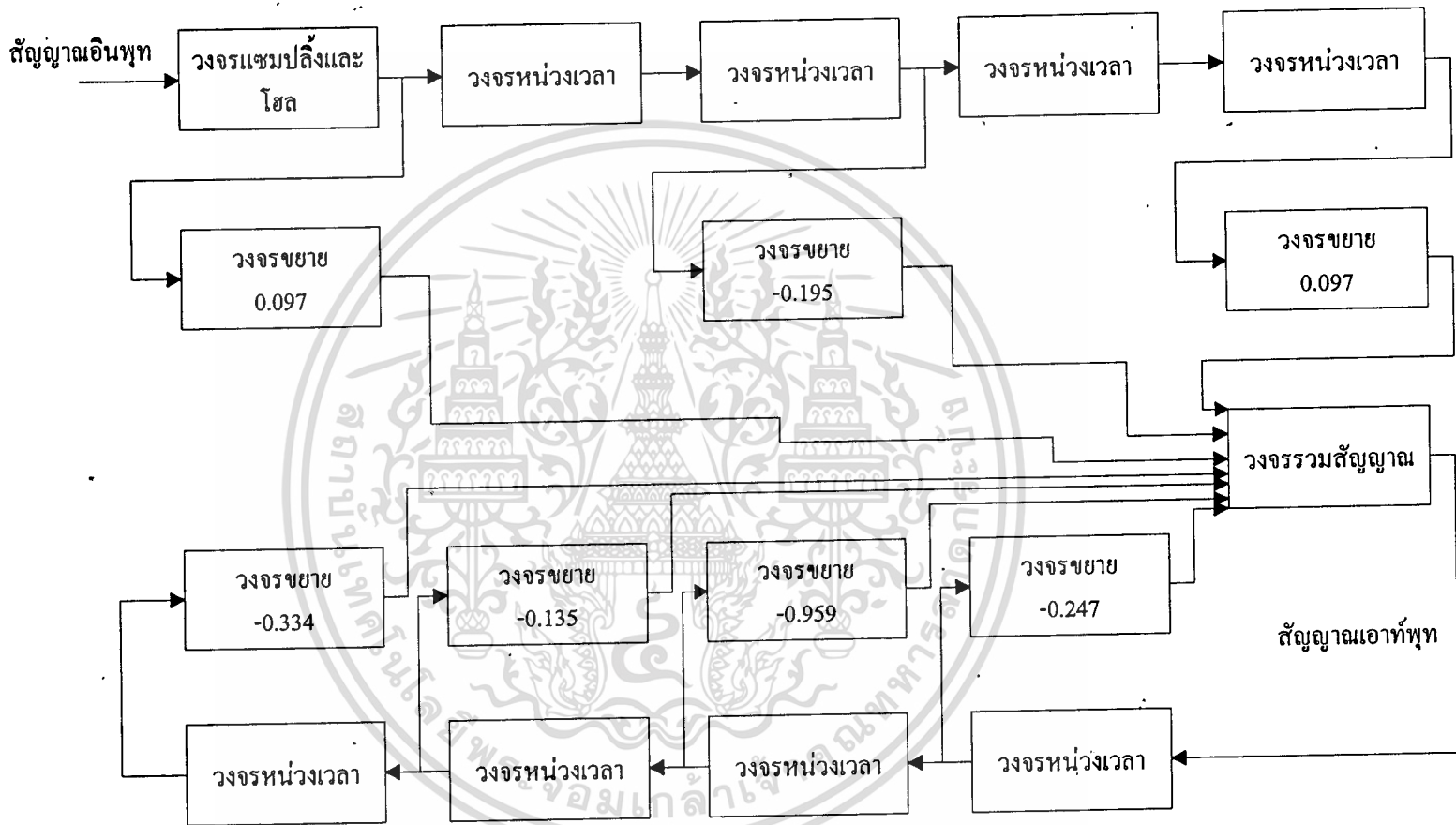


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

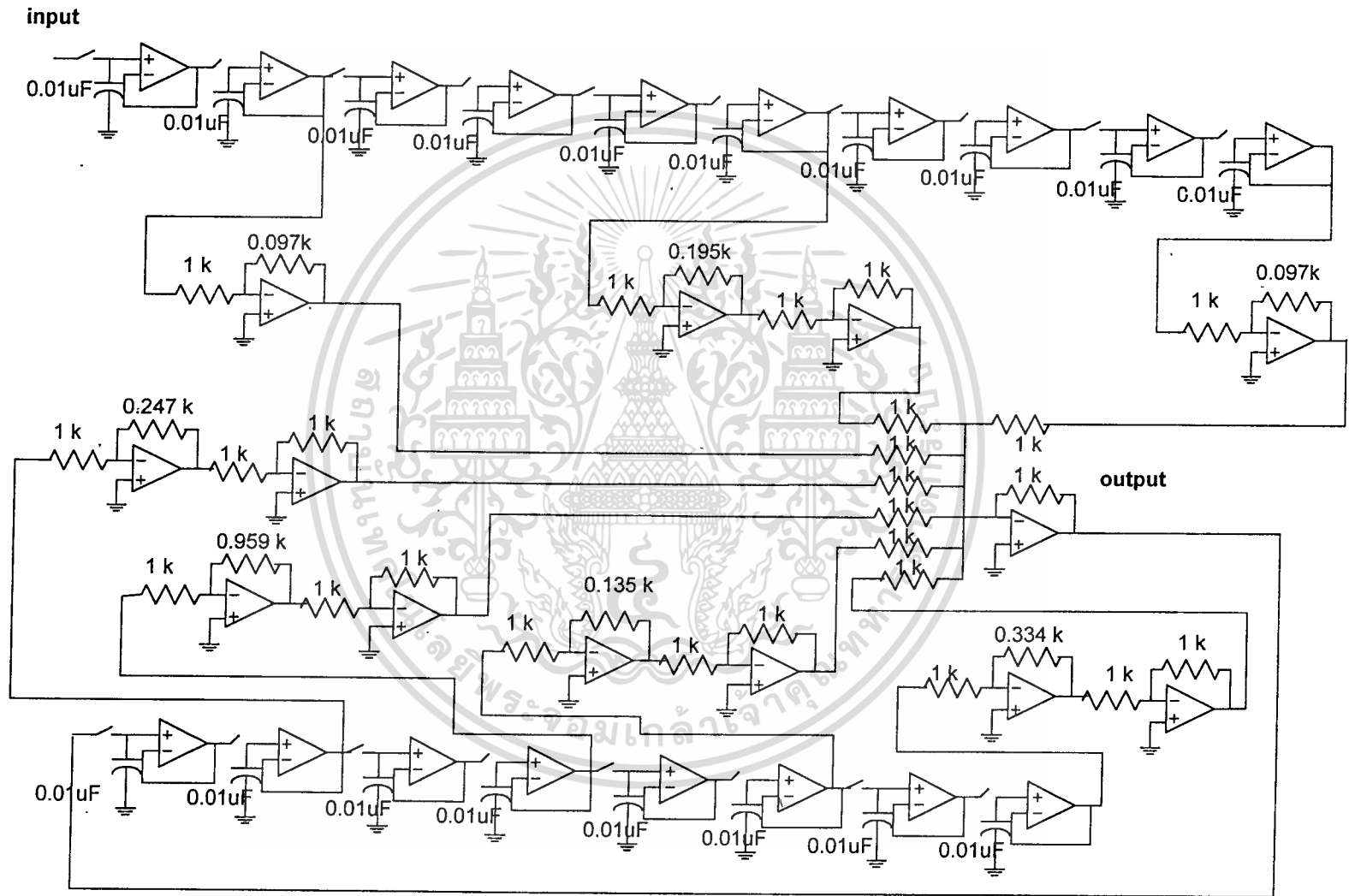
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 การออกแบบ Bandpass filter

รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรม Bandpass filter



รูปที่ 3.9 3005 Bandpass filter



3.4 การออกแบบ Bandreject filter

ต้องการความถี่ lower cutoff ที่ 0.4π ความถี่ upper cutoff ที่ 0.65π ที่ความถี่ 0.5π และ 0.55π ลดทอน 30 dB และจากตารางที่ 2.3

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\cos(\theta_u' / 2 + \theta_l' / 2)}{\cos(\theta_u' / 2 - \theta_l' / 2)} \\ &= \frac{\cos(4\pi / 20 + 6.5\pi / 20)}{\cos(4\pi / 20 - 6.5\pi / 20)} \\ &= -0.084 \\ k &= \tan \theta_c / 2 \tan(\theta_u' / 2 - \theta_l' / 2) \\ &= \tan(0.125\pi) \\ &= 0.414\end{aligned}$$

หาอันดับฟิลเตอร์จาก

$$\begin{aligned}N &= \frac{\log[(10^{-k_1/10} - 1)/(10^{-k_2/10} - 1)]}{2 \log[1/\omega_r]} \\ k_1 &= \text{อัตราขยายที่ความถี่คัทออฟ} = -3 \text{ dB} \\ k_2 &= \text{อัตราขยายที่ความถี่ลดทอน} = -30 \text{ dB} \\ \omega &= 2/T \tan(\theta/2) \\ T &= \text{คาบเวลาในการแซมปลิง ให้เท่ากับ 1} \\ \omega_1 &= 2 \tan(\theta_1/2) = 2 \tan(0.5\pi/2) = 2 \\ \omega_2 &= 2 \tan(\theta_2/2) = 2 \tan(0.55\pi/2) = 2.342 \\ \omega_l &= 2 \tan(\theta_l/2) = 2 \tan(0.4\pi/2) = 1.453 \\ \omega_u &= 2 \tan(\theta_u/2) = 2 \tan(0.65\pi/2) = 3.264 \\ \omega_r &= \min\{A, |B|\} \\ A &= \frac{[\omega_1(\omega_u - \omega_l)]/(-\omega_1^2 + \omega_l\omega_u)}{[2 \times (3.264 - 1.453)]} = 4.875 \\ B &= \frac{[\omega_2(\omega_u - \omega_l)]/(-\omega_2^2 + \omega_l\omega_u)}{[2.342 \times (3.264 - 1.453)]} = -5.716 \\ \omega_r &= |A| = 4.875 \\ N &= \frac{\log[(10^{3/10} - 1)/(10^{30/10} - 1)]}{2 \log[1/4.875]} \\ &= 1.973 \approx 2\end{aligned}$$

ได้อันดับฟิลเตอร์เท่ากับ 2 จากตารางที่ 2.3 และ 2.2 จะได้ว่า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 H_{BS}(z) &= \frac{0.293(z+1)^2}{z^2+0.173} \bigg|_{z=\frac{z^2+0.119z+0.414}{1+0.119z+0.414z^2}} \\
 &= \frac{0.569z^4+0.192z^3+1.154z^2+0.192z+0.569}{z^4+0.248z^3+0.959z^2+0.135z+0.334} \\
 \text{แปลงในรูปสมการผลต่างจะได้} \\
 y(n) &= 0.569x(n)+0.192x(n-1)+1.154x(n-2) \\
 &\quad +0.192x(n-3)+0.569x(n-4)-0.248y(n-1) \\
 &\quad -0.959y(n-2)-0.135y(n-3)-0.334y(n-4)
 \end{aligned}$$

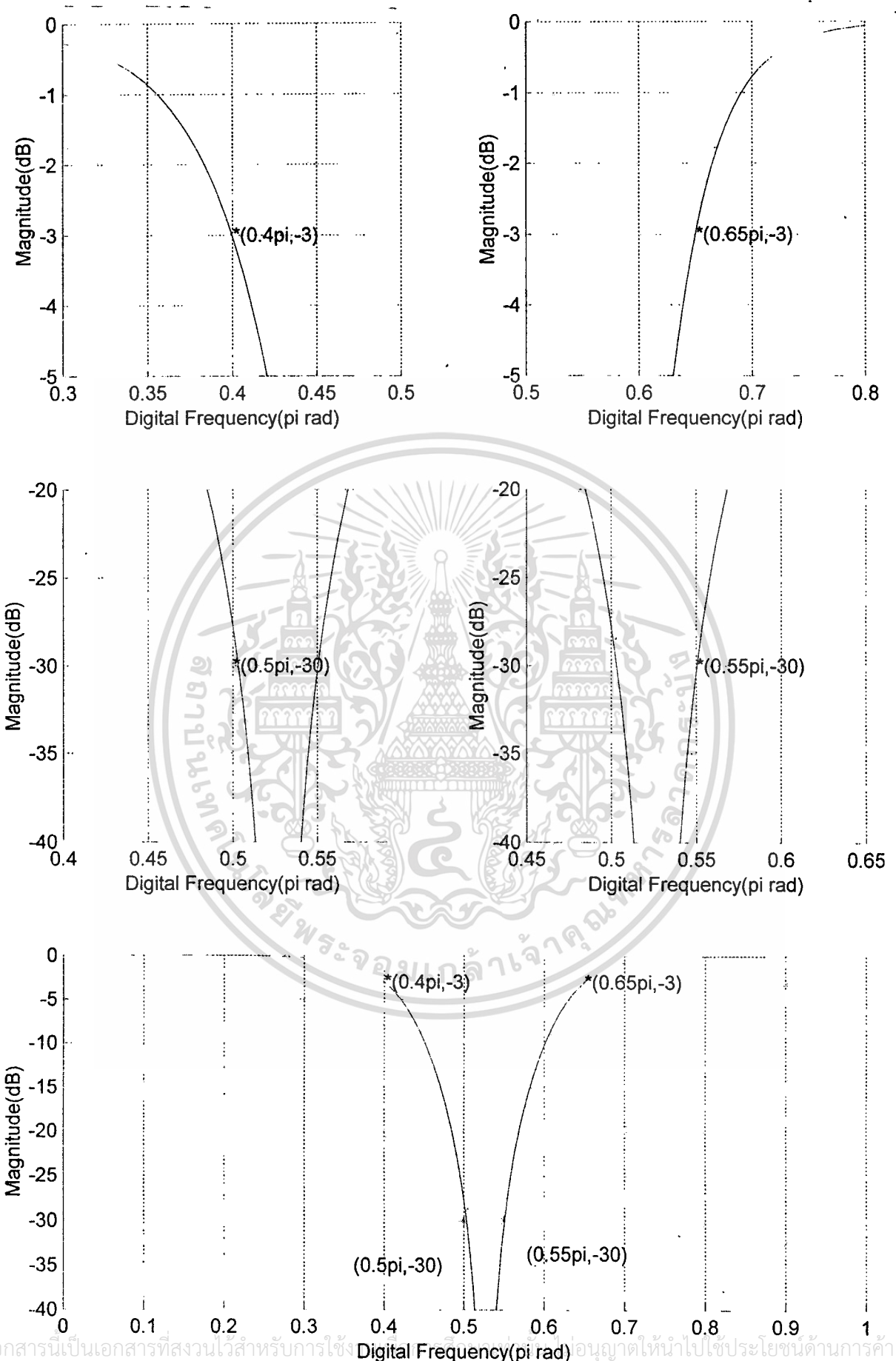
จากการใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลโดยใช้ Matlab เขียนโปรแกรมได้ดังนี้

```

w=0:0.01:5;
for a=1:length(w);
s=exp(i*2*pi*w(a)/10);
h(a)=(0.569*s^4+0.192*s^3+1.154*s^2+0.192*s+0.569)/
(s^4+0.248*s^3+0.959*s^2+0.135*s+0.334);
f=abs(h);
end;
y=20*log10(f);
z=((2*pi*w)/10)/pi;
plot(z,y);
hold on;grid on;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(313);hold on;grid on;
plot(z,y);axis([0 1 -40 0]);
xlabel('Digital Frequency(pi rad)');
ylabel('Magnitude(dB)');
text(0.4,-3,'*(0.4pi,-3)');
text(0.65,-3,'*(0.65pi,-3)');
plot(0.5,-3,'*');gtext('(0.5pi,-3)');
plot(0.55,-3,'*');gtext('(0.55pi,-3)');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

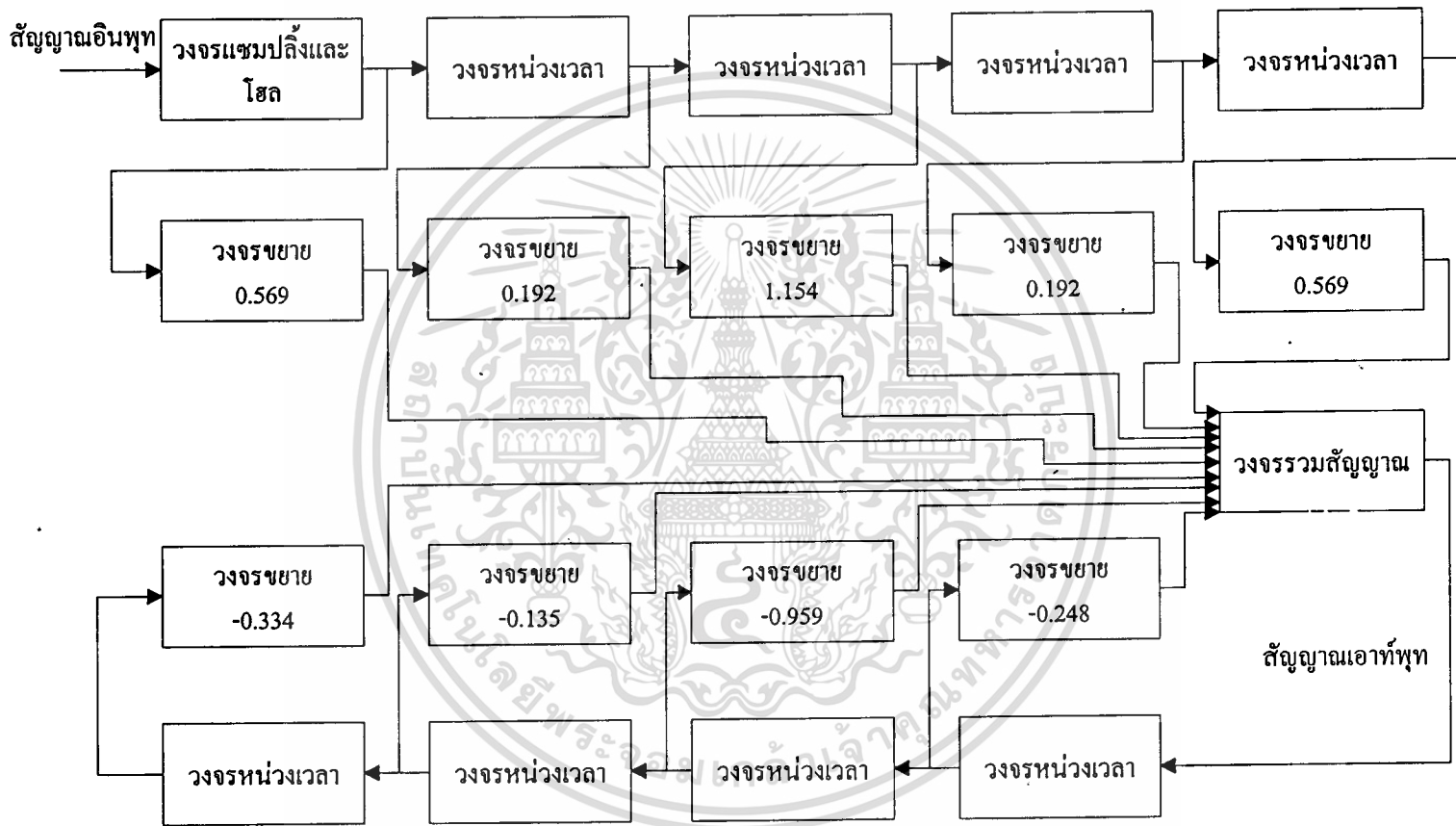


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะที่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

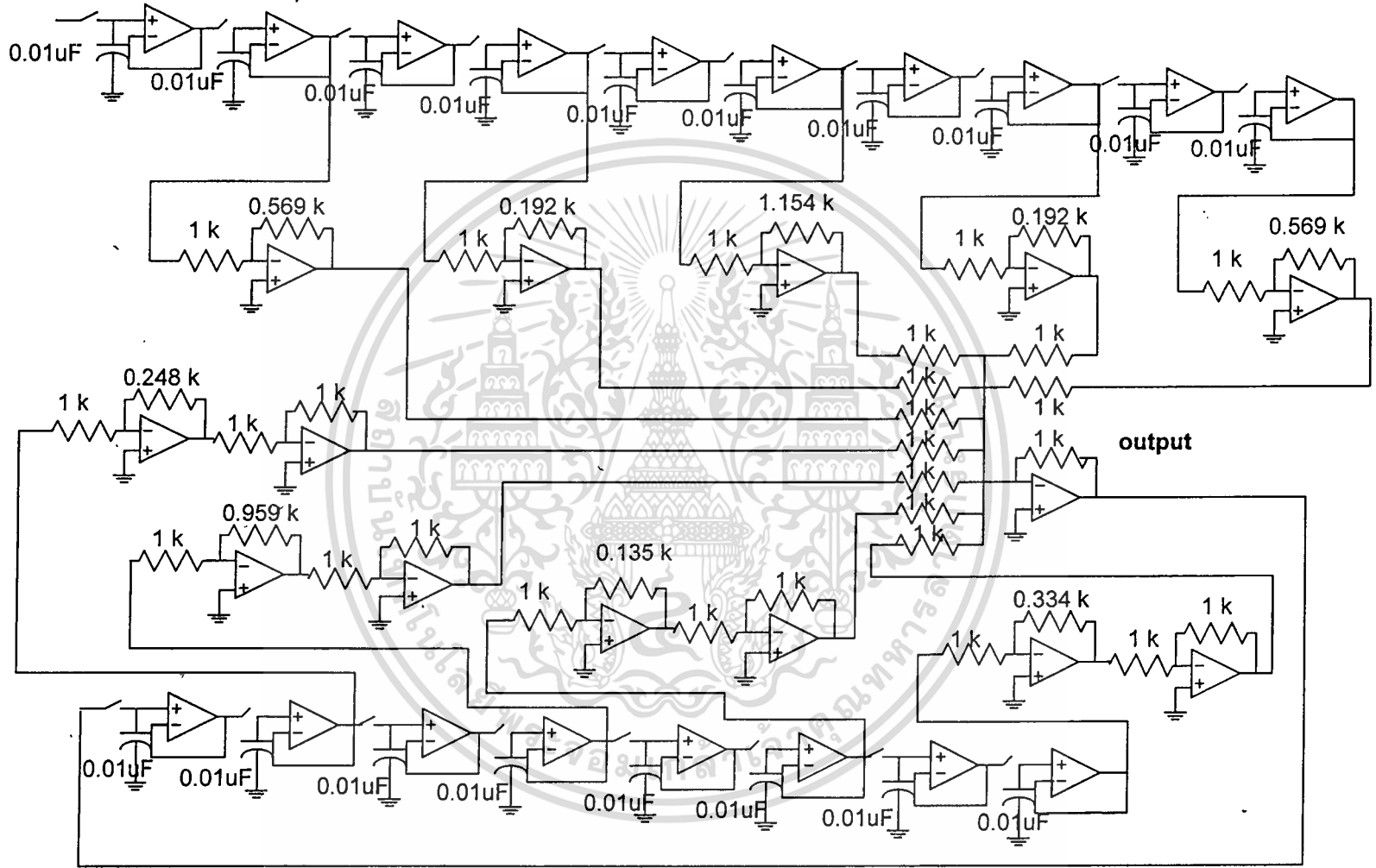
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 การออกแบบ Bandreject filter

รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรม Bandreject filter



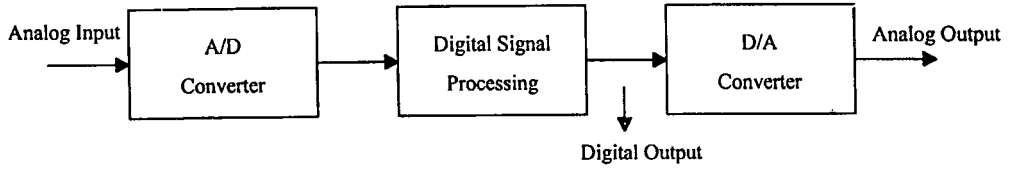
input



3.12 3rd order Bandreject filter

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

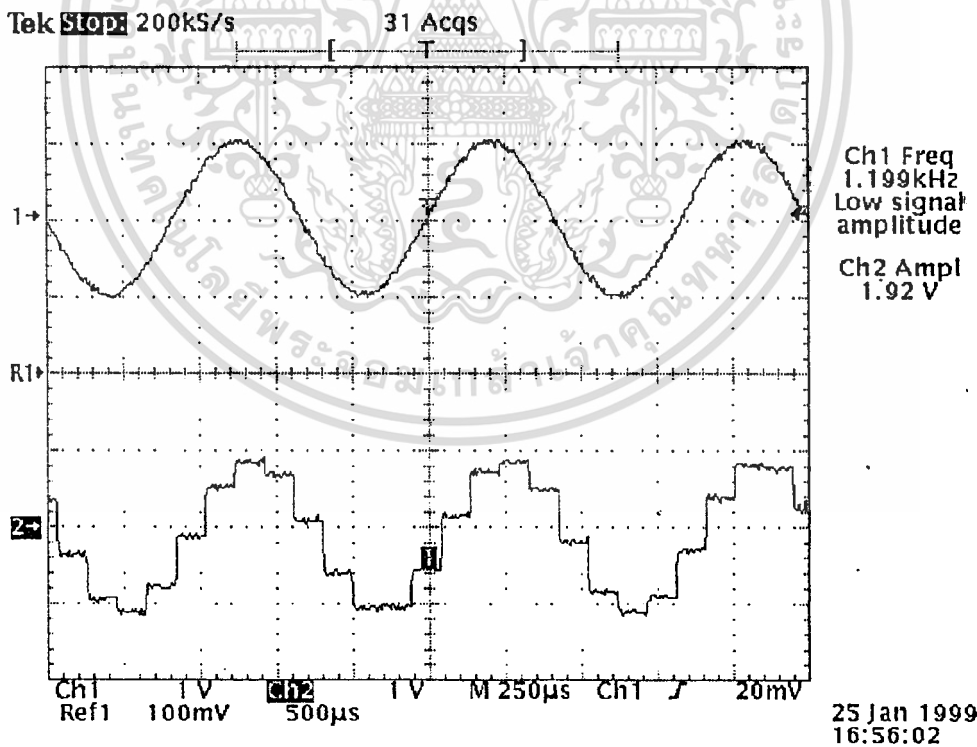


ขั้นตอนการทดลอง

ป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณอนาล็อก ผ่าน A/D Converter และ Digital Signal Processing แล้วทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นดิจิทัล

วงจร Lowpass filter

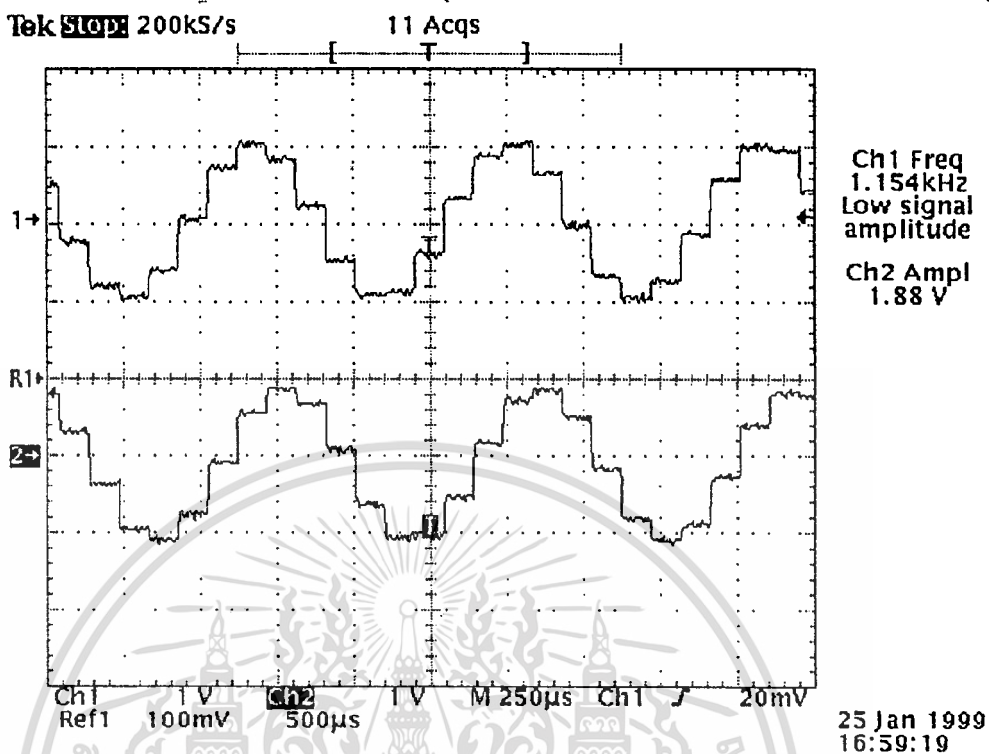
1. ต่อวงจรดังรูป ป้อนสัญญาณ Sine เข้าอินพุต วัดสัญญาณแอมพลิจูด โดยป้อน Clock ความถี่ 10 kHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
รูปที่ 4.1 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุต Channel 2 แสดงสัญญาณแอมพลิจูด

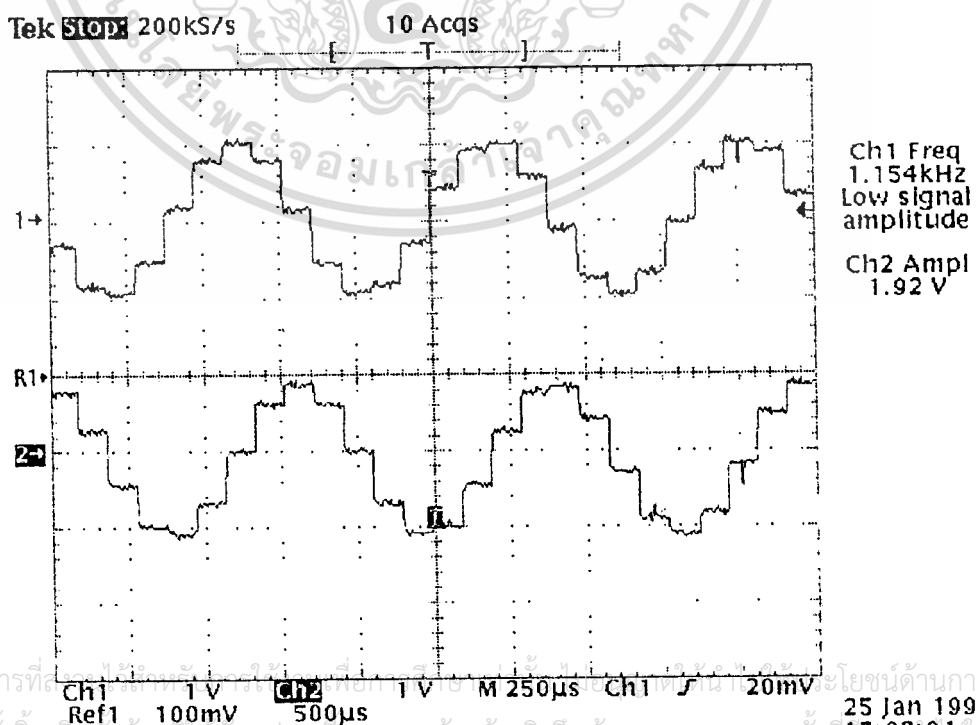
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ป้อนสัญญาณ Sine เข้าอินพุท วัดสัญญาณ Delay 1



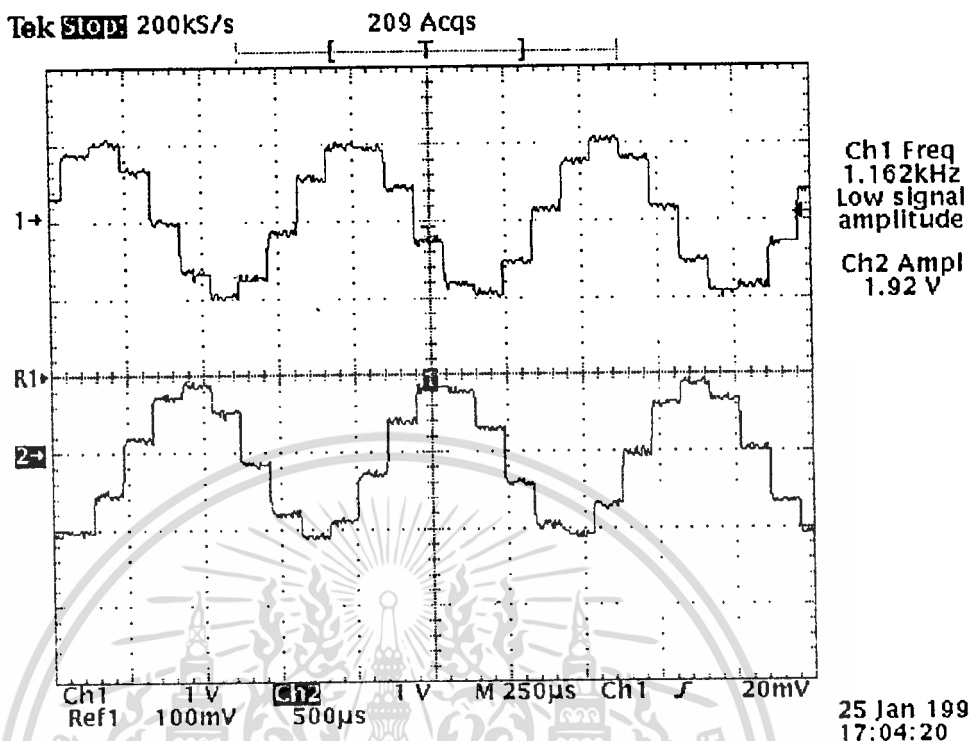
รูปที่ 4.2 Channel 1 แสดงสัญญาณแชนเนลถึง Channel 2 แสดงสัญญาณ Delay 1

3. ป้อนสัญญาณ Sine เข้าอินพุท วัดสัญญาณ Delay 2



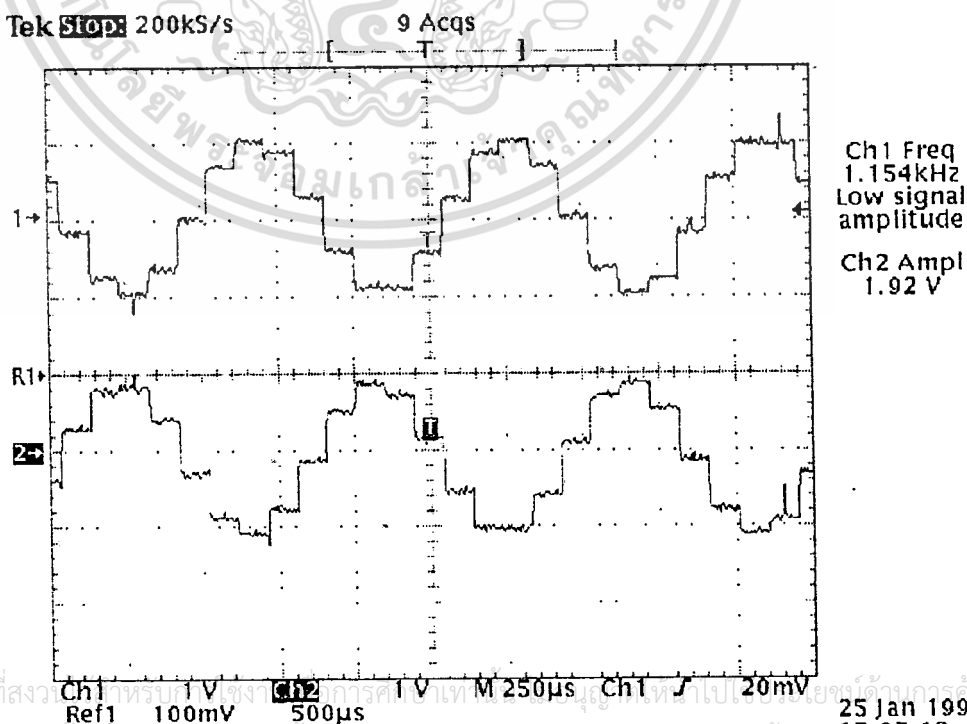
รูปที่ 4.3 Channel 1 แสดงสัญญาณแชนเนลถึง Channel 2 แสดงสัญญาณ Delay 2

4. ป้อนสัญญาณ Sine เข้าอินพุต วัดสัญญาณ Delay 3



รูปที่ 4.4 Channel 1 แสดงสัญญาณแฉมปลีจ Channel 2 แสดงสัญญาณ Delay 3

5. ป้อนสัญญาณ Sine เข้าอินพุต วัดสัญญาณ Delay 4

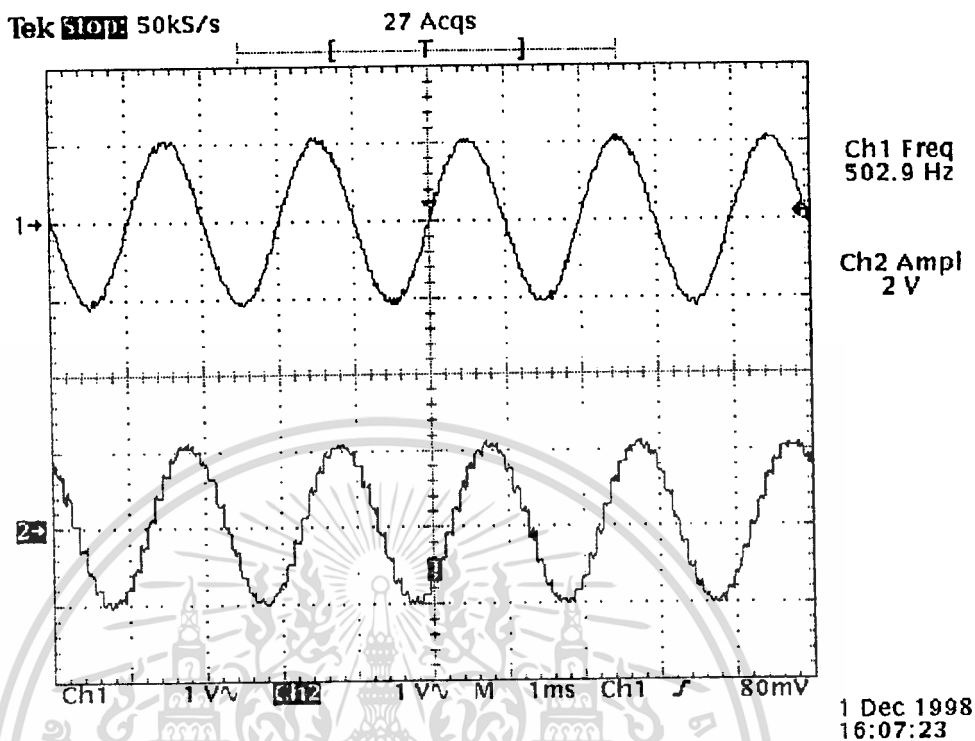


รูปที่ 4.5 Channel 1 แสดงสัญญาณแฉมปลีจ Channel 2 แสดงสัญญาณ Delay 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

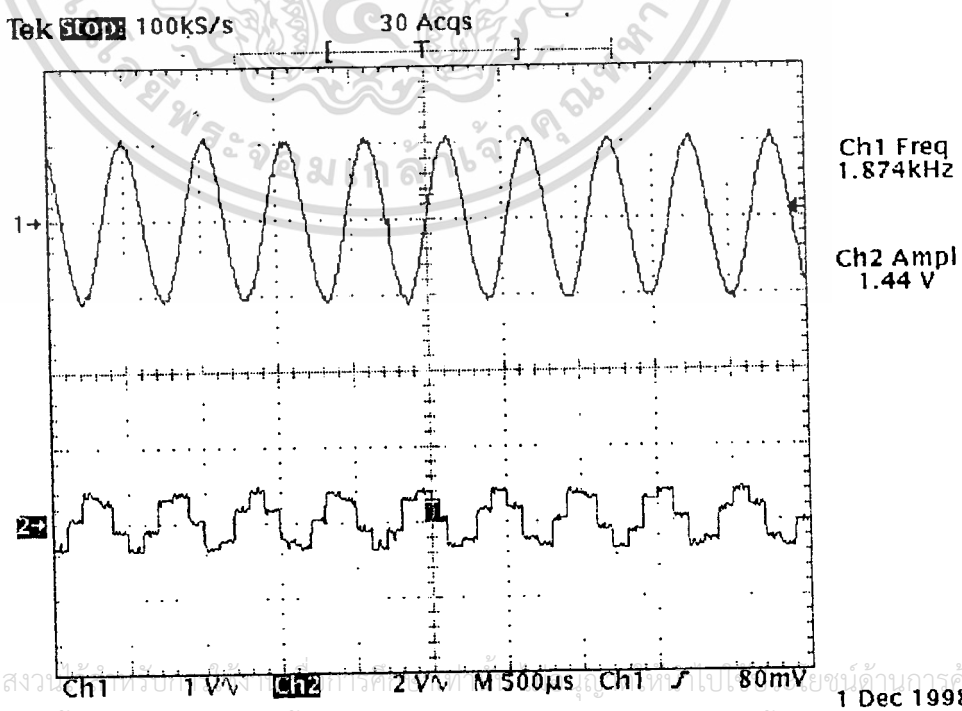
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

6. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 502.9 Hz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท



รูปที่ 4.6 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

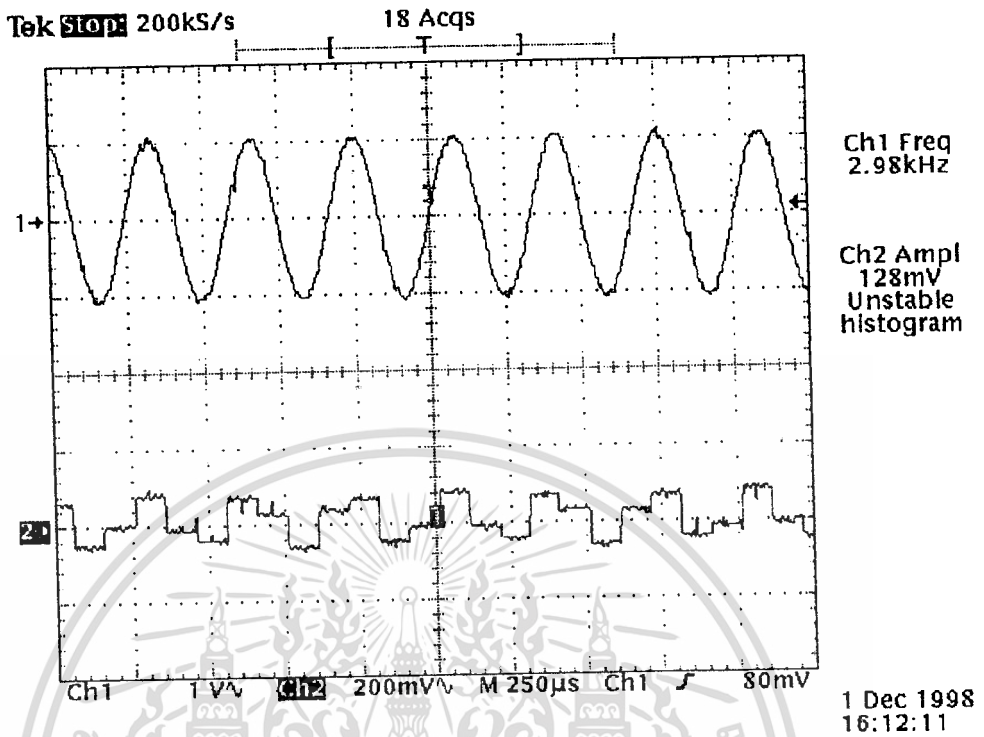
7. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 1.874 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท



รูปที่ 4.7 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น การนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบใช้

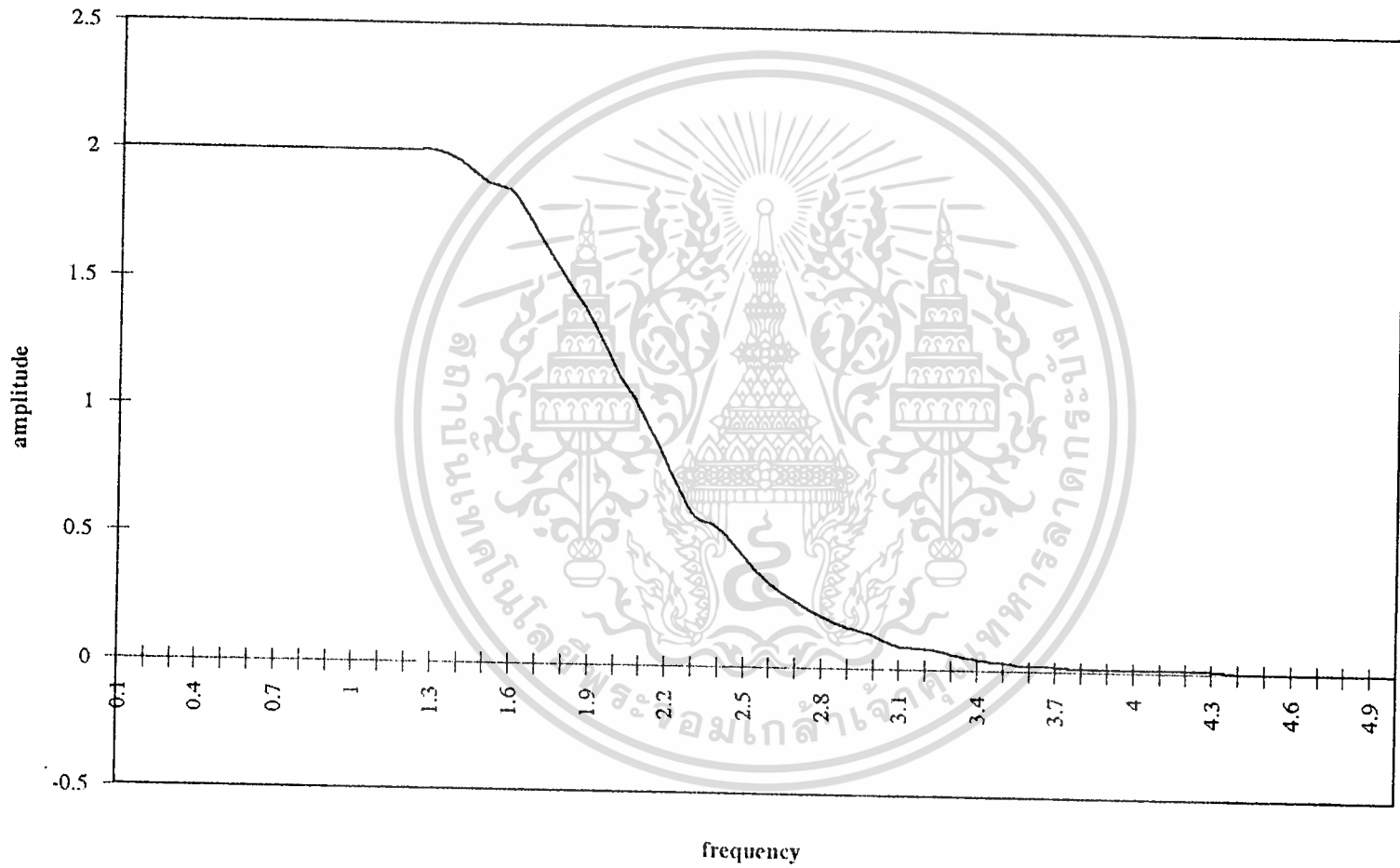
8. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 2.98 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท



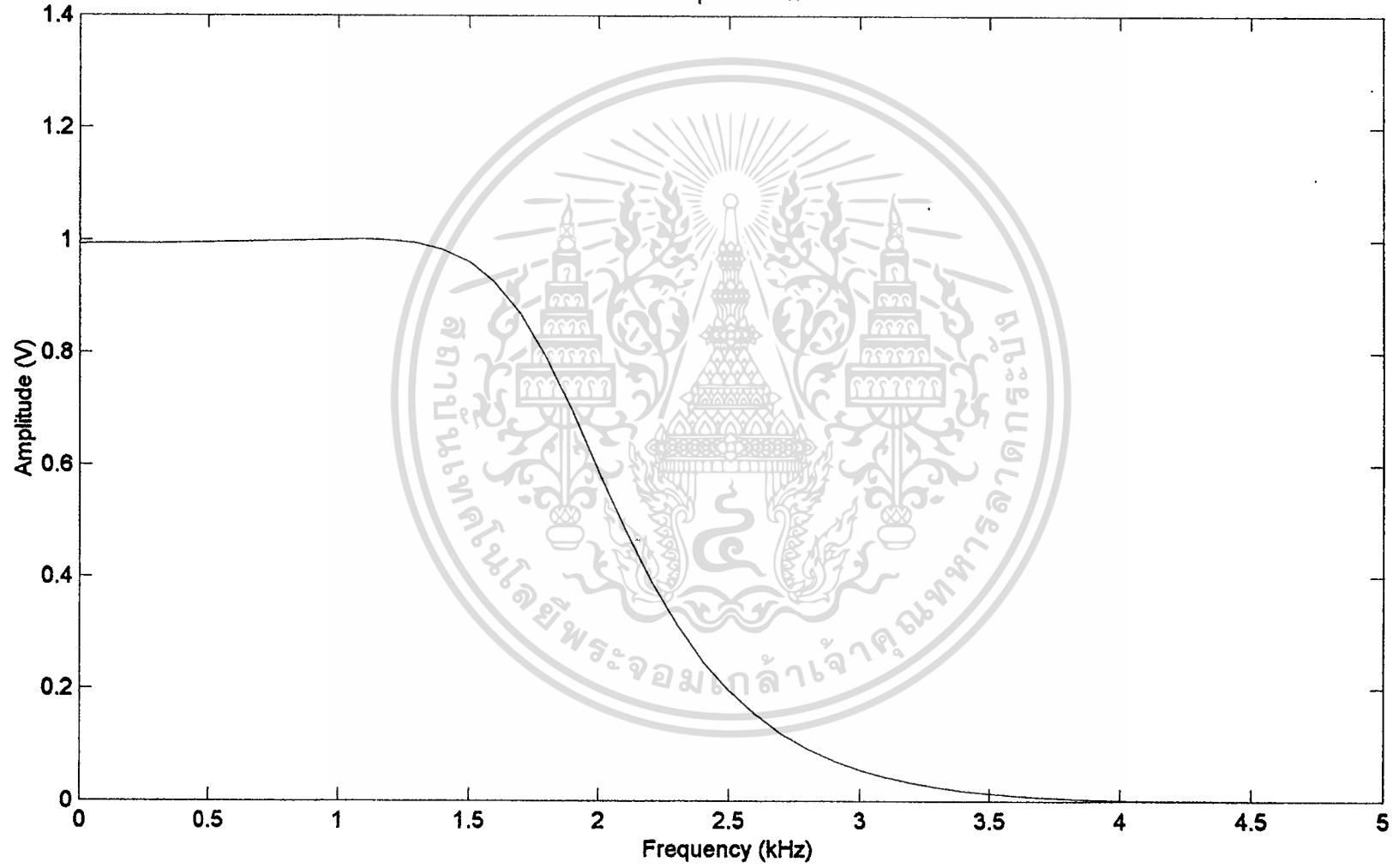
รูปที่ 4.8 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 กราฟคุณลักษณะ lowpass filter ผลจากทวงจร



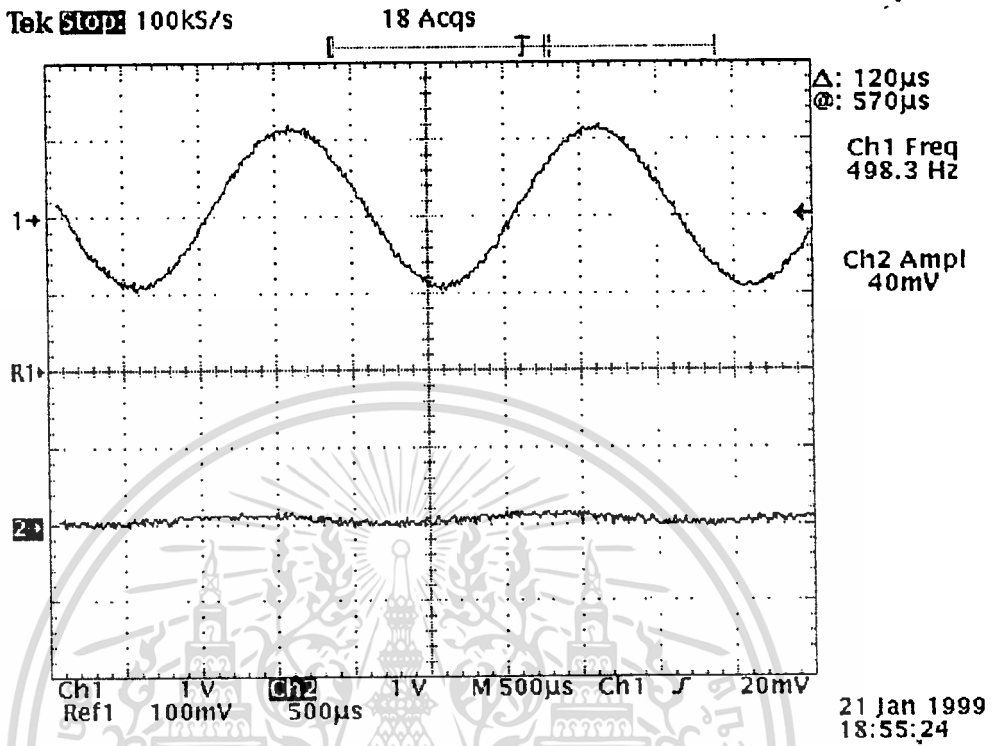
Lowpass Filter



รูปที่ 4.10 กราฟคุณสมบัติของ lowpass filter ผลจากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์

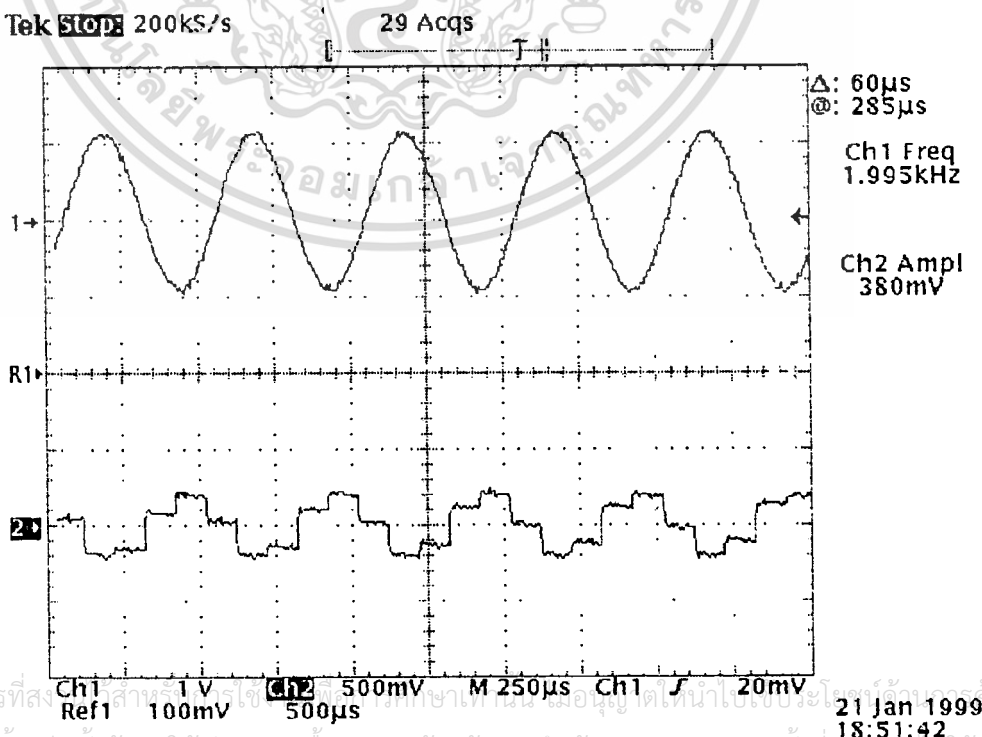
วงจร Highpass filter

9. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 498.3Hz 2 Vpp เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 4.11 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุต Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุต

10. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 1.995 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุต วัดสัญญาณเอาต์พุต

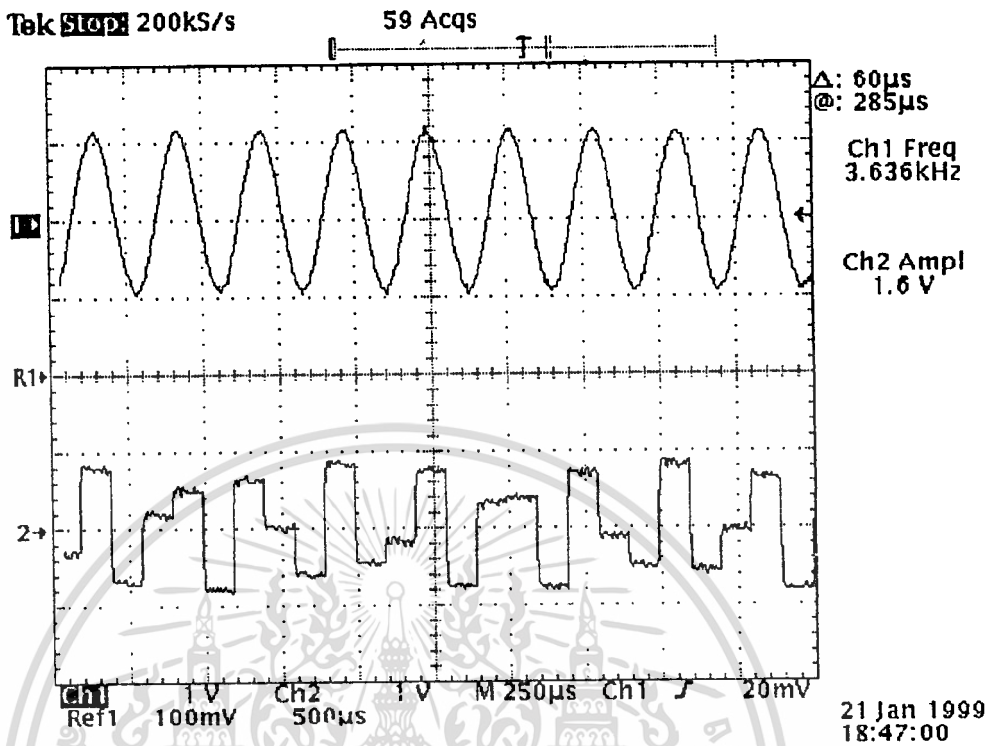


รูปที่ 4.12 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุต Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาโดยไม่มีเงื่อนไข

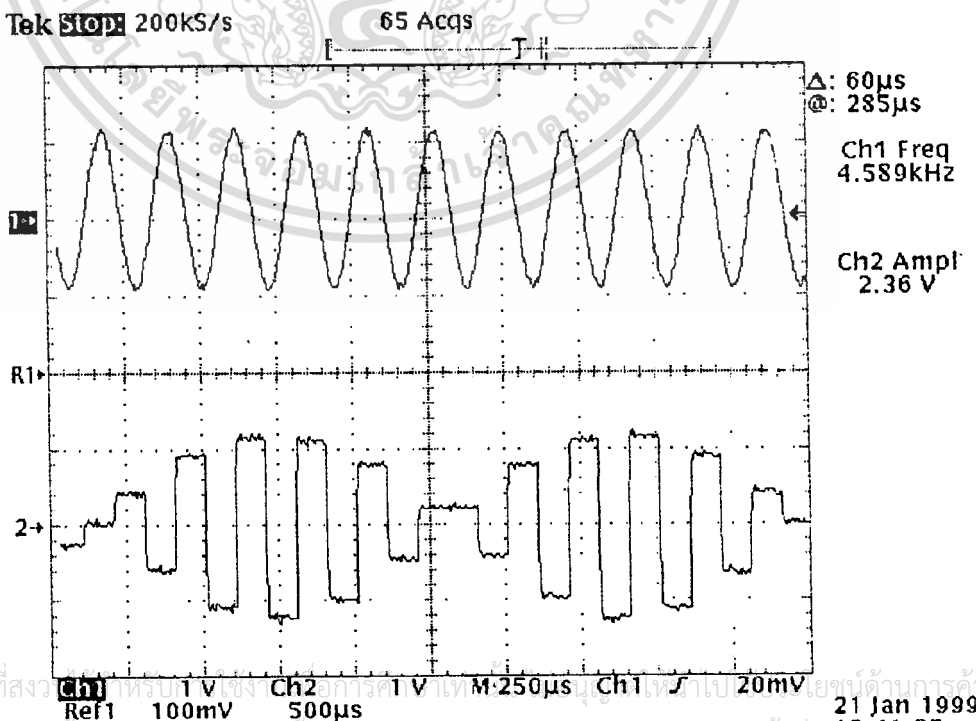
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 3.636 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท



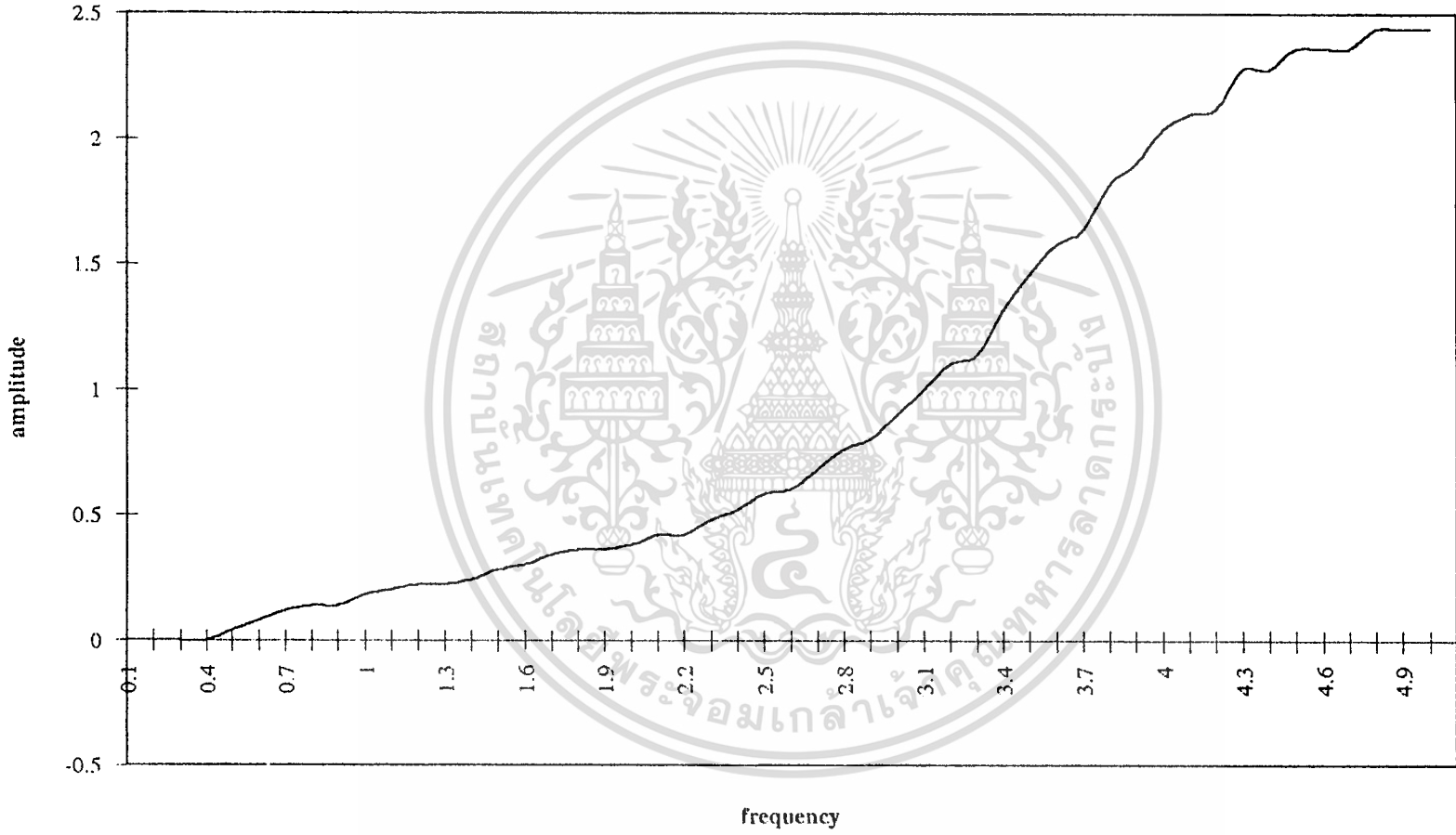
รูปที่ 4.13 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

12. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 4.589 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท

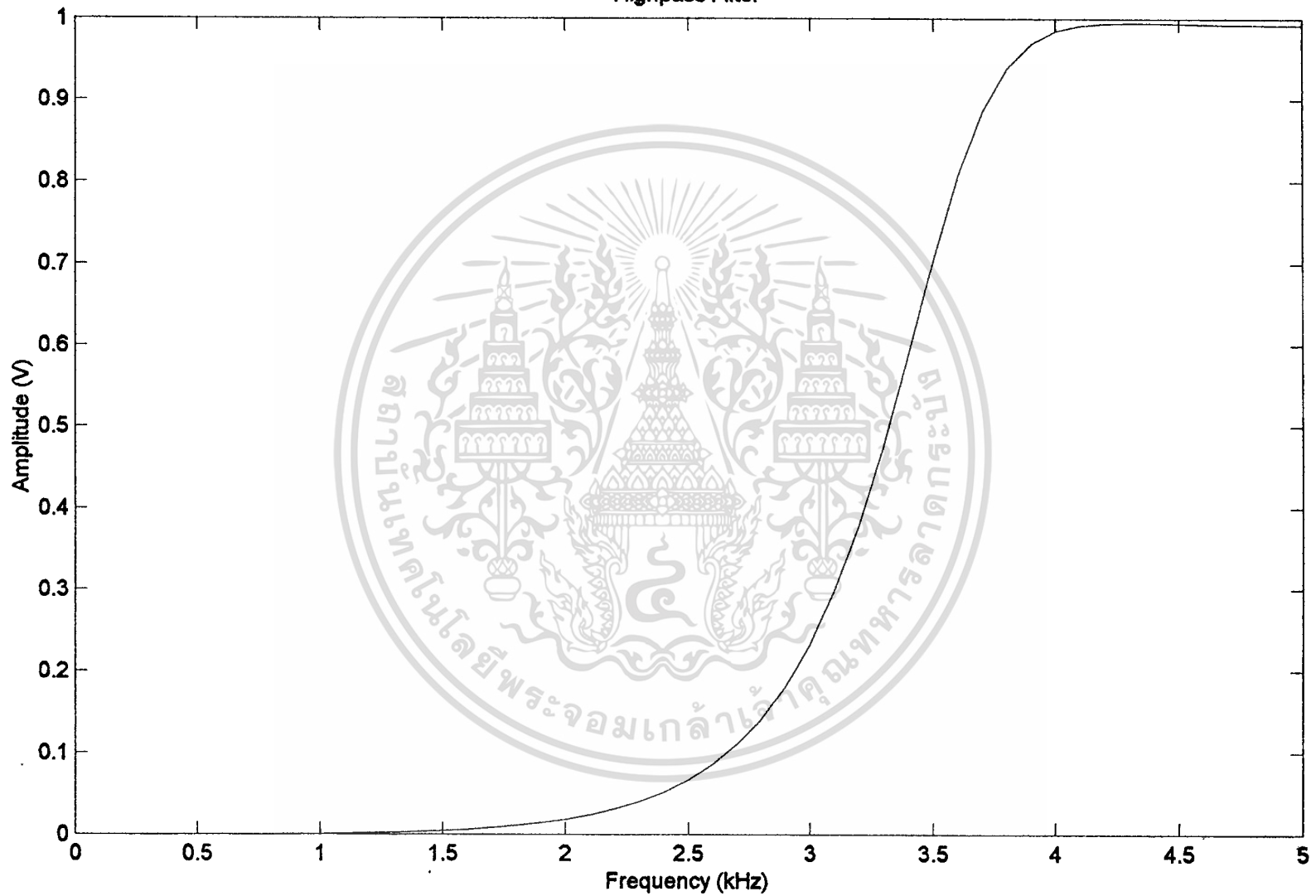


รูปที่ 4.14 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

รูปที่ 4.15 กราฟคุณลักษณะ highpass filter ผลจากวงจร



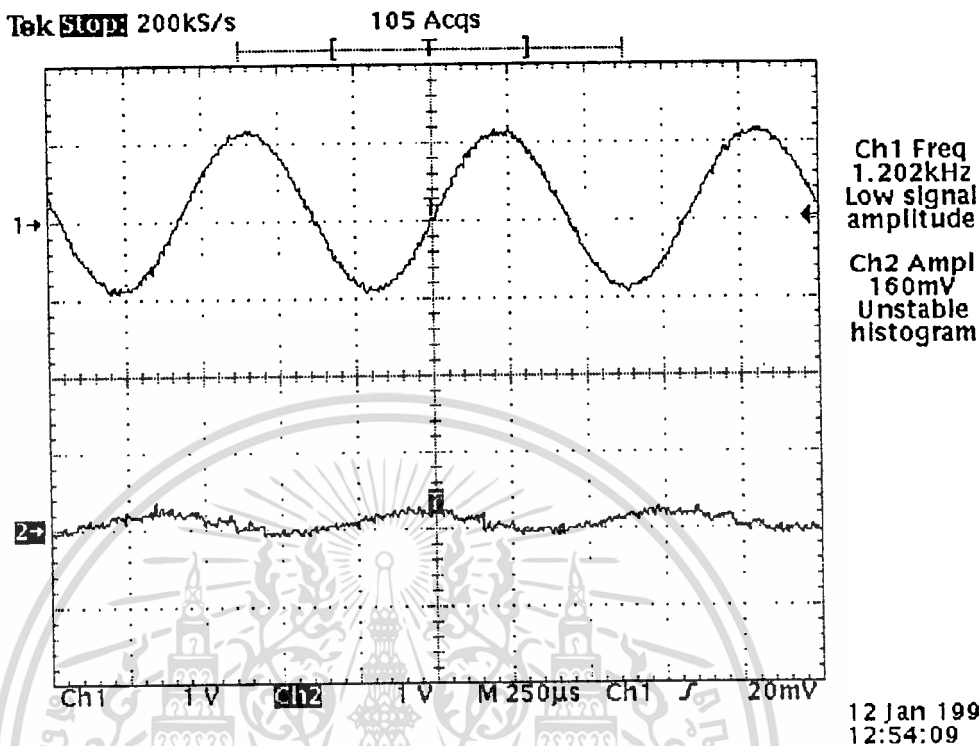
Highpass Filter



รูปที่ 4.16 กราฟคุณสมบัติของ highpass filter ผลจากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์

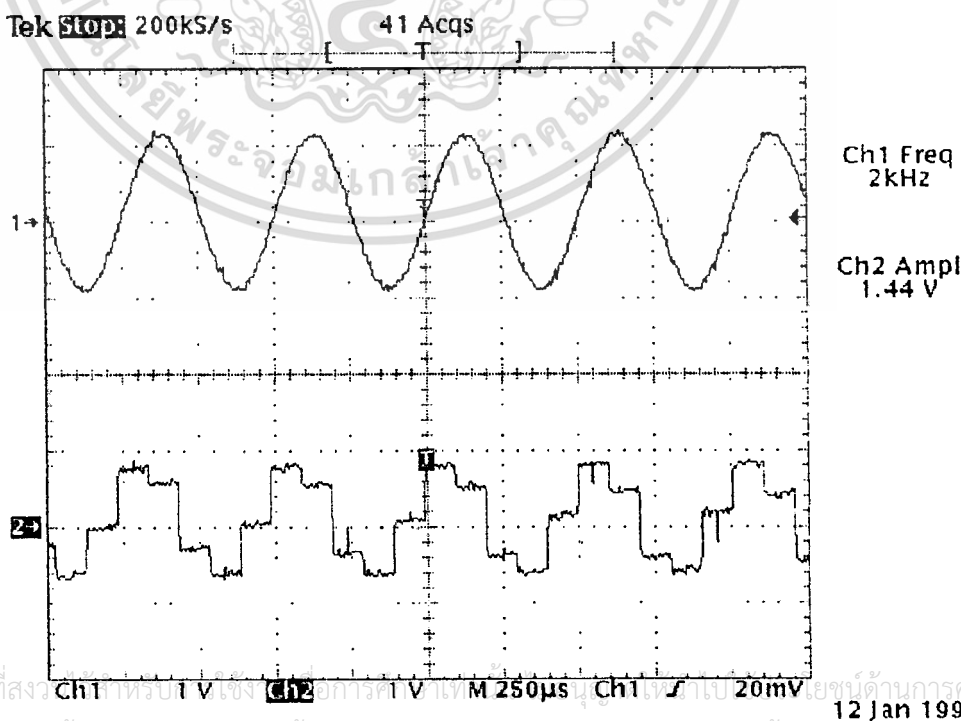
วงจร Bandpass filter

13. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 1.202 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท



รูปที่ 4.17 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

14. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 2 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท

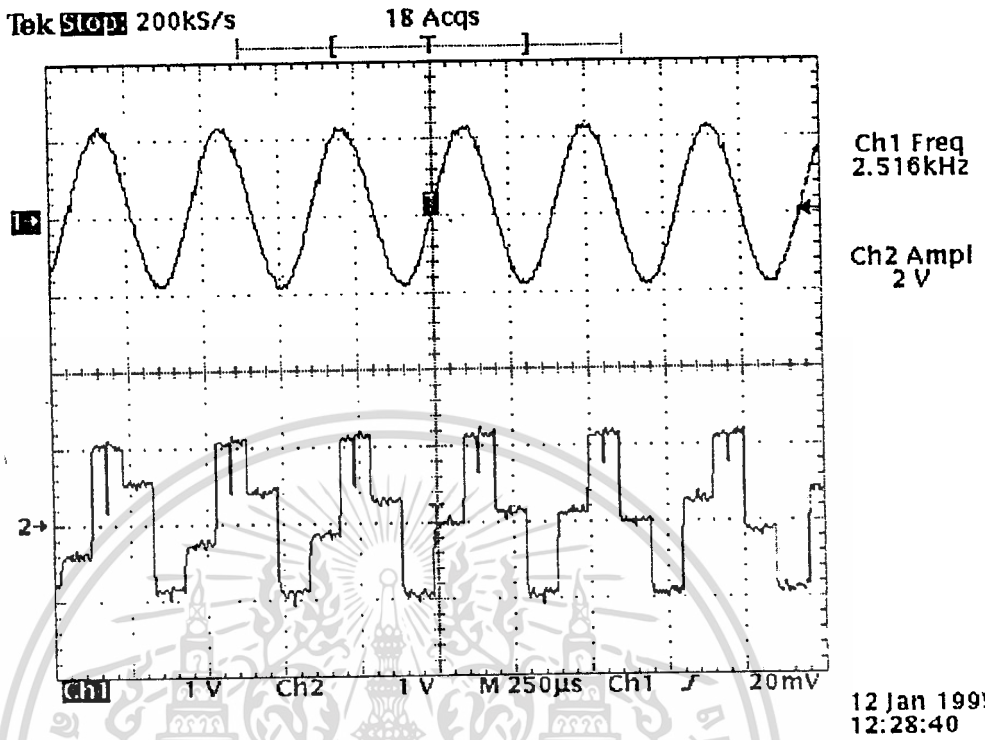


รูปที่ 4.18 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับอาจารย์ผู้สอนเท่านั้น ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

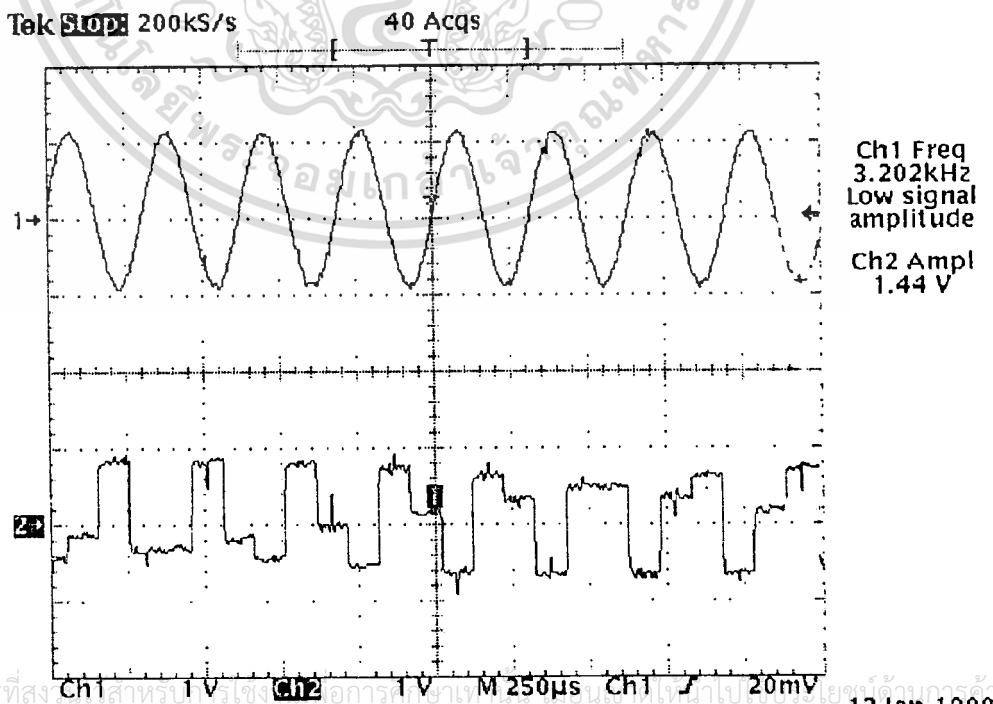
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

15. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 2.516 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท



รูปที่ 4.19 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

16. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 3.202 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท

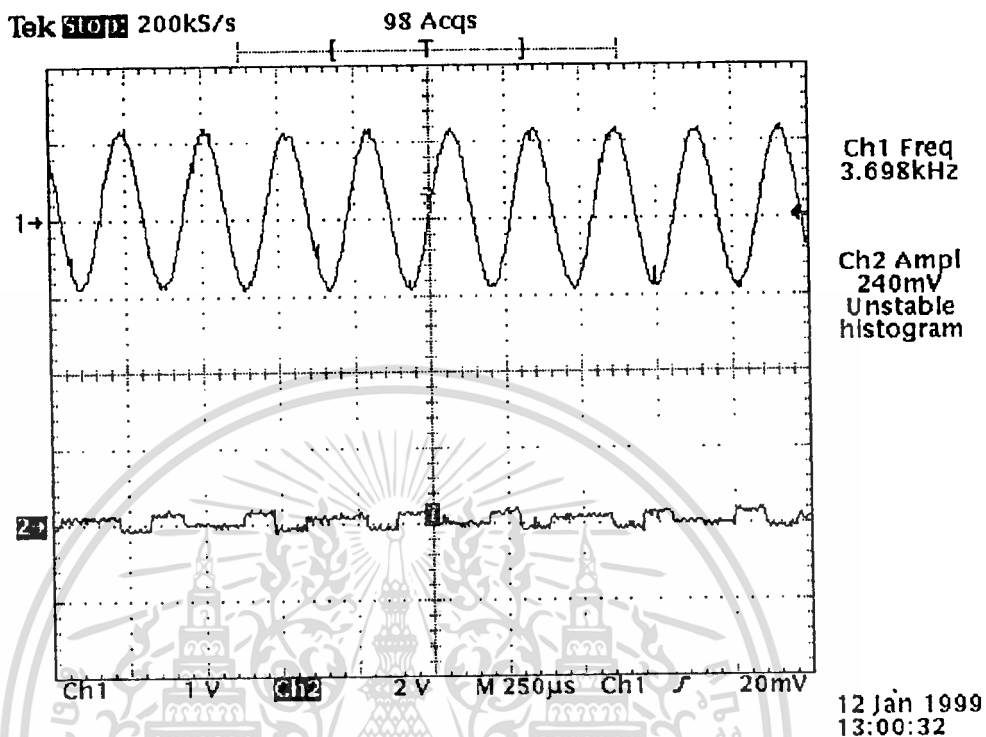


รูปที่ 4.20 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับโรงเรียนวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

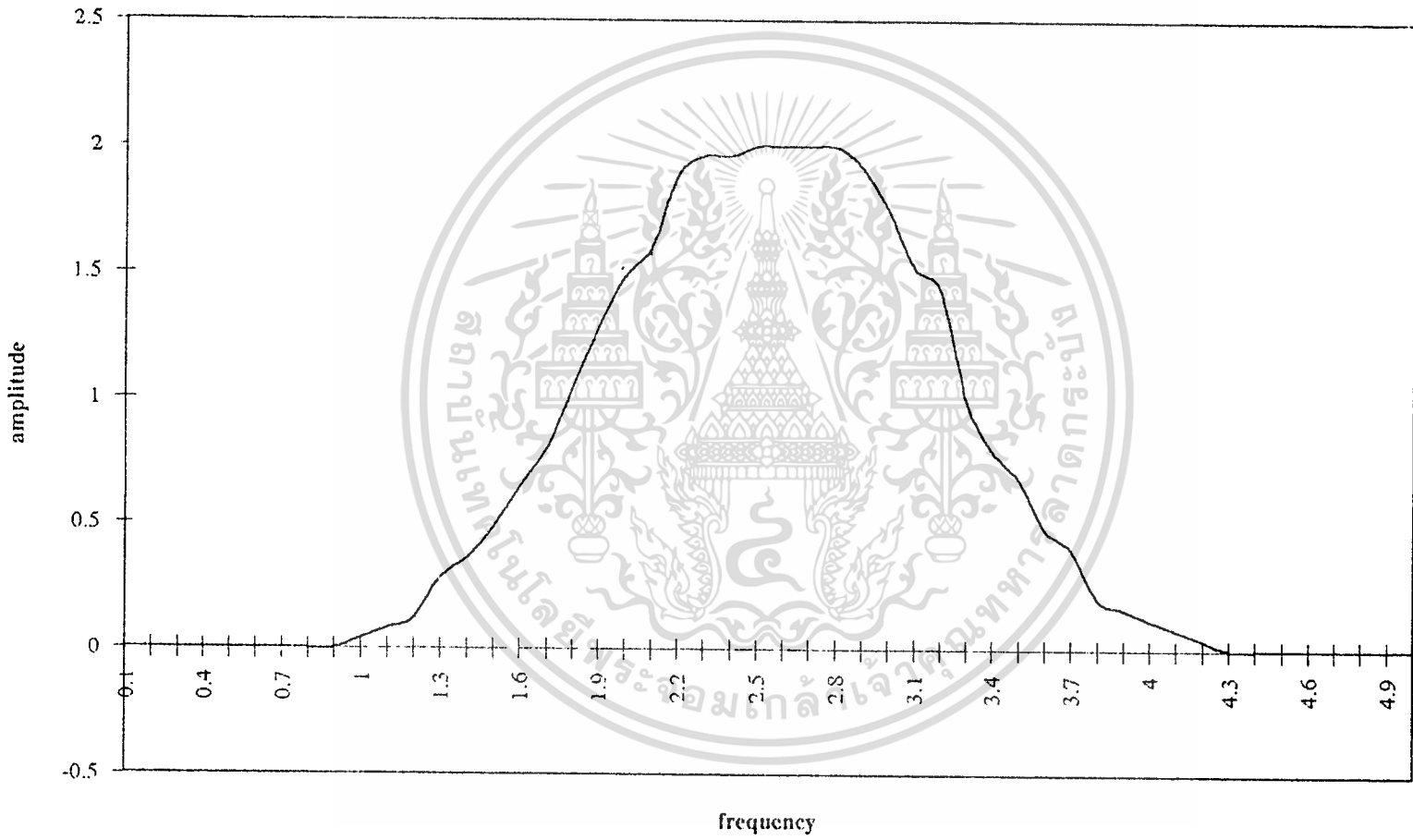
17. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 3.698 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท



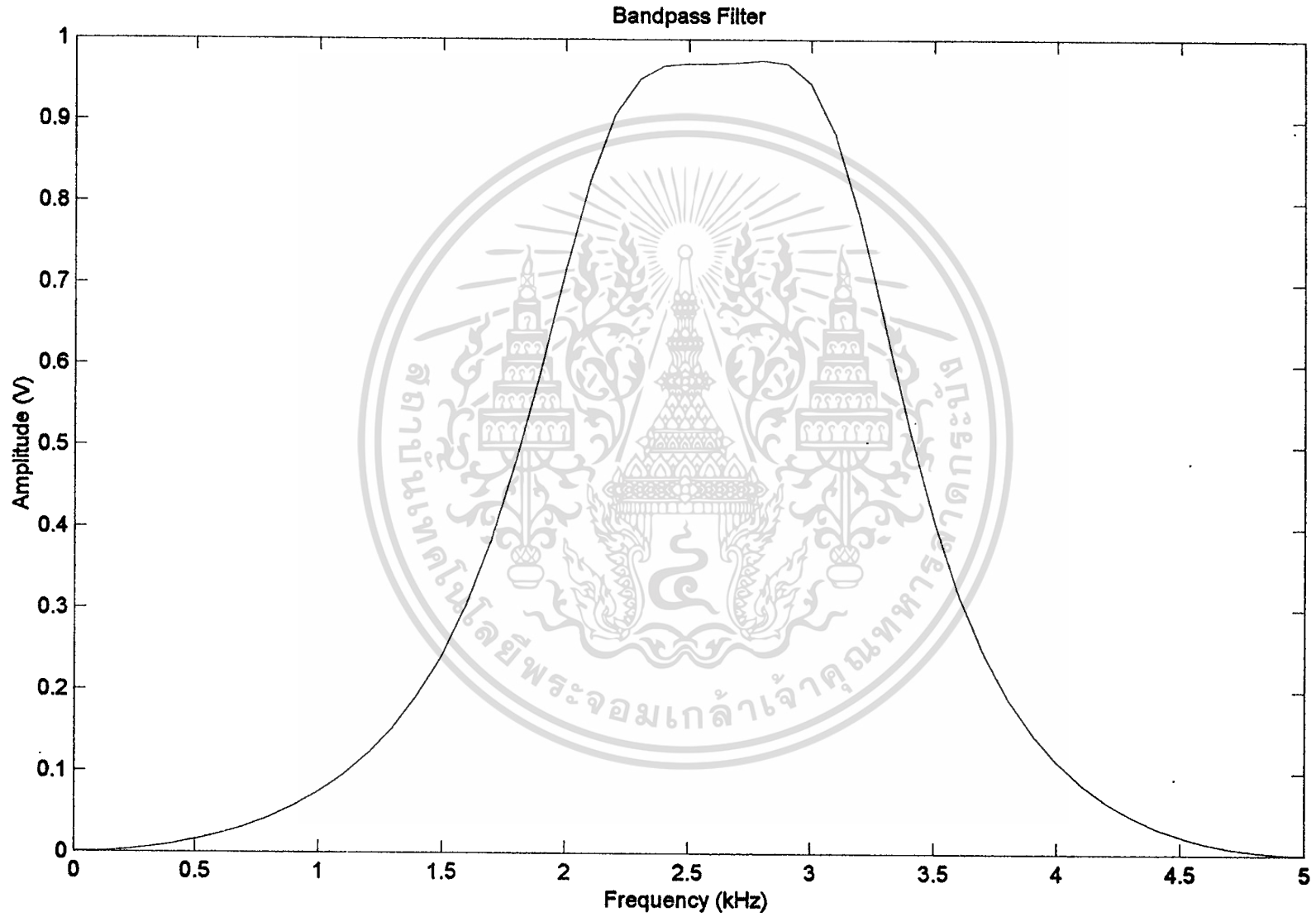
รูปที่ 4.21 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.22 กราฟคุณสมบัติ bandpass filter ผลจากวงจร

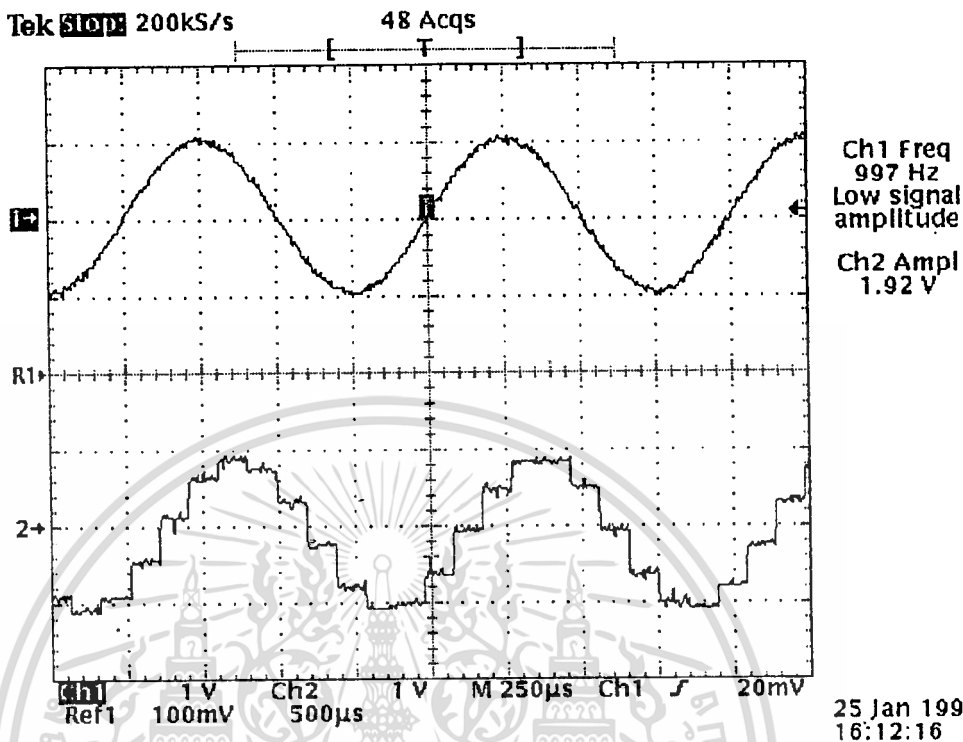


รูปที่ 4.23 กราฟคุณลักษณะ bandpass filter ผลจากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์



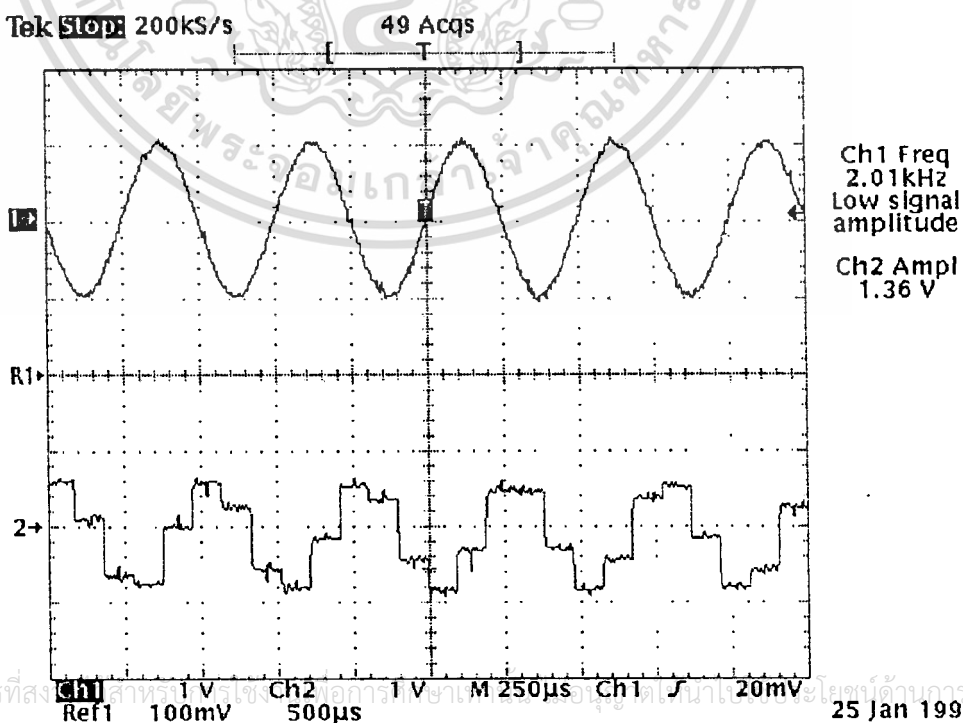
วงจรม Bandreject filter

18. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 997 Hz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท



รูปที่ 4.24 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

19. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 2.01 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท

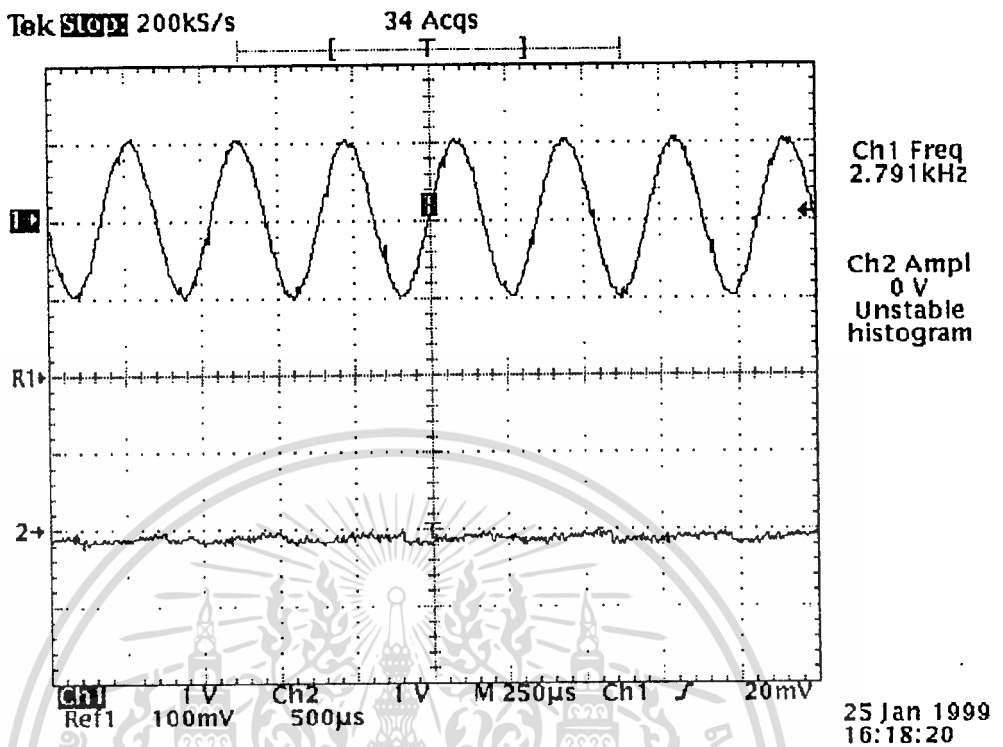


รูปที่ 4.25 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

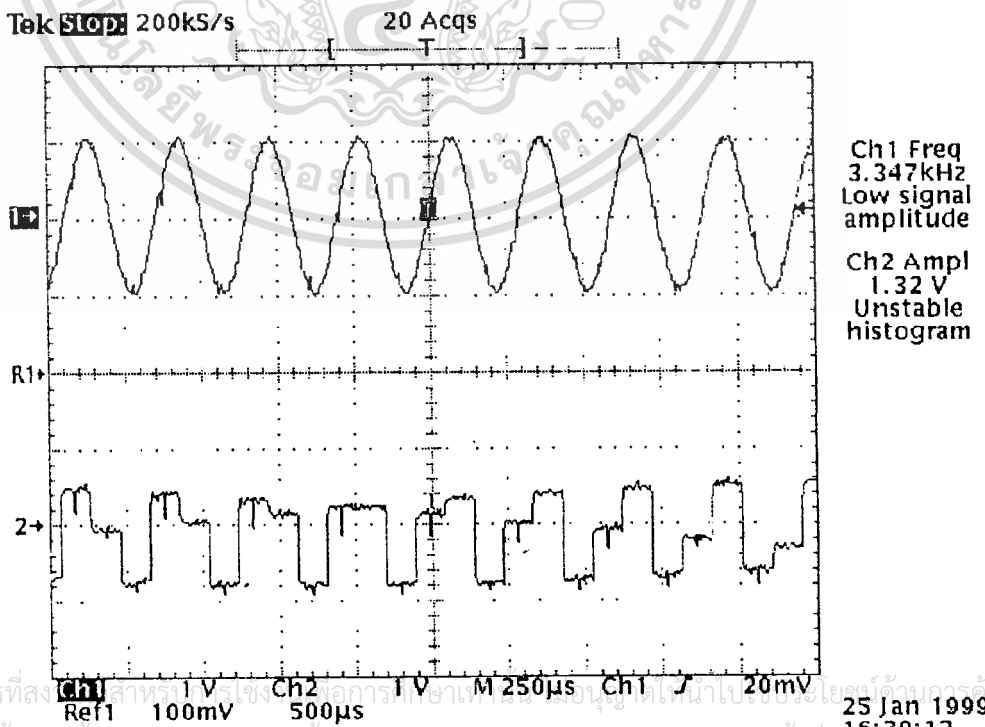
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีงานนำไปใช้

20. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 2.791 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท



รูปที่ 4.26 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

21. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 3.347 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัดสัญญาณเอาต์พุท

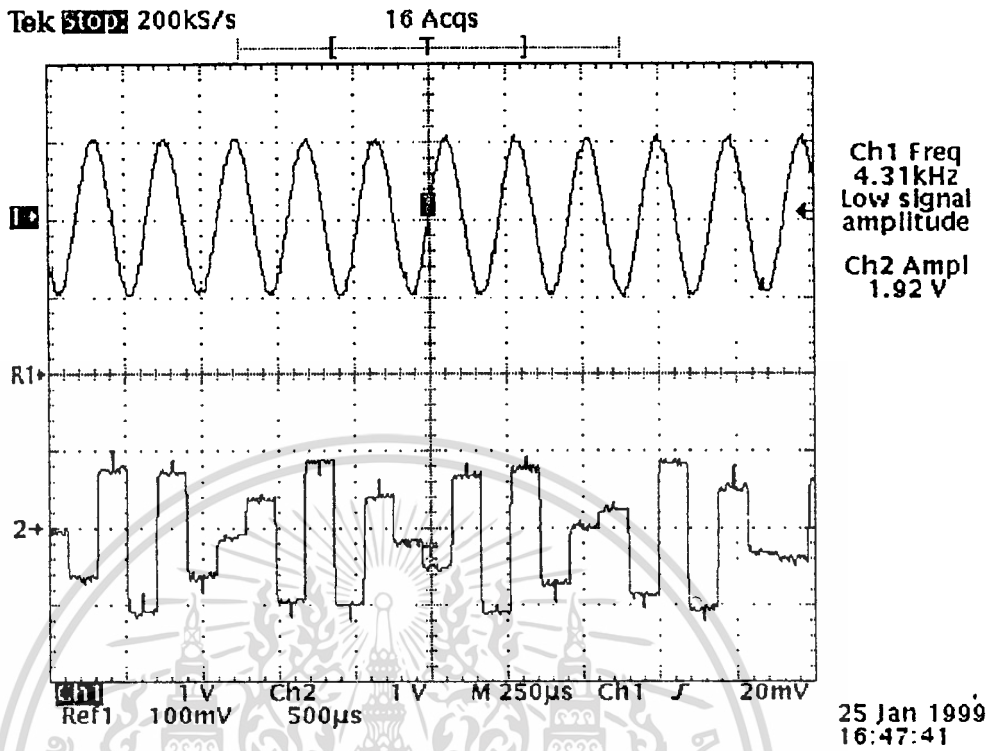


รูปที่ 4.27 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีภาควิชาฯ

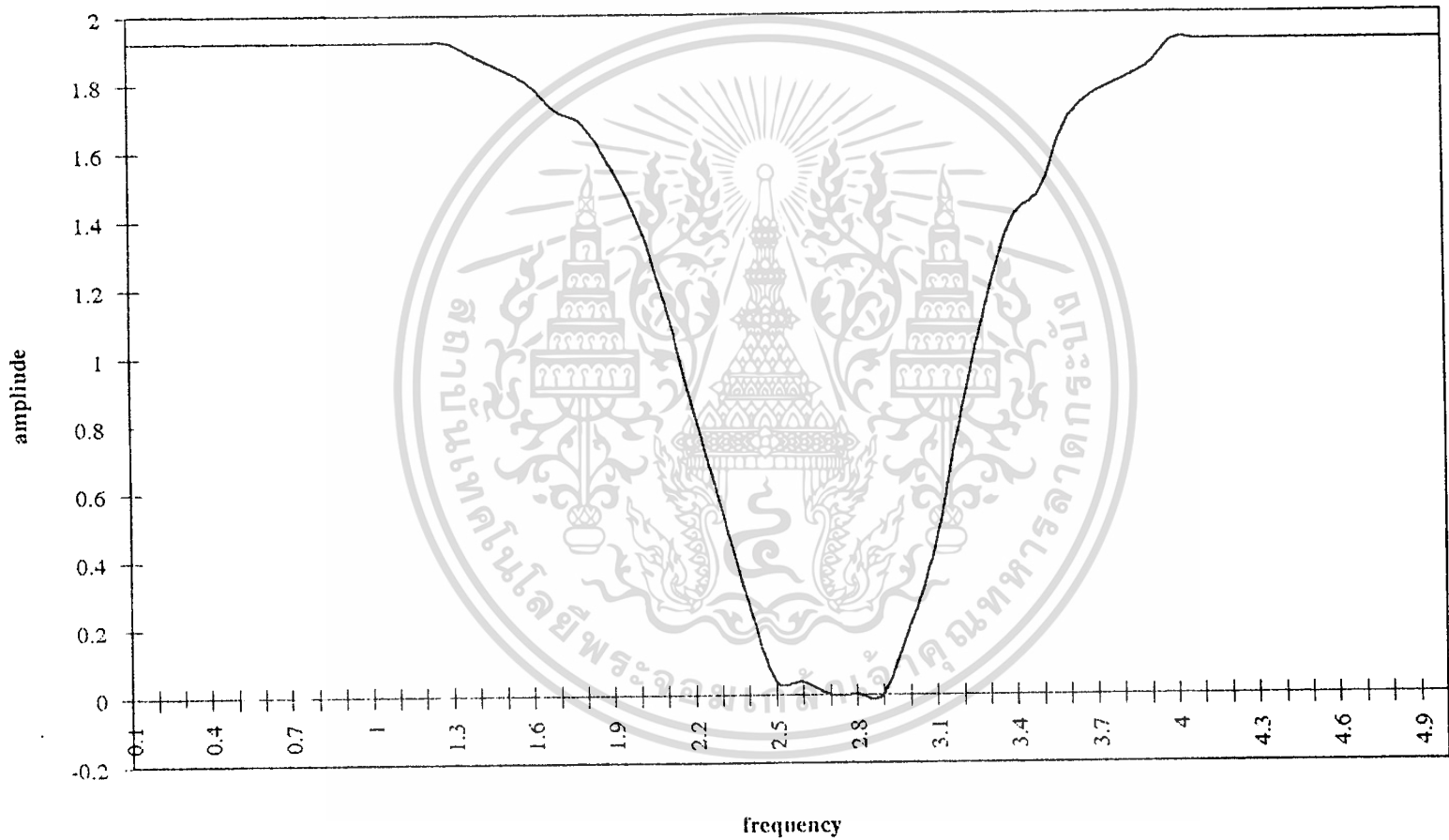
22. ป้อนสัญญาณ Sine ความถี่ 4.31 kHz 2 Vpp เข้าที่อินพุท วัตต์สัญญาณเอาต์พุท



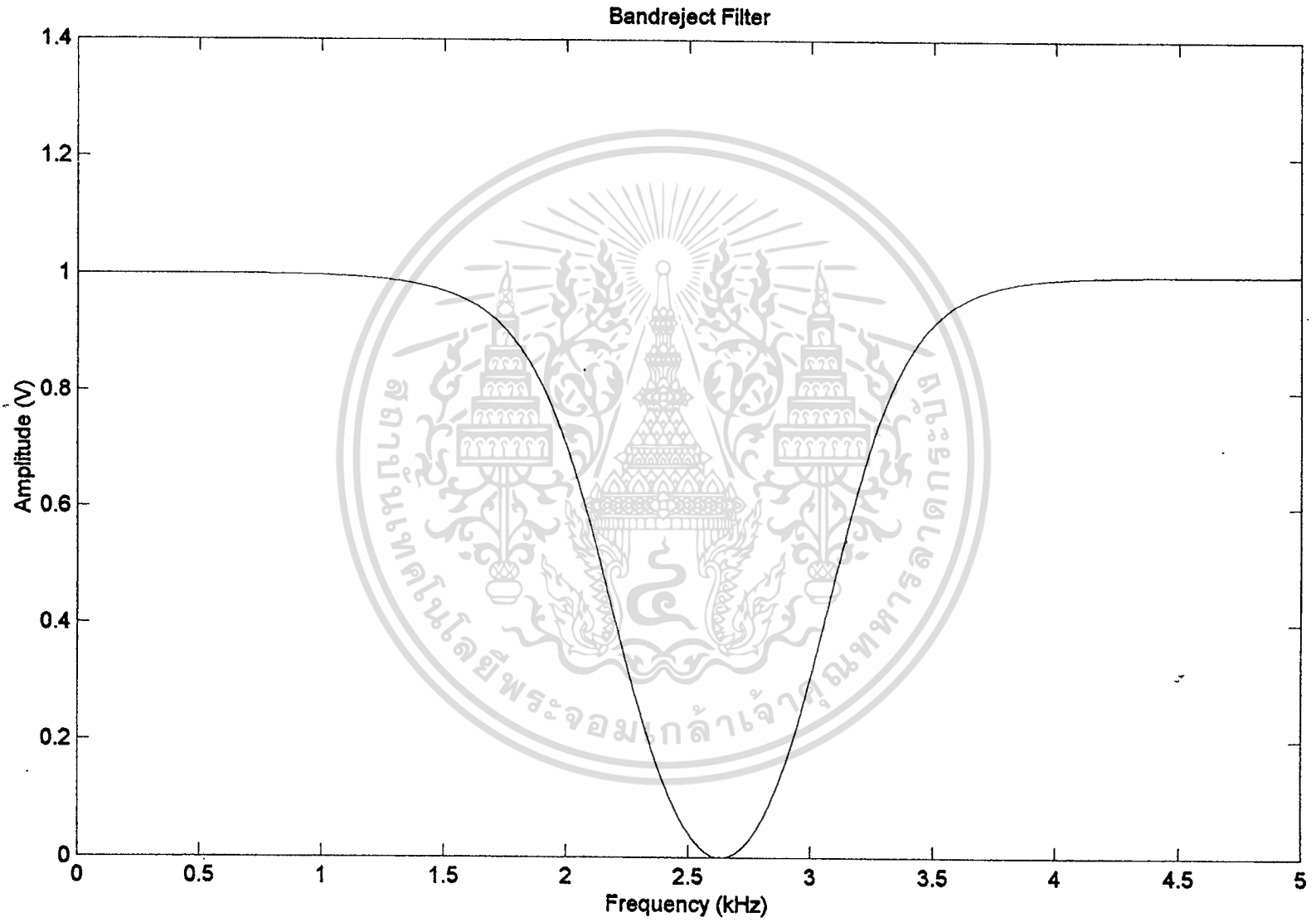
รูปที่ 4.28 Channel 1 แสดงสัญญาณอินพุท Channel 2 แสดงสัญญาณเอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.29 กราฟคุณสมบัติขมและ bandreject filter ผลการวางจร



รูปที่ 4.30 กราฟคุณลักษณะ bandreject filter ผลจากการประมาณค่าด้วยคอมพิวเตอร์



บทที่ 5 บทวิจารณ์และบทสรุป

จากการศึกษาการออกแบบดิจิทัลฟิลเตอร์ที่มีการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ และนำโครงสร้างฟิลเตอร์ที่ได้มาสร้างเป็นวงจรทางฮาร์ดแวร์ที่ประกอบด้วยวงจรมัลติเพล็กซ์และโพลีโพลาร์ วงจรขยาย วงจรหน่วงเวลา วงจรรวมสัญญาณ ซึ่งจะนำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟคุณลักษณะและมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากวงจรทางฮาร์ดแวร์จะไม่ได้เท่ากับผลที่ได้จากคอมพิวเตอร์

การออกแบบดิจิทัลฟิลเตอร์ โครงสร้างของฟิลเตอร์ที่ได้มีผลมาจากการกำหนดความถี่คัทออฟและอันดับของฟิลเตอร์ จากสมการผลต่างของฟิลเตอร์ที่ได้จะนำมาสร้างเป็นวงจรทางฮาร์ดแวร์ ต้องพิจารณาสัมประสิทธิ์ของแต่ละเทอม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์จะใช้ได้เฉพาะบางค่าเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถสร้างเป็นฟิลเตอร์ตามทีออกแบบไว้ ดังนั้นจึงต้องคำนวณใหม่โดยการเปลี่ยนความถี่คัทออฟเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม .



กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความร่วมมือจากหลายบุคคล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์ รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน อ.วิภา แสงพิสิทธิ และพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้ คำปรึกษา คำแนะนำ ช่วยเหลือการปฏิบัติงานอย่างดีมาโดยตลอด จึงขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้ด้วย

ผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] First Principles of Discrete Systems and Digital Signal Processing
Robert D. Strum
Donald E. Kirk
- [2] Fundamentals of Digital Signal Processing
Lonnie C. Ludeman



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้