การสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขอันดับ 6 แบบบัตเตอร์เวิร์ท

Hardware Implementation of 6th Order Butterworth Digital Filter

โดย

นาย พีรเดช พัฒนานุกูล

นาย สัทธา อินทราฉัตรจามร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขอันดับ 6 แบบบัตเตอร์เวิร์ท

Hardware Implementation of 6th Order Butterworth Digital Filter

โดย

นาย สัทธา อินทราฉัตรจามร 37014479

นาย พีรเดช พัฒนานุกูล 37014295

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. กอบชัย เดชหาญ

วัน เดือน ปี 18 ก.ค. 2541
เลขทะเบียน 039075
เลขเรียกหนังสือ T 2076 พ 797ก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

039075

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **การสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขอันดับ 6 แบบบัตเตอร์เวิร์ท**

Hardware Implementation of 6th Order Butterworth Digital Filter

ผู้จัดทำ

1. นายพีรเดช พัฒนานุกูล 37014295

2.นายสัทธา อินทราฉัตรจามร 37014479

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. กอบชัย เดชหาญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขอันดับ 6 แบบบัตเตอร์เวิร์ท

Hardware Implementation of 6th Order Butterworth Digital Filter

โดย นาย พีรเดช พัฒนานุกูล 37014295
นาย สัทธา อินทราฉัตรจามร 37014479

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. กอบชัย เดชหาญ

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาวิธีการออกแบบสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขอันดับ 6 แบบบัตเตอร์เวิร์ท เป็นอันดับที่สองต่ออนุกรมกัน จากต้นแบบทางคณิตศาสตร์ถ่ายโอนไปสู่วงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือฮาร์ดแวร์ โดยใช้โครงสร้างของตัวประมวลผลเชิงเลขแบบเลขคณิตกระจาย หรือแบบรอม-แอกคูมูเลเตอร์ ให้ทำงานได้จริงในทางปฏิบัติและรักษาคุณสมบัติของผลตอบสนองความถี่ ให้ผิดเพี้ยนจากทฤษฎีต้นแบบน้อยที่สุด โดยหลักการแล้วตัวประมวลผลเชิงเลขชนิดนี้มีความเร็วในการทำงานสูง ทำให้ตัวกรองสัญญาณเชิงเลขที่สร้างมีประสิทธิภาพดีในเชิงของการประมวลผลและใช้ฮาร์ดแวร์ไม่มาก

ABSTRACT

This project proposes a design of 6th order Butterworth digital filter based on distributed arithmatic. Having used the transfer function, the hardware can be implemented. This filter design results the frequency response characteristic which is a little difference from theoretical result. This circuit technique concerns about Rom-accumulator and the other commercial chips, they give the good efficiency in the form of processing and computation speed without hardware complexity.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและคณิตศาสตร์	2-9
2.1 นิยามของสัญญาณและระบบ	2
2.2 ลำดับสัญญาณหรือลำดับข้อมูล	4
2.3 สมการผลต่างสืบเนื่อง	4
2.4 การแปลง-แซด	5
2.5 การแปลงเส้นคู่	5
บทที่ 3 การออกแบบและคำนวณสร้าง	10-34
3.1 การออกแบบสร้างตัวประมวลผลเชิงเลข	10
3.2 การออกแบบตัวกรองป้อนกลับสัญญาณเชิงเลขอันดับที่ 6	15
3.3 การทำงานของวงจร	27
3.4 ส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขอันดับ 6 แบบบัตเตอร์เวอร์ท	29
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	35-44
4.1 การทดลอง	35
4.2 ผลการทดลอง	35
บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์การทดลอง	45-46
ภาคผนวก	
บรรณานุกรม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในปัจจุบันนี้ โลกของการติดต่อสื่อสารและการเรียนรู้ได้มีการพัฒนาไปอย่างมากมาย ตัวอย่างเช่น การติดต่อสื่อสารด้วยเส้นใยแสง (optic fiber) คลื่นไมโครเวฟ (microwave) และดาวเทียม (satellite) การนำอุปกรณ์อิเลคโทรนิคชนิดต่างๆ มาใช้งาน การใช้งานระบบการส่งสัญญาณด้วยความเร็วสูง ฯลฯ โดยข้อมูลข่าวสารต่างๆ ที่ถูกส่งไป ตลอดจนอุปกรณ์ชนิดต่างๆ ที่ใช้งานนั้น ยังแบ่งออกเป็นระบบอนาล็อก(analog) และระบบดิจิตอล (digital) ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวแต่เฉพาะระบบดิจิตอล เนื่องจากว่าในระบบดิจิตอล เป็นระบบที่มีข้อได้เปรียบมากกว่าระบบอนาล็อกหลายประการ และในปัจจุบันยังเป็นระบบที่นิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกมากมายในอนาคต

โดยในที่นี้จะกล่าวถึงวงจรกรองสัญญาณแบบดิจิตอล (digital filter) ซึ่งจะทำหน้าที่กรองสัญญาณที่เข้ามา เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความถี่ตามต้องการ โดยในบทต่อไปจะกล่าวถึงวงจรกรองเชิงเลขโดยใช้เทคนิคของบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่ 6 (6 th order Butterworth) เข้ามาช่วยในการคำณวนและออกแบบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและคณิตศาสตร์

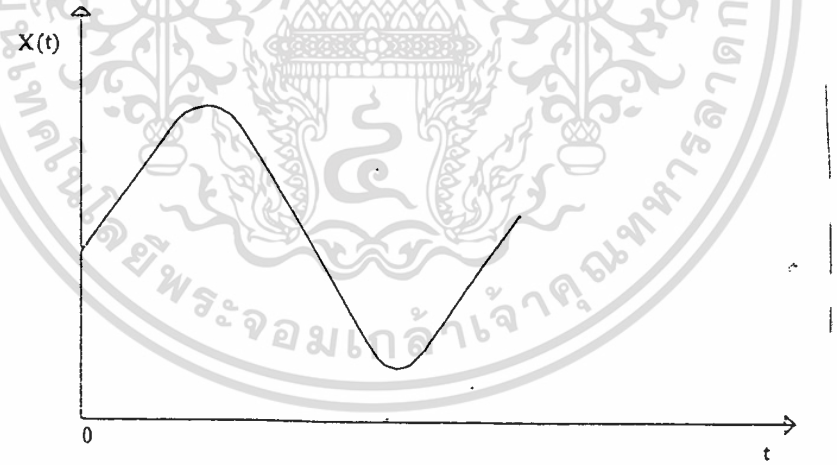
ตัวกรองสัญญาณเชิงเลขเกี่ยวข้องกับการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข จำเป็นต้องใช้คณิตศาสตร์มาทำการวิเคราะห์ คือ นิยามของสัญญาณและระบบ ลำดับของสัญญาณและลำดับข้อมูล สมการผลต่างสืบเนื่อง (Differrence Equation) ใช้การแปลง-แซด (Z-Transform) มาช่วยแก้ปัญหา ซึ่งมีนิยามและรูปแบบดังนี้

2.1 นิยามของสัญญาณและระบบ

ตัวกรองสัญญาณเชิงเลข (digital filter) เป็นส่วนหนึ่งในสาขาวิชาการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข (digital signal processing) ซึ่งเกี่ยวข้องกับสัญญาณและคณิตศาสตร์หลายแขนง จำเป็นที่จะกล่าวถึงความหมายของนิยามหรือสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับดังนี้

2.1.1. สัญญาณเชิงเวลาต่อเนื่อง (continuous-time signal)

เป็นสัญญาณที่มีรูปคลื่น (wave form) ของสัญญาณแปรค่าไปอย่างต่อเนื่องกับพิสัยเวลา แต่ขนาด (amplityude) ไม่ได้เจาะจงว่าแปรไปอย่างต่อเนื่องซึ่งก็หมายถึงว่าอาจแปรอย่างไม่ต่อเนื่องก็ได้ เพราะฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่าสัญญาณเชิงอุปมาณ(analog signal) เป็นชนิดหนึ่งของสัญญาณเชิงเวลาต่อเนื่องได้ อย่างไรก็ตามหนังสือทั่วไปก็มักใช้คำสองคำปนเปกันดังนั้นการพูดถึงสัญญาณเชิงอุปมาณก็หมายถึงสัญญาณเชิงเวลาต่อเนื่องด้วย คณิตศาสตร์พื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์คือสมการเชิงเส้น โดยการใช้การแปลงลาปลาสช่วยแก้ปัญหา รูปร่างของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.1



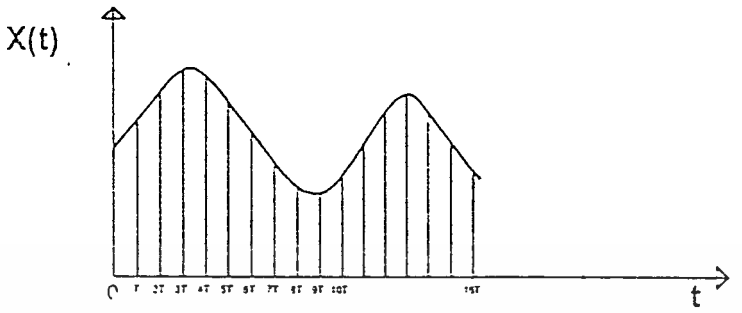
รูปที่ 2.1 สัญญาณเชิงเวลาต่อเนื่อง

2.1.2. สัญญาณเชิงเวลาเต็มหน่วย (discrete-time signal)

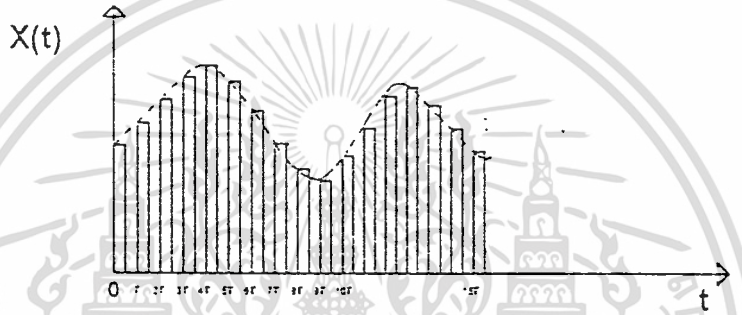
สัญญาณที่ค่าของฟังก์ชั่นกำหนดเฉพาะเซตของเวลาที่แน่นอนอันหนึ่งเท่านั้นสัญญาณแบบนี้ ได้แก่ สัญญาณเชิงข้อมูลเต็มหน่วย (discrete data signal) สัญญาณแบบนี้ขนาด (amplitude) จะต่อเนื่องกัน หรือกล่าวได้ว่า ขนาดมีค่าเท่ากันทุกประการกับสัญญาณเชิงอุปมาณเป็นต้นแบบในการสุ่มตัวอย่าง(sampling) เช่น สัญญาณออกของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ (sampling and hold) จะจัดเป็นสัญญาณเชิงเต็มหน่วย สัญญาณแบบนี้บางทีอาจเรียกข้อมูลหรือสัญญาณเชิงเลขเต็มหน่วย คณิตศาสตร์พื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์ คือ สมการผล

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างสืบเนื่อง (differrence equation) โดยยการใช้การแปลงแซด (Z-transform) ช่วยแก้ปัญหา ตัวอย่างรูปร่างของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.2



(ก) สัญญาณที่ได้จากการสุ่ม (Samoling Signal)

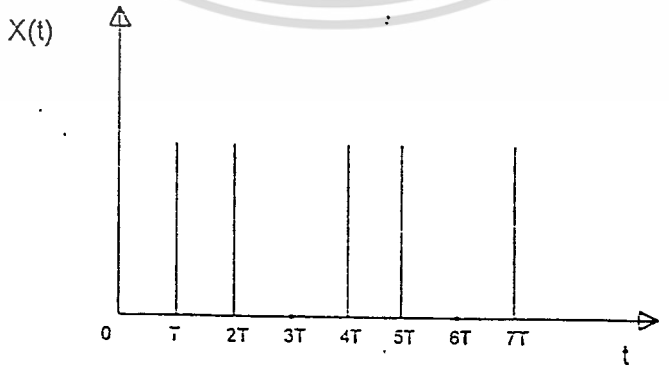


(ข) สัญญาณที่ได้จากการสุ่มและลงค่า (Samoling and Hold)

รูปที่ 2.2 สัญญาณเชิงข้อมูลเต็มหน่วย (discrete data-signal)

2.1.3 สัญญาณเชิงเลข (digital signal)

สัญญาณแบบนี้ขนาด (amplitude) ของสัญญาณจะมีค่าเฉพาะเซตของค่าที่แน่นอนเซตหนึ่งเท่านั้นเช่น สัญญาณเอ้าพุตของวงจร A/D (analog to digital converter) เป็นต้น ตัวอย่างของสัญญาณเชิงเลขแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สัญญาณเชิงเลข

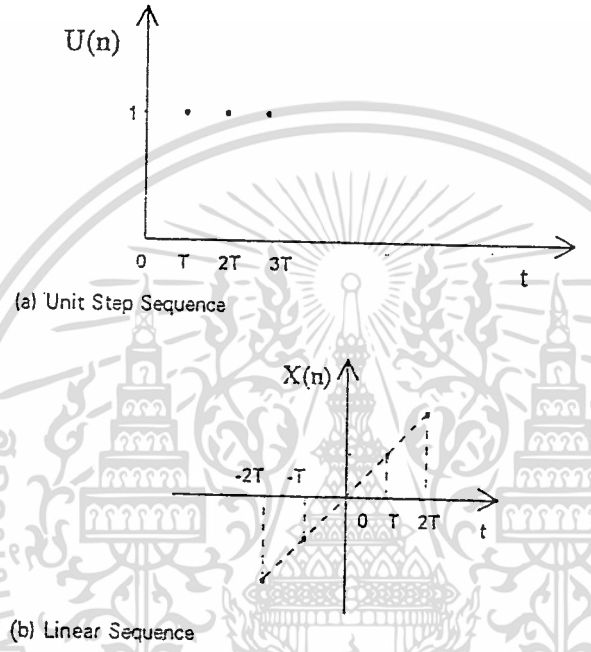
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ระบบเวลาจริง (real-time system)

โดยทั่วไปแล้วคำนี้ใช้กับระบบประมวลผลสัญญาณที่การประมวลผลทำได้เสร็จสิ้น ก่อนที่จะทำการสุ่มตัวอย่างสัญญาณอันดับใหม่

2.2 ลำดับสัญญาณ (sequence) หรือลำดับข้อมูล

ในหนังสือบางเล่มอาจเรียกเป็นลำดับข้อมูลหรือลำดับสัญญาณซึ่งอาจใช้แทนสัญญาณเชิงข้อมูลเต็มหน่วยหรือสัญญาณเชิงเลขก็ได้ ตัวอย่างลำดับสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลำดับสัญญาณชนิดต่างๆ

2.3 สมการผลต่างสืบเนื่อง (Difference Equation)

การวิเคราะห์ระบบเชิงอุปมาณ ในระบบโดเมนเวลาสามารถเขียนอธิบายได้โดยสมการเชิงอุปมาณ เช่น สมการอนุพันธ์เชิงเส้นใช้การแปลง-ลาปลาส มาช่วยแก้ปัญหา ในทำนองเดียวกันในระบบเชิงเลขเราก็มีสมการผลต่างสืบเนื่องใช้ในการอธิบายคุณสมบัติของระบบในโดเมนของเวลา รูปแบบของสมการผลต่างสืบเนื่อง N อันดับเขียนได้ดังนี้

$$y(n) = \sum_{k=1}^{k=N} a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^{k=L} b_k x(n-k) \qquad (2.1)$$

โดยที่ x(n) เป็นลำดับสัญญาณเข้าเชิงเลข

y(n) เป็นลำดับสัญญาณออกเชิงเลข

a_k และ b_k เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การแปลง-แซด (Z-Transform)

การแปลง-แซด ช่วยในการวิเคราะห์หรือแก้ปัญหาของระบบทางอ้อม ในการหาคำตอบผ่านการแปลงนี้ ซึ่งสามารถทำได้สะดวกกว่าการแก้ปัญหาโดยตรง มีบทนิยามดังนี้

2.4.1. นิยามการแปลง-แซด

ลำดับสัญญาณ เป็นลำดับสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางแกนเวลา สามารถแปลงให้อยู่โดเมนของ z คือ X(z) ด้วยการใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$Z\{x(n)\} = X(z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n} \tag{2.2}$$

$$Z^{-1}\{X(z)\} = x(n) = \frac{1}{2\pi j}\oint X(z)z^{n-1}dz \tag{2.3}$$

สมการ (2.2) เรียกว่าการแปลง-แซด ส่วนสมการ (2.3) เรียกว่าอินเวิร์สของการแปลง-แซด โดยที่ $z = e^{j\omega}$

2.4.2. คุณลักษณะสำคัญของการแปลง-แซด (Elementary Properties of Z-Transform)

ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

$$Z\{ax(n) + by(n)\} = aX(z) + bY(z) \tag{2.4}$$

การเลื่อน (Shift)

$$Z\{x(n+k)\} = z^k X(z) \tag{2.5}$$

คอนโวลูชั่น (Convolution)

ถ้าลำดับสัญญาณ f(n) และ g(n) เป็น Causal Sequences และเราจะได้ว่า

$$Z\{f(n)*g(n)\} = \sum_{n=0}^{\infty}\left[\sum_{k=0}^{n} f(n-k)g(k)\right]z^{-n}$$

$$Z\{f(n)*g(n)\} = Z\{f(n)\}Z\{g(n)\} = F(z)G(z) \tag{2.6}$$

2.5 การแปลงเส้นคู่ (Billinear Transform)

การแปลงเส้นคู่เป็นวิธีหนึ่งของการส่งผ่านหรือการแปลงค่าในระนาบ-S ไปสู่ระนาบ-Z เป็นการแปลงแบบหนึ่งต่อหนึ่งของความถี่แต่ละจุดบนแกน $j\Omega$ ในระนาบ-S ไปสู่แต่ละจุดบนเส้นรอบวงของวงกลมรัศมี 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยในระนาบ-Z วิธีการเช่นนี้ทำให้เราสามารถสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข จากวงจรกรองสัญญาณเชิงอุปมาณได้ การหาสูตรในการแปลงหาได้โดยใช้การประมาณการการอินทิเกรตด้วยกฎการอินทิเกรตแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Integration Rule) และทำการประมาณการสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยการใช้ผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง ผลจากการประมาณนี้ คือ สูตรการแปลงเส้นคู่ สามารถแสดงให้เห็นจริงดังนี้

สมมุติให้ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของวงจรเชิงอุปมาณ แบบโพลเดี่ยว ดังนี้

$$H(z)=\frac{a}{(s+a)} \tag{2.7}$$

สมการอนุพันธ์ที่สัมพันธ์กับสมการ (2.7) คือ

$$\frac{dy}{dx}=-ay+ax \tag{2.8}$$

ทำการอินทิเกรตจากเวลา t_1=0 ถึง t_2=kT ทั้งสองข้าง

$$\int_0^{kT}\frac{dy(t)}{dt}.dt = -a\int_0^{kT} y(t)dt+\int_0^{kT}x(t)dt$$

หรือ $$y(kT)-y[(k-1)T]=-a\int_{(k-1)T}^{kT} y(t)dt+a\int_{(k-1)T}^{kT} x(t)dt$$

ทำการประมาณการอินทิเกรตด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูได้ดังนี้

$$y(kT)-y[(k-1)T]=-\left(\frac{aT}{2}\right)\left[y(kT)+y[(k-1)T]\right]+\left(\frac{aT}{2}\right)\left[x(kT)+x[(k-1)T]\right]$$

ทำการแปลง-Z แล้วจัดพจน์ให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชั่นถ่ายโอน

$$H(z)=\frac{Y(z)}{X(z)}=\frac{a}{\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}+a} \tag{2.9}$$

ทำการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการ (2.7) กับ (2.9) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$s=\frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \tag{2.10}$$

$$z=\frac{2}{T}.\frac{2+sT}{2-sT} \tag{2.11}$$

สมการ (2.10) และ (2.11) คือ สูตรที่ใช้ในการแปลงเส้นคู่ ต่อไปจะศึกษาถึงคุณสมบัติของการแปลงเส้นคู่ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบสร้างตัวกรองสัญญาณเชิงเลข

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบ-S และระนาบ-Z โดยการแปลงความถี่แต่ละจุดบนแกน $s=j\Omega$ ในระนาบ-S ไปเป็นความถี่แต่ละจุดบนเส้นรอบวง $z=e^{j\omega}$ ในระนาบ-Z โดยการแทนค่า $s=j\Omega$ และ $z=e^{j\omega}$ ลงในสมการ (2.11) ผลที่ได้เป็นดังนี้

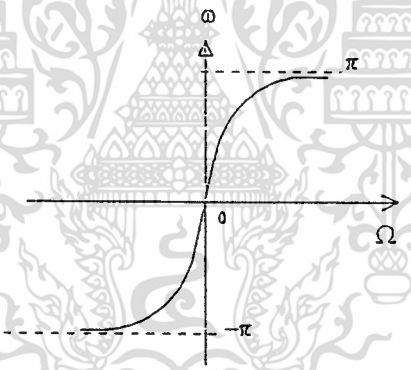
$$e^{j\omega} = \frac{j\frac{\Omega T}{2}+1}{j\frac{\Omega T}{2}-1} = \frac{\left[\left(\frac{\Omega T}{2}\right)^2+1\right]^{1/2} e^{j\tan^{-1}\left(\frac{\Omega T}{2}\right)}}{\left[\left(\frac{\Omega T}{2}\right)^2+1\right]^{1/2} e^{j\tan^{-1}\left(-\frac{\Omega T}{2}\right)}}$$

$$e^{j\omega} = e^{j2\tan^{-1}\left(\frac{\Omega T}{2}\right)} \qquad (2.12)$$

จากสมการ (2.12) เมื่อเทียบเฉพาะส่วนที่ยกกำลังของเอ็กซ์โพแนนเชียลจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\omega = 2\tan^{-1}\left(\frac{\Omega T}{2}\right) \qquad (2.13)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง Ω กับ ω แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5

จะเห็นได้ว่าเป็นการแปลงทุกค่าบนแกน $j\Omega, -\infty < \Omega < \infty$ ในระนาบ-S แบบหนึ่งต่อหนึ่ง ลงบนเส้นรอบวงรัศมีหนึ่งหน่วย $-\pi < \omega < \pi$ ในระนาบ-Z คำว่าหนึ่งต่อหนึ่งหมายความว่าจุดๆหนึ่งบนแกน $j\Omega$ จะแปลงไปเป็นจุดเดียวบนเส้นรอบวงของวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย จุดอื่นๆ บนแกน $j\Omega$ จะไม่แปลงไปทับซ้อนจุดนั้นอีก จากคุณสมบัติที่ดีเด่นอันนี้เองที่ทำให้การแปลงเส้นคู่ใช้แปลงวงจรกรองสัญญาณเชิงอุปมาณไปเป็นวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขโดยปราศจากปรากฏการณ์เหลื่อมกันของสเปคตรัม ทำให้วงจรกรองสัญญาณเชิงอุปมาณชนิด Lowpass, Highpass, Bandpass และ Band stop แปลงไปเป็นวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขได้หมด จากสมการ (2.13) สามารถเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งดังนี้

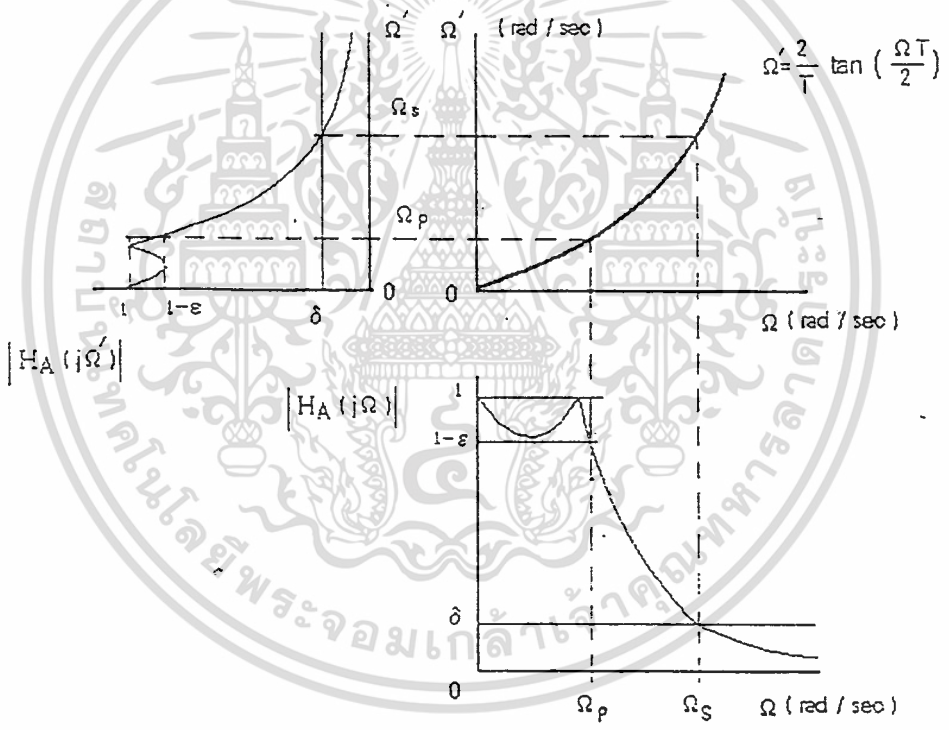
$$\Omega = \frac{2}{T}\tan\left(\frac{\omega}{2}\right) \qquad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.15) เป็นการแสดงให้เห็นว่าในช่วงความถี่ต่ำๆ ความสัมพันธ์ระหว่างΩ กับ ω เป็นไปลักษณะเชิงเส้น แต่ที่ความถี่สูงขึ้นไป ความสัมพันธ์ระหว่าง Ω กับ ω จะไม่เป็นเชิงเส้นอันเกิดจากสมการ (2.13) ก็ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่แล้ว ผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นนี้ทำให้ผลการตอบสนองความถี่ทั้งขนาดและเฟสที่บริเวณ Ω สูงๆ จะเพี้ยนไปเมื่อถูกแปลงไปเป็นฟังก์ชั่น ω ดังรูปที่ 2.1 ความเพี้ยนนี้มีลักษณะหดตัว (Compression) กล่าวคือ Ω มีค่าได้ถึง$\pm\infty$ แต่หดตัวมาเป็น $-\omega$ ซึ่งมีค่าสูงสุดเพียง $\pm\pi$ เท่านั้น อย่างไรก็ตามเราสามารถชดเชยการหดตัวของ Ω ที่ความถี่สูงได้ โดยการชดเชยความถี่ Ω ไว้ล่วงหน้าก่อน โดยการแทนด้วย Ω' และใช้ความสัมพันธ์

$$\Omega' = \frac{2}{T}\tan\left(\frac{\Omega T}{2}\right) \qquad (2.16)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ω' และ Ω แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6

เราเรียกสมการ (2.16) ว่า "Prewarping Procedure" การชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นตามที่กล่าวมาเบื้องต้น ทำได้โดยการแทน Ω' ในสมการ (2.13) ได้ดังนี้

$$\omega = 2\tan^{-1}\left[\frac{\Omega' T}{2}\right] = \Omega T \qquad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราเรียกสมการ (2.16) ว่า "Prewarping Procedure" การชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นตามที่กล่าวมาเบื้องต้น ทำได้โดยการแทน Ω' ในสมการ (2.13) ได้ดังนี้

$$\omega = 2\tan^{-1}\left[\frac{\Omega' T}{2}\right] = \Omega T \qquad (2.17)$$

เปรียบเทียบสมการ (2.15) กับสมการ (2.17) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะความเป็นเชิงเส้นเหมือนกันรา สามารถหาสูตรทั่วไปสำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่าง ω กับ Ω ได้ดังนี้

$$\omega_i = \Omega_i T \qquad (2.18)$$

และจากสมการ (2.14) เขียนเป็นสูตรทั่วไปดังนี้

$$\Omega_i = \frac{2}{T}\tan\left(\frac{\omega_i}{2}\right) \qquad (2.19)$$

โดยที I = 1,2,3,...

ω = คือความถี่เชิงมุมของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองเชิงเลขที่ได้จากการแปลง

Ω = คือความถี่เชิงมุมของผลตอบสนองความถี่ของตัวกรองเชิงอุปมาณ

T = คือคาบเวลาในการสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและคำนวณสร้าง

3.1 การออกแบบสร้างตัวประมวลผลเชิงเลข

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า การสร้างตัวกรองเชิงเลขด้วยการใช้วงจรฮาร์ดแวร์ หรือใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือ ชิป DSP ต่างก็เน้นพิจารณาและปรับปรุงความเร็วในการประมวลผลลำดับสัญญาณ ซึ่งทำได้โดยใช้วงจรคูณ แม้ว่าจะได้ความเร็วในการประมวลผลสูงแต่วงจรทางฮาร์ดแวร์ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนและราคาสูง มีโครงสร้างอีกแบบหนึ่งหลีกเลี่ยงการคูณโดยตรงให้ความเร็วในการประมวลผลสูง วงจรทางฮาร์ดแวร์ไม่ซับซ้อน ราคาถูก เราเรียกโครงสร้างชนิดนี้ว่าโครงสร้างแบบเลขาคณิตกระจาย ซึ่งใช้เป็นภาคประมวลผลของตัวกรองเชิงเลข

3.1.1 การแทนจำนวนเลข (Number Representation)

การประมวลผลเชิงเลข จำนวนเลขต่างๆ จะถูกแทนด้วยระบบตัวเลขฐานสอง โดยทั่วไปมีรูปแบบที่นิยมใช้อยู่ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบจำนวนเลขโดยตรง (Fixed Point Format) และรูปแบบจำนวนอิงดรรชนี (Floating Point Format)

1. ระบบเลขฐานสอง

ในการสร้างตัวกรองเชิงเลขโดยการแทนด้วยเลขฐานสองนิยมทำให้สัญญาณ x มีค่าอยู่ระหว่าง $-1 \le x < 1$ รูปแบบทั่วไปของสมการแทนจำนวนเลขฐานใดๆ เขียนได้ดังนี้

$$(x)_r = (b_{n-1}b_{n-2}\ldots b_1 b_0 . b_{-1}b_{-2}\ldots b_{-m})_r = \sum_{i=-m}^{n-1} b_i r^i \qquad (3.1)$$

โดยที่ r คือ ฐานของเลขจำนวนใดๆ เช่น r=2 หมายถึงเลขฐานสอง

b คือ ตัวเลขหนึ่งตัว(digit) ในระบบเลขฐานสองเรียกว่า บิต

n คือ จำนวนตัวเลขที่อยู่ในส่วนที่เป็นจำนวนเต็ม

m คือ จำนวนตัวเลขในส่วนที่เป็นเศษส่วน

. คือ จุดที่แยกส่วนที่เป็นจำนวนเต็มกับส่วนที่เป็นเศษส่วน (Binary Point)

b^{n-1} คือ บิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด (Most Significant Bit หรือ MSB)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนี้ ... สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b^{-m} คือ บิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (Last Significant Bit หรือ LSB)

เนื่องจาก r เป็นเลขฐานดังนั้น $0 \le b_i \le -1$

2. ระบบเลขส่วนเติมเต็มสอง (Two's Complement) มีนิยามว่า

$$\bar{x} = \begin{cases} x & x \ge 0 \\ 2 - |x| & |x| < 0 \end{cases} \qquad (3.2)$$

โดยที่ $\bar{x}$ คือ ส่วนเติมเต็มสองของเลขจำนวน x

x คือ จำนวนเลขที่ปัดเป็นเศษส่วน (Fractional Number)

$$x = \pm 0.b_{-1}b_{-2}b_{-3}\ldots b_{-m}$$

ในระบบเลขส่วนเติมเต็มสอง จะใช้บิตที่มีนัยสำคัญสูงสุดเป็นบิตแสดงเครื่องหมายถ้าเป็นบวกแทนด้วย "0" ส่วนลบแทนด้วย "1" ถ้าให้ x แทนด้วยเลขไบนารี่จำนวน B บิต ดังนั้นรูปแบบของเลขส่วนเติมเต็มสอง อาจเขียนแทนด้วยรูปแบบทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\bar{x} = x_0.x_1x_2\ldots x_B$$

ค่าของ $\bar{x}$ หาได้จากสมการ (3.3)

$$x = -x_0 + \sum_{i=I}^{B} x_i 2^{-i} \qquad (3.3)$$

โดยที่ I = 1,2,3,...B

3.1.2 โครงสร้างเลขคณิตกระจาย (Distributed Arithmatic : DA)

เราจะพิจารณาสมการผลต่างสืบเนื่อง (Difference Equation) อันดับที่ 2 ดังนี้

$$y(n) = a_0x(n) + a_1x(n-1) + a_2x(n-2) - b_1y(n-1) - b_2y(n-2) \qquad (3.4)$$

กำหนดให้ $\bar{x}(n) = x_0(n).x_1(n).x_2(n).....x_B(n)$

และ $\bar{y}(n) = y_0(n).y_1(n).y_2(n).....y_B(n)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเลขส่วนเติมเต็มสองของลำดับสัญญาณ x(n) และ y(n) โดยที่ $\overline{a_0},\overline{a_1},\overline{a_2},\overline{b_1},\overline{b_2}$ คือ เลขส่วนเติมเต็มสองของสัมประสิทธิ์สมการผลต่างสืบเนื่อง $a_0,a_1,a_2;b_1,b_2$ ตามลำดับ อาศัยสมการ (3.3) จะได้ค่าของ x(n) และ y(n) ดังนี้

$$x(n) = -x_0(n) + \sum_{i=1}^{B} x_i(n)2^{-i}$$

$$y(n) = -y_0(n) + \sum_{i=1}^{B} y_i(n)2^{-i} \qquad (3.5)$$

แทนค่าสมการ (3.5) ในสมการ(3.4)

$$y(n) = a_0[-x_0(n) + \sum_{i=1}^{B} x_i(n)2^{-i}] + a_1[-x_0(n-1) + \sum_{i=1}^{B} x_i(n-1)2^{-i}]$$

$$+a_2[-x_0(n-2) + \sum_{i=1}^{B} x_i(n-2)2^{-i}] - b_1[-y_0(n-1) + \sum_{i=1}^{B} y_i(n-1)2^{-i}]$$

$$-b_2[-y_0(n-2) + \sum_{i=1}^{B} y_i(n-2)2^{-i}]$$

$$y(n) = \sum_{i=1}^{B} 2^{-i}\left[a_0x_i(n) + a_1x_i(n-1) + a_2x_i(n-2) - b_1y_i(n-1) - b_2y_i(n-2)\right]$$

$$-\left[a_0x_0(n) + a_1x_0(n-1) + a_2x_0(n-2) - b_1y_0(n-1) - b_2y_0(n-2)\right]$$

คูณ 2^{-1} ทั้งสองข้าง

$$2^{-1}y(n) = \sum_{i=1}^{B} 2^{-i}\left[2^{-1}a_0x_i(n) + 2^{-1}a_1x_i(n-1) + 2^{-1}a_2x_i(n-2) - 2^{-1}b_1y_i(n-1) - 2^{-1}b_2y_i(n-2)\right]$$
$$-\left[2^{-1}a_0x_0(n) + 2^{-1}a_1x_0(n-1) + 2^{-1}a_2x_0(n-2) - 2^{-1}b_1y_0(n-1) - 2^{-1}b_2y_0(n-2)\right]$$

(3.6)

ต่อไปจะพิจารณาส่วนเติมเต็มสองของเลขจำนวน $2^{-1}u$ ซึ่ง $\overline{u} = u_0.u_1u_2\ldots u_m$ อาศัยสมการ (3.2) ได้ว่า สำหรับ $u \geq 0$ (หรือ $u_0 = 0$)

$$\text{Two's Complement}\ \left(2^{-1}u\right) = 2^{-1}\overline{u}$$

และสำหรับ $u<0$ (หรือ $u_0=1$)

$$\text{Two's Complement}\ \left(2^{-1}u\right) = 2 - \left|2^{-1}u\right|$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1 + 2^{-1}\left[2 - |u|\right]$$

$$= 1 + 2^{-1}\bar{u}$$

$$\text{Two's Complement} \quad \left(2^{-1}u\right) = \begin{cases} 2^{-1}\bar{u} & u_0 = 0 \\ 1 + 2^{-1}\bar{u} & u_0 = 1 \end{cases} \qquad (3.7)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.6) เขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (3.7) ได้ดังนี้

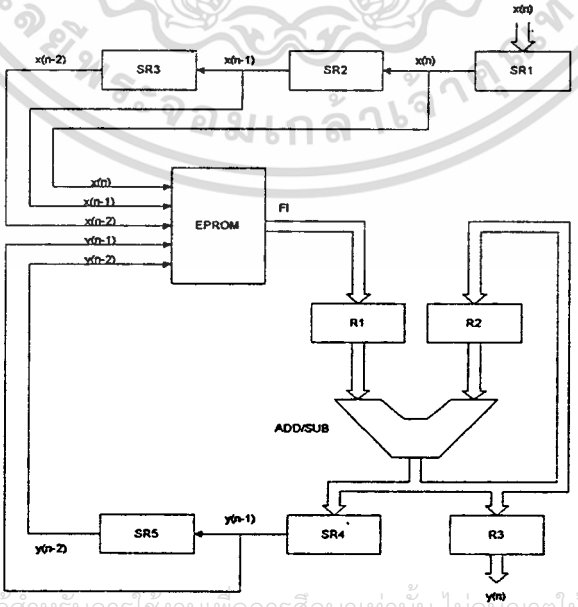
$$2^{-1}y(n) = \sum_{i=1}^{B} 2^{-i}\left[2^{-1}\bar{a}_0 x_i(n) + 2^{-1}\bar{a}_1 x_i(n-1) + 2^{-1}\bar{a}_2 x_i(n-2) - 2^{-1}\bar{b}_1 y_i(n-1) - 2^{-1}\bar{b}_2 y_i(n-2)\right]$$
$$-\left[2^{-1}\bar{a}_0 x_0(n) + 2^{-1}\bar{a}_1 x_0(n-1) + 2^{-1}\bar{a}_2 x_0(n-2) - 2^{-1}\bar{b}_1 y_0(n-1) - 2^{-1}\bar{b}_2 y_0(n-2)\right]$$

$$\bar{y}(n) = \sum_{i=1}^{B} 2^{-i} F_i - F_0 \qquad (3.8)$$

โดยให้ $F_i = \left[\bar{a}_0 x_i(n) + \bar{a}_1 x_i(n-1) + \bar{a}_2 x_i(n-2) - \bar{b}_1 y_i(n-1) - \bar{b}_2 y_i(n-2)\right]$ (3.9)

$$F_0 = \left[\bar{a}_0 x_0(n) + \bar{a}_1 x_0(n-1) + \bar{a}_2 x_0(n-2) - \bar{b}_1 y_0(n-1) - \bar{b}_2 y_0(n-2)\right] \qquad (3.10)$$

ผลจากสมการ (3.8),(3.9),(3.10) นำมาสร้างเป็นโครงสร้างเลขคณิตกระจาย โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดของฟังก์ชั่น F มาทำเป็นตารางเปิดดู โดยค่าในตารางเปิดดูหาได้จากสมการ (3.9) ซึ่งมีตัวแปรอยู่ 5 ตัว คือ x(n), x(n-1), x(n-2), y(n-1), y(n-2) ดังนั้นค่าที่นำไปสร้างตารางเปิดดูจะมีอยู่ $2^5 = 32$ ค่า ค่าเหล่านี้จะถูกทำการปัดเศษให้เหลือขนาด B บิตแล้วเก็บไว้ใน ROM หรือ RAM สำหรับโครงสร้างของเลขคณิตกระจายได้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 นี้

SR1, SR4 เป็นรีจีสเตอร์ชนิดเลื่อนข้อมูลเข้าแบบขนาน-ออกแบบอนุกรมขนาด B บิต

SR2, SR3, SR5 เป็นรีจีสเตอร์ชนิดเลื่อนข้อมูลเข้าแบบอนุกรม-ออกแบบอนุกรม

R1, R2, R3 เป็นรีจีสเตอร์ชนิดเลื่อนข้อมูลเข้า-ออกแบบขนาน

ADD/SUB เป็นวงจรบวกและลบเลข แบบ Two's Complement

มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. ลบข้อมูลภายในรีจีสเตอร์ R1, R2, R3 พร้อมกับโหลดข้อมูล x(n) เก็บไว้ใน SR1

2. เอ้าพุตของรีจีสเตอร์ SR1, SR2, SR3, SR4, SR5 คือลำดับสัญญาณ x(n), x(n-1), x(n-2), y(n-1), y (n-2) ตามลำดับ ถูกใช้เป็นแอดเดรสกำหนดค่าของ F_i (i=B) นำค่าที่ได้เก็บไว้ในรีจีสเตอร์ R1 จากนั้นนำค่าใน R1 บวกกับค่าใน R2 ด้วยวงจรบวก ADD/SUB ผลลัพธ์ที่ได้ถูกเก็บไว้ในรีจีสเตอร์ R2

3. เลื่อนข้อมูลในรีจีสเตอร์ SR1, SR2, SR3, SR4, SR5 ไปทางขวา 1 บิ ต ในทำนองเดียวกันกับข้อ 2 เอ้าพุตถูกใช้เป็นแอดเดรส กำหนดค่า F_i (i=B-1) นำค่าที่ได้เก็บใน R1 จากนั้นนำค่าใน R1 และ R2 บวกกันด้วยวงจรบวก ผลลัพธ์ที่ได้ถูกเก็บไว้ใน R2

4. ในทำนองเดียวกัน กระทำตามข้อ 3 สำหรับ บิตที่ B-2, B-3,... จนถึงบิตที่ 1

5. เลื่อนข้อมูลในรีจีสเตอร์ SR1, SR2, SR3, SR4, SR5 ไปทางขวาอีก 1 บิต เอ้าพุตของรีจีสเตอร์ถูกใช้เป็นแอดเดรส กำหนดค่าของ F_0 นำค่า F_0 ไปเก็บไว้ใน R1 จากนั้นนำค่าใน R1 ลบออกจากค่าใน R2 ด้วยวงจรลบ ผลที่ได้ คือ ค่า y(n) และนำไปเก็บไว้ใน R3, SR4 ตามลำดับ

6. ทำการโหลดลำดับสัญญาณ x(n) เข้ามาใหม่ แล้วกลับไปกระทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 เพื่อคำนวณหาลำดับสัญญาณ y(n) ตัวถัดไป

3.1.3 การแปลงสัมประสิทธิ์ของตัวกรองเชิงเลข

การแปลงสัมประสิทธิ์ของตัวกรองเชิงเลขให้อยู่ในรูปแบบเลขส่วนเติมเต็มสอง(Two's Complement) กระทำได้โดยอาศัยสมการ (3.9) มาคำนวณหาค่า Fi สำหรับบรรจุในหน่วยความจำประเภท EPROM โดยมีสัญญาณแอดเดรส 5 สัญญาณ คือ x(n),x(n-1),x(n-2),y(n-1),y(n-2) ดังนั้น จะมีแอดเดรสที่ไม่ซ้ำกันอยู่เท่ากับ 2^5 = 32 แอดเดรส ถ้าใช้หน่วยความจำขนาด 8 บิต ความจุของหน่วยความจำต้องมีขนาดเท่ากับ 32*8 = 256 บิต โดยมีแอดเดรสเริ่มจากค่า 00000 - 11111 จากนั้นแทนค่าแอดเดรสลงในสมการ (3.9) เพื่อความสะดวกในการคำนวณ จึงยกมาแสดงในที่นี้อีกครั้ง และผลของการแทนค่าแสดงในตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_i = \left[\overline{a_0}x_i(n) + \overline{a_1}x_i(n-1) + \overline{a_2}x_i(n-2) - \overline{b_1}y_i(n-1) - \overline{b_2}y_i(n-2)\right]$$

ตารางที่ 1

แสดงการแทนค่าแอดเดรสในสมการ (3.9)

แอดเดรสของ Eprom $x_i(n),x_i(n-1),x_i(n-2),y_i(n-1),y_i(n-2)$	ค่า Fi ใน Eprom
0 0 0 0 0	0
0 0 0 0 1	$-\overline{b_2}$
0 0 0 1 0	$-\overline{b_1}$
0 0 0 1 1	$-\overline{b_1}-\overline{b_2}$
0 0 1 0 0	$-\overline{a_2}$
*	*
1 1 1 0 1	$\overline{a_0}+\overline{a_1}+\overline{a_2}-\overline{b_2}$
1 1 1 1 0	$\overline{a_0}+\overline{a_1}+\overline{a_2}-\overline{b_1}$
1 1 1 1 1	$\overline{a_0}+\overline{a_1}+\overline{a_2}-\overline{b_1}-\overline{b_2}$

3.2 การออกแบบตัวกรองป้อนกลับสัญญาณเชิงเลขอันดับที่ 6

3.2.1 ตัวกรองบัตเตอร์เวอร์ธต้นแบบ

ตัวกรองเชิงอุปมาณต้นแบบที่กล่าวต่อไปนี้เป็นตัวกรองผ่านความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวอร์ธ (Butterworth Lowpass Prototype) เริ่มด้วยค่าขนาดกำลังสอง (Magnetude - Square) ของฟังก์ชันถูกกำหนดโดยสมการ (3.11)

$$\left|H_{LP}(j\Omega)\right|^2 = \frac{1}{1+\left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)^{2N}} \quad \text{หรือ} \quad \left|H_{LP}(j\Omega)\right| = \frac{1}{\left(1+\left[\frac{\Omega}{\Omega_c}\right]^{2N}\right)^{1/2}} \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ N คือ อันดับของตัวกรอง (N=1,2,3,4,...)

Ω_c คือ ค่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency)

Ω คือ ค่าความถี่ใด ๆ

$H_{LP}(j\Omega)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงอุปมาณแบบผ่านความถี่ต่ำ

ณ จุดที่ $\Omega_c = \Omega$ ซึ่งมีผลทำให้ขนาดลดลง $\frac{1}{\sqrt{2}}$เท่าของอัตราขยาย ดี.ซี. (DC Gain) และจุดที่ $\Omega = 0$ ทำให้ขนาดเท่ากับ 1 ฉะนั้นสมการ (4.1)เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\left|H_{LP}(j\Omega)\right|^2 = \frac{1}{1+\Omega^{2N}} \quad \text{หรือ} \quad \left|H_{LP}(j\Omega)\right| = \frac{1}{(1+\Omega^{2N})^{1/2}} \tag{3.12}$$

จากสมการที่ (3.12) ทำการหาโพล (Pole) ของฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\left|H_{LP}(j\Omega)\right|^2 = \frac{1}{1+\Omega^{2N}} \tag{3.13}$$

ให้ $s = j\Omega$ สมการ (1.13) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$H_{LP}(s).H_{LP}(-s) = \left.\frac{1}{1+\Omega^{2N}}\right|_{\Omega=-js} \tag{3.14}$$

$\therefore$ โพล (Pole) ของ $H_{LP}(s).H_{LP}(-s)$ หาได้ดังนี้

$$(-js)^{2N} + 1 = 0 \tag{3.15}$$

หรือ $$(-s^2)^N + 1 = 0 \tag{3.16}$$

สำหรับ N เป็นเลขคี่ เราได้ว่า

$$(-s^{2N}) + 1 = 0, s^{2N} = +1 \quad \text{รากสมการ คือ} \quad s_k = 1e^{j\left(\frac{k2\pi}{2N}\right)} = 1e^{j\frac{k\pi}{N}} \tag{3.17}$$

k = 1,2,3,....,2N-1

สำหรับ N เป็นเลขคู่ เราได้ว่า

$$s^{2N} + 1 = 0, s^{2N} = -1 \quad \text{รากสมการ คือ} \quad s_k = 1e^{j\frac{(n+k2\pi)}{2N}} \tag{3.18}$$

k = 1,2,3,....,2N-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์ 6 ตัวแรกของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวอร์ธแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2

แสดงค่าของ ส.ป.ส. ของตัวกรองผ่านความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวอร์ธ

N	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1	1.0000					
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	9.1446	7.4641	3.8637	1.0000

$$H_{LP}(s) = \frac{1}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + \ldots a_N s^N}$$

ปัญหาต่อมาเราจะพิจารณาว่าจะต้องออกแบบตัวกรองอันดับเท่าไร จึงจะได้ตัวกรองมีคุณสมบัติตามที่เราต้องการ เราจะเริ่มต้นจากสมการ (3.12) คือ

$$M = \left|H_{LP}(j\Omega)\right| = \frac{1}{(1+\Omega^{2N})^{1/2}} \qquad (3.19)$$

เขียนในรูป Decibel (db) ดังนี้

$$M_{db} = 20\log M = 10\log M^2 \qquad (3.20)$$

ณ ความถี่ $\Omega = \Omega_a$

$$M_{db} = 10\log\left|H_{LP}(j\Omega_a)\right|^2$$

$$= 10\log\frac{1}{1+\Omega_a^{2N}}$$

$$M_{db} = 10\log 1 - 10\log\left[1+\Omega_a^{2N}\right] \qquad (3.21)$$

$$M_{db} = -10\log\left[1+\Omega_a^{2N}\right] \qquad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า N

$$-\frac{M_{db}}{10} = \log\left[1+\Omega_a^{2N}\right]$$

$$\Omega_a^{2N} = 10^{\frac{-M_{db}}{10}} - 1 \qquad (3.23)$$

ใส่ log สมการ (3.23) หา N ได้ดังนี้

$$N = \frac{\log\left[10^{-\frac{M_{db}}{10}} - 1\right]}{2\log\Omega_a} \qquad (3.24)$$

สมการ (3.24) เป็นการหาค่า N ของตัวกรองที่มีอัตราขยาย (M) ณ ความถี่ที่กำหนด $\Omega = \Omega_a$ โดยทั่วไปแล้วค่า N ที่คำนวณได้จะไม่เป็นจำนวนเต็ม ต้องปัดเศษให้เป็นจำนวนเต็ม

3.2.2 ขั้นตอนการออกแบบ

1. กำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ ของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลข

ความถี่ในการสุ่ม (Sampling Frequency) $= f_s = 125{,}000\text{Hz}$

ความถี่ตัด (Cutoff Frequency) $= f_c = 10{,}000\text{Hz}$

ความถี่หยุด (Stopband Frequency) $= f_{st} = 12{,}500\text{Hz}$

การลดทอนสัญญาณที่ความถี่หยุด $= M_{db} = -15\text{db}$

2. คำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงเลขกับความถี่เชิงอุปมาณ จาสมการ(2.18) จากบทที่ 2 คือ

$$\omega_i = \Omega_i T = \frac{2\pi f_i}{f_s}$$

สำหรับ i = 1 (ให้ $\omega_1 = \omega_c$)

$$\omega_1 = \omega_c = \frac{2\pi f_c}{f_s} \qquad (3.25)$$

สำหรับ i = 2 (ให้ $\omega_2 = \omega_{ST}$)

$$\omega_2 = \omega_{ST} = \frac{2\pi f_{ST}}{f_s} \qquad (3.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้สมการ (2.19) หาความถี่ที่ต้องการ ที่ได้รับการชดเชยอันเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นเรียกว่า Prewraping Analog Frequency

$$\Omega_i = \frac{2}{T}\tan\left(\frac{\omega_i}{2}\right)$$

สำหรับ i = 1 (ให้ $\omega_1 = \omega_c$)

$$\therefore \Omega_1 = \Omega_c = \frac{2}{T}\tan\left(\frac{\omega_c}{2}\right) \quad (3.27)$$

สำหรับ i = 2 (ให้ $\omega_2 = \omega_{ST}$)

$$\therefore \Omega_2 = \Omega_{ST} = \frac{2}{T}\tan\left(\frac{\Omega_{ST}}{2}\right) \quad (3.28)$$

4. ทำการแปลง Prewraping Analog Frequency ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3. เพื่อหาตัวกรองเชิงอุปมาณต้นแบบ

$$\Omega_c = \frac{2}{T}\tan\left(\frac{\omega_c}{2}\right) \rightarrow \Omega_c = 1 \quad (3.29)$$

$$\Omega_{ST} = \frac{2}{T}\tan\left(\frac{\omega_{ST}}{2}\right) \rightarrow \Omega_a = \frac{\Omega_{ST}}{\Omega_c} \quad (3.30)$$

5. อาศัยสมการที่ (3.24) คำนวณหาค่า N ของตัวกรองโดยอาศัยข้อมูลจากขั้นตอนที่ 4.

$$N = \frac{\log\left[10^{-\frac{M_{db}}{10}} - 1\right]}{2\log\Omega_a} \quad (3.31)$$

6. อาศัยค่า N จากขั้นตอนที่ 5. เลือกฟังก์ชันถ่ายโอน จากตารางที่ 2 (ค่าต่าง ๆ ในตารางเป็นค่าที่ถูก Normalized แล้ว) จากนั้นทำการ Denormalized เราจะได้ ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงอุปมาณ ที่ได้รับการชดเชยความเพี้ยนจากการไม่เป็นเชิงเส้น

$$H_{LP}(s) = \left.\frac{1}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + \ldots + a_N s^N}\right|_{s=\frac{s}{\Omega a}} \quad (3.32)$$

7. ทำการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนในขั้นตอนที่ 6 ไปเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเลขโดยการแปลงเส้นคู่โดยอาศัย สมการ (2.10)

$$H(z) = H_{LP}(s)\Big|s = \tfrac{2}{T}\tfrac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (3.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

039075

8. อาศัยสมการ (3.9) หรือ ตารางที่ 1 ทำการแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนตัวกรองเชิงเลข ผลที่ได้เก็บไว้ใน EPROM สำหรับนำไปสร้างวงจรฮาร์ดแวร์ของตัวกรองเชิงเลข

การคำนวณจากขั้นตอนที่ 1-7 เป็นการยากและเสียเวลามากที่จะคำนวณด้วยมือหรือเครื่องคิดเลขธรรมดา เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่กล่าวมาจึงใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลคำนวณหาค่าต่าง ๆ ดังปรากฏอยู่ในตารางที่ 3 โปรแกรมที่ใช้คำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

ส่วนผลของการแปลง ส.ป.ส. ของตัวกรองในขั้นตอนที่ 8 แสดงไว้ในตารางที่ 4 - 6 โปรแกรมที่ใช้คำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3

แสดงค่าฟังก์ชันถ่ายโอนใน s-domain และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ผ่านการแปลงเส้นคู่ในรูปของ z-domain

Sampling Frequency in Hz = 125000

Cutoff Frequency in Hz = 10000

Stop band Frequency in Hz = 12500

Attenuation at Fst in db = 15

Order of Filter = 6.136008083624804

K = 1.818993187011993

Section#1	a(0)S^2 = 3.308736214396
	a(1)S^1 = 0.941510873424
	a(2)S^0 = 0.999940250000
Section#2	a(0)S^2 = 3.308736214396
	a(1)S^1 = 2.572420071050
	a(2)S^0 = 0.999980820000
Section#3	a(0)S^2 = 3.308736214396
	a(1)S^1 = 3.513931052895
	a(2)S^0 = 0.999940250000
Section #1	a(0)Z^2 = 0.073204956949
	a(1)Z^1 = 0.146409913898
	a(2)Z^0 = 0.073204956949

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b(0)Z^2 = 1.000000000000

b(1)Z^1 = -1.456455826759

b(2)Z^0 = 0.749258160591

Section #2 a(0)Z^2 = 0.060143392533

a(1)Z^1 = 0.120286785066

a(2)Z^0 = 0.060143392533

b(0)Z^2 = 1.000000000000

b(1)Z^1 = -1.196583509445

b(2)Z^0 = 0.437152355909

Section #3 a(0)Z^2 = 0.054527133703

a(1)Z^1 = 0.109054267406

a(2)Z^0 = 0.054527133703

b(0)Z^2 = 1.000000000000

b(1)Z^1 = -1.084849476814

b(2)Z^0 = 0.302945077419

จากตารางที่ 3 เป็นการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกรองเชิงอุปมาณผ่านความถี่ต่ำ แบบบัตเตอร์เวอร์ธ อันดับที่ 6 ต้นแบบ ในรูปเศษส่วนย่อย (partial fraction) ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 จำนวน 3 section (sention#....) แต่ละ section เขียนในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้ (^ หมายถึง ยกกำลัง)

$$H(s) = \frac{1}{a(0)s^2 + a(1)s + a(2)}$$

หรือ $$H(s) = \frac{1}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}$$

จากนั้นทำการแปลงเส้นคู่ของแต่ละ section (ผลการแปลงคือ Section หมายเลขเดียวกันใน z-domain) รูปแบบทั่วไปเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(z) = \frac{a(0)z^2 + a(1)z + a(2)}{b(0)z^2 + b(1)z + b(2)}$$

หรือ $$H(z) = \frac{a_0z^2 + a_1z + a_2}{b_0z^2 + b_1z + b_2}$$

จากตารางที่ 4 จากซ้ายสุด คอลัมน์ที่ 1 คือค่าแอดเดรส(จากลำดับสัญญาณ x(n) และ y(n)) แทนค่าแอดเดรสลงในสมการ (3.9) หรือ ตารางที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแทนค่าคือคอลัมน์ที่ 3 ค่าในคอลัมน์ที่ 3 มีค่าได้ไม่เกิน 1 ถ้าเกิน 1 ต้องทำการ scalling ผลลัพธ์ที่ได้จากการ scalling อยู่ในคอลัมน์ที่ 4 จากนั้นทำการแปลงค่าอยู่ในคอลัมน์ที่ 4 ให้เป็นเลขฐานสองแบบส่วนเติมเต็มสอง (Two's complement) ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในคอลัมน์ที่ 2 คอลัมน์ที่ 5 เป็น HEX format สำหรับโปรแกรมลง EPROM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4

การแปลงสัมประสิทธิ์ในรูปของเลขฐานสองและสิบหก ของ EPROM #1

a0 = 0.073204956949 b1 = -1.456455826759

a1 = 0.146409913898 b2 = 0.749258160591

a2 = 0.073204956949 Scaling Factor n= 2

XnXn-1Xn-2Yn-1Yn-2	Memory MAP F	F	F/n	HEX
0 0 0 0 0	00000000	0.0000000	0.0000000	00
0 0 0 0 1	11010000	-0.7492582	-0.3746291	D0
0 0 0 1 0	01011101	1.4564558	0.7282279	5D
0 0 0 1 1	00101101	0.7071977	0.3535988	2D
0 0 1 0 0	00000100	0.0732050	0.0366025	04
0 0 1 0 1	11010100	-0.6760532	-0.3380266	D4
0 0 1 1 0	01100001	1.5296608	0.7648304	61
0 0 1 1 1	00110001	0.7804026	0.3902013	31
0 1 0 0 0	00001001	0.1464099	0.0732050	09
0 1 0 0 1	11011001	-0.6028482	-0.3014241	D9
0 1 0 1 0	01100110	1.6028657	0.8014329	66
0 1 0 1 1	00110110	0.8536076	0.4268038	36
0 1 1 0 0	00001110	0.2196149	0.1098074	0E
0 1 1 0 1	11011110	-0.5296433	-0.2648216	DE
0 1 1 1 0	01101011	1.6760707	0.8380353	6B
0 1 1 1 1	00111011	0.9268125	0.4634063	3B
1 0 0 0 0	00000100	0.0732050	0.0366025	04
1 0 0 0 1	11010100	-0.6760532	-0.3380266	D4
1 0 0 1 0	01100001	1.5296608	0.7648304	61
1 0 0 1 1	00110001	0.7804026	0.3902013	31
1 0 1 0 0	00001001	0.1464099	0.0732050	09
1 0 1 0 1	11011001	-0.6028482	-0.3014241	D9
1 0 1 1 0	01100110	1.6028657	0.8014329	66
1 0 1 1 1	00110110	0.8536076	0.4268038	36
1 1 0 0 0	00001110	0.2196149	0.1098074	0E
1 1 0 0 1	11011110	-0.5296433	-0.2648216	DE
1 1 0 1 0	01101011	1.6760707	0.8380353	6B
1 1 0 1 1	00111011	0.9268125	0.4634063	3B
1 1 1 0 0	00010010	0.2928198	0.1464099	12
1 1 1 0 1	11100010	-0.4564383	-0.2282192	E2
1 1 1 1 0	01101111	1.7492757	0.8746378	6F
1 1 1 1 1	01000000	1.0000175	0.5000087	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5

การแปลงสัมประสิทธิ์ในรูปของเลขฐานสองแสะสิบหก ของ EPROM #2

a0 = 0.060143392533 b1 = -1.196583509445

a1 = 0.120286785066 b2 = 0.437152355909

a2 = 0.060143392533 Scaling Factor n= 2

Xn	Xn-1	Xn-2	Yn-1	Yn-2	Memory MAP F	F	F/n	HEX
0	0	0	0	0	00000000	0.0000000	0.0000000	00
0	0	0	0	1	11100100	-0.4371524	-0.2185762	E4
0	0	0	1	0	01001100	1.1965835	0.5982918	4C
0	0	0	1	1	00110000	0.7594312	0.3797156	30
0	0	1	0	0	00000011	0.0601434	0.0300717	03
0	0	1	0	1	11100111	-0.3770090	-0.1885045	E7
0	0	1	1	0	01010000	1.2567269	0.6283635	50
0	0	1	1	1	00110100	0.8195745	0.4097873	34
0	1	0	0	0	00000111	0.1202868	0.0601434	07
0	1	0	0	1	11101011	-0.3168656	-0.1584328	EB
0	1	0	1	0	01010100	1.3168703	0.6584351	54
0	1	0	1	1	00111000	0.8797179	0.4398590	38
0	1	1	0	0	00001011	0.1804302	0.0902151	0B
0	1	1	0	1	11101111	-0.2567222	-0.1283611	EF
0	1	1	1	0	01011000	1.3770137	0.6885068	58
0	1	1	1	1	00111100	0.9398613	0.4699307	3C
1	0	0	0	0	00000011	0.0601434	0.0300717	03
1	0	0	0	1	11100111	-0.3770090	-0.1885045	E7
1	0	0	1	0	01010000	1.2567269	0.6283635	50
1	0	0	1	1	00110100	0.8195745	0.4097873	34
1	0	1	0	0	00000111	0.1202868	0.0601434	07
1	0	1	0	1	11101011	-0.3168656	-0.1584328	EB
1	0	1	1	0	01010100	1.3168703	0.6584351	54
1	0	1	1	1	00111000	0.8797179	0.4398590	38
1	1	0	0	0	00001011	0.1804302	0.0902151	0B
1	1	0	0	1	11101111	-0.2567222	-0.1283611	EF
1	1	0	1	0	01011000	1.3770137	0.6885068	58
1	1	0	1	1	00111100	0.9398613	0.4699307	3C
1	1	1	0	0	00001111	0.2405736	0.1202868	0F
1	1	1	0	1	11110011	-0.1965788	-0.0982894	F3
1	1	1	1	0	01011011	1.4371571	0.7185785	5B
1	1	1	1	1	01000000	1.0000047	0.5000024	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6

การแปลงสัมประสิทธิ์ในรูปของเลขฐานสองและสิบหก ของ EPROM #3

a0 = 0.054527133703 b1 = -1.084849476814

a1 = 0.109054267406 b2 = 0.302945077419

a2 = 0.054527133703 Scaling Factor n= 2

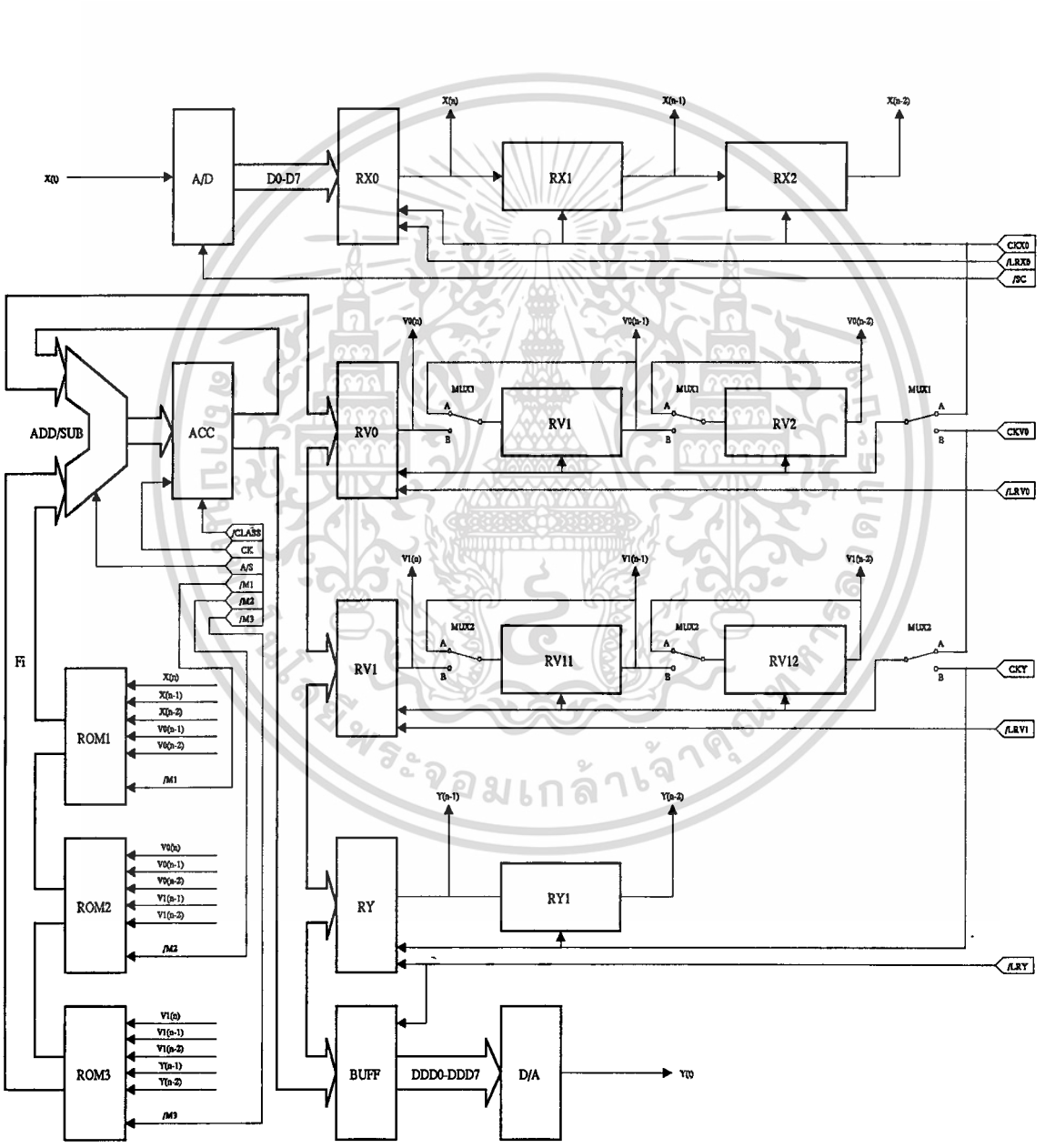
Xn	Xn-1	Xn-2	Yn-1	Yn-2	Memory MAP F	F	F/n	HEX
0	0	0	0	0	00000000	0.0000000	0.0000000	00
0	0	0	0	1	11101100	-0.3029451	-0.1514725	EC
0	0	0	1	0	01000101	1.0848495	0.5424247	45
0	0	0	1	1	00110010	0.7819044	0.3909522	32
0	0	1	0	0	00000011	0.0545271	0.0272636	03
0	0	1	0	1	11110000	-0.2484179	-0.1242090	F0
0	0	1	1	0	01001000	1.1393766	0.5696883	48
0	0	1	1	1	00110101	0.8364315	0.4182158	35
0	1	0	0	0	00000110	0.1090543	0.0545271	06
0	1	0	0	1	11110011	0.1938908	-0.0969454	F3
0	1	0	1	0	01001100	1.1939037	0.5969519	4C
0	1	0	1	1	00111001	0.8909587	0.4454793	39
0	1	1	0	0	00001010	0.1635814	0.0817907	0A
0	1	1	0	1	11110111	-0.1393637	-0.0696818	F7
0	1	1	1	0	01001111	1.2484309	0.6242154	4F
0	1	1	1	1	00111100	0.9454858	0.4727429	3C
1	0	0	0	0	00000011	0.0545271	0.0272636	03
1	0	0	0	1	11110000	-0.2484179	-0.1242090	F0
1	0	0	1	0	01001000	1.1393766	0.5696883	48
1	0	0	1	1	00110101	0.8364315	0.4182158	35
1	0	1	0	0	00000110	0.1090543	0.0545271	06
1	0	1	0	1	11110011	-0.1938908	-0.0969454	F3
1	0	1	1	0	01001100	1.1939037	0.5969519	4C
1	0	1	1	1	00111001	0.8909587	0.4454793	39
1	1	0	0	0	00001010	0.1635814	0.0817907	0A
1	1	0	0	1	11110111	-0.1393637	-0.0696818	F7
1	1	0	1	0	01001111	1.2484309	0.6242154	4F
1	1	0	1	1	00111100	0.9454858	0.4727429	3C
1	1	1	0	0	00001101	0.2181085	0.1090543	0D
1	1	1	0	1	11111010	-0.0848365	-0.0424183	FA
1	1	1	1	0	01010011	1.3029580	0.6514790	53
1	1	1	1	1	01000000	1.0000129	0.5000065	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปนี้เป็นการแสดงวิธีการสร้างตัวกรองป้อนกลับเชิงเลขแบบบัตเตอร์เวอร์ธอันดับที่ 6 โดยอาศัยฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ผ่านมา ทำการแปลงเป็นวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ (ฮาร์ดแวร์) โดยอุปกรณ์ที่ใช้สร้างเป็นวงจรรวมประเภท TTL

3.3 การทำงานของวงจร

เพื่อเป็นการประหยัดฮาร์ดแวร์และเพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนของวงจรให้ง่ายต่อการสร้างอาศัยโครงสร้างของตัวกรองสัญญาณป้อนกลับเชิงเลขอันดับที่สองดังที่กล่าวมาแล้วมาต่ออนุกรมกัน(Cascade) 3 วงจร โดยใช้ภาคคำนวณ DA เพียงตัวเดียว สลับกันใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวกรองป้อนกลับเชิงเลขแบบบัตเตอร์เวอร์ธอันดับที่ 6

ขั้นตอนที่ 1 ตำแหน่ง MUX1, MUX2 อยู่ในตำแหน่ง A โดย A/D, RX0, RX1, RX2, RV1, RV2, ROM1 ประกอบกันเป็นโครงสร้างตัวกรองเชิงเลขอันดับที่ 2 ส่วนแรกโดยใช้ภาคประมวลผล DA (ประกอบด้วยวงจรบวกและลบเลข ADD/SUB และรีจีสเตอร์ ACC)ร่วมกัน สัญญาณที่ใช้ควบคุม คือ สัญญาณ $\overline{SC}, \overline{LRX0}, CKX0, A/S, \overline{CLACC}, CK$ และ $\overline{M1}$

1. A/D (Analog to Digital Converter) ถูกควบคุมด้วยสัญญาณ $\overline{SC}$ ให้ทำการแปลงสัญญาณได้ที่จากการสุ่มให้เป็นลำดับสัญญาณเชิงเลข x(n) ขนาด 8 บิต (A/D มี วงจร Sampling อยู่ในตัว)

2. สัญญาณควบคุม $\overline{LRX0}$ ควบคุมให้รีจีสเตอร์ RX0 ทำการโหลด x(n) เข้าไปเก็บไว้ใน RX0 สัญญาณนี้จะเกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อการประมวลผลของตัวกรองเชิงเลขครบอันดับที่ 6 เพื่อทำการโหลดลำดับสัญญาณเชิงเลข x(n) เข้ามาประมวลผลใหม่

3. สัญญาณนาฬิกา CKX0 จะทำการเลื่อนข้อมูล x(n) ในรีจีสเตอร์ RX0, RX1, RX2, RV1, RV2 ไปครั้งละ 1 บิต โดยบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุดถูกเลื่อนออกไปก่อน (คือบิตที่ 7) เอ้าพุทของแต่ละรีจีสเตอร์ คือ $x(n), x(n-1), x(n-2), v_0(n-1), v_0(n-2)$จะเป็นแอดเดรสกำหนดค่า F_i ของตัวกรองเชิงเลขใน ROM1 (ROM1 ถูกเลือกด้วยสัญญาณ$\overline{M1}$) เอ้าพุตของ ROM1(F_i) จะถูกส่งไปบวกกับข้อมูลที่อยู่ในรีจีสเตอร์ ACC ด้วยวงจรบวกเลข ADD/SUB (เป็นการบวกเลขแบบส่วนเติมเต็มสองและควบคุมการบวกด้วยสัญญาณ A/S) ผลลัพธ์ที่ได้ถูกโหลดเข้าไปเก็บไว้ใน ACC ด้วยสัญญาณ CK

4. สัญญาณนาฬิกา CKX0 ทำการเลื่อนข้อมูล x(n) ไปอีก 1 บิตแล้วทำการบวกข้อมูลเหมือนข้อที่ 3 จนกระทั้ง CKX0 การเลื่อนข้อมูลไปถึงบิตที่ 0 จึงนำค่าที่ได้จากเอ้าพุตของ ROM1 ไปลบออกจากข้อมูลที่อยู่ใน ACC (ข้อมูล คือ ค่าที่ได้จากการบวกของการเลื่อนข้อมูล 7 ครั้ง) ผลลัพธ์ที่ได้ถูกโหลดเข้าไปเก็บไว้ที่รีจีสเตอร์ RV0 ด้วยสัญญาณควบคุม $\overline{LRV0}$ จากนั้นลบข้อมูลในรีจีสเตอร์ ACC ด้วยสัญญาณควบคุม $\overline{CLACC}$ สิ้นสุดการทำงานขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 2 ตำแหน่ง MUX1 อยู่ในตำแหน่ง B ส่วน MUX2 อยู่ในตำแหน่ง A (ตำแหน่งเดิม) โดยมีรีจีสเตอร์ RV0, RV1, RV2, RV11 , RV12, ROM2 ประกอบกันเป็นโครงสร้างตัวกรองเชิงเลขอันดับที่ 2 ส่วนที่สอง โดยใช้ภาคประมวลผลแบบ DA ร่วมกันเหมือนขั้นตอนที่หนึ่งจะเห็นได้ว่าขั้นตอนนี้คือการประมวลผลของตัวกรองในอันดับที่4นั่นเอง ส่วนสัญญาณควบคุมคือ $\overline{LRV0}, CKV0, A/S, CK$ $\overline{CLACC}, \overline{LRV1}$ การทำงานเหมือนกับขึ้นตอนที่ 1 ข้อที่1 ถึง 3 โดยเปลี่ยนรีจีสเตอร์และสัญญาณความคุมใหม่ตามลำดับดังนี้

รีจีสเตอร์ RX0, RX1, RX2, RV1, RV2 $\Rightarrow$ RV0, RV1, RV2, RV11 , RV12

แอดเดรส $x(n), x(n-1), x(n-2), v_0(n-1), v_0(n-2) \Rightarrow v_0(n), v_0(n-1), v_0(n-2),$ $v_1(n-1), v_1(n-2)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของผลงานทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณควบคุม $\overline{M1}, \overline{LRX0}, \overline{LRV0}, CKX0 \Rightarrow \overline{M2}, \overline{LRV0}, \overline{LRV1}, CKV0$

ขั้นตอนที่ 3 ตำแหน่ง MUX1 อยู่ในตำแหน่ง A ส่วน MUX2 อยู่ในตำแหน่ง B โดยมีรีจีสเตอร์ RV1,RV11,RV12,RY,RY1 ประกอบกันเป็นโครงสร้างตัวกรองป้อนกลับเชิงเลขอันดับที่ 2 ส่วนที่ 3 ขั้นตอนนี้เป็นการประมวลผลของตัวกรองอันดับที่ 6 นั่นเอง ส่วนสัญญาณที่ใช้ควบคุมการทำงาน คือ $\overline{LRV1}, CKY, \overline{LRY}$ ขั้นตอนการทำงานเหมือนกับข้อ 1 ถึง 3 โดยเปลี่ยนรีจีสเตอร์และสัญญาณควบคุมตามลำดับดังนี้

รีจีสเตอร์ RX0, RX1, RX2, RV1, RV2 $\Rightarrow$ RV1, RV11, RV12, RY, RY1

แอดเดรส $x(n), x(n-1), x(n-2), v_0(n-1), v_0(n-2) \Rightarrow v_1(n), v_1(n-1), v_1(n-2),$

$y(n-1), y(n-2)$

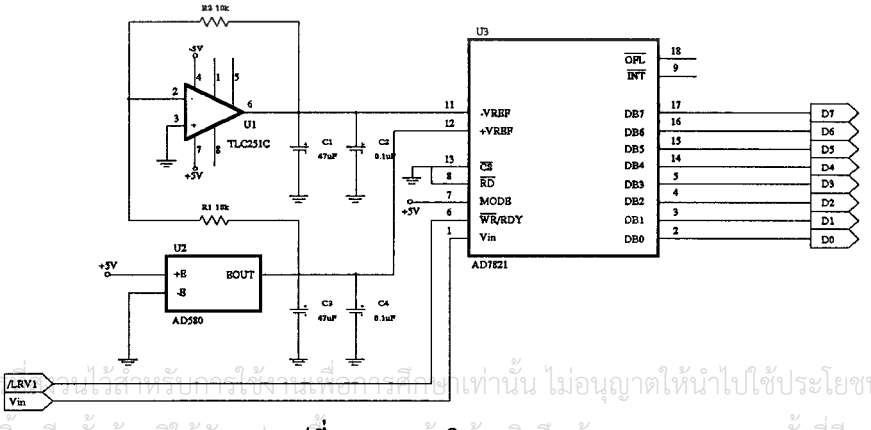
สัญญาณควบคุม $\overline{LRX0}, CKX0, \overline{LRV0}, \overline{M1} \Rightarrow \overline{LRV1}, CKY, \overline{LRY}, \overline{M3}$

ขั้นตอนที่ 3 นี้จะแตกต่างกับขั้นตอนที่ 1 และ 2 คือ เมื่อสัญญาณนาฬิกา CKY เลื่อนข้อมูลในรีจีสเตอร์ไปจนครบ 8 บิต $\overline{LRY}$ จะทำการโหลดผลลัพธ์เก็บไว้ในรีจีสเตอร์ Buffer เพื่อทำการแปลงสัญญาณเชิงเลข เป็นสัญญาณเชิงอุปมาณ ด้วยวงจร D/A จากนั้นก็จะวนกลับไปทำงานซ้ำในขั้นตอน 1,2,3 ตามลำดับ เราจะได้ตัวกรองป้อนกลับเชิงเลขแบบบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่ 6 ตามต้องการ

3.4 ส่วนประกอบของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขอันดับ 6 แบบบัตเตอร์เวิร์ท

3.4.1 ภาคอินพุต

วงจรภาคอินพุตได้ออกแบบให้รับสัญญาณอินพุต(V_{in}) ซึ่งมีขนาด $5V_{pp}$ มีความถี่ในการสุ่มสัญญาณ($\overline{SC}$) เท่ากับ 125 kHz โดยมี U1,U2 ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดศักดาอ้างอิง (Voltage Reffrerence) ขนาด $\pm$2.5V แก่ U3 (A/D) เอ้าพุต U3 เป็นสัญญาณเชิงเลขขนาด 8 บิต แบบ Offset Binary Code ทำงานในแบบ Stand-Alone Mode โดยต่อขา $\overline{CS}$ และ $\overline{RS}$ ลงกราวนด์ วงจรจริงแสดงดังภาพที่ 4.2

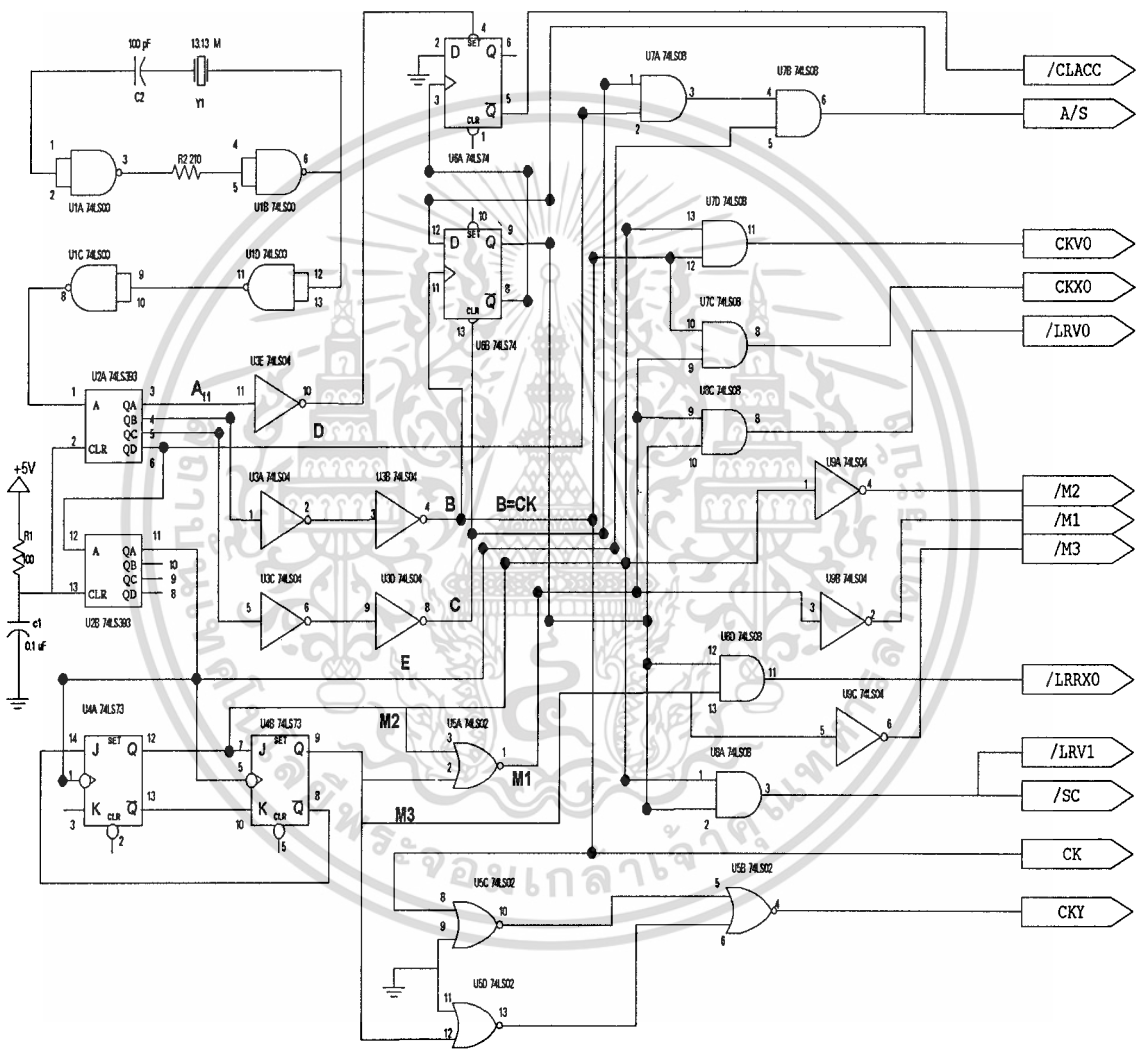


รูปที่ 3.3 วงจรอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ภาคควบคุม

ภาคควบคุมเป็นภาคที่สำคัญที่สุดในการออกแบบสร้างตัวกรองเชิงเลขแบบบัตเตอร์เวอร์ตอันดับที่ 6 โดยภาคควบคุมนี้จะคอยควบคุมการทำงานให้ได้ผลลัพธ์เป็นไปตามการคำนวณ ภาคควบคุมจะประกอบด้วยวงจร Gate และ Flip-Flop ทำงานให้ได้สัญญาณตามที่ต้องการ เพื่อนำสัญญาณนี้ไปควบคุมการทำงานของวงจรในส่วนต่างๆ ต่อไป วงจรจริงของภาคควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรภาคควบคุม

จากรูป U1A-U1D ถูกออกแบบให้ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณนาฬิกาของวงจร (System Clock) มีความถี่ 13.32 Mhz จากนั้นทำการหาร System Clock ด้วย 32 โดย U2 (Dual 4-bit and Binary Counter) ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเอ้าพุท 5 เอ้าพุท คือ A,B,C,D,E แต่ละเอ้าพุทให้ความถี่ 6.66, 3.33, 1.665, 0.8325, 0.41625 MHz ตามลำดับ ต่อไปจะนำสัญญาณหลัก A,B,C,D,E มาสร้างสัญญาณควบคุมต่างๆ ดังนี้

สัญญาณ $\overline{M1}, \overline{M2}, \overline{M3}$ ได้จากการนำสัญญาณ E ผ่านวงจรนับคือ U4A, U4B, U5A วงจรนับจะนับสัญญาณ E ใน Mod 3 ได้เอ้าพุทเป็น M1,M2,M3 นำ M1,M2,M3 ผ่านอินเวอร์เตอร์ U9A,U9B,U9C ก็จะได้สัญญาณ $\overline{M1}, \overline{M2}, \overline{M3}$ สำหรับใช้เป็นสัญญาณเลือก Eprom #1 ถึง Eprom #3 ให้ทำงานสอดคล้องกับการประมวลผลของตัวกรองเชิงเชขในแต่ละส่วน

สัญญาณ CKX0, CKV0, CKY ได้จากการนำสัญญาณ M1,M2,M3 ไปควบคุมการเปิด Gate ของ AND Gate U7C,U7D,U5D (เป็น AND Gate ที่ใช้ NOR Gate 3 ตัวต่อกัน) เวลาที่ใช้ในการเปิด Gate มีค่าเป็น 8 เท่าของสัญญาณ B หรือ CK ดังนั้นสัญญาณ CKX0, CKV0, CKY จะมีความถี่เท่ากับ B หรือ CK จำนวน 8 clock สำหรับใช้ในการเลื่อนข้อมูลในรีจีสเตอร์ต่างที่ๆ ที่กล่าวมาแล้ว

สัญญาณ A / S ได้จากการนำสัญญาณ C,D,E มาทำการ AND กันด้วย U7A และ U7B สัญญาณนี้ใช้ควบคุมการบวกเมื่อ CKX0, CKV0 เลื่อนไป 0-6 clock และจะทำการลบเมื่อถึง clock ที่ 7

สัญญาณ $\overline{CLACC}$ ได้จากการนำสัญญาณ A, B(CK), C, A/S มาควบคุม D-Type Flip-Flop U6A และ U6B สัญญาณนี้จะเกิดขึ้นเพื่อลบข้อมูลออกจากภาคคำนวณ(รีจีสเตอร์ ACC) หลังจากเสร็จสิ้นขบวนการบวกและลบเลขในแต่ละครั้งหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าสัญญาณนี้จะเกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อสิ้นสุดการเลื่อนข้อมูลบิตสุดท้ายคือบิตที่ 8 ในรีจีสเตอร์หน่วงสัญญาณ

สัญญาณ $\overline{LRX0}$ ได้จากนำสัญญาณ M3 และเอ้าพุทของ U6B มาทำการ AND กันด้วย U8D สัญญาณนี้จะเกิดครั้งแรกเพื่อทำการโหลดข้อมูลที่ได้จาก A/D เข้าสู่รีจีสเตอร์ RX0 หลังจากนั้นจะเกิดขึ้นอีกเมื่อสิ้นสุดขบวนการประมวลผลทั้ง 6 อันดับ ของตัวกรองเชิงเลข เพื่อทำการโหลดลำดับสัญญาณ x(n) เข้าสู่รีจีสเตอร์ RX0 ใหม่

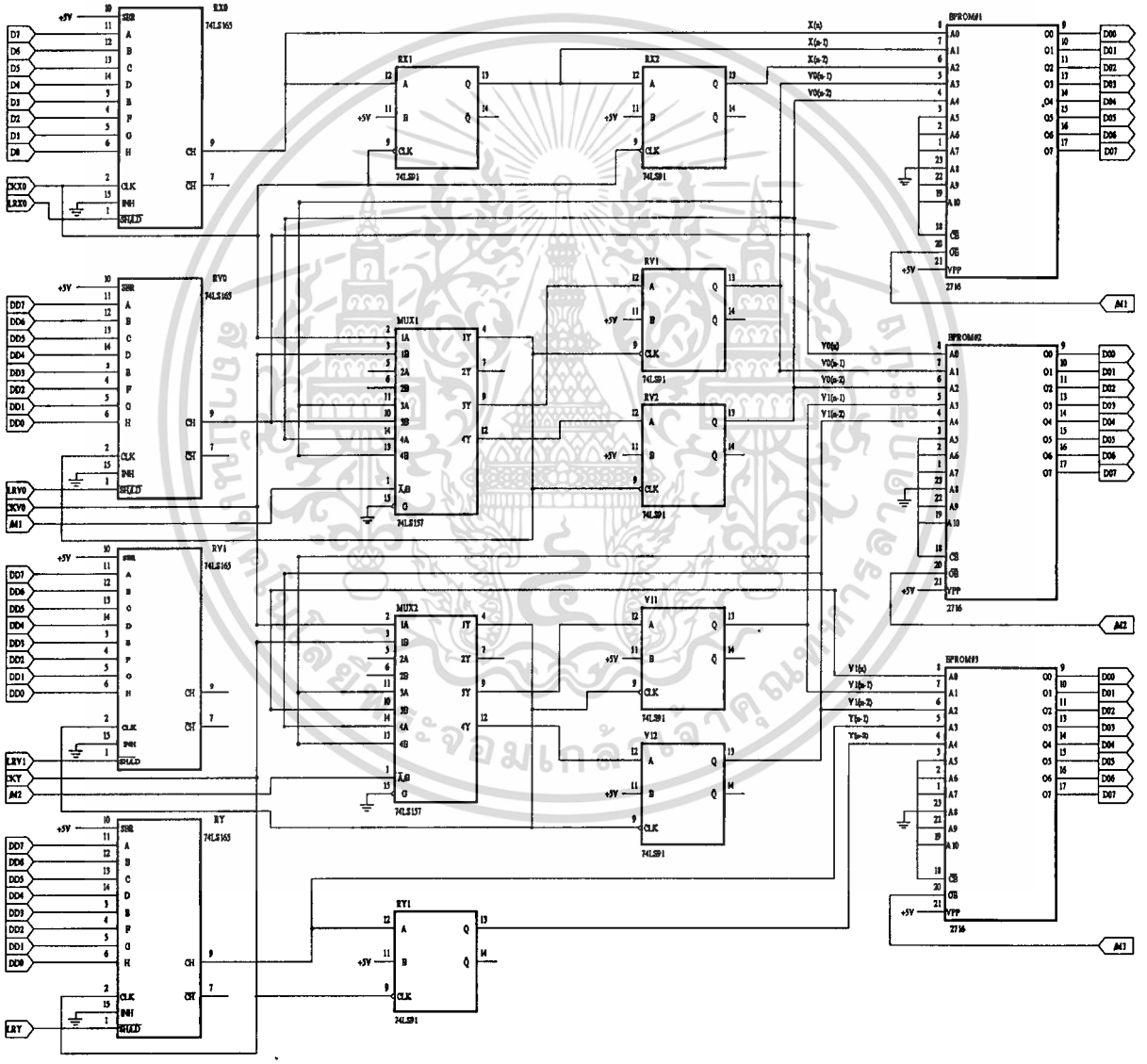
สัญญาณ $\overline{LRV0}$ ได้จากนำสัญญาณ M1 และเอ้าพุทของ U6B มาทำการ AND กันด้วย U8C สัญญาณนี้จะเกิดขึ้นต่อเมื่อสิ้นสุดขบวนการประมวลผลของตัวกรองเชิงเลขอันดับที่ 2 ส่วนแรก เพื่อทำการโหลดข้อมูลจากส่วนแรกเข้าสู่รีจีสเตอร์ RV0 สำหรับการประมวลผลในส่วนที่ 2 (อันดับที่ 4)

สัญญาณ $\overline{LRV}$ ได้จากนำสัญญาณ M2 และเอ้าพุทของ U6B มาทำการ AND กันด้วย U8A สัญญาณนี้จะเกิดขึ้นต่อเมื่อสิ้นสุดขบวนการประมวลผลของตัวกรองเชิงเลขอันดับที่ 4 ส่วนที่สอง เพื่อทำการโหลดข้อมูลจาก ACC เข้าสู่รีจีสเตอร์ RV1 สำหรับการประมวลผลในอันดับที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 ภาครีจีสเตอร์

วงจรของภาครีจีสเตอร์ ถูกออกแบบไว้สำหรับเลื่อนข้อมูลหรือสัญญาณเชิงเลขในรีจีสเตอร์ขนาด 8 บิต ผลที่ได้จากการเลื่อนข้อมูลแต่ละบิตจะเป็นตัวกำหนด แอดเดรสของ Eprom โดยการทำงานของภาครีจีสเตอร์จะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ในขั้นตอนที่ 1 จะใช้รีจีสเตอร์ RX0, RX1, RX2, RV1, RV2 ส่วนในขั้นตอนที่ 2 จะใช้รีจีสเตอร์ RV0, RV1, RV2, RV11 , RV12 และขั้นตอนที่ 3 ใช้รีจีสเตอร์ RV1, RV11, RV12, RY, RY1 โดยจะใช้ MUX1 ,MUX2 เป็นตัวเลือกการทำงานของรีจีสเตอร์ ส่วนรายละเอียดอื่นๆ ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อการทำงานของวงจร

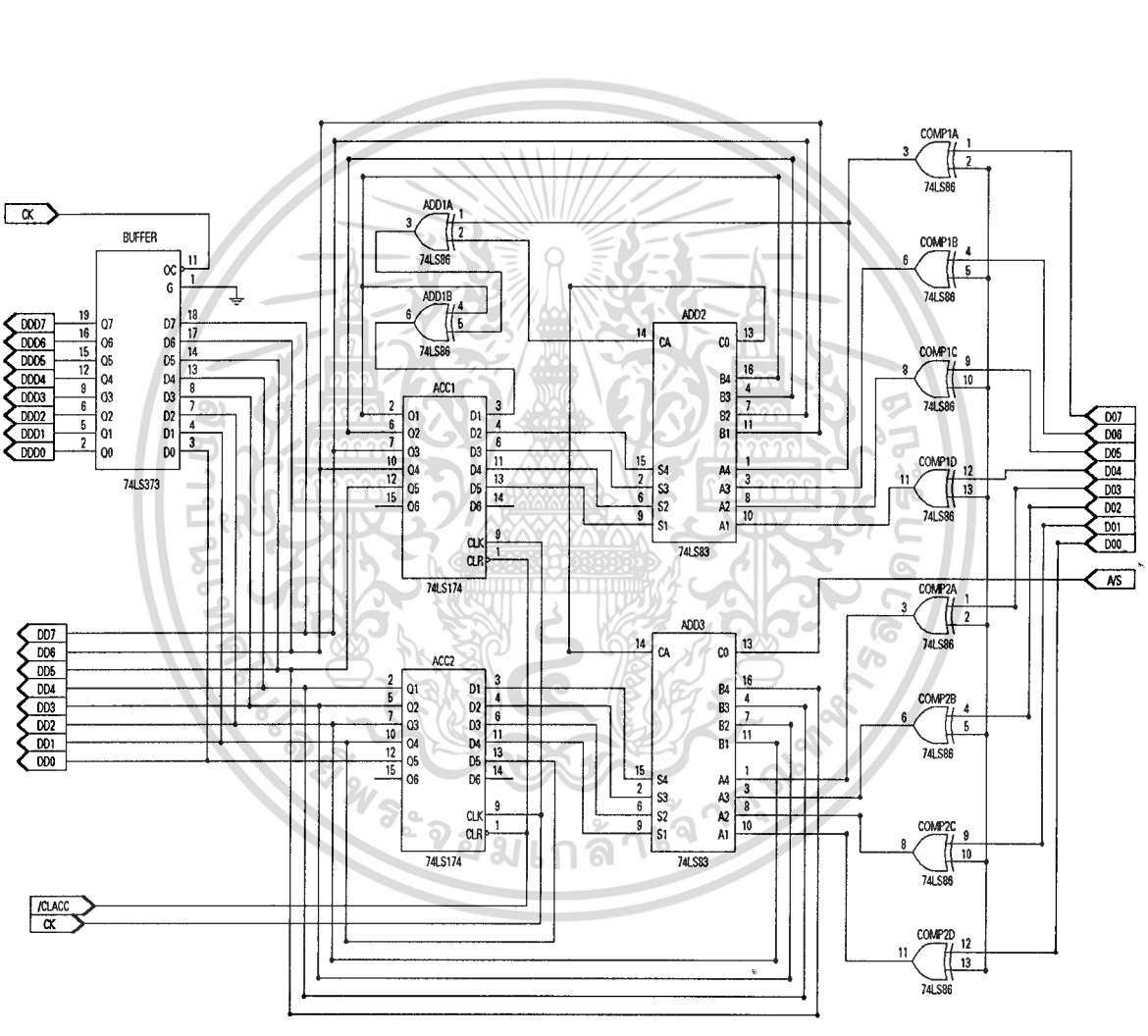


รูปที่ 3.5 วงจรภาครีจีสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 ภาคประมวลผล

วงจรภาคประมวลผลใช้โครงสร้างแบบเลขคณิตกระจายโดยอาศัยคุณสมบัติการบวกลบเลขส่วนเติมเต็มสองแทนการคูณเลขโดยตรงประกอบด้วยวงจรบวกและลบเลข (ADD1,ADD2) และ D-type Flip-Flop 2 ตัว (ACC1, ACC2) ขนาด 10 บิต และมีวงจร ADD1A, ADD1B สำหรับตรวจสอบบิตเครื่องหมาย ส่วนรีจีสเตอร์ BUFFER จะทำการเก็บผลลัพธ์ที่ได้ไว้แล้วส่งไปยังภาคเอ้าพุต เพื่อรอการแปลงเป็นสัญญาณเชิงอุปมาณจากภาคเอ้าพุต ส่วนรายละเอียดต่างๆ ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อการทำงานของวงจร วงจรของภาคประมวลผลแสดงดังรูปที่ 3.6

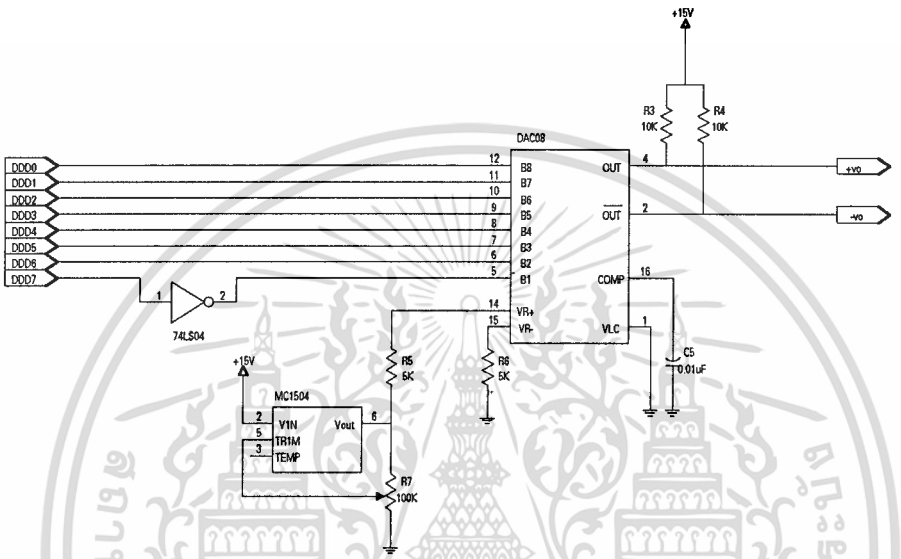


รูปที่ 3.6 วงจรภาคประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 ภาคเอ้าพุต

วงจรภาคเอ้าพุตออกแบบโดยใช้ D/A เบอร์ DAC0800 ให้ทำงานใน Bipolar Mode ให้เอ้าพุตมีขนาด ±15V ส่วนอินพุตของ DAC0800 ต้องการอินพุตแบบ Offset Binary Code แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากภาคประมวลเป็นเลข Two's Complement Code ดังนั้นต้องทำการแปลงให้เป็น Offset Binary Code โดยใช้วงจร NOT-Gate ที่บิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด วงจร D/A จึงจะแปลงผลลัพธ์ไปเป็นสัญญาณเชิงอุปมาณได้อย่างถูกต้อง วงจรแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรภาคเอ้าพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการแสดงถึงวิธีในการทดลอง วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขอันดับที่ 6 แบบบัตเตอร์เวิร์ท ที่ได้ออกแบบมาแล้ว และแสดงผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

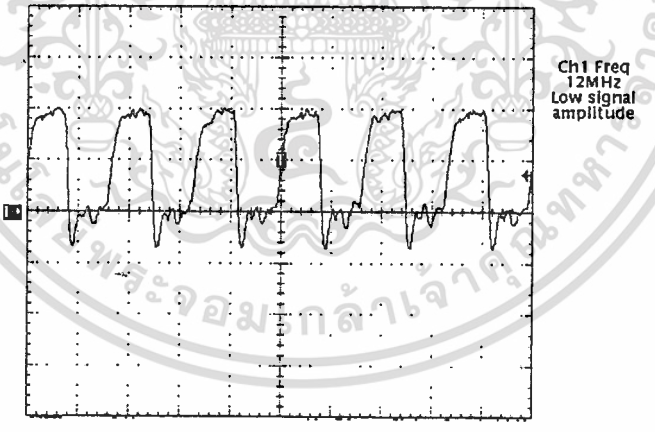
4.1 การทดลอง

วงจรที่ออกแบบและใช้ในการทดลอง คือ ภาคอินพุต ภาคควบคุม ภาครีจีสเตอร์ ภาคประมวลผล และภาคเอ้าพุต ในบทที่ 3 จากนั้นป้อนสัญญาณอินพุตด้วยสัญญาณ SINE ขนาด 3 Vpp ปรับค่าความถี่ของอินพุตไป ณ ค่าต่างๆ ค่าเอ้าพุตที่ได้ถูกบันทึกไว้ในตาราง โดยในการทดลองนี้จะเป็นการยุ่งยากที่จะพิจารณาสัญญาณเอ้าพุตทุกภาคของวงจรเนื่องจากเป็นสัญญาณดิจิตอลขนาด 8 บิต จึงของนำเสนอเพียงสัญญาณเอ้าพุตในส่วนภาคควบคุมและสัญญาณเอ้าพุตของวงจรรวมเท่านั้น

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 สัญญาณควบคุม

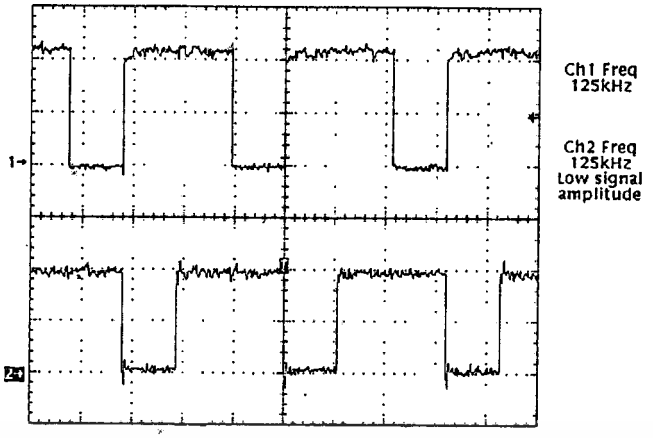
ภาคควบคุมเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในวงจร โดนภาคควบคุมจะคอยควบคุมการทำงานของวงจรในส่วนต่างๆ ให้ได้ผลเป็นไปตามการคำนวณ ในการทดลองจะพิจารณาสัญญาณเอาท์พุตต่างๆ ของส่วนภาคควบคุมดังนี้



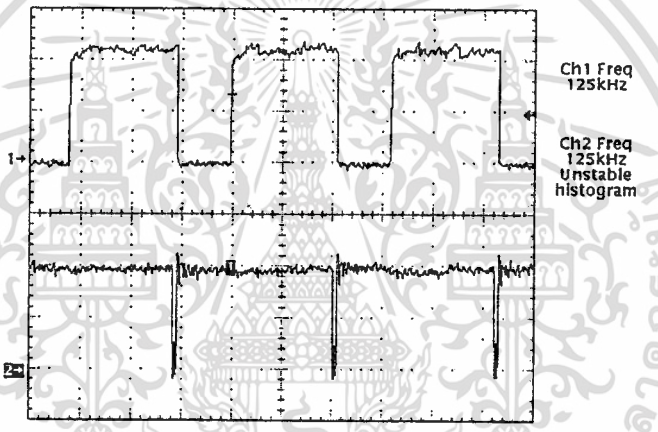
รูปที่ 4.1 แสดงสัญญาณที่ได้จากวงจรออสซิเลเตอร์เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณอื่นๆ ต่อไป

จากนั้นจะพิจารณาสัญญาณต่างๆ ที่ได้จากภาคควบคุม เพื่อนำไปควบคุมอุปกรณ์ในส่วนต่างๆ ของวงจรให้สามารถทำงานตามช่วงเวลาที่ต้องการต่อไป

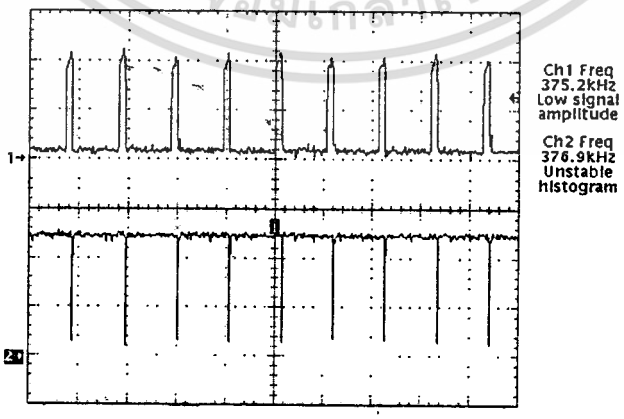
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณ M1 (CH1) และสัญญาณ M2 (CH2)

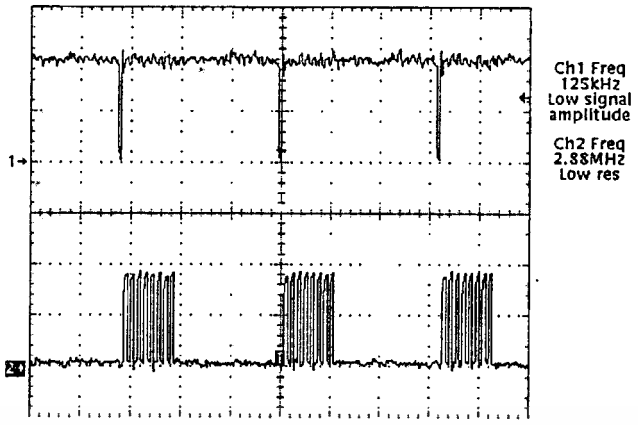


รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณ M3 (CH1) และสัญญาณ /SC (CH2)

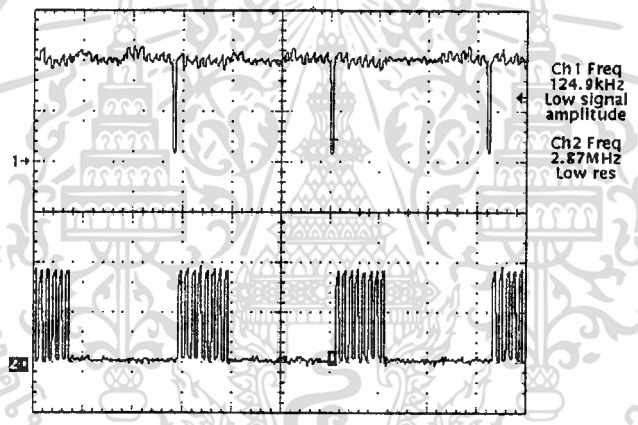


รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณ S/A (CH1) และสัญญาณ /CLACC (CH2)

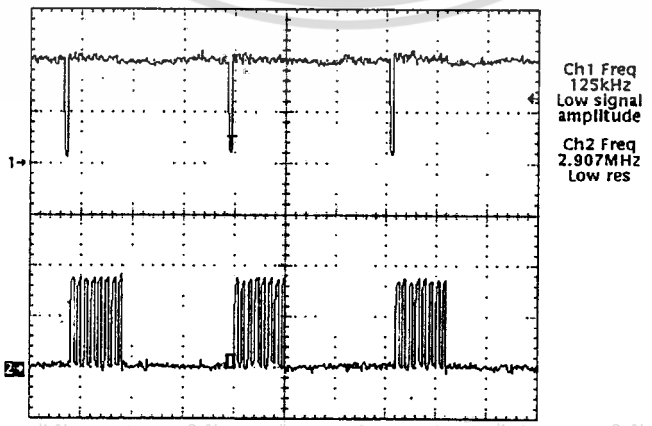
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณ /LRX0 (CH1) และสัญญาณ CKX0 (CH2)



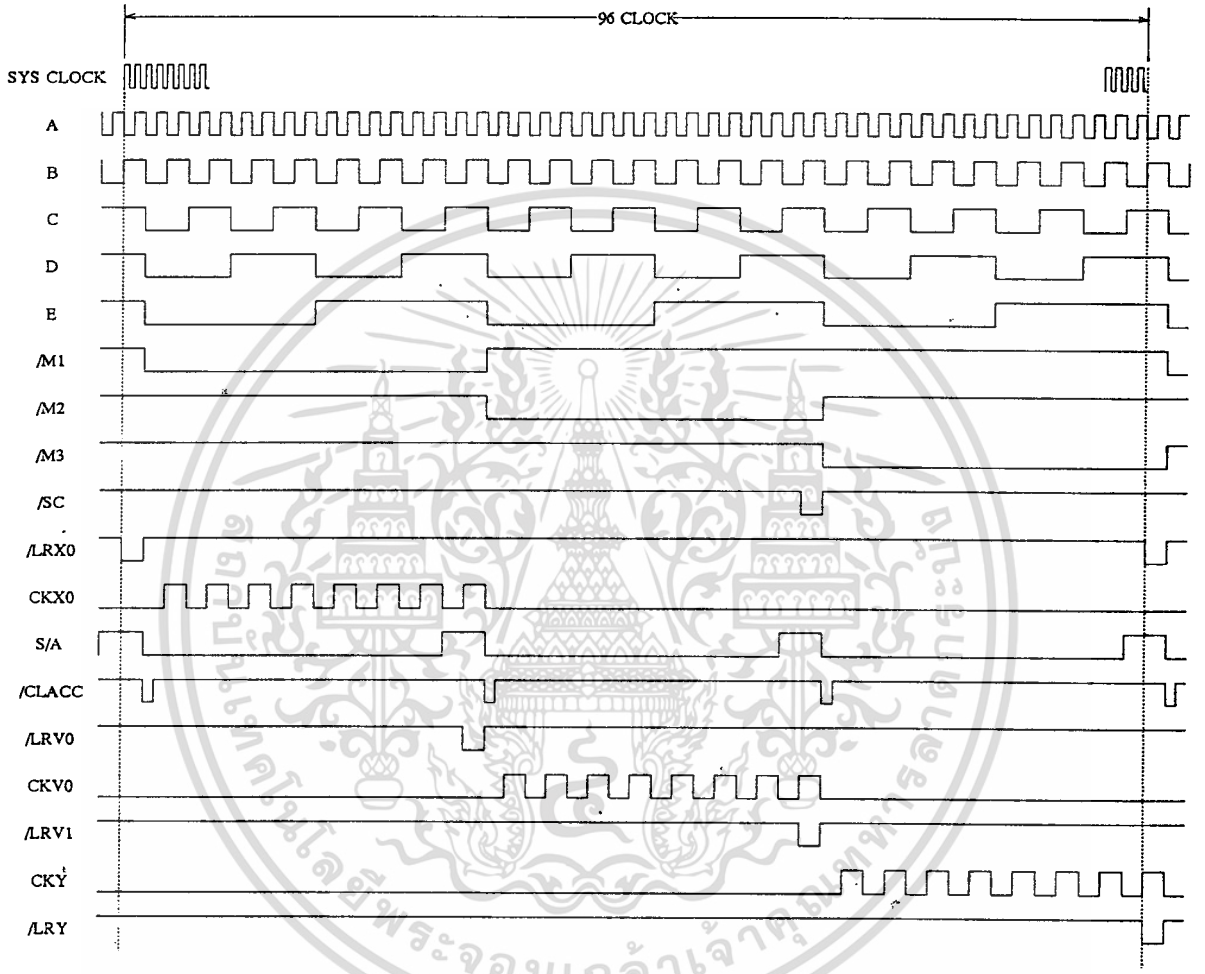
รูปที่ 4.6 แสดงสัญญาณ /LRV0 (CH1) และสัญญาณ CKV0 (CH2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ไม่ว่าครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณ /LRV1 (CH1) และสัญญาณ CKLY (CH2)

เมื่อนำสัญญาณเอ้าพุตของภาคควบคุมทั้งหมดที่ได้จากการทดลองมาเขียนรวมกัน เพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบสัญญาณ จะได้ Timing Diagram ของสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของตัวกรองป้อนกลับเชิงเลขทั้งหมด ดังรูปที่ 4.8

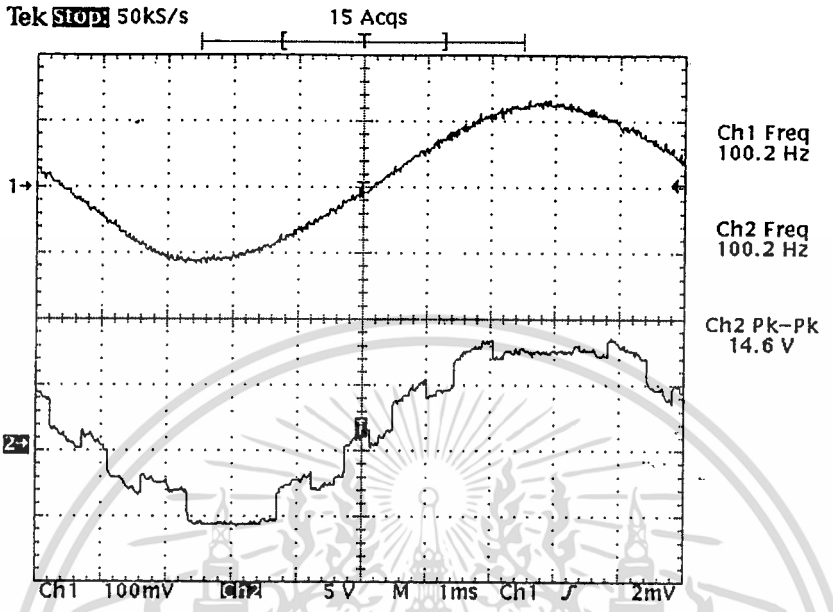


รูปที่ 4.8 Timing Diagram ของภาคควบคุม

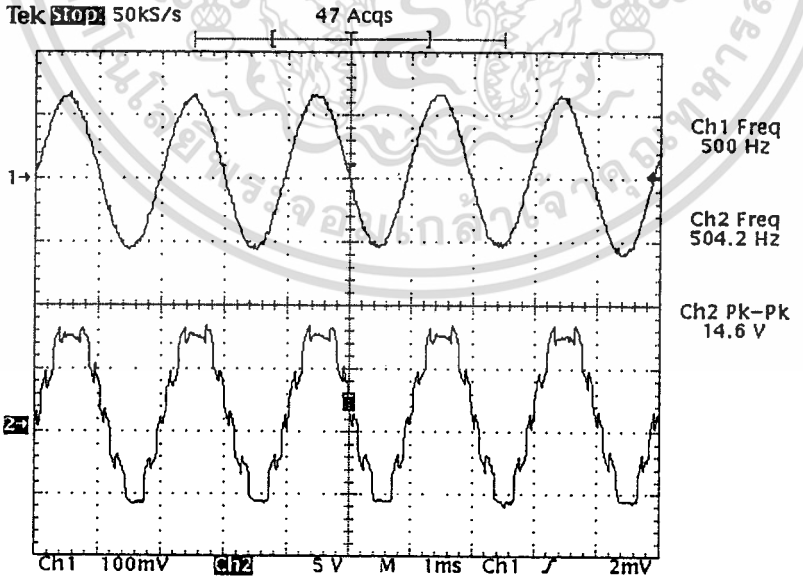
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 สัญญาณเอ้าพุตของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขอันดับ 6

ในการทดลองจะป้อนอินพุตด้วยสัญญาณ SINE ขนาด 3 Vpp จากนั้นปรับค่าความถี่ของอินพุตไป ณ ค่าต่างๆ แล้ววัดผลที่ได้ออกมาดังนี้

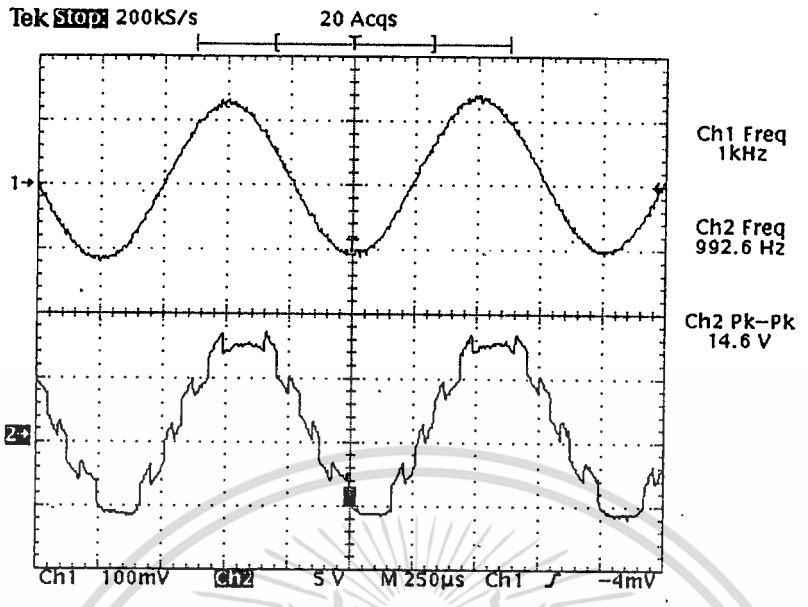


รูปที่ 4.9 (บน) สัญญาณอินพุตที่ความถี่ 100 Hz
(ล่าง) สัญญาณเอ้าพุต

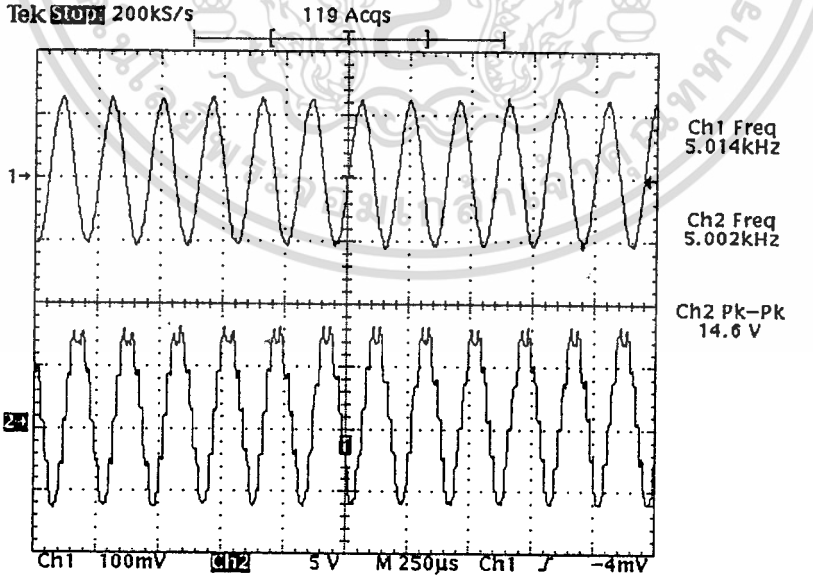


รูปที่ 4.10 (บน) สัญญาณอินพุตที่ความถี่ 500 Hz
(ล่าง) สัญญาณเอ้าพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

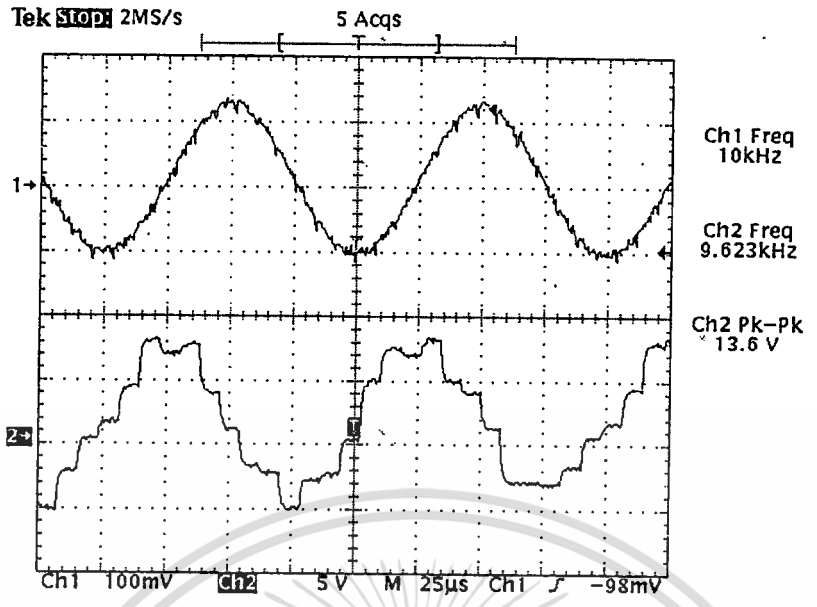


รูปที่ 4.11 (บน) สัญญาณอินพุตที่ความถี่ 1 kHz
(ล่าง) สัญญาณเอ้าพุต

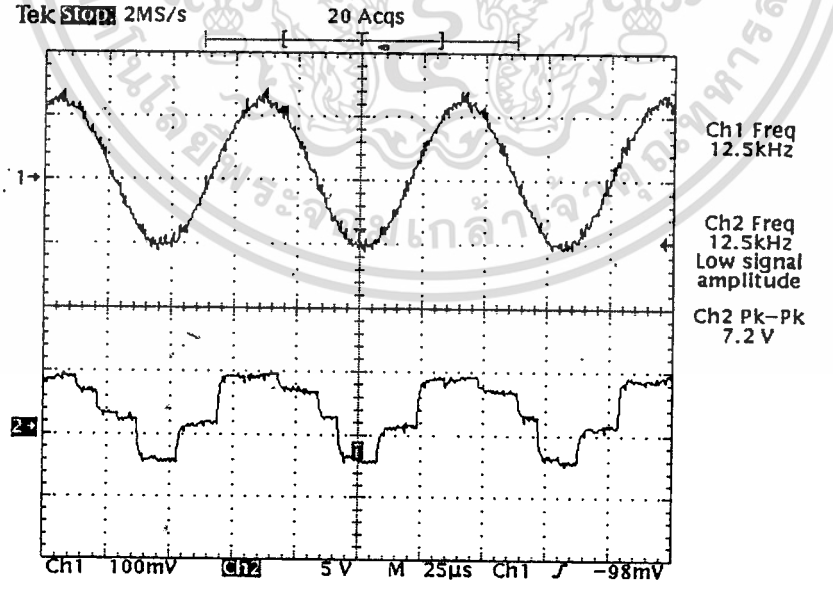


รูปที่ 4.12 (บน) สัญญาณอินพุตที่ความถี่ 5 kHz
(ล่าง) สัญญาณเอ้าพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

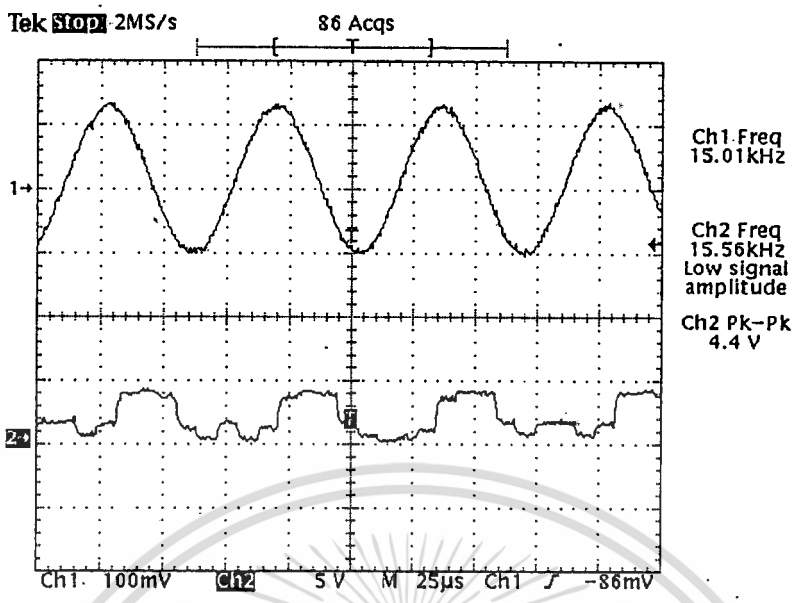


รูปที่ 4.13 (บน) สัญญาณอินพุตที่ความถี่ 10 kHz
(ล่าง) สัญญาณเอ้าพุต

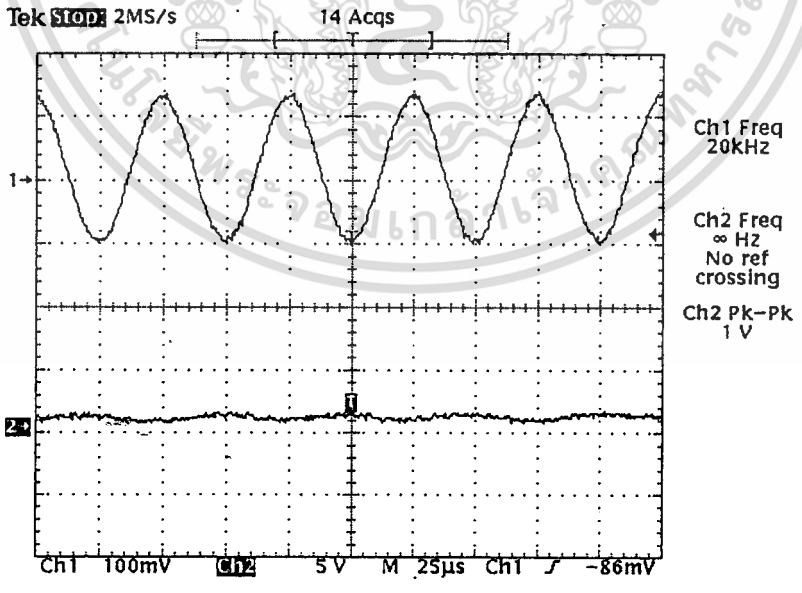


รูปที่ 4.14 (บน) สัญญาณอินพุตที่ความถี่ 12.5 kHz
(ล่าง) สัญญาณเอ้าพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 (บน) สัญญาณอินพุตที่ความถี่ 15 kHz
(ล่าง) สัญญาณเอ้าพุต



รูปที่ 4.16 (บน) สัญญาณอินพุตที่ความถี่ 20 kHz
(ล่าง) สัญญาณเอ้าพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7

ผลการทดลองแสดงค่าระดับของสัญญาณเอ้าพุต ณ.ความถี่ต่างๆ

fin(Hz)	Vo(pp) (Volts)	Normalized	fin(Hz)	Vo(pp) (Volts)	Normalized
100	14.6	1	9000	14.0	0.959
300	14.6	1	9500	14.0	0.959
500	14.6	1	10000	13.6	0.932
700	14.6	1	10500	12.0	0.822
900	14.6	1	11000	11.2	0.767
1000	14.6	1	11500	10.8	0.740
1200	14.6	1	12000	10.0	0.685
1400	14.6	1	12500	7.2	0.493
1600	14.6	1	13000	6.0	0.411
1800	14.6	1	13500	5.2	0.356
2000	14.6	1	14000	5.0	0.342
2500	14.6	1	14500	4.8	0.329
3000	14.6	1	15000	4.4	0.301
3500	14.6	1	15500	4.2	0.288
4000	14.6	1	16000	4.0	0.274
4500	14.6	1	16500	3.6	0.247
5000	14.6	1	17000	3.4	0.233
5500	14.6	1	17500	3.2	0.219
6000	14.6	1	18000	3.0	0.205
6500	14.6	1	18500	2.8	0.192
7000	14.4	0.986	19000	1.2	0.082
7500	14.4	0.986	19500	1.0	0.068
8000	14.2	0.973	20000	1.0	0.068
8500	14.2	0.973			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้