การออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟชนิดความถี่สูงผ่าน ที่ให้ผลตอบสนองทั้งขนาดและกรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน

An Alternative Simultnaeous Maximally Flat Approximation for a Highpass Recursive Digital Filter

รัตนะ มีเต็ม
Rattana Metem

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ. ดร. ฟูศักดิ์ ชีวสุวิทย์
Advisor
Assoc. Prof. Dr. Fusak Cheevasuvit

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2532

ISBN 974-8154-39-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอล (Digital Filter) ที่ผ่านมา มีการนำเสนอการออกแบบในย่านความถี่ต่างๆ ที่มีคุณสมบัติตอบสนองที่แตกต่างกันออกไป ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการออกแบบ วงจรกรองความถี่สูงที่มีการพิจารณาถึงผลการตอบสนองของขนาด กรุ๊ฟดีเลย์ ตลอดจนการควบคุมผลตอบสนองนั้นๆ รวมทั้งการประยุกต์ใช้สูตรสำเร็จ (Close-form formula) ในการลดค่าความผิดพลาดของผลการตอบสนองของวงจรด้วย

ในตอนท้ายของวิทยานิพนธ์ ได้แสดงการใช้สูตรการแปลงไบลิเนียร์ (Bilinear Transform) เพื่อหาค่าจุดตัดความถี่ (Cutoff Frequency) ของวงจรที่ออกแบบ และผลลัพธ์ของวงจรเมื่อมีการผ่านสัญญาณตัวอย่างเข้าไปในวงจรนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

The previously designed techniques of Digital Filter provide various kinds of filter design which had different ways of responsive characteristics. This thesis presents the design of highpass recursive digital filters considered on the magnitude response, group delay response and the response control, including the application of close-form formula to reduce the responses error.

Using Bilinear Transform to find out the cutoff frequency of designed filter and the sample of output signal when simulate input signal into it are shown in the last part of this thesis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผลงานวิจัยที่ผ่านมาอย่างเช่น [4] และ [5] แม้จะมีการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงไว้ แต่วงจรเหล่านั้นต่างก็มีคุณสมบัติเด่นเฉพาะอย่าง เช่นใน [5] เป็นการออกแบบวงจรที่มีการพิจารณาเฉพาะแต่ทางด้านเฟสของวงจรเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่เพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้กับงานบางประเภท เพื่อเป็นการขจัดปัญหาของความไม่สมบูรณ์ดังกล่าว จึงเป็นจุดริเริ่มสำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่สูง ที่มีการพิจารณา คุณสมบัติการตอบสนองทั้งทางด้าน ขนาด และกรุ๊ฟดีเลย์ ตลอดถึงการควบคุม ผลตอบสนองดังกล่าวด้วย อันจะเป็นวงจรที่มีคุณสมบัติต่างๆ อยู่ครบต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

1.2 เทคนิคริเริ่ม

เทคนิคริเริ่มในการขจัดปัญหาดังกล่าวคือ

1.2.1 การออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟ ชนิดความถี่สูงผ่าน ที่ให้ผลตอบสนองทั้งขนาดและกรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน (An Alternative Simultaneous Maximally Flat Approximation for a Highpass Recursive digital Filter)

1.2.2 การประยุกต์ใช้สูตรสำเร็จในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟชนิดความถี่สูงผ่าน (Application of close-form formula to calculate filter coefficients of a Highpass Recursive digital filter)

1.2.3 การควบคุมผลการตอบสนองของวงจรกรองความถี่ดิจิตอลชนิดความถี่สูงผ่าน ที่มีผลตอบสนอง ขนาดและกรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน (The controllable of the Highpass digital filter with simultaneous maximally flat magnitude and group delay)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และคณิตศาสตร์ที่ใช้

2.1 บทนำ

ลักษณะสัญญาณที่มีอยู่สามารถจำแนกได้ตามโปรเซสในแกนเวลาได้เป็น 2 ชนิดคือ สัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางแกนเวลา และสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางแกนเวลา หรือก็คือสัญญาณดิจิตอลนั่นเอง

การประมวลผลสัญญาณแบบดิจิตอลเพื่อให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์นั้นมีหลายประการ วิธีที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย คือการกรองสัญญาณเหล่านั้นเพื่อให้ได้สัญญาณที่อยู่ในช่วงความถี่ที่จะพิจารณาจริงๆ ซึ่งกรรมวิธีการกรองสัญญาณนี้เรียกว่า ดิจิตอลฟิลเตอร์ (Digital Filter)

2.2 รูปแบบของวงจรกรองความถี่ดิจิตอล

วงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบ่งตามลักษณะใช้งานได้ 2 รูปแบบคือ

2.2.1 วงจรกรองไม่ป้อนกลับ (Non-Recursive Digital Filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่ไม่มีการป้อนกลับเอาสัญญาณที่ออกมาไปใช้ในการคำนวณ สัญญาณออกอันดับถัดไป มีฟังชั่นการส่งผ่านที่มีเฉพาะ ซีโร่ เพียงอย่างเดียว ลักษณะการโปรเซสของวงจรกรองความถี่ชนิดนี้เป็นไปดังรูปที่ 2.1

Z^{-1} คือชีฟรีจิสเตอร์ (shift register) ใช้ในการหน่วงสัญญาณให้ช้าลงหนึ่งคาบเวลาการแซมปลิ้ง สมการของระบบนี้สามารถแสดงได้เป็น

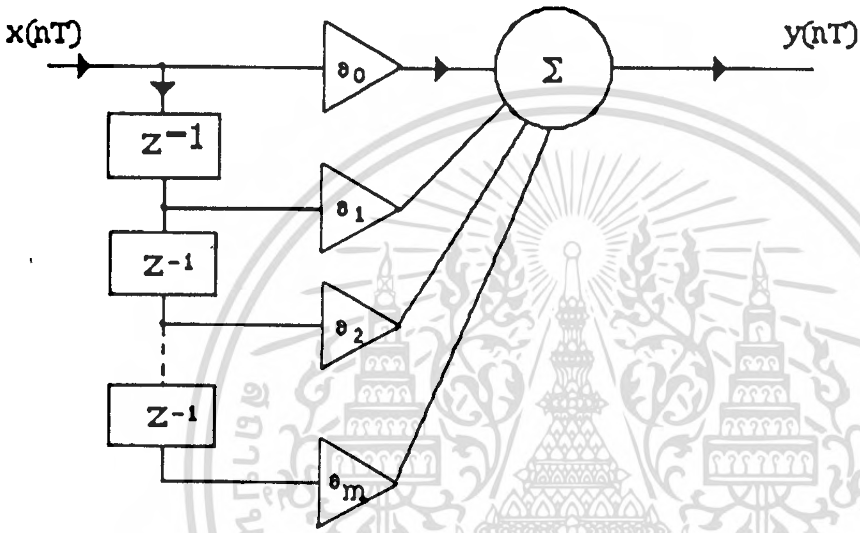
$$y(nT) = \sum_{i=0}^{m} a_i x(nT-iT)$$

ทำ Z ทรานส์ฟอร์มของสมการข้างบน จะได้

$$Y(z) = X(Z)\sum_{i=0}^{m} a_i Z^{-i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{i=0}^{n-1} a_i Z^{-i} = H(Z)$$



รูป 2.1 วงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบ นอนรีเคอร์ซีฟ

2.2.2 วงจรกรองป้อนกลับเชิงดิจิตอล (Recursive digital filter)

เป็นวงจรกรองความถี่ที่มีการป้อนกลับของสัญญาณขาออกมาเป็นสัญญาณเข้าใหม่ วงจรกรองความถี่นี้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2

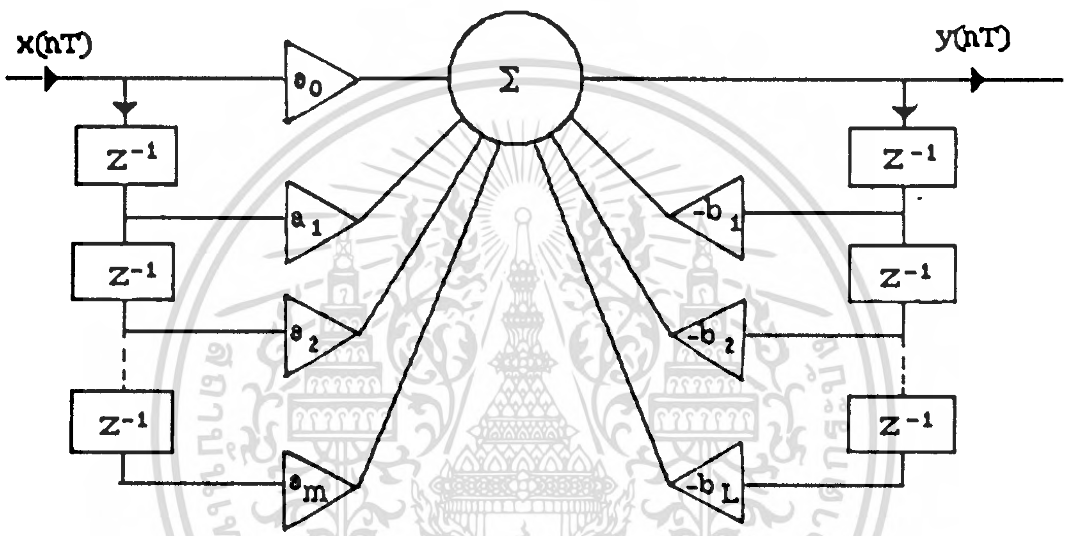
สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบคือ

$$y(nT) = \sum_{i=0}^{m} a_i x(nT-iT) - \sum_{i=1}^{L} b_i y(nT-iT)$$

ทำ Z ทรานส์ฟอร์มของสมการข้างบนจะได้ ทรานส์ฟอร์ฟังค์ชั่นของวงจรเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{m} a_i Z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^{L} b_i Z^{-i}}$$



รูป 2.2 วงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟ

วงจรทั้งสองแบบต่างมีข้อดีและข้อเสียอยู่ในตัว โดยในวงจรแบบป้อนกลับนั้นจะให้ จุดตัด (cut off) ที่มีความคมกว่า แบบไม่ป้อนกลับ ในอันดับ (order) เดียวกัน ซึ่งในการที่จะให้ได้จุดตัดที่มีความคมเท่าๆ กันแล้ว วงจรแบบรีเคอร์ซีฟจะสิ้นเปลืองชิ้นส่วนน้อยกว่า แต่ถ้าจะพิจารณาถึงเสถียรภาพ (stability) ของวงจรแล้ว แบบนอนรีเคอร์ซีฟจะเสถียรเสมอ ส่วนแบบรีเคอร์ซีฟจะขึ้นอยู่กับ pole ของทรานสเฟอร์ฟังชั่นนั้น

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง s-plane และ z-plane

จากข้อกำหนดที่ให้

$$e^{-sT} = z^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

จะเขียนได้เป็น

$$Z = e^{(\alpha - j\omega)T}$$

จะพบว่า $|Z| = e^{(\omega T)}$ $\angle Z = \omega T$

ซึ่งเมื่อนำมาเขียนในรูป s และ Z plane จะได้ดังรูป 2.3

(ก) ความสัมพันธ์ ของ S_K และ Z_K (ข) วงกลมหนึ่งหน่วยใน Z-plane

รูป 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง s-plane และ Z-plane โดยรูป (ก) แสดงความสัมพันธ์ของขนาด และรูป (ข) แสดงถึงวงกลม 1 หน่วยใน Z-plane

จาก $|Z| = e^{\alpha T}$

ถ้า $\alpha = 0$ แล้ว $Z = 1$ จะได้วงกลมหนึ่งหน่วยในรูป (b) ส่วนของ Ω ทั้งหมดก็จะปรากฏอยู่ในพื้นที่ของวงกลม 1 หน่วย ใน Z-plane

2.4 The bilinear transformation

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างวงจรกรองความถี่แบบ อนาลอก และ ดิจิตอล สามารถหาได้โดยการใช้วิธีการของ bilinear transformation ซึ่งมีสมการเป็น

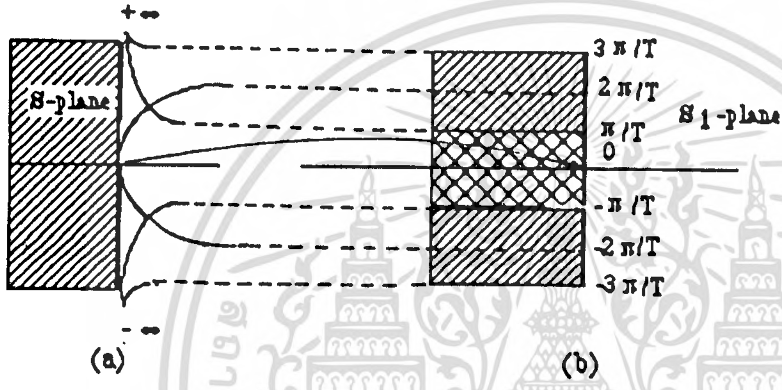
$$s = \frac{Z-1}{Z+1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

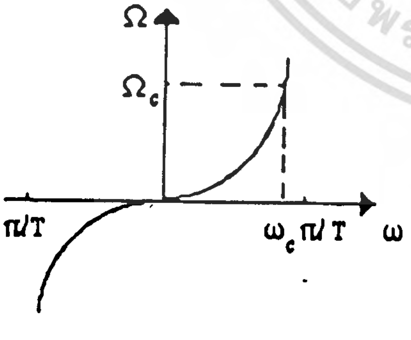
ให้ $s = j\omega_A$ (A หมายถึง อนาลอก)

$z = e^{j\omega_D T}$ (D หมายถึง ดิจิตอล)

แก้สมการแสดงรูปการ mapping ได้ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูป 2.4 แสดงการ mapping ของ bilinear transformation



รูป 2.5 แสดงความสัมพันธ์ในแกนของความถี่ โดยวิธีไบลิเนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 แวนเดอร์มองดีเทอร์มิแนนท์ (Vandermonde determinant)

สำหรับแมทริกซ์ใดที่มีคุณสมบัติเป็น โพลิโนเมียล (polynomial) อันดับที่ n ดังที่แสดงไว้ต่อไปนี้

$$
A = \begin{bmatrix}
1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\
x_0 & x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_m \\
x_0^2 & x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & \cdots & x_m^2 \\
x_0^3 & x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & \cdots & x_m^3 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
x_0^m & x_1^m & x_2^m & x_3^m & \cdots & x_m^m
\end{bmatrix}
$$

แมทริกซ์นี้จะเรียกว่า แวนเดอร์มองแมทริกซ์ และจะได้ ดีเทอร์มิแนนท์ที่มีคุณสมบัติเป็นแวนเดอร์มองดีเทอร์มิแนนท์ ดังนี้

$$
|A| = \begin{vmatrix}
1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\
x_0 & x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_m \\
x_0^2 & x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & \cdots & x_m^2 \\
x_0^3 & x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & \cdots & x_m^3 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
x_0^m & x_1^m & x_2^m & x_3^m & \cdots & x_m^m
\end{vmatrix}
$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำ colume ที่ 1 ให้เป็น 0 โดยการนำ x_0 คูณแถวถัดไป แล้วลบออกจากแถวล่าง จะได้

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & (x_1 - x_0) & (x_2 - x_0) & (x_3 - x_0) & \cdots & (x_m - x_0) \\ 0 & x_1(x_1 - x_0) & x_2(x_2 - x_0) & x_3(x_3 - x_0) & \cdots & x_m(x_m - x_0) \\ 0 & x_1^2(x_1 - x_0) & x_2^2(x_2 - x_0) & x_3^2(x_3 - x_0) & \cdots & x_m^2(x_m - x_0) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ 0 & x_1^{m-1}(x_1 - x_0) & x_2^{m-1}(x_2 - x_0) & x_3^{m-1}(x_3 - x_0) & \cdots & x_m^{m-1}(x_m - x_0) \end{vmatrix}$$

ทำแถวที่ 1 เป็น 0 โดยนำ หลักที่ 1 ลบออกจากทุกแถว จะได้

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & (x_1 - x_0) & (x_2 - x_0) & (x_3 - x_0) & \cdots & (x_m - x_0) \\ 0 & x_1(x_1 - x_0) & x_2(x_2 - x_0) & x_3(x_3 - x_0) & \cdots & x_m(x_m - x_0) \\ 0 & x_1^2(x_1 - x_0) & x_2^2(x_2 - x_0) & x_3^2(x_3 - x_0) & \cdots & x_m^2(x_m - x_0) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ 0 & x_1^{m-1}(x_1 - x_0) & x_2^{m-1}(x_2 - x_0) & x_3^{m-1}(x_3 - x_0) & \cdots & x_m^{m-1}(x_m - x_0) \end{vmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดึงตัวร่วมในแต่ละหลัก ออกมา จะได้

$$A = (x_1 - x_0)(x_2 - x_0)(x_3 - x_0)\ldots(x_m - x_0)\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \ldots & 1 \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & \ldots & x_m^2 \\ x_1^3 & x_2^3 & x_3^3 & \ldots & x_m^3 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \ldots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \ldots & \cdot \\ x_1^{m-1} & x_2^{m-1} & x_3^{m-1} & \ldots & x_m^{m-1} \end{vmatrix}$$

จะพบว่า ดีเทอร์มีแนนท์ ที่เหลือก็จะอยู่ในรูปของ แวนเดอร์มองดีเทอร์มีแนนท์ด้วย ซึ่งเมื่อใช้วิธีการหาผลคูณของดีเทอร์มีแนนท์ ที่เหลือก็จะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นรูปของผลคูณอีกชุดหนึ่ง เมื่อทำจนถึงที่สุดแล้วก็จะพบว่าสามารถเขียนผลคูณเหล่านั้นให้อยู่ใน รูปสูตรสำเร็จใดๆ ได้เป็น

$$A = \prod_{m \geq j,\ j > i,\ i \geq 0} (x_j - x_i)$$

ในกรณีที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ใดๆ ของ แมทริกซ์ สามารถใช้กฎของ แครมเมอร์ ดังนี้.

$$a_0 = \frac{A_0}{A}\ ,\ a_1 = \frac{A_1}{A}\ ,\ \ldots,\ a_m = \frac{A_m}{A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 Sampling Theorem

ในการแปลงสัญญาณ อนาลอก เป็น สัญญาณ ดิจิตอลนั้น จะต้องมีการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณนั้นๆ เข้ามา และเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีคุณสมบัติครบตามสัญญาณต้นแบบนั้นๆ จะต้องทำการสุ่มตาม uniform sampling theorem โดยจะต้องมีความถี่ในการสุ่มอย่างน้อยเป็น 2 เท่า ของความถี่สูงสุดของสัญญาณนั้นๆ ช่วงเวลา T (sampling interval) จะต้องไม่มากเกินกว่า $T = 1/2f_m$ ซึ่งช่วงกว้างนี้จะเรียกว่า Nyquist Interval

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟชนิดความถี่สูงผ่าน ที่ให้ผลตอบสนองทั้งขนาดและกรุ๊ปดีเลย์ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน

An Alternative Simultaneous Maximally Flat Approximation for a Highpass Recursive Digital Filter

3.1 บทนำ

เทคนิคการออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟชนิดความถี่สูงผ่านของ [5] นั้น เป็นเพียงการออกแบบให้ได้ผลตอบสนองกรุ๊ปดีเลย์ราบเรียบที่สุดเท่านั้น แต่ไม่ได้คำนึงถึงผลตอบสนองขนาด ในบทนี้จะเป็นการออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟ ชนิดความถี่สูงผ่าน โดยให้ผลตอบสนองทั้งขนาดและกรุ๊ปดีเลย์ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน เทคนิคการออกแบบนี้ จะใช้ Gauss-Jordan elimination แก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่ดิจิตอลดังกล่าว

3.2 การออกแบบ

ให้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟเป็น

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{m} a_i z^{-i}}{\sum_{i=0}^{n} b_i z^{-i}} \qquad (3.1)$$

แต่เนื่องจากวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟนี้ต้องการให้ได้ผลตอบสนองทั้งขนาด และกรุ๊ปดีเลย์มีความราบเรียบที่สุด ดังนั้นจึงต้องหาฟังก์ชันใดๆ ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้ทำการประมาณ* ให้กับ H(z) ซึ่งจะพบว่าฟังก์ชันที่ต้องการคือ ฟังก์ชันของเอกซ์โพเนนเชียล $e^{-j[\beta_0 + (\omega - \omega_0)\tau]}$

---

* ในการออกแบบโดยการประมาณค่าจะอาศัยคุณสมบัติของฟังก์ชันที่ใช้ อันเป็นวิธีออกแบบโดยตรง ยังมีการออกแบบอย่างอื่นเช่น Frequency transformation จะใช้การแทนค่า Z^{-1} ใน transfer function ซึ่งค่าที่นำมาแทนนั้น [14] จะพิจารณาแต่ในด้านผลตอบสนองของขนาดเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังค์ชั่นเอกซ์โพเนนเชียลนี้ให้ผลตอบสนองขนาด (ค่า absolute) เท่ากับ 1 เสมอ และให้เฟสคือ $-[\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau]$ เป็นเชิงเส้น ถ้าหากทำการหาอนุพันธ์ของเฟสเทียบกับ ω ก็จะได้เป็นกรุ๊ฟดีเลย์ที่ราบเรียบที่สุดนั่นเอง ดังนั้นเราจึงทำการประมาณค่าวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟด้วยฟังค์ชั่นของเอกซ์โพเนนเชียล ดังสมการข้างล่าง

$$H(z)\Big|_{z = e^{j\omega T}} = e^{-j[\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau]} \qquad (3.2)$$

เมื่อ ω_0 : ความถี่ใดๆ ที่เราต้องการจะทำการประมาณ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที

β_0 : ค่าเฟสที่ $\omega = \omega_0$ มีหน่วยเป็นเรเดียน

τ : ค่ากรุ๊ฟดีเลย์ มีหน่วยเป็นวินาที

T : ช่วงเวลาในการแซมปลิ้ง (sampling period) ซึ่งนอมอลไลซ์ (nomolrize) ให้เป็นหนึ่งวินาที

เมื่อแทนค่า $H(z)$ ด้วยสมการที่ (3.1) ลงในสมการที่ (3.2) จะได้

$$\frac{\sum_{i=0}^{m} a_i \cos i\omega - j\sum_{i=0}^{m} a_i \sin i\omega}{\sum_{i=0}^{n} b_i \cos i\omega - j\sum_{i=0}^{n} b_i \sin i\omega} = \cos[\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau] - j\sin[\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau] \qquad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\sum_{l=0}^{m} a_l \cos l\omega - \sum_{l=0}^{n} b_l[\cos l\omega \cos(\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau) - \sin l\omega \sin(\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau)]$$

$$-j[\sum_{l=0}^{m} a_l \sin l\omega - \sum_{l=0}^{n} b_l[\sin l\omega \cos(\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau) + \cos l\omega \sin(\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau)]$$

$$= 0 \qquad (3.4)$$

ให้ $x = \omega - \omega_0$ หรือ $\omega = x + \omega_0$ แทนลงในสมการ (3.4) แล้วทำการแยกส่วนที่เป็นค่าจริง (real-part) กับส่วนที่เป็นค่าจินตภาพ (imaginary-part) ออกจากกัน

$$\sum_{l=0}^{m} a_l (\cos lx \cos l\omega_0 - \sin lx \sin l\omega_0) - \sum_{l=0}^{n} b_l[\cos(l+\tau)x \cos(l\omega_0 + \beta_0)$$

$$- \sin(l+\tau)x \sin(l\omega_0 + \beta_0)] = 0 \qquad (3.5\text{-a})$$

$$\sum_{l=0}^{m} a_l (\sin lx \cos l\omega_0 - \cos lx \sin l\omega_0) - \sum_{l=0}^{n} b_l[\sin(l+\tau)x \cos(l\omega_0 + \beta_0)$$

$$+ \cos(l+\tau)x \sin(l\omega_0 + \beta_0)] = 0 \qquad (3.5\text{-b})$$

จากสมการที่ (3.5a) และ (3.5b) กระจายให้อยู่ในรูปอนุกรมกำลัง (power series) ของ x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=0}^{m} a_i\Big[\cos(i\omega_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k(ix)^{2k}}{2k!} - \sin(i\omega_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k(ix)^{2k+1}}{(2k+1)!}\Big]$$

$$-\sum_{i=0}^{m} b_i\Big[\cos(i\omega_0+\beta_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k((i+\tau)x)^{2k}}{2k!} - \sin(i\omega_0+\beta_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k((i+\tau)x)^{2k+1}}{(2k+1)!}\Big]$$

$$= 0 \qquad (3.6\text{-a})$$

$$\sum_{i=0}^{m} a_i\Big[\cos(i\omega_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k(ix)^{2k+1}}{(2k+1)!} + \sin(i\omega_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k(ix)^{2k}}{2k!}\Big]$$

$$-\sum_{i=0}^{m} b_i\Big[\cos(i\omega_0+\beta_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k((i+\tau)x)^{2k+1}}{(2k+1)!} + \sin(i\omega_0+\beta_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k((i+\tau)x)^{2k}}{2k!}$$

$$= 0 \qquad (3.6\text{-b})$$

ในการทำการประมาณค่าให้ราบเรียบที่สุด หมายความว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของ x ที่กำลังต่างๆ จะต้องเป็นศูนย์ และเพื่อเป็นการสะดวกต่อการคำนวณทางคณิตศาสตร์ จึงกำหนดให้ $b_0 = 1$ ดังนั้นจะได้

$$\sum_{i=0}^{m} a_i(i)^{2k}\cos(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} b_i(i+\tau)^{2k}\cos(i\omega_0+\beta_0) = (\tau)^{2k}\cos(\beta_0) \qquad (3.7\text{-a})$$

$$\sum_{i=0}^{m} a_i(i)^{2k}\sin(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} b_i(i+\tau)^{2k}\sin(i\omega_0+\beta_0) = (\tau)^{2k}\sin(\beta_0) \qquad (3.7\text{-a})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=0}^{m} a_i(i)^{2k+1}\cos(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} b_i(i+\tau)^{2k+1}\cos(i\omega_0+\beta_0) = (\tau)^{2k+1}\cos(\beta_0) \quad (3.7\text{-a})$$

$$\sum_{i=0}^{m} a_i(i)^{2k+1}\sin(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} b_i(i+\tau)^{2k+1}\sin(i\omega_0+\beta_0) = (\tau)^{2k+1}\sin(\beta_0) \quad (3.7\text{-a})$$

k มีค่าเท่ากับ 0, 1, 2, . . . จนกว่าจะได้แมทริกส์ (matrix) ข้างซ้ายมือเป็นสแควร์แมทริกซ์ (square matrix) มีขนาด (m+n+1)x(m+n+1) เราจะเขียนในรูปของสมการเชิงเส้น มีสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่เป็นตัวไม่รู้ค่าคือ

$$\underline{A}\,\underline{x} = \underline{c}$$

ดังแมทริกส์ในหน้า 16

3.3 ตัวอย่างการออกแบบ

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟชนิดความถี่สูงผ่าน ที่ให้ผลตอบสนองขนาดและกรุ๊ปดีเลย์ราบเรียบที่สุดนั้น จะกำหนดให้ $\omega_0 = \pi$ เรเดียนต่อวินาที * โดยให้อันดับของ โพลิโนเมียล ที่เป็นเศษในสมการ (3.1) คือ m แปรค่าจาก 1 ถึง 3 ในขณะที่อันดับของ โพลิโนเมียล ที่เป็นส่วนคือ n=4 และมีค่า กรุ๊ปดีเลย์ $\tau = 5$ วินาที เมื่อ $\beta_0 = 0$ เรเดียนต่อวินาที เมื่อแทนค่าที่กำหนดลงใน แมทริกส์ ที่ได้ และทำการหาค่าสัมประสิทธิ์โดยวิธีของ Guass-Jordan elimination จนได้ค่าของสัมประสิทธิ์ a_i และ b_i ออกมาแล้วนำไปหาค่าผลตอบสนองของขนาด โดยมีสมการดังนี้

---

* ใน z Plane จะพิจารณาผลตอบสนองตามแกนของความถี่เชิงมุม ω โดย ω มีค่าระหว่าง 0 ถึง π และตามลักษณะของ banwidth ของสัญญาณที่พิจารณาตาม energy density spectrum [14] จะแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

- Low frequency signal จะมี power density spectrum ที่ $\omega = 0$ เรเดียน
- Hign frequency signal จะมี power density spectrum ที่ $\omega = \pi$ เรเดียน
- Bandpass signal จะมี power density spectrum ที่ $0<\omega<\pi$ เรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\underline{A} = \overset{\longleftarrow \; m+n+1 \; \longrightarrow}{\begin{bmatrix}
1 & \cos\omega_0 & \cos 2\omega_0 & \cdots & \cos m\omega_0 & -\cos(\omega_0+\beta_0) & -\cos(2\omega_0+\beta_0) & \cdots & -\cos(n\omega_0+\beta_0) \\
0 & \sin\omega_0 & \sin 2\omega_0 & \cdots & \sin m\omega_0 & -\sin(\omega_0+\beta_0) & -\sin(2\omega_0+\beta_0) & \cdots & -\sin(n\omega_0+\beta_0) \\
0 & \cos\omega_0 & 2\cos 2\omega_0 & \cdots & m\cos m\omega_0 & -(1+\tau)\cos(\omega_0+\beta_0) & -(2+\tau)\cos(2\omega_0+\beta_0) & \cdots & -(n+\tau)\cos(n\omega_0+\beta_0) \\
0 & \sin\omega_0 & 2\sin 2\omega_0 & \cdots & m\sin m\omega_0 & -(1+\tau)\sin(\omega_0+\beta_0) & -(2+\tau)\sin(2\omega_0+\beta_0) & \cdots & -(n+\tau)\sin(n\omega_0+\beta_0) \\
0 & \cos\omega_0 & 2^2\cos 2\omega_0 & \cdots & m^2\cos m\omega_0 & -(1+\tau)^2\cos(\omega_0+\beta_0) & -(2+\tau)^2\cos(2\omega_0+\beta_0) & \cdots & -(n+\tau)^2\cos(n\omega_0+\beta_0) \\
0 & \sin\omega_0 & 2^2\sin 2\omega_0 & \cdots & m^2\sin m\omega_0 & -(1+\tau)^2\sin(\omega_0+\beta_0) & -(2+\tau)^2\sin(2\omega_0+\beta_0) & \cdots & -(n+\tau)^2\sin(n\omega_0+\beta_0) \\
0 & \cos\omega_0 & 2^3\cos 2\omega_0 & \cdots & m^3\cos m\omega_0 & -(1+\tau)^3\cos(\omega_0+\beta_0) & -(2+\tau)^3\cos(2\omega_0+\beta_0) & \cdots & -(n+\tau)^3\cos(n\omega_0+\beta_0) \\
0 & \sin\omega_0 & 2^3\sin 2\omega_0 & \cdots & m^3\sin m\omega_0 & -(1+\tau)^3\sin(\omega_0+\beta_0) & -(2+\tau)^3\sin(2\omega_0+\beta_0) & \cdots & -(n+\tau)^3\sin(n\omega_0+\beta_0) \\
\cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\
\cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\
\cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot
\end{bmatrix}} \; m+n+1$$

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_m \\ b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{bmatrix} \; m+n+1 \qquad \underline{C} = \begin{bmatrix} \cos\beta_0 \\ \sin\beta_0 \\ \tau\cos\beta_0 \\ \tau\sin\beta_0 \\ \tau^2\cos\beta_0 \\ \tau^2\sin\beta_0 \\ \tau^3\cos\beta_0 \\ \tau^3\sin\beta_0 \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \; m+n+1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กองห้องสมุดกลาง

$$\left|H(z)\right| = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=0}^{m} a_i\cos(i\omega)\right)^2 + \left(\sum_{i=0}^{m} a_i\sin(i\omega)\right)^2}{\left(\sum_{i=0}^{m} b_i\cos(i\omega)\right)^2 + \left(\sum_{i=0}^{m} b_i\sin(i\omega)\right)^2}} \qquad (3.8)$$

แทนค่าสัมประสิทธ์ที่ได้ในสมการที่ (3.8) โดยจะใช้ค่าที่ได้จาก $\omega = \pi$ เรเดียน/วินาที เป็นค่านอร์มอลไลซ์ขนาดของผลตอบสนองที่ ω ค่าใดๆ โดยจะทำการแปรค่า ω จาก 0 ถึง π เป็นจำนวณ 200 ค่า แล้วหาขนาดของผลตอบสนอง เมื่อนำผลตอบสนองต่างๆ มาพล็อต (plol) ก็จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 3.1

ในการหาค่าผลตอบสนองของ กรุ๊พดีเลย์ สามารถทำได้ดังต่อไปนี้

กรุ๊พดีเลย์ ของเศษ ของทรานส์เฟอร์ฟังค์ชั่น $H(z) = \tau_a$ โดย

$$\tau_a = -\frac{d}{d\omega} \tan^{-1} \frac{\sum_{i=0}^{m} a_i \sin i\omega}{\sum_{i=0}^{m} a_i \cos i\omega}$$

$$= -\frac{\left[\sum_{i=0}^{m} i a_i \cos i\omega\right]\left[\sum_{i=0}^{m} a_i \cos i\omega\right] + \left[\sum_{i=0}^{m} i a_i \sin i\omega\right]\left[\sum_{i=0}^{m} a_i \sin i\omega\right]}{\left[\sum_{i=0}^{m} a_i \cos i\omega\right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{m} a_i \sin i\omega\right]^2} \qquad (3.9)$$

และกรุ๊พดีเลย์ ของส่วน ของทรานส์เฟอร์ฟังค์ชั่น $H(z) = \tau_b$ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
15349

$$\tau_b = -\frac{d}{d\omega}\tan^{-1}\frac{\sum_{i=0}^{m} b_i \sin i\omega}{\sum_{i=0}^{m} b_i \cos i\omega}$$

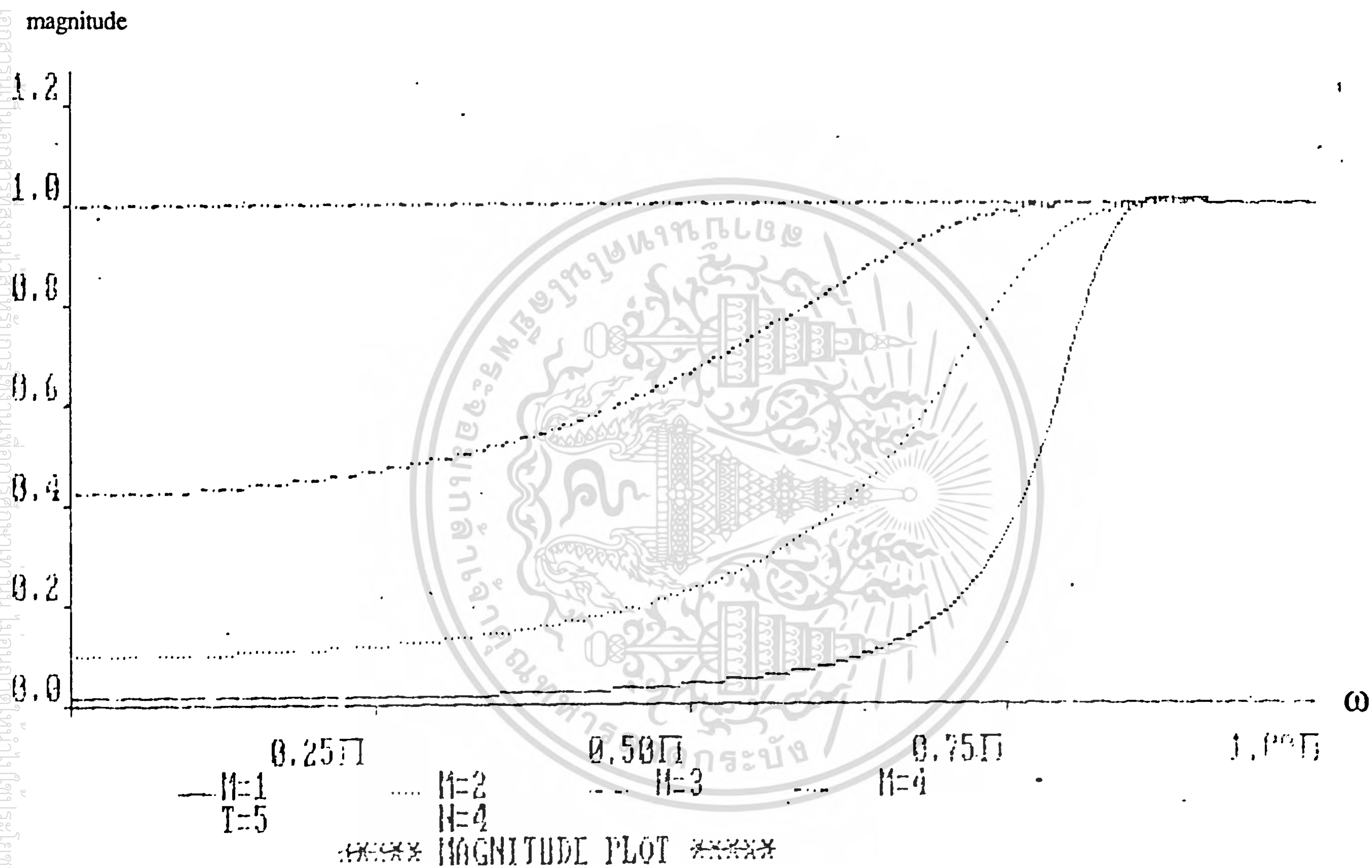
$$= -\frac{\left[\sum_{i=0}^{n} i b_i \cos i\omega\right]\left[\sum_{i=0}^{n} b_i \cos i\omega\right] + \left[\sum_{i=0}^{n} i b_i \sin i\omega\right]\left[\sum_{i=0}^{n} b_i \sin i\omega\right]}{\left[\sum_{i=0}^{n} b_i \cos i\omega\right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{n} b_i \sin i\omega\right]^2} \qquad (3.10)$$

จะได้กรุ๊ฟดีเลย์ของวงจรคือ

$$\tau = \tau_a + \tau_b \qquad (3.11)$$

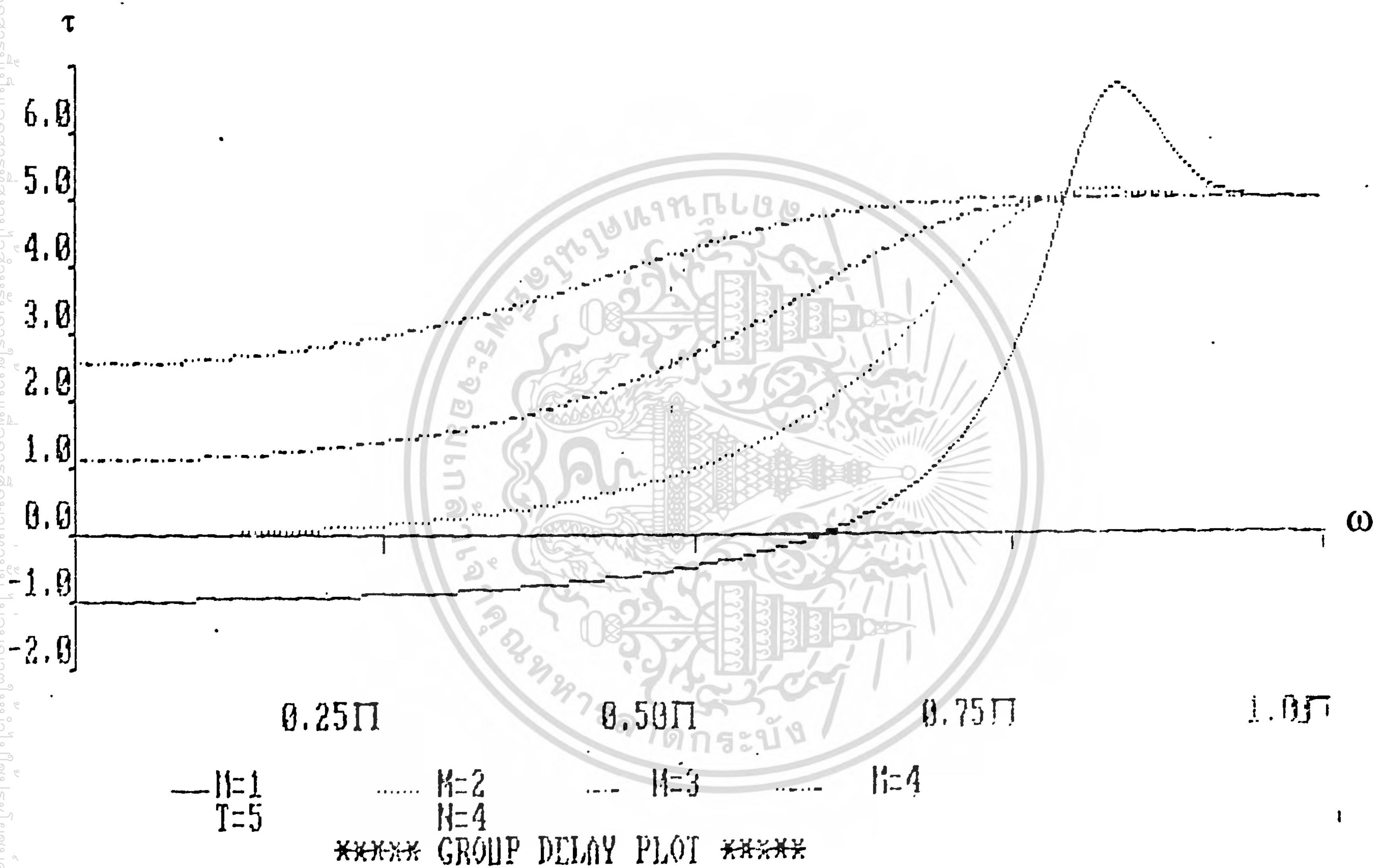
แทนค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้ในสมการที่ (3.9) และ (3.10) โดยแปรค่า จาก 0 ถึง เป็นจำนวน 200 ค่า แล้วใช้สมการที่ (3.11) ทำการหาค่า กรุ๊ฟดีเลย์ ของวงจร เมื่อนำค่าที่หาได้มาทำการพล็อต ดูผลตอบสนอง จะได้ดังรูปที่ (3.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.1 ผลตอบสนองขนาดของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เมื่อ τ = 5 วินาที n = 4 และ m แปรค่า จาก 1 ถึง 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.2 ผลตอบสนองกรุ๊ปดีเลย์ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน เมื่อ τ = 5 วินาที n = 4
และ m แปรค่า จาก 1 ถึง 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 สรุป

จากผลลัพท์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 และ 3.2 จะพบว่าเทคนิคการออกแบบ วงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟชนิดความถี่สูงผ่าน ที่ได้แสดงมา ให้ผลตอบสนองทั้งขนาด และกรุ๊ฟดีเลย์ ที่ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน ในบริเวณผ่านความถี่ที่กำหนด ซึ่งในกรณีนี้ก็คือ π เรเดียน นั่นเอง

เทคนิคในการหาค่า สัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่ในบทนี้ ได้ใช้วิธีลดสัมประสิทธิ์ของเก๊าส์ ในการหาค่า a_i และ b_i ซึ่งจะมีข้อเสีย ในกรณีที่วงจรกรองความถี่มีอันดับสูงๆ จะทำให้ค่าผิดพลาดจากการคำนวณมีมาก แต่ข้อเสียดังกล่าวจะสามารถแก้ไขได้ในบทที่ 4

สำหรับตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ ของวงจรกรองความถี่ และผลตอบสนองของ ขนาด และ กรุ๊ฟดีเลย์ ตลอดจนโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลตอบสนอง ของตัวอย่างที่ได้ในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก และ ข ซึ่งโปรแกรมที่แสดงไว้นั้นสามารถนำไปใช้กับค่า m และ n ใดๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้สูตรสำเร็จในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟชนิดความถี่สูงผ่าน

Application of Close-form formula to calculate filter coefficients of a Highpass Recursive Digital Filter

4.1 บทนำ

เทคนิคการออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟ ชนิดความถี่สูงผ่านที่ให้ผลตอบสนองทั้งขนาดและกรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน ในบทที่ 3 นั้น จะพบว่าที่อันดับที่สูงขึ้นของวงจร ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จะมีค่าที่ผิดพลาดมากขึ้นและใช้เวลาในการคำนวณมาก เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว ในบทนี้จึงได้นำเสนอการใช้สูตรสำเร็จ (close-form formular) มาทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งจะทำให้ผลลัพธ์ของวงจร มีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบมากขึ้น

4.2 การออกแบบ

จากแมทริกซ์ที่ได้ในบทที่ 3 เมื่อทำการแทนค่า $\omega_0 = \pi$ เรเดียนต่อวินาที และ $\beta_0 = 0$ เรเดียน แล้วจะได้แมทริกซ์ดังนี้

$$
\begin{array}{cc}
 & \overbrace{\hphantom{0 \quad -1^{m+n} \quad 2^{m+n} \quad \ldots \quad m^{m+n}}}^{m+1}\ \overbrace{\hphantom{(1+\tau)^{m+n} \quad -(2+\tau)^{m+n} \quad \ldots \quad (n+\tau)^{m+n}}}^{n} \\
A = & \left[\begin{array}{ccccc|cccc}
1 & 1 & 1 & \ldots & 1 & 1 & 1 & \ldots & 1 \\
0 & 1 & 2 & \ldots & m & (1+\tau) & -(2+\tau) & \ldots & (n+\tau) \\
0 & -1^2 & 2^2 & \ldots & m^2 & (1+\tau)^2 & -(2+\tau)^2 & \ldots & (n+\tau)^2 \\
0 & -1^3 & 2^3 & \ldots & m^3 & (1+\tau)^3 & -(2+\tau)^3 & \ldots & (n+\tau)^3 \\
\cdot & \cdot & \cdot & \ldots & \cdot & \cdot & \cdot & \ldots & \cdot \\
\cdot & \cdot & \cdot & \ldots & \cdot & \cdot & \cdot & \ldots & \cdot \\
0 & -1^{m+n} & 2^{m+n} & \ldots & m^{m+n} & (1+\tau)^{m+n} & -(2+\tau)^{m+n} & \ldots & (n+\tau)^{m+n}
\end{array}\right] \updownarrow m+n+1
\end{array}
$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$
\mathbf{x} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_m \\ b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{bmatrix} \; m+n+1 \qquad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 \\ \tau \\ \tau^2 \\ \tau^3 \\ \tau^4 \\ \tau^5 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \tau^{m+n} \end{bmatrix} \; m+n+1
$$

จะเห็นว่า $\underline{A}$ อยู่ในรูปของแวนเดอร์มอนแมทริกซ์ ซึ่งสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ได้โดยการใช้กฎของแครมเมอร์ (Cramer's Rule) โดยดีเทอร์มิแนนท์หลักของ $\underline{A}$ จะเขียนได้เป็น

$$
\Delta = |A| = (-1)^p
\begin{array}{c}
\overbrace{\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad}^{m+1} \quad \overbrace{\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad}^{n} \\
\left|\begin{array}{ccccc|cccc}
1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & & \cdots & 1 \\
0 & 1 & 2 & \cdots & m & (1+\tau) & (2+\tau) & \cdots & (n+\tau) \\
0 & 1^2 & 2^2 & \cdots & m^2 & (1+\tau)^2 & (2+\tau)^2 & \cdots & (n+\tau)^2 \\
0 & 1^3 & 2^3 & \cdots & m^3 & (1+\tau)^3 & (2+\tau) & \cdots & (n+\tau)^3 \\
\cdot & \cdot & \cdot & \cdots & & \cdot & \cdot & \cdots & \\
\cdot & \cdot & \cdot & \cdots & & \cdot & \cdot & \cdots & \\
0 & 1^{m+n} & 2^{m+n} & \cdots & m^{m+n} & (1+\tau)^{m+n} & (2+\tau)^{m+n} & \cdots & (n+\tau)^{m+n}
\end{array}\right|
\end{array}
\; m+n+1
$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากดีเทอร์มิแนนท์ที่ได้อยู่ในรูป แวนเดอร์มองดีเทอร์มิแนนท์ จึงใช้วิธีการลดรูปแบบที่แสดงไว้ใน บทที่ 2 จนสามารถเขียนออกมาอยู่ในรูปของสมการได้ ดังนี้

$$\Delta = (-1)^p \Big[\prod_{m \geq i > j \geq 0} (i-j) \Big] \Big[\prod_{j=0}^{m} \prod_{i=1}^{n} (i+\tau-j) \Big] \Big[\prod_{n \geq i > j \geq 1} (i-j) \Big] \qquad (4.1)$$

ซึ่ง p จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า m และ n ดังนี้

m	n	p
คู่	คี่	$(m+n)/2$
คี่	คี่	$(m+n)/2$
คู่	คู่	$(m+n-1)/2$
คี่	คู่	$(m+n+1)/2$

และดีเทอร์มิแนนท์ย่อยในหลักที่ 1 ถึง m+1 จะแสดงได้เป็น

$$\begin{array}{ccc} & \begin{array}{cc} \longleftarrow \quad m+1 \quad \longrightarrow & \longleftarrow \quad n \quad \longrightarrow \end{array} & \\ \Delta_k = (-1)^q & \left|\begin{array}{cccccc|ccc} 1 & 1 & \ldots 1 & 1 & 1 & \ldots 1 & 1 & 1 & \ldots 1 \\ 0 & 1 & \ldots (k-1) & \tau & (k+1) & \ldots m & (1+\tau) & (2+\tau) & \ldots (n+\tau) \\ 0 & 1^2 & \ldots (k-1)^2 & \tau^2 & (k+1)^2 & \ldots m^2 & (1+\tau)^2 & (2+\tau)^2 & \ldots (n+\tau)^2 \\ 0 & 1^3 & \ldots (k-1)^3 & \tau^3 & (k+1)^3 & \ldots m^3 & (1+\tau)^3 & (2+\tau)^3 & \ldots (n+\tau)^3 \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdots \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdots \\ 0 & 1^{m+n} & \ldots (k-1)^{m+n} & \tau^{m+n} & (k+1)^{m+n} & \ldots m^{m+n} & (1+\tau)^{m+n} & (2+\tau)^{m+n} & \ldots (n+\tau)^{m+n} \end{array}\right| & \updownarrow m+n+1 \end{array}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่า ดีเทอร์มิแนนท์ที่ได้ ก็อยู่ในรูป แวนเดอร์มองดีเทอร์มิแนนท์ ด้วย จึงใช้วิธีเช่นที่กล่าวไว้ใน บทที่ 2 ทำการจัดรูปของ ดีเทอร์มิแนนท์ใหม่ จะสามารถเขียนสมการได้ เป็น

$$\Delta_k = (-1)^q \Big[\prod_{\substack{m\geq i,\ i>j,\ j\geq 0 \\ i,j\neq k}} (i-j) \Big]\Big[\prod_{m\geq i,\ i>k} (i-\tau) \Big]\Big[\prod_{k>j,\ j\geq 0} (\tau-j) \Big]\Big[\prod_{\substack{j=0 \\ j\neq k}}^{m} \prod_{i=1}^{n} (i+\tau-j) \Big]$$

$$\Big[\prod_{i=1}^{n} (i) \Big]\Big[\prod_{n\geq i,\ i>j,\ j\geq 1} (i-j) \Big] \qquad (4.2)$$

เมื่อ $0<k<m$

โดยที่ $q = p$ เมื่อ k เป็นเลขคู่

$q = p-1$ เมื่อ k เป็นเลขคี่

และดีเทอร์มิแนนท์ย่อยในหลักที่ $m+2$ ถึง n จะแสดงได้เป็น

$$\Delta_h = (-1)^r \begin{array}{c} \overleftarrow{\quad m+1 \quad} \overrightarrow{} \qquad\qquad \overleftarrow{\qquad\qquad n \qquad\qquad}\overrightarrow{} \\ \left|\begin{array}{ccccc|ccccc} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 & \cdots\ 1 & 1 & 1 & \cdots\ 1 \\ 0 & 1 & 2 & \cdots & m & (1+\tau) & \cdots\ (h-1+\tau) & \tau & (h+1+\tau) & \cdots\ (n+\tau) \\ 0 & 1^2 & 2^2 & \cdots & m^2 & (1+\tau)^2 & \cdots\ (h-1+\tau)^2 & \tau^2 & (h+1+\tau)^2 & \cdots\ (n+\tau)^2 \\ 0 & 1^3 & 2^3 & \cdots & m^3 & (1+\tau)^3 & \cdots\ (h-1+\tau)^3 & \tau^3 & (h+1+\tau)^3 & \cdots\ (n+\tau)^3 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & & \cdot & \cdot\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot\ \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & & \cdot & \cdot\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot\ \cdot \\ 0 & 1^{m+n} & 2^{m+n} & \cdots & m^{m+n} & (1+\tau)^{m+n} & \cdots\ (h-1+\tau)^{m+n} & \tau^{m+n} & (h+1+\tau)^{m+n} & \cdots\ (n+\tau)^{m+n} \end{array}\right| \end{array} \updownarrow m+n+1$$

จะพบว่า ดีเทอร์มิแนนท์ ที่ได้ ก็อยู่ในรูปของ แวนเดอร์มองดีเทอร์มิแนนท์ จึงใช้วิธีการลดรูปดังที่แสดงไว้ในบทที่ 2 จนสามารถเขียนออกมาอยู่ในรูปของสมการได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta_h = (-1)^r \Big[\prod_{m \geq i > j \geq 0} (i-j) \Big] \Big[\prod_{\substack{j=0}}^{m} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq h}}^{n} (i+\tau-j) \Big] \Big[\prod_{j=0}^{m} (\tau-j) \Big] \Big[\prod_{\substack{n \geq i > j \geq 1 \\ i,j \neq h}} (i-j) \Big]$$

$$\Big[\prod_{n \geq i > h} (i) \Big] \Big[\prod_{h > j \geq 1} (-j) \Big] \tag{4.3}$$

เมื่อ $1<h<n$

โดยที่ $r = p-1$ เมื่อ h เป็นเลขคู่

$r = p$ เมื่อ h เป็นเลขคี่

จะได้สัมประสิทธิ์ a_k และ b_h โดยกฎของ แครมเมอร์ ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังนี้

$$a_k = \frac{\Delta_k}{\Delta}$$

$$= (-1)^s \frac{\Big[\prod_{m \geq i > k} (i-\tau) \Big] \Big[\prod_{k > j \geq 0} (\tau-j) \Big] \Big[\prod_{i=1}^{n} (i) \Big]}{k! \Big[\prod_{m \geq i > k} (i-k) \Big] \Big[\prod_{i=1}^{n} (i+\tau-k) \Big]} , \quad 0 \leq k \leq m \tag{4.4}$$

โดยที่ $s = 0$ เมื่อ k เป็นเลขคู่

$s = -1$ เมื่อ k เป็นเลขคี่

และจะได้ค่าของ สัมประสิทธิ์ b_h เป็น

$$b_h = \frac{\Delta_h}{\Delta}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_h = (-1)^v \frac{\left[\prod_{j=0}^{m} (\tau-j)\right]\left[\prod_{n\geq i,\, i>h} (i)\right]\left[\prod_{h>j,\, j\geq 1} (-j)\right]}{(h-1)!\left[\prod_{j=0}^{m} (h+\tau-j)\right]\left[\prod_{n\geq i,\, i>h} (i-h)\right]} \quad , 1\leq h\leq n \qquad (4.5)$$

โดยที่ $v = -1$ เมื่อ h เป็นเลขคู่

$= 0$ เมื่อ h เป็นเลขคี่

4.3 ตัวอย่างการออกแบบ

เมื่อใช้สูตรสำเร็จในสมการที่ (4.4) และ (4.5) เพื่อทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่ แล้วนำค่าที่ได้มาใช้ในการหาผลตอบสนองของ ขนาด (สมการ 3.8) และ กรุ๊ฟดีเลย์ (สมการ 3.9, 3.10, 3.11) เทียบกับแบบที่ใช้ Guass-Jordan elimination ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ ในบทที่ 3 ในที่นี้ จะใช้ที่ค่า $\tau = 8$ วินาที ค่า $n = 10$ ส่วนค่า m แปรค่าเป็น 4, 5, 6, 7 และที่ $m=4$ จะมีค่าสัมประสิทธิ์เปรียบเทียบดังนี้

สัมประสิทธิ์	ค่าจากการใช้สูตรสำเร็จ	ค่าจากวิธีของ Guass
a_0	7.99×10^{-4}	1665.4
a_1	8.22X10-3	3789.1
a_2	3.49×10^{-2}	2672.3
a_3	7.46×10^{-2}	641.4
a_4	6.99×10^{-2}	93.5
b_0	1	1
b_1	4.4	-4.8×10^{-2}
b_2	10.0	-0.6
b_3	14.5	-.285
b_4	14.8	-2.36×10^{-2}
b_5	10.9	-2.03×10^{-2}
b_6	5.87	1.35×10^{-2}
b_7	2.23	5.99×10^{-3}
b_8	0.5	6.3×10^{-4}
b_9	9.05×10^{-2}	-4.88×10^{-4}
b_{10}	6.54×10^{-3}	-1.25×10^{-4}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีค่าตัวอย่างที่ ω ค่าต่างๆ เป็น

ω	mag(close-from)	mag(Guass)	τ (close-form)	τ (Guass)
0.1	3.20×10^{-3}	13129.09	-0.55	3.05×10^{-3}
0.2	4.28×10^{-3}	6128.48	-0.35	4.65×10^{-3}
0.3	7.15×10^{-3}	3821.74	1.77×10^{-2}	8.17×10^{-3}
0.4	1.59×10^{-2}	2732.39	0.67	1.95×10^{-2}
0.5	5.4×10^{-2}	2068.12	1.91	7.46×10^{-2}
0.6	0.45	1560.96	6.51	0.89
0.7	1.08	1094.32	7.99	1.35
0.8	0.99	604.06	7.99	0.99
0.9	0.99	174.69	7.99	1.00
1.0	1.00	1.00	7.999	7.999

ผลตอบสนองที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ส่วนรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเป็นรูปผลตอบสนองที่ได้จากการใช้ Guass-Jordan elimination ในการหาค่าสัมประสิทธิ์

4.4 สรุป

จากผลเปรียบเทียบที่ได้ จะพบว่า การใช้วิธีการของ Guass-Jordan elimination หาค่าสัมประสิทธิ์ในบทที่ 3 จะให้ผลตอบสนองที่ผิดไปจากการออกแบบอย่างมาก ซึ่งผลของความผิดพลาดดังกล่าวน่าจะอยู่ในขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรนั่นเอง ดังผลเปรียบเทียบตามตารางข้างต้น แต่ถ้าลองพิจารณาสมาชิกของ แมทริกซ์ ที่ m=4, n=10, τ=8 ดังแสดงไว้ในหน้าที่ 29-31 จะพบว่า ค่าของสมาชิกบางตัวในแมทริกซ์มีค่าที่สูงมากเกินกว่าค่าดิจิตของ ตัวแปรจะรับได้โดยต้องแสดงอยู่ในรูปยกกำลัง ซึ่งจุดนี้น่าจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความผิดพลาดเมื่อใช้วิธีของ Guass-Jordan elimination หาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรนั้น

ข้อผิดพลาดดังกล่าวอาจจะสามารถแก้ไขได้โดยการคำนวณด้วยเครื่อง คอมพิวเตอร์ ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอันจะสามารถให้รายละเอียดของตัวแปรได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้วิธีสูตรสำเร็จก็น่าจะเป็นวิธีที่มีประโยชน์ควรแก่การประยุกต์ใช้ในกรณีของวงจรที่มีค่าอันดับมากขึ้น

แม้ว่าวงจรที่ได้จากการออกแบบที่แสดงมา จะให้ผลตอบสนองที่ราบเรียบที่สุดทั้ง ขนาด และ กรุ๊ฟดีเลย์ แล้วก็ตาม แต่การควบคุมผลตอบสนองเหล่านั้นก็เป็นสิ่งที่จำเป็นเช่นกัน ดังที่ในบทต่อไปจะได้กล่าวถึง วิธีบางวิธีที่จะนำมาเพื่อการควบคุมผลการตอบสนองนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
a( 1 , 1 )= 1
a( 3 , 1 )= 0
a( 5 , 1 )= 0
a( 7 , 1 )= 0
a( 9 , 1 )= 0
a( 11 , 1 )= 0
a( 13 , 1 )= 0
a( 15 , 1 )= 0
a( 1 , 2 )=-1
a( 3 , 2 )=-1
a( 5 , 2 )=-1
a( 7 , 2 )=-1
a( 9 , 2 )=-1
a( 11 , 2 )=-1
a( 13 , 2 )=-1
a( 15 , 2 )=-1
a( 1 , 3 )= 1
a( 3 , 3 )= 4
a( 5 , 3 )= 16
a( 7 , 3 )= 64
a( 9 , 3 )= 256
a( 11 , 3 )= 1024
a( 13 , 3 )= 4096
a( 15 , 3 )= 16384
a( 1 , 4 )=-1
a( 3 , 4 )=-9
a( 5 , 4 )=-81
a( 7 , 4 )=-729
a( 9 , 4 )=-6561
a( 11 , 4 )=-59049
a( 13 , 4 )=-531441
a( 15 , 4 )=-4782969
a( 1 , 5 )= 1
a( 3 , 5 )= 16
a( 5 , 5 )= 256
a( 7 , 5 )= 4096
a( 9 , 5 )= 65536
a( 11 , 5 )= 1048576
a( 13 , 5 )= 16777216
a( 15 , 5 )= 268435456
a( 1 , 6 )= 1
a( 3 , 6 )= 81
a( 5 , 6 )= 6561
a( 7 , 6 )= 531441
a( 9 , 6 )= 43046720
a( 11 , 6 )= 3486784512
a( 13 , 6 )= 282429521920
a( 15 , 6 )= 22876793077760

a( 2 , 1 )= 0
a( 4 , 1 )= 0
a( 6 , 1 )= 0
a( 8 , 1 )= 0
a( 10 , 1 )= 0
a( 12 , 1 )= 0
a( 14 , 1 )= 0

a( 2 , 2 )=-1
a( 4 , 2 )=-1
a( 6 , 2 )=-1
a( 8 , 2 )=-1
a( 10 , 2 )=-1
a( 12 , 2 )=-1
a( 14 , 2 )=-1

a( 2 , 3 )= 2
a( 4 , 3 )= 8
a( 6 , 3 )= 32
a( 8 , 3 )= 128
a( 10 , 3 )= 512
a( 12 , 3 )= 2048
a( 14 , 3 )= 8192

a( 2 , 4 )=-3
a( 4 , 4 )=-27
a( 6 , 4 )=-243
a( 8 , 4 )=-2187
a( 10 , 4 )=-19683
a( 12 , 4 )=-177147
a( 14 , 4 )=-1594323

a( 2 , 5 )= 4
a( 4 , 5 )= 64
a( 6 , 5 )= 1024
a( 8 , 5 )= 16384
a( 10 , 5 )= 262144
a( 12 , 5 )= 4194304
a( 14 , 5 )= 67108864

a( 2 , 6 )= 9
a( 4 , 6 )= 729
a( 6 , 6 )= 59049
a( 8 , 6 )= 4782969
a( 10 , 6 )= 387420480
a( 12 , 6 )= 31381059584
a( 14 , 6 )= 2541865926656
```

ค่าของสมาชิกในแมทริกส์ที่ m=4, n=10, r=8 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a(1 , 7)=-1
a(2 , 7)=-10
a(3 , 7)=-100
a(4 , 7)=-1000
a(5 , 7)=-10000
a(6 , 7)=-100000
a(7 , 7)=-1000000
a(8 , 7)=-10000000
a(9 , 7)=-100000000
a(10 , 7)=-1000000000
a(11 , 7)=-10000000000
a(12 , 7)=-99999997952
a(13 , 7)=-999999995904
a(14 , 7)=-9999999827968
a(15 , 7)=-100000000376832
a(1 , 8)= 1
a(2 , 8)= 11
a(3 , 8)= 121
a(4 , 8)= 1331
a(5 , 8)= 14641
a(6 , 8)= 161051
a(7 , 8)= 1771561
a(8 , 8)= 19487172
a(9 , 8)= 214358880
a(10 , 8)= 2357947648
a(11 , 8)= 25937424384
a(12 , 8)= 285311664128
a(13 , 8)= 3138428338176
a(14 , 8)= 34522712244224
a(15 , 8)= 379749834686464
a(1 , 9)=-1
a(2 , 9)=-12
a(3 , 9)=-144
a(4 , 9)=-1728
a(5 , 9)=-20736
a(6 , 9)=-248832
a(7 , 9)=-2985984
a(8 , 9)=-35831808
a(9 , 9)=-429981696
a(10 , 9)=-5159780352
a(11 , 9)=-61917364224
a(12 , 9)=-743008370688
a(13 , 9)=-8916100448256
a(14 , 9)=-106993205379072
a(15 , 9)=-1283918464548864
a(1 , 10)= 1
a(2 , 10)= 13
a(3 , 10)= 169
a(4 , 10)= 2197
a(5 , 10)= 28561
a(6 , 10)= 371293
a(7 , 10)= 4826809
a(8 , 10)= 62748516
a(9 , 10)= 815730752
a(10 , 10)= 10604498944
a(11 , 10)= 137858498560
a(12 , 10)= 1792160432128
a(13 , 10)= 23298085748736
a(14 , 10)= 302875121025024
a(15 , 10)= 3937376371998720
a(1 , 11)=-1
a(2 , 11)=-14
a(3 , 11)=-196
a(4 , 11)=-2744
a(5 , 11)=-38416
a(6 , 11)=-537824
a(7 , 11)=-7529536
a(8 , 11)=-105413504
a(9 , 11)=-1475789056
a(10 , 11)=-20661047296
a(11 , 11)=-289254670336
a(12 , 11)=-4049565122560
a(13 , 11)=-56693912240128
a(14 , 11)=-793714788139008
a(15 , 11)=-1.11120070339461E+016
a(1 , 12)= 1
a(2 , 12)= 15
a(3 , 12)= 225
a(4 , 12)= 3375
a(5 , 12)= 50625
a(6 , 12)= 759375
a(7 , 12)= 11390625
a(8 , 12)= 170859376
a(9 , 12)= 2562890752
a(10 , 12)= 38443360256
a(11 , 12)= 576650412032
a(12 , 12)= 8649755852800
a(13 , 12)= 129746339889152
a(14 , 12)= 1946195039617024
a(15 , 12)= 2.91929270706503E+016

ค่าของสมาชิกในแมทริกส์ที่ m=4, n=10, r=8 (ต่อ)

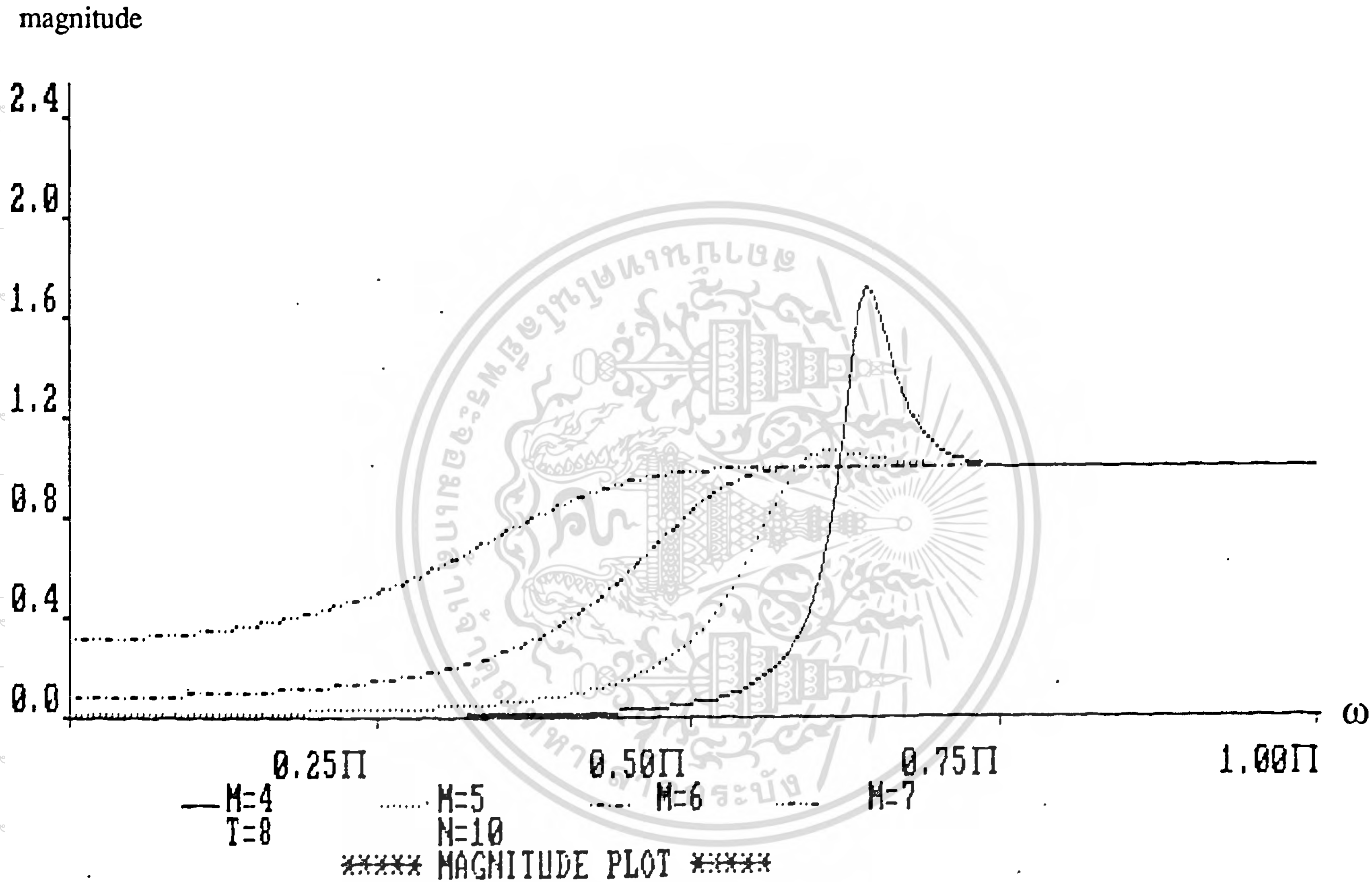
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
a( 1 , 13 )=-1                          a( 2 , 13 )=-16
a( 3 , 13 )=-256                        a( 4 , 13 )=-4096
a( 5 , 13 )=-65536                      a( 6 , 13 )=-1048576
a( 7 , 13 )=-16777216                   a( 8 , 13 )=-268435456
a( 9 , 13 )=-4294967296                 a( 10 , 13 )=-68719476736
a( 11 , 13 )=-1099511627776             a( 12 , 13 )=-17592186044416
a( 13 , 13 )=-281474976710656           a( 14 , 13 )=-4503599627370496
a( 15 , 13 )=-7.205759403792794E+016
a( 1 , 14 )= 1                          a( 2 , 14 )= 17
a( 3 , 14 )= 289                        a( 4 , 14 )= 4913
a( 5 , 14 )= 83521                      a( 6 , 14 )= 1419857
a( 7 , 14 )= 24137568                   a( 8 , 14 )= 410338688
a( 9 , 14 )= 6975757312                 a( 10 , 14 )= 118587875328
a( 11 , 14 )= 2015993921536             a( 12 , 14 )= 34271896659328
a( 13 , 14 )= 582622245814272           a( 14 , 14 )= 9904577910407168
a( 15 , 14 )= 1.683778191082127E+017
a( 1 , 15 )=-1                          a( 2 , 15 )=-18
a( 3 , 15 )=-324                        a( 4 , 15 )=-5832
a( 5 , 15 )=-104976                     a( 6 , 15 )=-1889568
a( 7 , 15 )=-34012224                   a( 8 , 15 )=-612220032
a( 9 , 15 )=-11019960320                a( 10 , 15 )=-198359285760
a( 11 , 15 )=-3570467340288             a( 12 , 15 )=-64268410028032
a( 13 , 15 )=-1156831321784320          a( 14 , 15 )=-2.082296567116595E+016
a( 15 , 15 )=-3.748133777860198E+017


b( 1 )= 1
b( 2 )= 8
b( 3 )= 64
b( 4 )= 512
b( 5 )= 4096
b( 6 )= 32768
b( 7 )= 262144
b( 8 )= 2097152
b( 9 )= 16777216
b( 10 )= 134217728
b( 11 )= 1073741824
b( 12 )= 8589934592
b( 13 )= 68719476736
b( 14 )= 549755813888
b( 15 )= 4398046511104
```

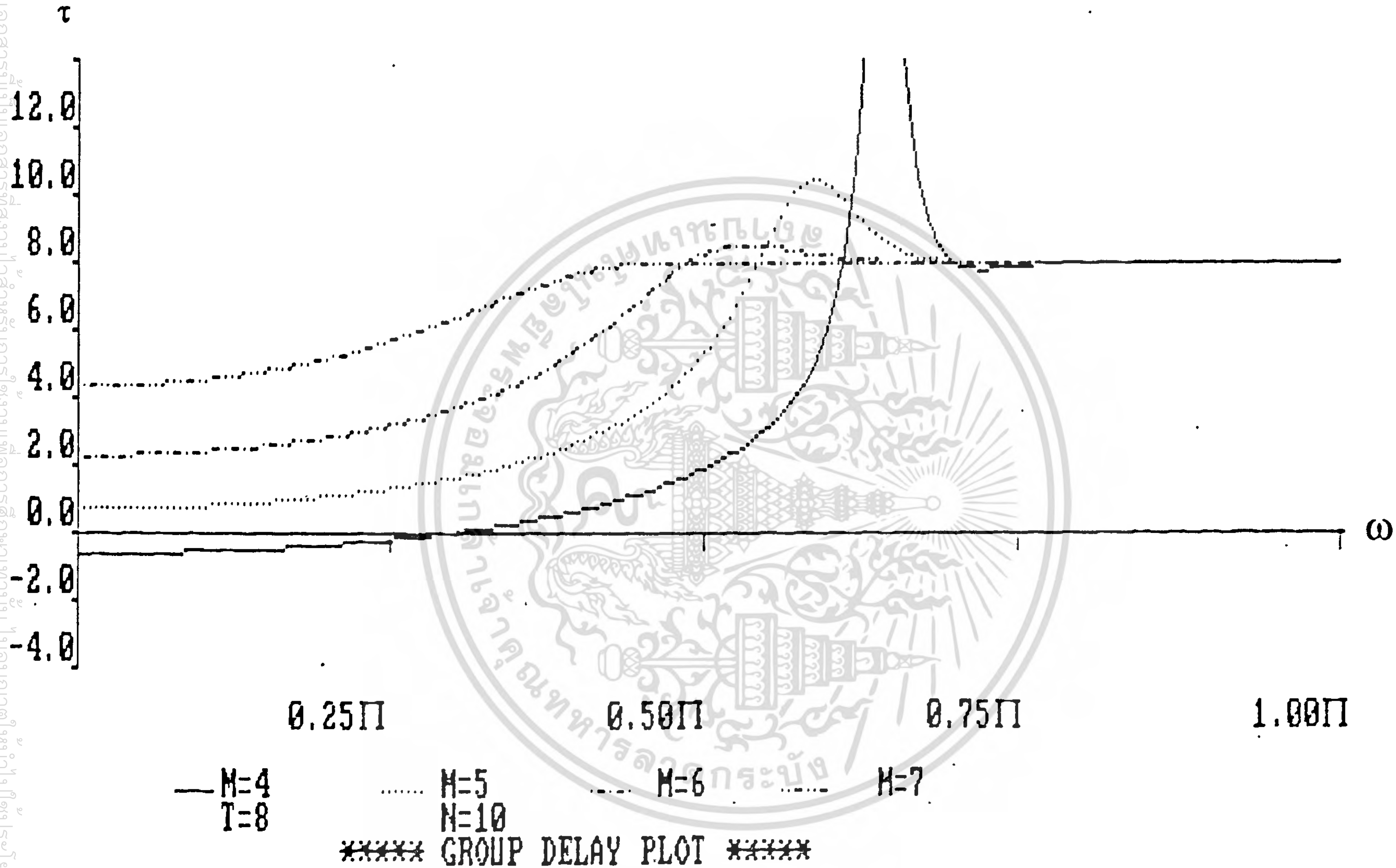
ค่าของสมาชิกในแมทริกส์ที่ m=4, n=10, r=8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



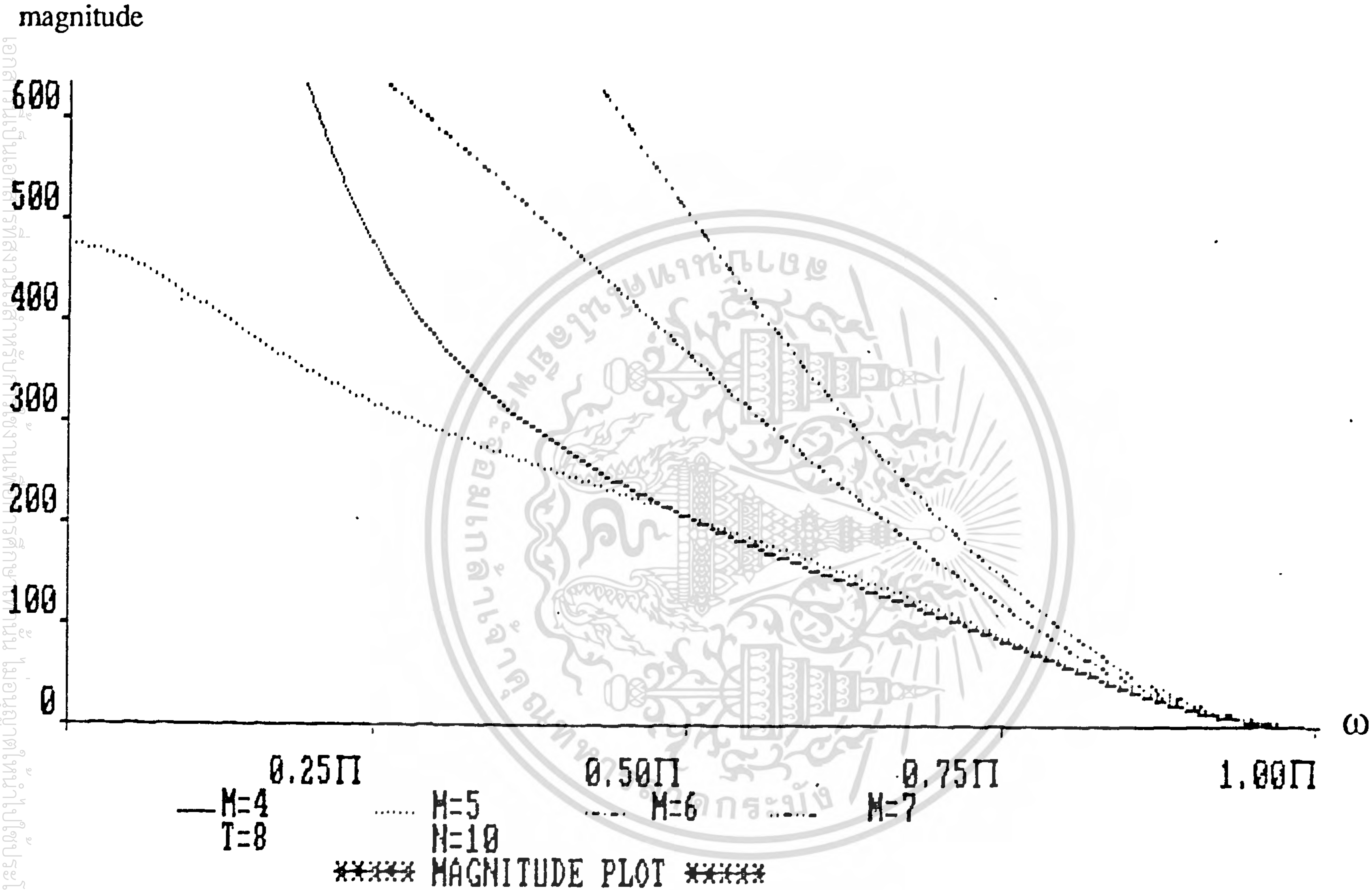
รูป 4.1 ผลตอบสนองขนาดของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน จากการใช้สูตรสำเร็จ
เมื่อ τ = 8 วินาที n = 10 และ m แปรค่า จาก 4 ถึง 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



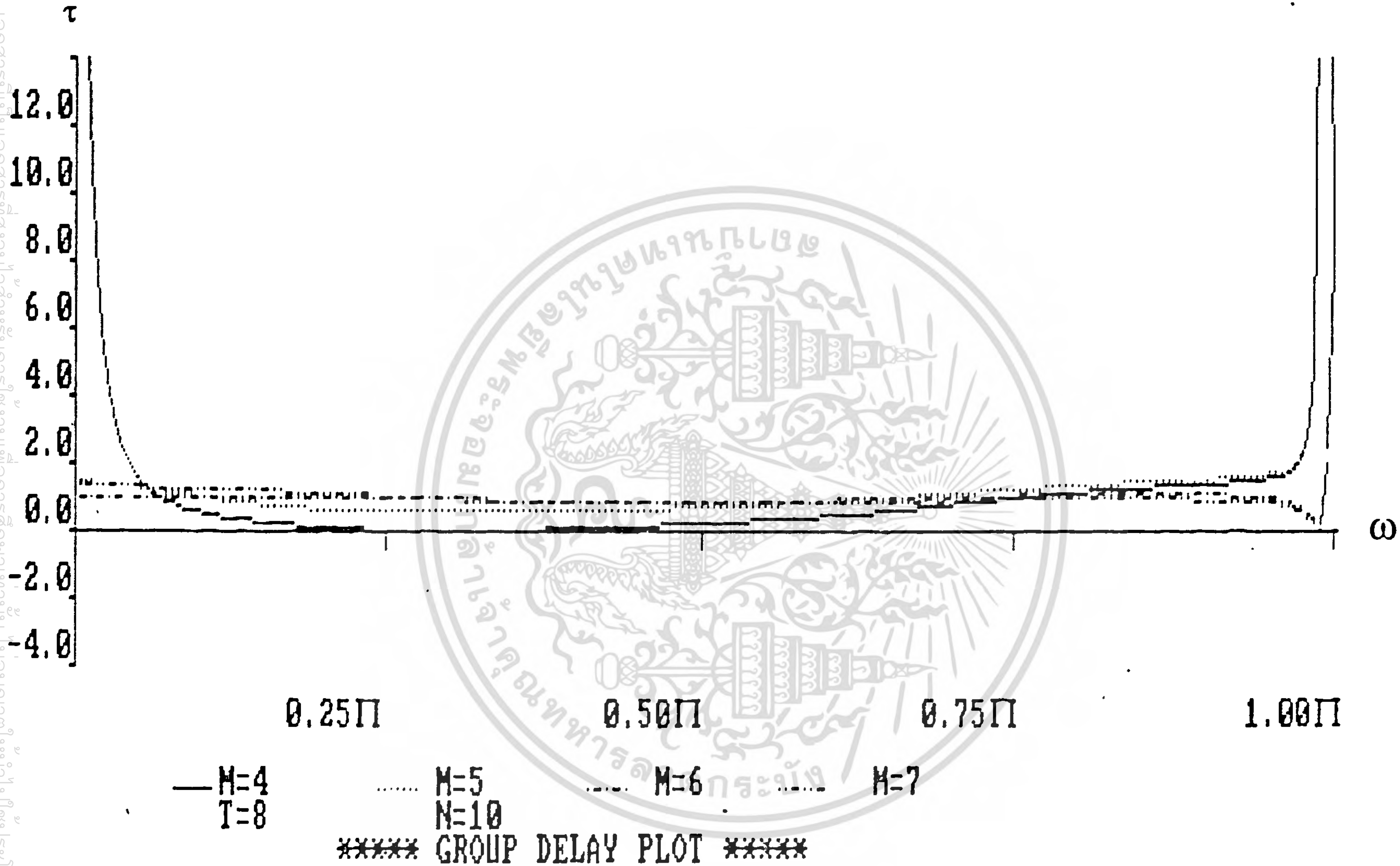
รูป 4.2 ผลตอบสนองกรุ๊ฟดีเลย์ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน จากการใช้สูตรสำเร็จ
เมื่อ $\tau = 8$ วินาที $n = 10$ และ m แปรค่า จาก 4 ถึง 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.3 ผลตอบสนองขนาดของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน จากวิธีของ Guass-Jordan elimination
เมื่อ τ = 8 วินาที n = 10 และ m แปรค่า จาก 4 ถึง 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.4 ผลตอบสนองกรุ๊ปดีเลย์ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน จากวิธีของ Guass-jordan elimination
เมื่อ τ = 8 วินาที n = 10 และ m แปรค่า จาก 4 ถึง 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ ๕

การควบคุมผลการตอบสนองของวงจรกรองความถี่ดิจิตอล ชนิดความถี่สูงผ่าน ที่มีผลตอบสนองขนาดและกรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน

The controllable of the highpass digital filter with simultaneous maximally flat magnitude and group delay

๕.1 บทนำ

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟ ชนิดความถี่สูงผ่าน ที่ให้ผลตอบสนอง ขนาด และ กรุ๊ฟดีเลย์ ราบเรียบที่สุด ดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 นั้น ยังไม่สามารถที่จะควบคุมผลของการตอบสนองนั้นๆ ได้ ในบทนี้จะเสนอวิธีการออกแบบวงจรที่มีทั้งผลตอบสนองที่ราบเรียบ และ สามารถควบคุมการตอบสนองได้ พร้อมกัน โดยวิธีการเพิ่ม พารามิเตอร์ (paramelor) เพื่อทำการควบคุมผลการตอบสนองดังกล่าว

๕.2 การออกแบบ

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟ ที่มีผลตอบสนองทั้ง ขนาด และ กรุ๊ฟดีเลย์ ราบเรียบที่สุด ดังกล่าวไว้ในบทที่ 3 ได้ใช้ ฟังค์ชั่นที่มีคุณสมบัติดังกล่าว มาทำการประมาณค่า ทรานส์ฟอร์ฟังค์ชั่น (transfer function) H(z) ของวงจรนั้น โดยฟังค์ชั่นที่ใช้คือ เอกโพเนนเชียล ฟังค์ชั่น ดังมีสมการดังนี้

$$H(z)\Big|_{z = e^{j\omega T}} = e^{-j[\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau]} \qquad (5.1)$$

และเพื่อการควบคุมผลของการตอบสนองของวงจร จึงทำการเพิ่ม พารามิเตอร์ L เข้าในสมการ โดยกำหนดให้

$$H(z) = \frac{H_L(z)}{H_{L-1}(z)} \qquad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยให้ค่า ทรานส์เฟอร์ฟังค์ชั่น ของ $H_L(z)$ และ $H_{L-1}(z)$ เป็น

$$H_L(z) = \frac{\sum_{i=0}^{m} a_i z^{-i}}{\sum_{i=0}^{n} b_i z^{-i}} \tag{5.3}$$

$$H_{L-1}(z) = \frac{\sum_{i=0}^{m} c_i z^{-i}}{\sum_{i=0}^{n} d_i z^{-i}} \tag{5.4}$$

และเพื่อให้ $H(z)$ ในสมการที่ (5.2) มีค่าตาม ฟังค์ชั่นที่ใช้ในการประมาณค่า จึงกำหนดให้

$$H_L(z) = e^{-jL[\beta_0 + (\omega - \omega_0)\tau]} \tag{5.5}$$

$$H_{L-1}(z) = e^{-j(L-1)[\beta_0 + (\omega - \omega_0)\tau]} \tag{5.6}$$

จากสมการที่ (5.3) และ (5.5) จะได้

$$\frac{\sum_{i=0}^{m} a_i \cos i\omega - j \sum_{i=0}^{m} a_i \sin i\omega}{\sum_{i=0}^{n} b_i \cos i\omega - j \sum_{i=0}^{n} b_i \sin i\omega} = \cos L[\beta_0 + (\omega - \omega_0)\tau] - j\sin L[\beta_0 + (\omega - \omega_0)\tau] \tag{5.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\sum_{i=0}^{m} a_i \cos i\omega - \sum_{i=0}^{n} b_i[\cos i\omega \cos L(\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau) - \sin i\omega \sin L(\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau)]$$

$$-j[\sum_{i=0}^{m} a_i \sin i\omega - \sum_{i=0}^{n} b_i[\sin i\omega \cos L(\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau) + \cos i\omega \sin L(\beta_0 + (\omega-\omega_0)\tau)]$$

$$= 0 \qquad (5.8)$$

ให้ $x = \omega - \omega_0$ หรือ $\omega = x + \omega_0$ แทนลงในสมการ (3.4) แล้วทำการแยกส่วนที่เป็นค่าจริง (real-part) กับส่วนที่เป็นค่าจินตภาพ (imaginary-part) ออกจากกัน

$$\sum_{i=0}^{m} a_i (\cos ix \cos i\omega_0 - \sin ix \sin i\omega_0) - \sum_{i=0}^{n} b_i[\cos(i+L\tau)x \cos(i\omega_0+L\beta_0)$$

$$-\sin(i+L\tau)x \sin(i\omega_0+L\beta_0)] = 0 \qquad (5.9\text{-a})$$

$$\sum_{i=0}^{m} a_i (\sin ix \cos i\omega_0 + \cos ix \sin i\omega_0) - \sum_{i=0}^{n} b_i[\sin(i+L\tau)x \cos(i\omega_0+L\beta_0)$$

$$+\cos(i+L\tau)x \sin(i\omega_0+L\beta_0)] = 0 \qquad (5.9\text{-b})$$

จากสมการที่ (5.9a) และ (5.9b) กระจายให้อยู่ในรูปอนุกรมกำลัง (power series) ของ x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=0}^{m} a_i\Big[\cos(i\omega_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k(ix)^{2k}}{2k\,!} - \sin(i\omega_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k(ix)^{2k+1}}{(2k+1)\,!}\Big]$$

$$-\sum_{i=0}^{m} b_i\Big[\cos(i\omega_0+L\beta_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k((i+L\tau)x)^{2k}}{2k\,!} - \sin(i\omega_0+L\beta_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k((i+L\tau)x)^{2k+1}}{(2k+1)\,!}$$

$$= 0 \qquad (5.10\text{-a})$$

$$\sum_{i=0}^{m} a_i\Big[\cos(i\omega_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k(ix)^{2k+1}}{(2k+1)\,!} + \sin(i\omega_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k(ix)^{2k}}{2k\,!}\Big]$$

$$-\sum_{i=0}^{m} b_i\Big[\cos(i\omega_0+L\beta_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k((i+L\tau)x)^{2k+1}}{(2k+1)\,!} + \sin(i\omega_0+L\beta_0)\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k((i+L\tau)x)^{2k}}{2k\,!}$$

$$= 0 \qquad (5.10\text{-b})$$

ในการทำการประมาณค่าให้ราบเรียบที่สุด หมายความว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของ x ที่กำลังต่างๆ จะต้องเป็นศูนย์ และเพื่อเป็นการสะดวกต่อการคำนวณทางคณิตศาสตร์ จึงกำหนดให้ $b_0 = 1$ ดังนั้นจะได้

$$\sum_{i=0}^{m} a_i(i)^{2k}\cos(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} b_i(i+L\tau)^{2k}\cos(i\omega_0+L\beta_0) = (L\tau)^{2k}\cos(L\beta_0) \qquad (5.11\text{-a})$$

$$\sum_{i=0}^{m} a_i(i)^{2k}\sin(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} b_i(i+L\tau)^{2k}\sin(i\omega_0+L\beta_0) = (L\tau)^{2k}\sin(L\beta_0) \qquad (5.11\text{-b})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=0}^{m} a_i(i)^{2k+1}\cos(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} b_i\,(i+L\tau)^{2k+1}\cos(i\omega_0+L\beta_0) = (L\tau)^{2k+1}\cos(L\beta_0) \qquad (5.11\text{-c})$$

$$\sum_{i=0}^{m} a_i(i)^{2k+1}\sin(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} b_i\,(i+L\tau)^{2k+1}\sin(i\omega_0+L\beta_0) = (L\tau)^{2k+1}\sin(L\beta_0) \qquad (5.11\text{-d})$$

k มีค่าเท่ากับ 0, 1, 2, . . . จนกว่าจะได้แมทริกส์ (matrix) ข้างซ้ายมือเป็นสแควร์แมทริกซ์ (square matrix) มีขนาด $(m+n+1)\times(m+n+1)$ เราจะเขียนในรูปของสมการเชิงเส้นมีสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่เป็นตัวไม่รู้ค่าคือ

$$\underline{A}\,\underline{x} = \underline{c}$$

ดังแมทริกซ์ในหน้า 39

และจากสมการที่ (5.4) และ (5.6) จะได้

$$\frac{\sum_{i=0}^{m} c_i\cos i\omega - j\sum_{i=0}^{m} c_i\sin i\omega}{\sum_{i=0}^{n} d_i\cos i\omega - j\sum_{i=0}^{n} d_i\sin i\omega} = \cos(L-1)[\beta_0+(\omega-\omega_0)\tau] - j\sin(L-1)[\beta_0+(\omega-\omega_0)\tau] \qquad (5.12)$$

และโดยวิธีการเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว จะได้สมการย่อย 4 สมการดังนี้

$$\sum_{i=0}^{m} c_i{}^{2k}\cos(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} d_i\,(i+(L-1)\tau)^{2k}\cos(i\omega_0+(L-1)\beta_0) = ((L-1)\tau)^{2k}\cos((L-1)\beta_0) \qquad (5.13\text{-a})$$

$$\sum_{i=0}^{m} c_i{}^{2k}\sin(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} d_i\,(i+(L-1)\tau)^{2k}\sin(i\omega_0+(L-1)\beta_0) = ((L-1)\tau)^{2k}\sin((L-1)\beta_0) \qquad (5.13\text{-b})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sum_{i=0}^{m} c_i i^{2k+1}\cos(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} d_i (i+(L-1)\tau)^{2k+1}\cos(i\omega_0+(L-1)\beta_0) = ((L-1)\tau)^{2k+1}\cos((L-1)\beta_0) \quad (5.13\text{-c})$$

$$\sum_{i=0}^{m} c_i i^{2k+1}\sin(i\omega_0) - \sum_{i=1}^{n} d_i (i+(L-1)\tau)^{2k+1}\sin(i\omega_0+(L-1)\beta_0) = ((L-1)\tau)^{2k+1}\sin((L-1)\beta_0) \quad (5.13\text{-d})$$

k มีค่าเท่ากับ 0, 1, 2 . . . จนกว่าจะได้ แมทริกซ์ ข้างซ้ายมือเป็นสแควร์แมทริกซ์ มีขนาด $(m+n+1)\times(m+n+1)$ จะเขียนในรูปของสมการเชิงเส้นมีสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่เป็นตัวไม่รู้ค่าคือ

$$\underline{D}\underline{x} = \underline{c}$$

ดังแมทริกซ์ ในหน้าที่ 40

5.3 ตัวอย่างการออกแบบ

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟชนิดความถี่สูงผ่าน จะกำหนดให้ $\omega_0 = \pi$ เรเดียนต่อวินาที และในการทดสอบวงจรนี้ จะกำหนดให้ อันดับของ โพลิโนเมียล ที่เป็นเศษคือ m มีค่าเป็น 2 ขณะที่อันดับของ โพลิโนเมียล ที่เป็นส่วนคือ n มีค่าเป็น 4 และกรุ๊ฟดีเลย์ $\tau = 5$ วินาที เมื่อ $\beta_0 = 0$ เรเดียน จากการแทนค่า แมทริกซ์ ในหน้าที่ 39 และ 40 โดยทำการเปลี่ยนค่า พารามิเตอร์ L เป็น .3, .6, .8, .9 แล้วทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ a_i, b_i, c_i, d_i แล้วนำสัมประสิทธิ์ที่ได้ไปใช้ในการหาผลตอบสนองของ ขนาด และ กรุ๊ฟดีเลย์ ที่ค่า L ต่างๆ นั้น (หาผลตอบสนองขนาดจาก สมการ 3.8 และ กรุ๊ฟดีเลย์จาก สมการ 3.9, 3.10, 3.11) เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ มาทำการพล็อต จะได้กราฟของผลตอบสนอง ขนาด ดังรูปที่ 5.1 และ ผลตอบสนอง กรุ๊ฟดีเลย์ ดังรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 สรุป

จากผลตอบสนองที่ได้จากกร๊าฟ ในรูปที่ 5.1 และ 5.2 จะเห็นว่า เราสามารถควบคุมผลตอบสนองของวงจรได้ด้วยค่า พารามิเตอร์ L ในขณะที่มีผลตอบสนองของ ขนาด และ กรุ๊ฟดีเลย์ ยังคงราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กันด้วย อันจะเป็นวงจรที่มีคุณสมบัติครบถ้วนกว่า วิธีที่ผ่านมา (ใน [5] จะพิจารณาเพียงแต่ กรุ๊ฟดีเลย์ เท่านั้น)

อย่างไรก็ตาม วงจรที่กล่าวมานี้ ค่อนข้างจะซับซ้อน และสิ้นเปลืองอุปกรณ์ และเวลามากขึ้น อันเนื่องจาก การใช้ ทรานสเฟอร์ฟังค์ชั่น ถึง 2 สมการ ในวงจรเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม วงจรนี้ก็น่าจะมีประโยชน์ต่อการใช้งานอย่างมากเนื่องจาก คุณสมบัติที่ครบถ้วนดังกล่าว โดยเฉพาะกับ วงจรที่มีอันดับไม่สูงนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\underline{A} = \begin{array}{c c} \multicolumn{1}{c}{\xleftrightarrow{\qquad\qquad\qquad m+n+1 \qquad\qquad\qquad}} & \\ \begin{bmatrix} 1 & \cos\omega_0 & \cos 2\omega_0 & \ldots & \cos m\omega_0 & -\cos(\omega_0+L\beta_0) & -\cos(2\omega_0+L\beta_0) & \ldots & -\cos(n\omega_0+L\beta_0) \\ 0 & \sin\omega_0 & \sin 2\omega_0 & \ldots & \sin m\omega_0 & -\sin(\omega_0+L\beta_0) & -\sin(2\omega_0+L\beta_0) & \ldots & -\sin(n\omega_0+L\beta_0) \\ 0 & \cos\omega_0 & 2\cos 2\omega_0 & \ldots & m\cos m\omega_0 & -(1+L\tau)\cos(\omega_0+L\beta_0) & -(2+L\tau)\cos(2\omega_0+L\beta_0) & \ldots & -(n+L\tau)\cos(n\omega_0+L\beta_0) \\ 0 & \sin\omega_0 & 2\sin 2\omega_0 & \ldots & m\sin m\omega_0 & -(1+L\tau)\sin(\omega_0+L\beta_0) & -(2+L\tau)\sin(2\omega_0+L\beta_0) & \ldots & -(n+L\tau)\sin(n\omega_0+L\beta_0) \\ 0 & \cos\omega_0 & 2^2\cos 2\omega_0 & \ldots & m^2\cos m\omega_0 & -(1+L\tau)^2\cos(\omega_0+L\beta_0) & -(2+L\tau)^2\cos(2\omega_0+L\beta_0) & \ldots & -(n+L\tau)^2\cos(n\omega_0+L\beta_0) \\ 0 & \sin\omega_0 & 2^2\sin 2\omega_0 & \ldots & m^2\sin m\omega_0 & -(1+L\tau)^2\sin(\omega_0+L\beta_0) & -(2+L\tau)^2\sin(2\omega_0+L\beta_0) & \ldots & -(n+L\tau)^2\sin(n\omega_0+L\beta_0) \\ 0 & \cos\omega_0 & 2^3\cos 2\omega_0 & \ldots & m^3\cos m\omega_0 & -(1+L\tau)^3\cos(\omega_0+L\beta_0) & -(2+L\tau)^3\cos(2\omega_0+L\beta_0) & \ldots & -(n+L\tau)^3\cos(n\omega_0+L\beta_0) \\ 0 & \sin\omega_0 & 2^3\sin 2\omega_0 & \ldots & m^3\sin m\omega_0 & -(1+L\tau)^3\sin(\omega_0+L\beta_0) & -(2+L\tau)^3\sin(2\omega_0+L\beta_0) & \ldots & -(n+L\tau)^3\sin(n\omega_0+L\beta_0) \\ . & . & . & \ldots & . & . & . & \ldots & . \\ . & . & . & \ldots & . & . & . & \ldots & . \\ . & . & . & \ldots & . & . & . & \ldots & . \end{bmatrix} & \updownarrow m+n+1 \end{array}$$

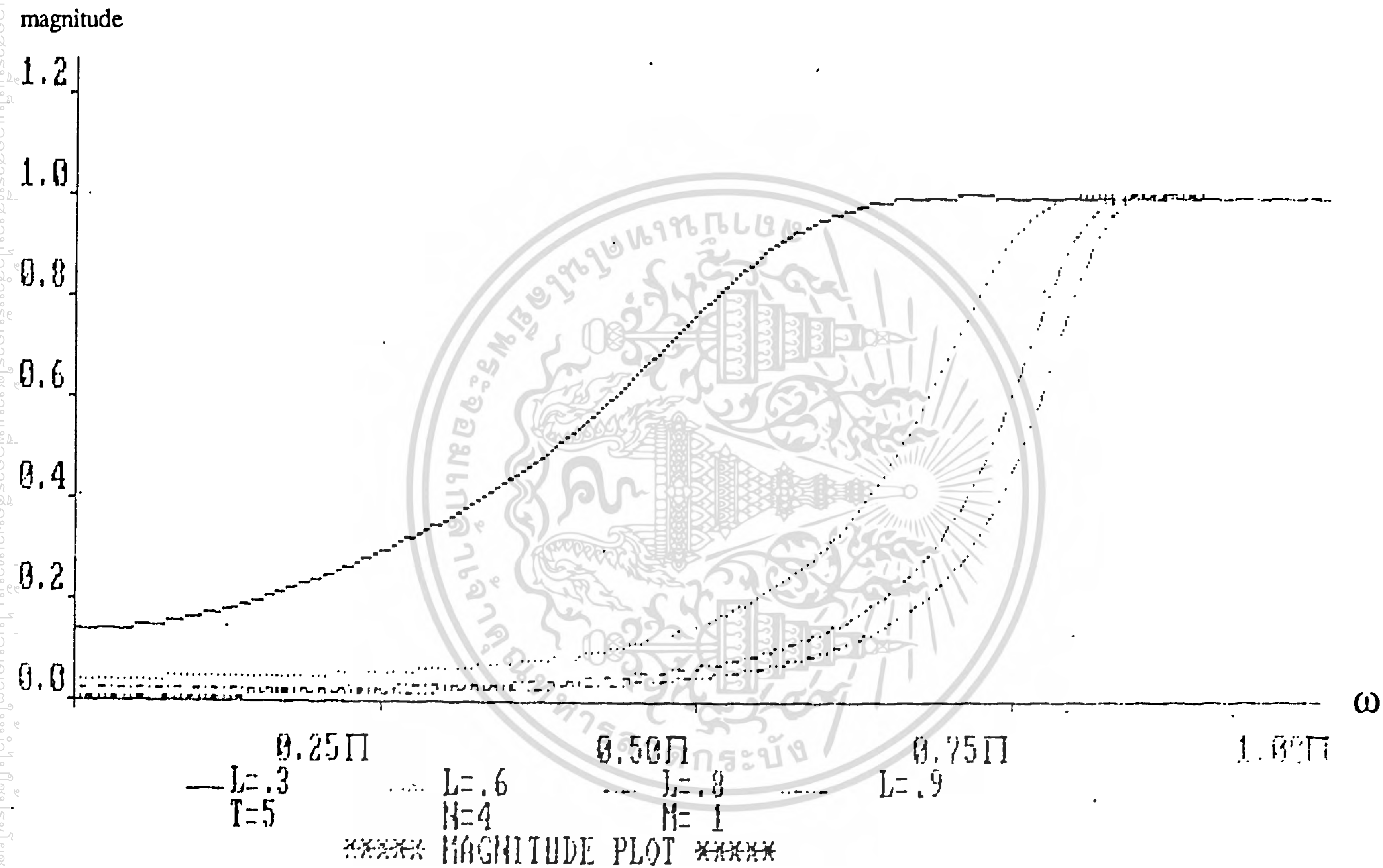
$$\underline{x} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ . \\ . \\ a_m \\ b_1 \\ b_2 \\ . \\ . \\ b_n \end{bmatrix} \updownarrow m+n+1 \qquad \underline{c} = \begin{bmatrix} \cos L\beta_0 \\ \sin L\beta_0 \\ L\tau\cos L\beta_0 \\ L\tau\sin L\beta_0 \\ L\tau^2\cos L\beta_0 \\ L\tau^2\sin L\beta_0 \\ L\tau^3\cos L\beta_0 \\ L\tau^3\sin L\beta_0 \\ . \\ . \end{bmatrix} \updownarrow m+n+1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\underline{D} = \overset{\longleftarrow\; m+n+1 \;\longrightarrow}{\begin{bmatrix} 1 & \cos\omega_0 & \cdots & \cos m\omega_0 & -\cos(\omega_0+(L-1)\beta_0) & \cdots & -\cos(n\omega_0+(L-1)\beta_0) \\ 0 & \sin\omega_0 & \cdots & \sin m\omega_0 & -\sin(\omega_0+(L-1)\beta_0) & \cdots & -\sin(n\omega_0+(L-1)\beta_0) \\ 0 & \cos\omega_0 & \cdots & m\cos m\omega_0 & -(1+(L-1)\tau)\cos(\omega_0+(L-1)\beta_0) & \cdots & -(n+(L-1)\tau)\cos(n\omega_0+(L-1)\beta_0) \\ 0 & \sin\omega_0 & \cdots & m\sin m\omega_0 & -(1+(L-1)\tau)\sin(\omega_0+(L-1)\beta_0) & \cdots & -(n+(L-1)\tau)\sin(n\omega_0+(L-1)\beta_0) \\ 0 & \cos\omega_0 & \cdots & m^2\cos m\omega_0 & -(1+(L-1)\tau)^2\cos(\omega_0+(L-1)\beta_0) & \cdots & -(n+(L-1)\tau)^2\cos(n\omega_0+(L-1)\beta_0) \\ 0 & \sin\omega_0 & \cdots & m^2\sin m\omega_0 & -(1+(L-1)\tau)^2\sin(\omega_0+(L-1)\beta_0) & \cdots & -(n+(L-1)\tau)^2\sin(n\omega_0+(L-1)\beta_0) \\ 0 & \cos\omega_0 & \cdots & m^3\cos m\omega_0 & -(1+(L-1)\tau)^3\cos(\omega_0+(L-1)\beta_0) & \cdots & -(n+(L-1)\tau)^3\cos(n\omega_0+(L-1)\beta_0) \\ 0 & \sin\omega_0 & \cdots & m^3\sin m\omega_0 & -(1+(L-1)\tau)^3\sin(\omega_0+(L-1)\beta_0) & \cdots & -(n+(L-1)\tau)^3\sin(n\omega_0+(L-1)\beta_0) \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \end{bmatrix}} \; m+n+1$$

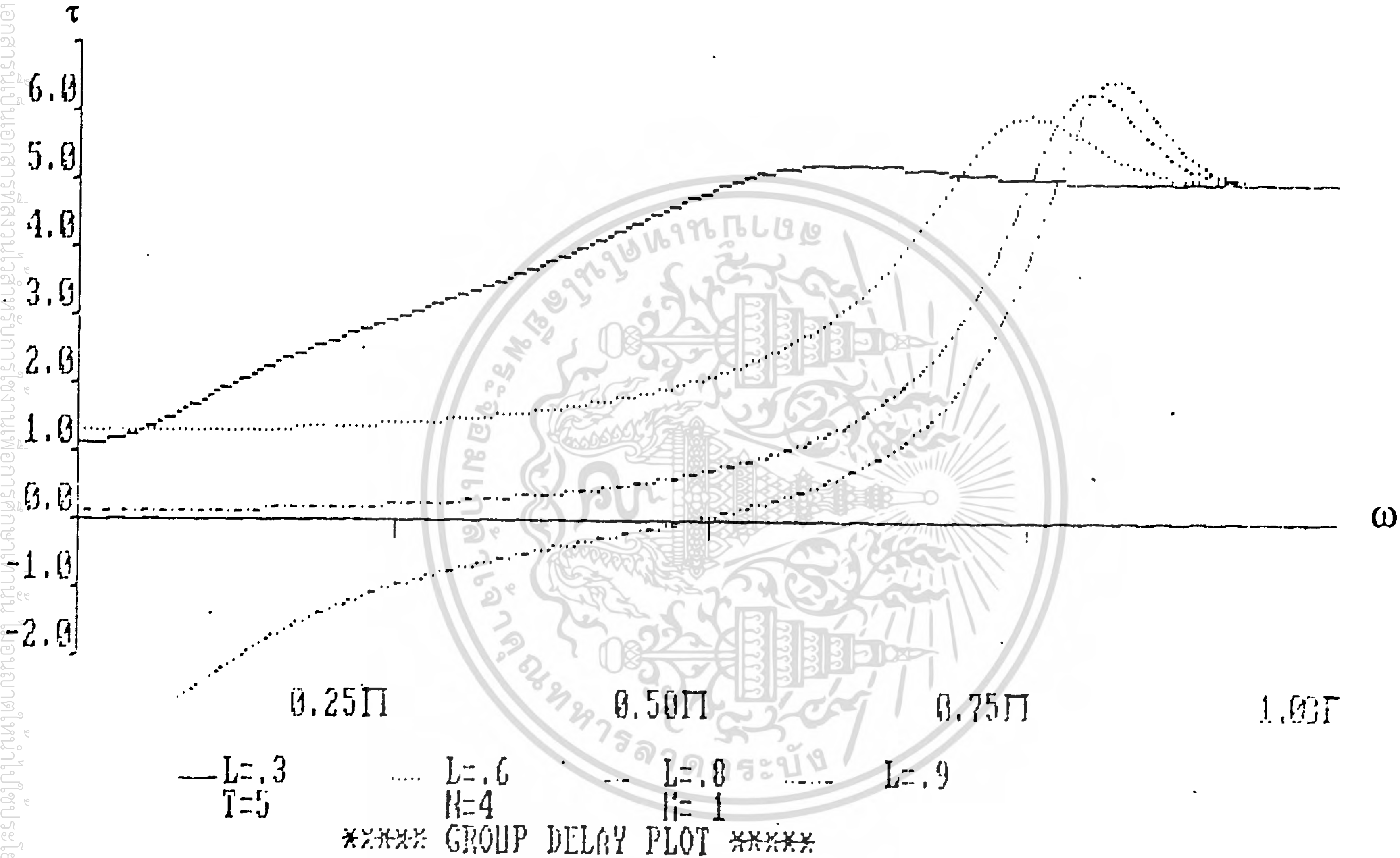
$$\underline{x} = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ c_m \\ d_1 \\ d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ d_n \end{bmatrix} \; m+n+1 \qquad \underline{e} = \begin{bmatrix} \cos(L-1)\beta_0 \\ \sin(L-1)\beta_0 \\ (L-1)\tau\cos(L-1)\beta_0 \\ (L-1)\tau\sin(L-1)\beta_0 \\ (L-1)\tau^2\cos(L-1)\beta_0 \\ (L-1)\tau^2\sin(L-1)\beta_0 \\ (L-1)\tau^3\cos(L-1)\beta_0 \\ (L-1)\tau^3\sin(L-1)\beta_0 \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \; m+n+1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.1 ผลตอบสนองขนาดของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน จากการใช้พารามิเตอร์ L ในการควบคุม
เมื่อ $\tau = 5$ วินาที $n = 4$ $m = 1$ และ L มีค่าเป็น .3, .6, .8, .9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5.2 ผลตอบสนองกรุ๊ฟดีเลย์ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน จากการใช้พารามิเตอร์ L ในการควบคุม
เมื่อ τ = 5 วินาที n = 4 m = 1 และ L มีค่าเป็น .3, .6, .8, .9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลลัพธ์ที่ได้จากการผ่านสัญญาณตัวอย่าง

The resualt from the sample signal

6.1 บทนำ

จากบทที่ 3, 4 และ 5 ที่ผ่านมา จะพบว่า ในแต่ละบทเหล่านั้นจะแสดงแต่เพียง ทฤษีการออกแบบ และแม้ว่าจะมีการแสดงผล ก็เป็นเพียง ผลตอบสนองในรูปของ ความถี่เชิงมุม (ω) เท่านั้น มิได้มีการแสดงถึง การทดลองผ่านสัญญาณจริงเข้าไปในวงจรแต่อย่างไร ดังนั้นเพื่อเป็นแนวทาง และเป็นการยืนยัน ถึงผลการตอบสนอง ของการออกแบบวงจรที่ผ่านมา ในบทนี้จึงจะได้แสดงถึง การประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่ กับสัญญาณดิจิตอล ที่ผ่านเข้าไป ในวงจรนั้น แล้วดูสัญญาณผลลัพธ์ ที่ได้จากวงจร

6.2 การออกแบบ

6.2.1 การทดสอบผลตอบสนองขนาด

จากบทที่ 3 กำหนดให้

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{m} a_i z^{-i}}{\sum_{i=0}^{n} b_i z^{-i}} \qquad (6.1)$$

และใช้ฟังค์ชั่นในการประมาณค่าเป็น

$$H(z)\Big|_{z=e^{j\omega T}} = e^{-j[\beta_0 + (\omega - \omega_0)\tau]} \qquad (6.2)$$

ซึ่งในการออกแบบที่ผ่านมากำหนดให้ T = 1 วินาที : T = ช่วงเวลาในการแซมปลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบทนี้จะลองทำการผ่านสัญญาณดิจิตอลเข้าสู่วงจร โดยกำหนดให้วงจรมีค่า m = 1, n = 4 และ τ = 5 จากการใช้วิธีในบทที่ 3 หรือ 4 ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ a_i และ b_i ของวงจรแล้วทำการพล็อต ผลตอบสนอง ดังรูปที่ 3.1 และจากรูปจะสามารถหาจุด คัด (cut off) ของวงจรได้ โดยกำหนดให้จุดดังกล่าวอยู่ในช่วง 0 db ถึง -3 db (จาก [3] 20log(ratio) = db unit ในที่นี้ที่ -3 db คือที่ 0.707) และจะเรียกความถี่ที่จุด คัทอ๊อฟ นั้นเป็น ω_D

จากความถี่ คัทออฟ ที่ได้จะสามารถแปลงไปสู่ความถี่แบบ อนาลอก (ω_A) ได้โดยการใช้การแปลงไบลิเนียร์ ดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังนี้

$$\omega_A = \tan \frac{\omega_D T}{2} \qquad (6.3)$$

กำหนดให้ ω_D = 0.9π และ T ที่ใช้ในการคำนวณค่า a_i, b_i เป็น 1 จะได้

$$\omega_A = \tan \frac{0.9\pi}{2}$$

$$\omega_A = 6.31 \qquad ; \omega_A = 2\pi f_c$$

$$f_c = 1.75 \times 10^{-2}$$

จากความถี่ คัทอ๊อฟ ดังกล่าว จะลองผ่านสัญญาณที่มีการผสมของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ และ สูงกว่าจุด คัทอ๊อฟ นั้น แล้วดูผลลัพธ์ที่ได้ ในที่นี้ จะใช้สัญญาณผสมที่อยู่ในรูป ฟังค์ชั่น ของ sine ดังนี้

$$F(t) = \sin 2\pi f_1 t + \sin 2\pi f_2 t \qquad (6.4)$$

จากสมการ (6.4) จะกำหนดให้

f_1 = 0.5 Hz

f_2 = 0.005 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนี้จะทำการแปลงสัญญาณนี้เป็นสัญญาณความถี่แบบ ดิจิตอล โดยใช้เงื่อนไขของทฤษีการ แซมปลิ้ง ในบทที่ 2 ที่กล่าวถึงความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง ของสัญญาณใดๆ จะต้องไม่ต่ำกว่า 2 เท่า ของความถี่สูงสุดของสัญญาณนั้นๆ ในที่นี้จะใช้ความถี่ในการ แซมปลิ้ง เป็น 1 Hz (ตามการออกแบบในบทที่ผ่านมา กำหนดให้ T = 1) ดังนั้น สัญญาณที่มีความถี่สูงสุดจะเป็น 0.5 Hz และจากความถี่ f_1 และ f_2 ที่กำหนดให้เป็นสัญญาณที่ผ่านเข้าในวงจร จึงอยู่ในข้อกำหนดดังกล่าวด้วย ซึ่งจะใช้สมการต่อไปนี้ในการหาค่าสัญญาณ ดิจิตอล ที่เวลาใดๆ

$$f(nT) = \sin 2\pi(0.5)\, n + 0.5\sin 2\pi(5{*}10^{-3})\, n \quad ; T = 1 \text{ วินาที} \tag{6.5}$$

จากสมการ (6.5) สามารถ พล็อต สัญญาณที่ใช้ในการป้อนเข้าสู่วงจรได้ ดังรูป 6.2

เมื่อใช้ ทรานส์เฟอร์ฟังค์ชั่น จาก (6.1) มาใช้เป็นตัวกรองสัญญาณ จะได้สัญญาณผลลัพธ์ ดังสมการต่อไปนี้

$$y(n) = \sum_{i=0}^{m} a_i x(n-i) - \sum_{i=1}^{n} b_i y(n-i) \tag{6.6}$$

และค่า a_i, b_i ที่ได้จากบทที่ 3 เป็น

$a_0 = -3.175{*}10^{-2}$ $\quad a_1 = -7.143{*}10^{-2}$

$b_0 = 1$ $\quad b_1 = 2.667$

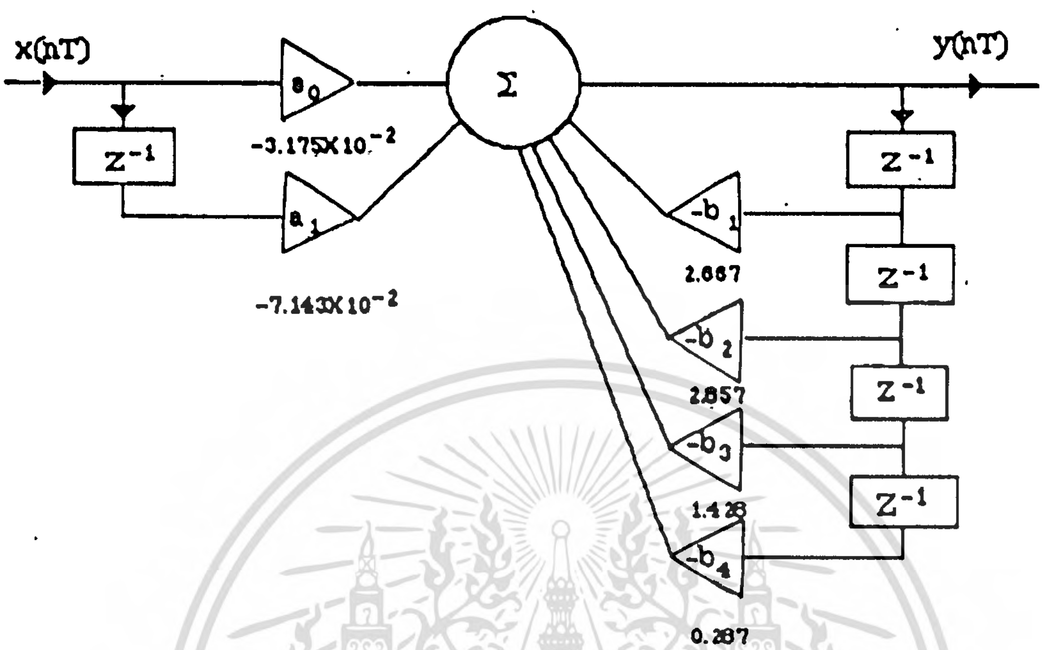
$b_2 = 2.857$ $\quad b_3 = 1.428$

$b_4 = 0.278$

จะสามารถเขียนลักษณะของวงจรได้ดังรูป 6.1

เมื่อแทนค่า a_i, b_i และ $f(n)$ ลงในสมการ (6.6) (ในที่นี้แทน $x(n)$ ด้วย $f(n)$) แล้วนำค่า $y(n)$ มาทำการ พล็อต จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 6.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6.1 ลักษณะวงจรกรองความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ

6.2.2 การทดสอบผลตอบสนองกรุ๊ฟดีเลย์

จะทดสอบผลตอบสนองกรุ๊ฟดีเลย์ของวงจรในรูปที่ 6.1 ($m=1,\ n=4,\ \tau=5$) โดยการผ่านสัญญาณสองความถี่เข้าสู่วงจร โดยใช้สมการของ cosine ดังสมการต่อไปนี้

$$F(t) = \cos 2\pi f t \qquad (6.7)$$

จะได้สมการของสัญญาณดิจิตอลที่มีช่วงเวลาการแซมปลิ้งเท่ากับ 1 วินาที ($T=1$) เป็น

$$x(nT) = \cos 2\pi f nT \qquad (6.8)$$

ถ้ากำหนด ให้สัญญาณที่เข้าสู่วงจรมีความถี่เป็น 475 Hz แล้วนำค่าที่ได้จากสมการที่ (6.8) ไปหาค่าสัญญาณผลลัพธ์ที่ได้จากวงจรตามสมการที่ (6.6) จะได้ผลเปรียบเทียบของสัญญาณที่ป้อนเข้าสู่วงจร และสัญญาณที่ได้จากวงจรที่ n ค่าต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n	$x_1(n)$	$y_1(n)$
0	1	.7071689963340759
1	-.9876883625984192	-.8091152906417847
2	.9510565400123596	.89113849401474
3	-.8910065293312073	-.9512189626693726
4	.80901700258255	.9878773093223572
5	-.7071067690849304	-1.000210881233215
6	.5877852439880371	.9879159331321716
7	-.4539904892444611	-.9512951970100403
8	.30901700258255	.8912503719329834
9	-.1564344614744186	-.8092599511146545
10	-2.302053946773297E-014	.7073428630828857
11	.1564344614744186	-.5880086421966553
12	-.30901700258255	.4541957080364227
13	.4539904892444611	-.3091989755630493
14	-.5877852439880371	.1565887480974197
15	.7071067690849304	-1.22801648103632E-004
16	-.80901700258255	-.1563461571931839
17	.8910065293312073	.3089653551578522
18	-.9510565400123596	-.4539768099784851
19	.9876883625984192	.5878098607063293
20	-1	-.7071691155433655

และถ้าลองป้อนสัญญาณที่ความถี่นี้แต่มี เฟส เปลี่ยนไป 45 องศา (.25π) ดังสมการต่อไปนี้

$$F(l) = \cos(2\pi(.475l) - .25\pi)$$

เข้าสู่วงจรแล้วหาค่าสัญญาณที่ได้จากวงจรตามสมการ (๖.๖) จะได้ค่าสัญญานเข้า และสัญญาณที่ได้ ที่ n ค่าต่างๆ ดังนี้

n	$x_2(n)$	$y_2(n)$
0	.7071067690849304	1.000210881233215
1	-.5877852439880371	-.9879158139228821
2	.4539904892444611	.951295018196106
3	-.30901700258255	-.8912501931190491
4	.1564344614744186	.809259831905365
5	2.171407584988794E-014	-.707342803478241
6	-.1564344614744186	.5880086421966553
7	.30901700258255	-.4541957676410675
8	-.4539904892444611	.3091990947723389
9	.5877852439880371	-.1565889120101929
10	-.7071067690849304	1.229832996614277E-004
11	.80901700258255	.1563459783792496
12	-.8910065293312073	-.3089651763439178
13	.9510565400123596	.4539766311645508
14	-.9876883625984192	-.587809681892395
15	1	.7071689367294312
16	-.9876883625984192	-.8091153502464294
17	.9510565400123596	.8911386728286743
18	-.8910065293312073	-.9512192010879517
19	.80901700258255	.9878775477409363
20	-.7071067690849304	-1.000211000442505

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนด ให้สัญญาณที่เข้าสู่วงจรมีความถี่เป็น 4833 Hz แล้วนำค่าที่ได้จากสมการที่ (๖.๘) ไปหาค่าสัญญาณผลลัพธ์ที่ได้จากวงจรตามสมการที่ (๖.๖) จะได้ผลเปรียบเทียบของสัญญาณที่ป้อนเข้าสู่วงจร และสัญญาณที่ได้จากวงจรที่ n ค่าต่างๆ ดังนี้

n	$x_1(n)$	$y_1(n)$
0	1	.866039812564849 9
1	-.9945219159126282	-.913561522960662 8
2	.9781476259231567	.9510740041732788
3	-.9510565400123596	-.9781662821769714
4	.913545429706573 5	.9945415854454041
5	-.8660253882408142	-1.000020503997803
6	.80901700258255	.9945430159568787
7	-.7431448101997375	-.9781691431999207
8	.6691306233406067	.9510782957077026
9	-.5877852439880371	-.9135672450065613
10	.5	.8660469651222229
11	-.4067366421222687	-.8090381026268005
12	.30901700258255	.7431652545928955
13	-.2079116851091385	-.6691501140594482
14	.1045284643769264	.5878036022186279
15	1.601594291217312E-014	-.500016987323761
16	-.1045284643769264	.4067520797252655
17	.2079116851091385	-.3090307116508484
18	-.30901700258255	.2079235315322876
19	.4067366421222687	-.1045382842421532
20	-.5	7.680011549382471E-006

และถ้าลองป้อนสัญญาณที่ความถี่นี้แต่มี เฟส เปลี่ยนไป 30 องศา (.16666π) ดังสมการต่อไปนี้

$$F(t) = \cos(2\pi(4833t) - .16666\pi)$$

เข้าสู่วงจรแล้วหาค่าสัญญาณที่ได้จากวงจรตามสมการ (๖.๖) จะได้ค่าสัญญาณเข้า และสัญญาณที่ได้ ที่ n ค่าต่างๆ ดังนี้

n	$x_2(n)$	$y_2(n)$
0	.8660253882408142	1.000020503997803
1	-.80901700258255	-.9945429563522339
2	.7431448101997375	.9781690239906311
3	-.6691306233406067	-.9510781168937683
4	.5877852439880371	.91356706619262 7
5	-.5	-.8660468459129333
6	.4067366421222687	.8090380430221558
7	-.30901700258255	-.7431651949882507
8	.2079116851091385	.6691499948501587
9	-.1045284643769264	-.5878033638000488
10	-1.537561310910318E-014	.5000166296958923
11	.1045284643769264	-.4067516624927521
12	-.2079116851091385	.30903029441833 5
13	.30901700258255	-.2079231590032578
14	-.4067366421222687	.1045379862189293
15	.5	-7.469502634194214E-006
16	-.5877852439880371	-.1045231446623802
17	.6691306233406067	.2079086005687714
18	-.7431448101997375	-.3090161979198456
19	.80901700258255	.4067381620407104
20	-.8660253882408142	-.5000038146972656

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลที่ได้ในหน้าที่ 44 จะเห็นว่าสัญญาณผลลัพธ์ที่ได้จากการป้อนสัญญาณความถี่ 4.75 Hz ที่มีเฟสเปลี่ยนไป 45 องศา จะมีค่าเท่ากับสัญญาณที่ป้อนเข้าสู่วงจรที่มีค่าเฟสเป็น 0 จึงสรุปได้ว่าวงจรที่ออกแบบนี้ทำให้สัญญาณที่ความถี่ 4.75 Hz มีเฟสเปลี่ยนไป 45 องศา

ในขณะเดียวกับผลที่ได้ในหน้า 45 ผลที่ได้จากการผ่านสัญญาณความถี่ 4.833 Hz ที่มีเฟสเปลี่ยนไป 30 องศา จะมีค่าเท่ากับสัญญาณที่มีเฟสเป็น 0 จึงแสดงว่า วงจรที่ออกแบบนี้ทำให้สัญญาณที่ความถี่ 4.833 Hz มีความถี่เปลี่ยนไป 30 องศา

และจากสูตรของกรุ๊พดีเลย์

$$\tau = -\Delta\varnothing/(360 \cdot \Delta f) \qquad (6.9)$$

จะได้

$$\tau = -(45-30)/(360 \cdot (4.75-4.833))$$

$$= 5$$

ซึ่งค่า τ ที่ได้จะเป็นไปตามที่ออกแบบไว้

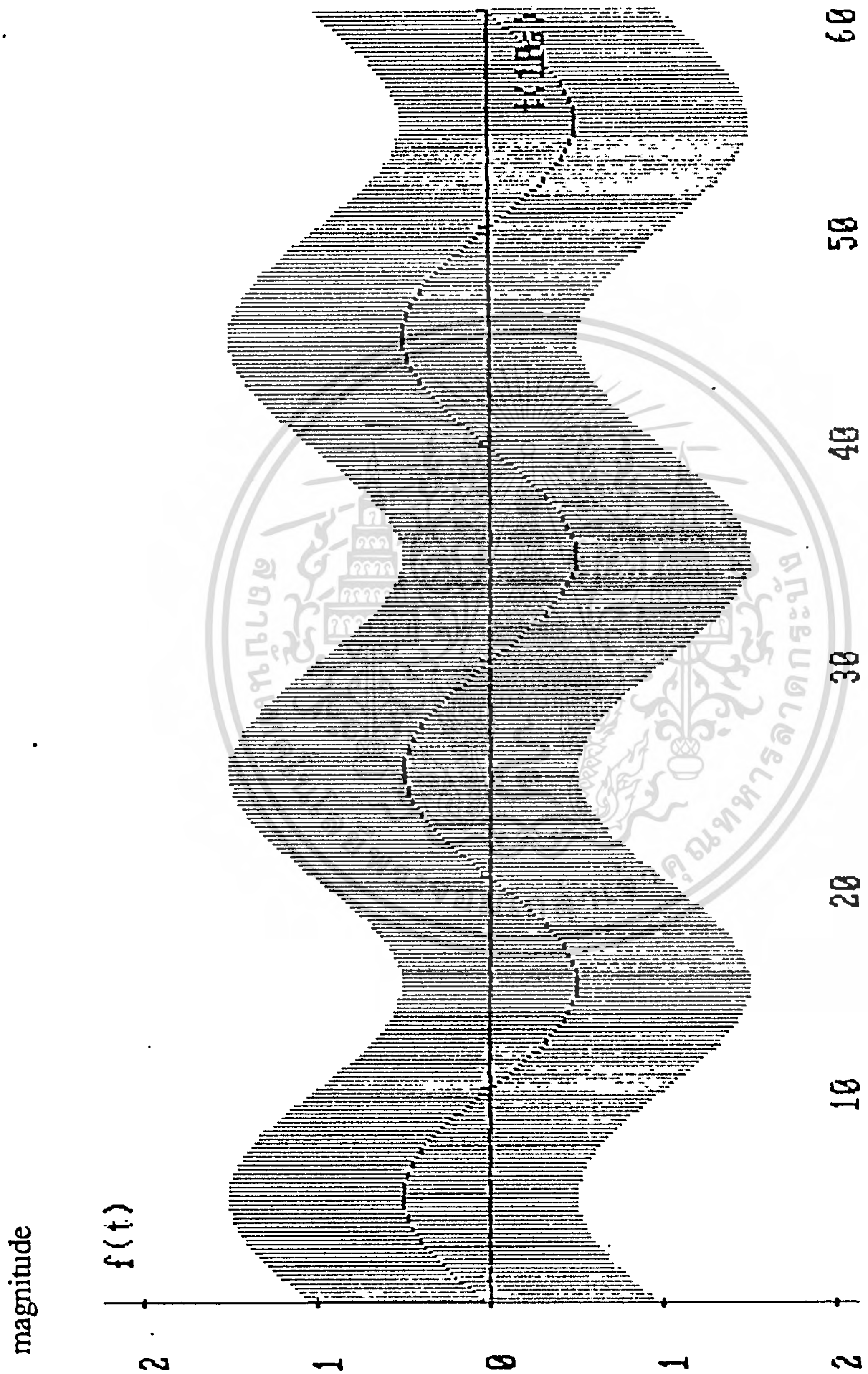
6.3 สรุป

การแสดงผลลัพธ์ของวงจรที่แสดงมาเป็นแต่เพียงแนวทางที่จะชี้ให้เห็นถึง วิธีการประยุกต์ใช้ ในเบื้องต้นเท่านั้น ความถี่ และ คาบในการ แซมปลิ้งก็มีค่าต่ำมาก ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการคำนวณ เพราะคอมพิวเตอร์ที่ใช้มีความเร็วต่ำ อีกทั้งเพื่อเป็นการง่าย ต่อการเข้าใจ และติดตามด้วย

ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ และพล็อตกราฟ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก และ ข ซึ่งจะทำการอ่านค่า a_i และ b_i จากไฟล์ผลลัพธ์ที่คำนวณได้ในบทที่ 3

อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ ที่ได้จากรูปที่ 6.1 และ 6.2 ก็เป็นสิ่งที่จะช่วยยืนยันถึง ทฤษฎีการออกแบบได้เป็นอย่างดี อันจะเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้ที่จะประยุกต์ใช้กับงานที่เหมาะสมต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6.2 สัญญาณผสม ในรูป sine ที่ใช้ป้อนเพื่อทดสอบวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 6.3 สัญญาณความถี่สูงที่ได้จากการผ่านสัญญาณผสมเข้าสู่วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุป

ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงปัญหา ที่มา และเทคนิคริเริ่ม ของวิทยานิพนธ์ ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึง คณิตศาสตร์ และ ทฤษฎีบางอย่างที่นำมาใช้ ตลอดจนกล่าวถึงลักษณะบางประการของวงจรกรองความถี่ดิจิตอล

บทที่ 3 ได้แสดงถึงวิธีการออกแบบ วงจรกรองความถี่ดิจิตอล แบบรีเคอร์ซีฟ ชนิดความถี่สูงผ่าน ที่มีผลตอบสนอง ขนาด และ กรุ๊ฟดีเลย์ ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน โดยวิธีการประมาณค่ากับฟังค์ชั่นที่มีคุณสมบัติดังกล่าว แล้วทำการหาสัมประสิทธ์ของวงจรออกมา ในบทที่ 3 นี้ ได้ใช้วิธีการของ Gauss-Jordan elimination ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งพบว่าในการใช้วิธีดังกล่าวจะให้ผลตอบสนองเป็นไปตามทฤษฎีที่ออกแบบ แต่ถ้าทำการทดสอบวงจรที่ค่าอันดับที่สูงขึ้น จะพบว่าผลตอบสนองที่ได้มีค่า ผิดเพี้ยนไป และจากการตรวจสอบก็พบว่า ผลของการผิดพลาดนี้ ส่วนหนึ่งเกิดในขั้นตอนของการหาสัมประสิทธิ์ จึงได้นำเสนอวิธีการหาสัมประสิทธิ์ โดยการใช้สูตรสำเร็จ ในบทที่ 4 เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว

จากการออกแบบในบทที่ 3 แม้ว่าจะได้วงจรที่มีคุณสมบัติ การตอบสนอง ที่ราบเรียบที่สุดทั้ง ขนาด และ กรุ๊ฟดีเลย์ แล้วก็ตาม ก็ยังพบว่าวงจรดังกล่าวยังไม่สามรถควบคุมผลการตอบสนองนั้นๆ ได้ จึงได้นำเสอวิธีการควบคุมผลตอบสนองของวงจร โดยที่วงจรนั้นยังมีผลตอบสนองทั้งสองอย่างราบเรียบที่สุดอยู่ โดยวิธีการในบทที่ 5 นี้จะใช้พารามิเตอร์ ในการควบคุมผลตอบสนองดังกล่าว

ในบทที่ 6 ได้แสดงกรรมวิธีตัวอย่างการนำวงจรที่ออกแบบไปใช้ เมื่อมีสัญญาณ ดิจิตอล ผ่านเข้าสู่วงจร ซึ่งในบทนี้ มีการแสดงให้เห็นถึงการแปลงจุด คัทอ๊อฟ ของวงจร โดยการใช้การแปลงทาง ไบลิเนียร์ อันเป็นการแปลงค่าความถี่จากค่าทาง ดิจิตอล มาสู่ค่าทาง อนาลอก

ข้อเสนอแนะสำหรับผู้สนใจต่อการจะทำวิทยานิพนธ์ต่อ พอจะมีแนวทางได้ ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบวงจรในย่านความถี่กลาง และ ย่านความถี่ต่ำ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มิได้กล่าวถึงการออกแบบวงจรในย่านความถี่ทั้งสอง ซึ่งวิธีการที่กล่าวมาก็น่าจะนำไปใช้ได้ แต่คงต้องพิจารณากันใหม่ถึงย่านของ ความถี่ผ่าน (pass-band) ซึ่งเมื่อถึงจุดนี้แล้ว แมทริกซ์ ที่ได้ก็คงจะมีลักษณะที่ต่างกันออกไป อันจะต้องนำมาพิจารณาถึงความเป็นไปได้ และผลตอบสนองที่จะได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การควบคุมผลการตอบสนองในบทที่ 5 แม้จะให้ผลสรุปของวงจรที่มีคุณสมบัติครบถ้วน คือมีทั้ง ผลตอบสนอง ขนาด กรุ๊ฟดีเลย์ ที่ราบเรียบ แล้วยังสามารถควบคุม ผลการตอบสนองดังกล่าวได้ด้วย แต่วงจรนี้ก็มีข้อเสียอยู่คือ เป็นวงจรที่ค่อนข้างซับซ้อน คือต้องมีการพิจารณา ทรานส์เฟอร์ ฟังค์ชั่น ถึง 2 ฟังค์ชั่น ซึ่งค่อนข้างจะไม่สะดวกนัก น่าที่จะลองหาวิธีการอื่นที่จะมาช่วยควบคุมผลตอบสนอง ให้มีประสิทธิภาพต่อการใช้งานในเชิงปฏิบัติด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ ด้วยความกรุณาแนะนำ และแก้ปัญหาจาก ท่านอาจารย์ รศ. ดร. ฟูศักดิ์ ธีวสุวิทย์ และ ท่านอาจารย์ ธนิศย์ ศรีสุวรรณวัฒน์ ตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนศึกษา ณ สถาบันแห่งนี้ ซึ่งผู้เขียน ขอขอบพระคุณ ไว้ ณ ที่นี้ เป็นอย่างสูงด้วย

รัตนะ มีคิ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] R.E. Boger and A.G. Constinides., Introduction to Digital Filtering, Johm Wiley & sons, 1975.

[2] B. Liu, Digital Filter and The Fast Fourier Transform, Downden, Hutchinson & Ross, Inc, 1975.

[3] R.W. Hamming, Digital Filters, Prentice-Hall, 1977.

[4] P.Thajchayapong, P. Kamchanawadee and F. Cheevasuvit, "A Recursive Digital Filter with Simultaneous Maximally Flat Magnitude and Group Delay at an Arbitary Specified Frequency", Proceedings of The IEEE, Vol. 67, No.5, May, 1979.

[5] T. Trisuwannawat, "Linear Phase Recursive Digital Filter with Controllable Magnitude Response", Master thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1986.

[6] P.Thajchayapong, and P.Lomtong," A maximally Flat Group Delay Recursive Digital Filters with Controllable Magnitude ", IEEE Trans. Circuit Syst ., Vol. CAS-25, No.1, pp. 51-53, January, 1978.

[7] J.P. Thiran, " Recursive digital filters with maximally flat group delay ", IEEE Trans. Circuit Theory, Vol. CT-18, pp. 659-664, Nov. 1971.

[8] A. Filttweis, " A simple design of maximally flat delay digital filter ", IEEE Trans. Audio Electroacoust., Vol. AU-20, pp. 112-114, June, 1972.

[9] E. Isacson and H.B. Keller, Analysis of Numerical Method, New York, John Wiley & Sons, Inc., pp. 328-329, 1966.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10] G.C. Temes and J.W. Lapatra, Introduction to circuit systhesis and design, New York : McGraw-Hill, 1977.

[11] E.Kreysig, Advanced Engineering Mathematics 3 rd ed, New York : John Wiley and Sons, Inc, 1972.

[12] R. C. Gonsalez and P. Wintz, Digital Image Processing 2 nd ed, Adison Wesley Publishing company, 1987.

[13] B.P. Lathi, Communication System, Wiley Easten limited, 1968.

[14] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, Introduction to Digital Signal Processing, Macmillan Pulishing company, 1988.

[15] D. F. Ellioh, Handbook of Digital Signal Processing, Academic Press, Inc, 1987.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ท

โปรแกรมที่ใช้คำนวณในบทที่ 3

```
'THE CALCULATION PROGRAM FOR LESSON 3
dim m$(10)
DIM AA(20,20),B(20),ac(2,20),ab(10),a(20)
cls
input "PLEASE ENTER GROUP DELAY VALUE(T)?",T
INPUT "ENTER N NUMBER_",N1
INPUT "HOW MANY 'M' NUMBER DO YOU WANT TO RECORD?",E
FOR I=1 TO E
    INPUT "ENTER 'M' NUMBER_",M$(I)
NEXT I
'CALCULATE THE FILTER COEFFICIENT
FOR ABC=1 TO E
    N=N1
    M=VAL(M$(ABC))
    NA=M
    DA=N
    FOR J=0 TO M+N
        FOR K=0 TO (M+N)
            I=J
            IF J>=(M+1) THEN I=(J-M)
            F1=(-1)^(I)*((I)^(k))
            IF J>=(M+1) THEN F1=-1*(-1)^(I)*((I+T)^(K))
            'PRINT K,F1
            AA(K+1,J+1)=F1
            if j<m+n then goto xyz
            f3=t^k
            AA(K+1,M+N+2)=F3
        xyz:
        NEXT K
    NEXT J
    for i=1 to m+n+1
        b(i)=aa(i,m+n+2)
    next i
    for k=1 to m+n
        gosub sub1
        p=aa(k,k)
        for i=k+1 to m+n+1
            p1=aa(i,k)/p
            b(i)=b(i)-p1*b(k)
            for j=k to m+n+1
                aa(i,j)=aa(i,j)-p1*aa(k,j)
            next j
        next i
    next k
    b(m+n+1)=b(n+m+1)/aa(n+m+1,n+m+1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
for i=m+n to 1 step -1
    a1=0
    for j=i+1 to m+n+1
        a1=a1+aa(i,j)*b(j)
    next j
    b(i)=(b(i)-a1)/aa(i,i)
next i
print:print:print
print "*     solution    *":print
for i=1 to m+n+1
    print "x(",i,")=",b(i)
next i
for i=1 to m+n+1
    IF I<=M+1 THEN ac(1,i-1)=b(i)
    IF I>M+1 THEN ac(2,i-1-m)=b(i)
NEXT I
'STOP
'***#### MAGNITUDE AND PHASE ***#####
AC(2,0)=1
PRINT:PRINT
DA=N:NA=M
FOR ID = 1 TO 2
    P=3.14159265358979323
    B0=0
    C0=1
    W=C0*P
    PRINT W
    AC(2,0)=1
    IF ID=2 THEN N=DA
    IF ID=1 THEN N=NA
    MR=0:MI=0
    FOR I=0 TO N
        A(I)=AC(ID,I)
        MR=A(I)*COS(I*W)+MR
        MI=A(I)*SIN(I*W)+MI
    NEXT I
    AB(ID)=SQR(MR*MR+MI*MI)
    PRINT AB(ID)
NEXT ID
DIM MN(201),PH(201)
SS=200:REM MEANE NO.OF POINTIONS=SS+1
FOR S=0 TO SS
    P=3.14159265358979323
    W=(S/SS)*P
    MR=0:MI=0:PC=0:PS=0
    FOR I=0 TO NA
        MR=AC(1,I)*COS(I*W)+MR
     PC=I*AC(1,I)*COS(I*W)+PC
     MI=AC(1,I)*SIN(I*W)+MI
     PS=I*AC(1,I)*SIN(I*W)+PS
    NEXT I
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        MA= SQR(MR*MR+MI*MI)
        TA=-1*(PC*MR+PS*MI)/(MR*MR+MI*MI)
        MR=0:MI=0:AC(2,0)=1:PC=0:PS=0
        FOR I=0 TO DA
            MR=AC(2,I)*COS(I*W)+MR
         PC=I*AC(2,I)*COS(I*W)+PC
         MI=AC(2,I)*SIN(I*W)+MI
         PS=I*AC(2,I)*SIN(I*W)+PS
        NEXT I
        MB=SQR(MR*MR+MI*MI)
        TB=-1*(PC*MR+PS*MI)/(MR*MR+MI*MI)
        MN(S)=(MA/AB(1))*(AB(2)/MB):PH(S)=TB-TA
        PRINT "PT.#  ";S;TAB(11);"  W = " ;S/SS;
        PRINT      "        PI        ";TAB(30);MN(S);SPC(25-
LEN(STR$(MN(S))));PH(S)
        cls : locate 1,9,0 :PRINT TAB(10): PRINT "DO NOT
DISTURB !"
        locate 1,12,0:PRINT TAB(15);S;"->";SS
        'PRINT CHR$(7)
    NEXT S
    C$="GDATA"+M$(ABC)+".DAT"
    OPEN C$ FOR OUTPUT AS #1
    for s=0 to ss
        print#1,mn(s)
        print#1,ph(s)
    next s
    print#1,da
    print#1,na
    print#1,T
    close#1
NEXT ABC
stop


sub1:
p=abs(aa(k,k))
mm=k
for i=k to m+n+1
    if p<abs(aa(i,k)) then p=abs(aa(i,k)):mm=i
next i
if p=0 then print:print "*can't be solved *":stop
if mm=k then return
for j=k to m+n+1
    swap aa(k,j),aa(mm,j)
next j
swap b(k),b(mm)
return
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้คำนวณในบทที่ 4

```
'THE CALCULATION PROGRAM FOR LESSON 4
DEFINT  K,L,H
defdbl a,b,d
DIM A(10),B(10),AC(2,20),m$(10)
PRINT "**** WELCOME TO HIGH PASS FILLTER SOFTWARE ****"
PRINT
INPUT "PLEASE ENTER GROUP DELAY VALUE(T)?",T
INPUT "ENTER N NUMBER_",N
INPUT "HOW MANY 'M' NUMBER DO YOU WANT TO RECORD?",E
FOR I=1 TO E
    INPUT "ENTER 'M' NUMBER_",M$(I)
NEXT I
FOR ABC=1 TO E
M=VAL(M$(ABC))
NA=M
DA=N
'T=GROUP DELAY
'CHECK ODD&EVEN
X=M/2
K=M/2
Y=N/2
L=N/2
IF X<>K AND Y<>L THEN P=(-1)^((M+N)/2)
IF X<>K AND Y=L  THEN P=(-1)^((M+N+1)/2)
IF X=K  AND Y<>L THEN P=(-1)^((M+N-1)/2)
IF X=K  AND Y=L  THEN P=(-1)^((M+N)/2)
'FIND DELTA
A=1
FOR I=1 TO M
    J=0
    DO WHILE I>J
       A=A*(I-J)
       J=J+1
    LOOP
NEXT I
B=1
FOR J=0 TO M
    FOR I=1 TO N
        B=B*(I+T-J)
    NEXT I
NEXT J
C=1
FOR I=2 TO N
    J=1
    DO WHILE I>J
       C=C*(I-J)
       J=J+1
    LOOP
NEXT I
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
AA=P*A*B*C
PRINT "DELTA =  ",AA
'FIND DELTA K
FOR K=0 TO M
    A=1
    FOR I=1 TO M
        J=0
        IF I=K THEN GOTO L1
        DO WHILE I>J
           IF J=K THEN GOTO L2
           A=A*(I-J)
           L2:
           J=J+1
        LOOP
    L1:
    NEXT I
    B=1
    FOR I=K+1 TO M
        B=B*(I-T)
    NEXT I
    C=1
    IF K<=0 THEN GOTO LL1
    FOR J=0 TO K-1
        C=C*(T-J)
    NEXT J
    LL1:
    D=1
    FOR J=0 TO M
        IF J=K THEN GOTO L3
        FOR I=1 TO N
            D=D*(I+T-J)
        NEXT I
    L3:
    NEXT J
    E=1
    FOR I=1 TO  N
        E=E*I
    NEXT I
    F=1
    FOR I=2 TO N
        J=1
        DO WHILE I>J
           E=E*(I-J)
           J=J+1
        LOOP
    NEXT I
    X=K/2
    L=K/2
    IF X=L THEN Q=P
    IF X<>L THEN Q=P*(-1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    BB=Q*A*B*C*D*E*F
    A(K)=BB/AA
    PRINT "A(",K,") = ",A(K)
    AC(1,K)=A(K)
NEXT K
FOR H=1 TO N
    A=1
    FOR I=1 TO M
        J=0
        DO WHILE I>J
            A=A*(I-J)
            J=J+1
        LOOP
    NEXT I
    B=1
    FOR I=1 TO N
     IF I=H THEN GOTO L5
        FOR J=0 TO M
            B=B*(I+T-J)
        NEXT J
    L5:
    NEXT I
    C=1
    FOR J=0 TO M
        C=C*(T-J)
    NEXT J
    D=1
    FOR I=2 TO N
        J=1
        IF I=H THEN GOTO L6
        DO WHILE I>J
            IF J=H THEN GOTO L7
            D=D*(I-J)
            L7:
            J=J+1
        LOOP
     L6:
     NEXT I
     E=1
     FOR I=H+1 TO N
         E=E*I
     NEXT I
     F=1
     IF H<=1 THEN GOTO L8
     FOR J=1 TO H-1
         F=F*(-J)
     NEXT J
     L8:
     X=H/2
     L=H/2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        IF X=L THEN R=P*(-1)
        IF X<>L THEN R=P
        BB=R*A*B*C*D*E*F
        B(H)=BB/AA
        PRINT "B(",H,") = ",B(H)
        AC(2,H)=B(H)
NEXT H

DIM  AB(2)
AC(2,0)=1
PRINT:PRINT
FOR ID = 1 TO 2
     P=3.14159265358979323
     B0=0
     C0=1
     W=C0*P
     PRINT W
     AC(2,0)=1
     IF ID=2 THEN N=DA
     IF ID=1 THEN N=NA
     MR=0:MI=0
     FOR I=0 TO N
          MR=AC(ID,I)*COS(I*W)+MR
          MI=AC(ID,I)*SIN(I*W)+MI
     NEXT I
     AB(ID)=SQR(MR*MR+MI*MI)
     PRINT AB(ID)
NEXT ID
DIM MN(201),PH(201)
SS=200:REM MEANE NO.OF POINTIONS=SS+1
FOR S=0 TO SS
     P=3.14159265358979323
     W=(S/SS)*P
     MR=0:MI=0:PC=0:PS=0
     FOR I=0 TO NA
          MR=AC(1,I)*COS(I*W)+MR
      PC=I*AC(1,I)*COS(I*W)+PC
      MI=AC(1,I)*SIN(I*W)+MI
      PS=I*AC(1,I)*SIN(I*W)+PS
     NEXT I
     MA= SQR(MR*MR+MI*MI)
     TA=-1*(PC*MR+PS*MI)/(MR*MR+MI*MI)
     MR=0:MI=0:AC(2,0)=1:PC=0:PS=0
     FOR I=0 TO DA
          MR=AC(2,I)*COS(I*W)+MR
      PC=I*AC(2,I)*COS(I*W)+PC
      MI=AC(2,I)*SIN(I*W)+MI
      PS=I*AC(2,I)*SIN(I*W)+PS
     NEXT I
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    MB=SQR(MR*MR+MI*MI)
    TB=-1*(PC*MR+PS*MI)/(MR*MR+MI*MI)
    MN(S)=(MA/AB(1))*(AB(2)/MB):PH(S)=TB-TA
    PRINT "PT.#  ";S;TAB(11);"  W = ";S/SS;
    PRINT " PI ";TAB(30);MN(S);SPC(25-LEN(STR$(MN(S))));PH(S)
    cls :locate 1,9,0 :PRINT TAB(10): PRINT "DO NOT DISTURB !"
    locate 1,12,0:PRINT TAB(15);S;"->";SS
    'PRINT CHR$(7)
NEXT S
'for s=0 to ss
'    print mn(s),ph(s)
'next s
'stop
C$="FDATA"+M$(ABC)+".DAT"
open C$ for output as #1
for s=0 to ss
    print#1,mn(s)
    print#1,ph(s)
next s
print#1,da
print#1,na
print#1,T
close#1
NEXT ABC
stop
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้คำนวณในบทที่ 5

```
'THE CALCULATION PROGRAM FOR LESSON 5
dim ll$(10)
DIM AA(20,20),B(20),ac(2,20),ab(10),a(20)
cls
input "PLEASE ENTER GROUP DELAY VALUE(T)?",T$
input "pls enter 'M' number?",m$
INPUT "ENTER N NUMBER_",N1
INPUT "HOW MANY 'l' NUMBER DO YOU WANT TO RECORD?",E
FOR I=1 TO E
    INPUT "ENTER 'l' NUMBER_",ll$(I)
NEXT I
FOR ABC=1 TO E
for bcd=1 to 2
    LL=VAL(LL$(ABC))
    t=val(t$)
    if bcd=1 then t=t*ll
    if bcd=2 then t=t*(ll-1)
    n=n1
    M=VAL(M$)
    NA=M
    DA=N
    FOR J=0 TO M+N
        FOR K=0 TO (M+N)
            I=J
            IF J>=(M+1) THEN I=(J-M)
            F1=(-1)^(I)*((I)^(k))
            IF J>=(M+1) THEN F1=-1*(-1)^(I)*((I+T)^(K))
            'PRINT K,F1
            AA(K+1,J+1)=F1
            if j<m+n then goto xyz
            f3=t^k
            AA(K+1,M+N+2)=F3
        xyz:
        NEXT K
    NEXT J
    for i=1 to m+n+1
        b(i)=aa(i,m+n+2)
    next i
    for k=1 to m+n
        gosub sub1
        p=aa(k,k)
        for i=k+1 to m+n+1
            p1=aa(i,k)/p
            b(i)=b(i)-p1*b(k)
            for j=k to m+n+1
                aa(i,j)=aa(i,j)-p1*aa(k,j)
            next j
        next i
    next k
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
b(m+n+1)=b(n+m+1)/aa(n+m+1,n+m+1)
for i=m+n to 1 step -1
    a1=0
    for j=i+1 to m+n+1
        a1=a1+aa(i,j)*b(j)
    next j
    b(i)=(b(i)-a1)/aa(i,i)
next i
print:print:print
print "*     solution     *":print
for i=1 to m+n+1
    print "x(",i,")=",b(i)
next i
for i=1 to m+n+1
    IF I<=M+1 THEN ac(1,i-1)=b(i)
    IF I>M+1 THEN ac(2,i-1-m)=b(i)
NEXT I
'STOP
'******* MAGNITUDE AND PHASE *******
AC(2,0)=1
PRINT:PRINT
DA=N:NA=M
FOR ID = 1 TO 2
    P=3.14159265358979323
    B0=0
    C0=1
    W=C0*P
    PRINT W
    AC(2,0)=1
    IF ID=2 THEN N=DA
    IF ID=1 THEN N=NA
    MR=0:MI=0
    FOR I=0 TO N
        A(I)=AC(ID,I)
        MR=A(I)*COS(I*W)+MR
        MI=A(I)*SIN(I*W)+MI
    NEXT I
    AB(ID)=SQR(MR*MR+MI*MI)
    PRINT AB(ID)
NEXT ID
DIM MN(201),PH(201),mmn(201),pph(201)
SS=200:REM MEANE NO.OF POINTIONS=SS+1
if bcd=2 then goto call
FOR S=0 TO SS
    P=3.14159265358979323
    W=(S/SS)*P
    MR=0:MI=0:PC=0:PS=0
    FOR I=0 TO NA
        MR=AC(1,I)*COS(I*W)+MR
     PC=I*AC(1,I)*COS(I*W)+PC
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
         MI=AC(1,I)*SIN(I*W)+MI
         PS=I*AC(1,I)*SIN(I*W)+PS
        NEXT I
        MA= SQR(MR*MR+MI*MI)
        TA=-1*(PC*MR+PS*MI)/(MR*MR+MI*MI)
        MR=0:MI=0:AC(2,0)=1:PC=0:PS=0
        FOR I=0 TO DA
            MR=AC(2,I)*COS(I*W)+MR
         PC=I*AC(2,I)*COS(I*W)+PC
         MI=AC(2,I)*SIN(I*W)+MI
         PS=I*AC(2,I)*SIN(I*W)+PS
        NEXT I
        MB=SQR(MR*MR+MI*MI)
        TB=-1*(PC*MR+PS*MI)/(MR*MR+MI*MI)
        MN(S)=(MA/AB(1))*(AB(2)/MB):PH(S)=TB-TA
        PRINT "PT.#  ";S;TAB(11);"  W = " ;S/SS;
        PRINT     "        PI        ";TAB(30);MN(S);SPC(25-
LEN(STR$(MN(S))));PH(S)
        cls  :  locate  1,9,0  :PRINT  TAB(10):  PRINT  "DO  NOT
DISTURB !"
        locate 1,12,0:PRINT TAB(15);S;"->";SS
        'PRINT CHR$(7)
    NEXT S
    goto cal2
    cal1:
    FOR S=0 TO SS
        P=3.14159265358979323
        W=(S/SS)*P
        MR=0:MI=0:PC=0:PS=0
        FOR I=0 TO NA
            MR=AC(1,I)*COS(I*W)+MR
         PC=I*AC(1,I)*COS(I*W)+PC
         MI=AC(1,I)*SIN(I*W)+MI
         PS=I*AC(1,I)*SIN(I*W)+PS
        NEXT I
        MA= SQR(MR*MR+MI*MI)
        TA=-1*(PC*MR+PS*MI)/(MR*MR+MI*MI)
        MR=0:MI=0:AC(2,0)=1:PC=0:PS=0
        FOR I=0 TO DA
            MR=AC(2,I)*COS(I*W)+MR
         PC=I*AC(2,I)*COS(I*W)+PC
         MI=AC(2,I)*SIN(I*W)+MI
         PS=I*AC(2,I)*SIN(I*W)+PS
        NEXT I
        MB=SQR(MR*MR+MI*MI)
        TB=-1*(PC*MR+PS*MI)/(MR*MR+MI*MI)
        MmN(S)=(MA/AB(1))*(AB(2)/MB):PpH(S)=TB-TA
        PRINT "PT.#  ";S;TAB(11);"  W = " ;S/SS;
        PRINT     "        PI        ";TAB(30);MN(S);SPC(25-
LEN(STR$(MN(S))));PH(S)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        cls : locate 1,9,0 :PRINT TAB(10): PRINT "DO NOT
DISTURB !"
        locate 1,12,0:PRINT TAB(15);S;"->";SS
        'PRINT CHR$(7)
    NEXT S
    cal2:
    next bcd
    C$="FDATA"+LL$(ABC)+"DAT"
    OPEN C$ FOR OUTPUT AS #1
    for s=0 to ss
        mn(s)=mn(s)/mmn(s)
        ph(s)=ph(s)-pph(s)
        print#1,mn(s)
        print#1,ph(s)
    next s
    t=val(t$)
    print#1,da
    print#1,na
    print#1,T
    close#1
NEXT ABC
stop


sub1:
p=abs(aa(k,k))
mm=k
for i=k to m+n+1
    if p<abs(aa(i,k)) then p=abs(aa(i,k)):mm=i
next i
if p=0 then print:print "*can't be solved *":stop
if mm=k then return
for j=k to m+n+1
    swap aa(k,j),aa(mm,j)
next j
swap b(k),b(mm)
return
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้คำนวณในบทที่ 6

```
'THE INPUT SAMPLING SIGNAL

PI#=4*ATN(1)
DEF FNF(N)=.5*SIN(PI#*10^(-3)*(N+.5))+SIN(PI#*(N+.5))
DIM Y(10000)
print "calculate the y(N) value"
FOR n=0 to 5000
    Y(n)=FNF(N)
NEXT n
print "write to disk"
close#1
open "mix1.dat" for output as#1
for i=0 to 5000
    print#1,y(i)
next i
close#1
stop


'THE FILTER COEFFICIENT CALCULATION PROGRAM

dim m$(10)
DIM AA(20,20),B(20),ac(2,20),ab(10),a(20)
cls
input "PLEASE ENTER GROUP DELAY VALUE(T)?",T
INPUT "ENTER N NUMBER_",N1
INPUT "HOW MANY 'M' NUMBER DO YOU WANT TO RECORD?",E
FOR I=1 TO E
    INPUT "ENTER 'M' NUMBER_",M$(I)
NEXT I
FOR ABC=1 TO E
    N=N1
    M=VAL(M$(ABC))
    NA=M
    DA=N
    FOR J=0 TO M+N
        FOR K=0 TO (M+N)
            I=J
            IF J>=(M+1) THEN I=(J-M)
            F1=(-1)^(I)*((I)^(k))
            IF J>=(M+1) THEN F1=-1*(-1)^(I)*((I+T)^(K))
            'PRINT K,F1
            AA(K+1,J+1)=F1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
          if j<m+n then goto xyz
          f3=t^k
          AA(K+1,M+N+2)=F3
     xyz:
     NEXT K
NEXT J
for i=1 to m+n+1
     b(i)=aa(i,m+n+2)
next i
for k=1 to m+n
     gosub sub1
     p=aa(k,k)
     for i=k+1 to m+n+1
          p1=aa(i,k)/p
          b(i)=b(i)-p1*b(k)
          for j=k to m+n+1
               aa(i,j)=aa(i,j)-p1*aa(k,j)
          next j
     next i
next k
b(m+n+1)=b(n+m+1)/aa(n+m+1,n+m+1)
for i=m+n to 1 step -1
     a1=0
     for j=i+1 to m+n+1
          a1=a1+aa(i,j)*b(j)
     next j
     b(i)=(b(i)-a1)/aa(i,i)
next i
print:print:print
print "*     solution     *":print
for i=1 to m+n+1
     print "x(",i,")=",b(i)
next i
close#1
cc$="filt"+m$(abc)+".dat"
print cc$
open cc$ for output as#1
print#1,m,n

for i=1 to m+n+1
     IF I<=M+1 THEN ac(1,i-1)=b(i)
     IF I>M+1 THEN ac(2,i-1-m)=b(i)
NEXT I
ac(2,0)=1
for i=0 to m
     print#1,ac(1,i)
next i
for i=0 to n
     print#1,ac(2,i)
next i
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    close#1
NEXT ABC
stop



sub1:
p=abs(aa(k,k))
mm=k
for i=k to m+n+1
    if p<abs(aa(i,k)) then p=abs(aa(i,k)):mm=i
next i
if p=0 then print:print "*can't be solved *":stop
if mm=k then return
for j=k to m+n+1
    swap aa(k,j),aa(mm,j)
next j
swap b(k),b(mm)
return
```

'THE CALCULATEION PROGRAM FOR FILTER OUTPUT SIGNAL

```
DIM x(10000),y(10000)
defdbl a,b
close#1
'goto 111
open "mix1.dat" for input as #1

FOR J=0 TO 5000
    input#1,x(j)
NEXT J
close#1
cls
111:
open "filt1.dat" for input as #1
input#1,m,n
print m,n
for i=0 to m
    input#1,a(i)
    print "m=";i,"a(";i;")=";a(i)
next i
for i=0 to n
    input#1,b(i)
    print "n=";i,"b(";i;")=";b(i)
next i
y(0)=0
close#1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
open "mix2.dat"for output as#1
print#1,y(0)
for j=1 to 5000
    cls
    a=0
    b=0
    for k=0 to m
        l=j-k
        if k<0 then x(l)=0
        a=a+(a(k)*x(l))
     next k
     for k=1 to n
         l=j-k
         if l<=0 then y(l)=0
         b=b+(b(k)*y(l))
     next k
     y(j)=a-b
     print "calculate filter out put....."
next j
for i=1 to 5000
    print#1,y(i)
next i
stop
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลลัพธ์ในบทที่ 3 และ 4

```
'THE PLOTTING PROGRAM FOR LESSON 3&4
defint 1
DIM YV(201),MN(201),PH(201),x1(5),x2(5),y1(5),y2(5)
DIM M$(10)
PRINT "    *****  WELCOME TO PLOT SOFTWHARE    ******"
PRINT:PRINT
INPUT "   HOW MANY GRAPH DO YOU WANT TO PLOT?",E
FOR I=1 TO E
    INPUT "   ENTER 'M=' NUMBER_",M$(I)
NEXT I
PRINT "   PLEASE ENTER YOUR DATA DISKETTES"
PRINT "   PRESS ANY KEY AFTER FINISH......"
WHILE NOT INSTAT
WEND
ss=200
for id=1 to 2
    SCREEN 0
    close #1
    IF ID=2 THEN CCCC
    FOR II= 1 TO E
        C$="GDATA"+M$(II)+".DAT"
        'USE C$="FDATA"+M$(II)+".DAT" FOR LESSON 4
        open C$ FOR INPUT AS #1
        for s=1 to ss+1
            input#1,yv(s)
            input#1,PH(s)
        next s
        input#1,da
        input#1,na
        input#1,T
        close#1
        T$=STR$(T)
        T$=RIGHT$(T$,1)
        DA$=STR$(DA)
        DA$=RIGHT$(DA$,1)
        IF II>1 THEN GOTO DDD
        screen 2
        VIEW  (20,0)-(639,170)
        line(8,0)-(8,168)
        FOR Y=168 TO 0 STEP -24:line(5,Y)-(7,Y):NEXT Y
        DD=-20
        FOR KK=20 TO 0 STEP -3
            LOCATE KK+1,1
            DD=DD+20
            PRINT USING "#.#";DD/100
        NEXT KK
        LOCATE 22,79
        'PRINT "W"
     line(8,168)-(610,168)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    FOR X=8 TO 610 STEP 150:line(X,168)-(x,170):NEXT X
    FOR I=1 TO 4
        LOCATE 23,17+((I-1)*19)
        PRINT USING "#.##";.25*I;
        PRINT "II"
    NEXT I
    DDD:
    D1=168
    D2=24/.2
    IF II=1 THEN GOSUB P1
    IF II=2 THEN GOSUB P2
    IF II=3 THEN GOSUB P3
    IF II=4 THEN GOSUB P4
    if ii=5 then gosub p5
NEXT II
LOCATE 24,14
A$=SPACE$(10)
FOR II=1 TO E
    PRINT "M=";M$(II);A$;
NEXT II
GOSUB KIND
locate 25,14
B$=SPACE$(10)
PRINT "T=";T$;B$;"N=";DA$

LOCATE 25,15
PRINT "        ***** MAGNITUDE PLOT *****"
while char$<>"Y"
      char$=inkey$
wend
GOTO EEEE
CCCC:
FOR II=1 TO E
    C$="GDATA"+M$(II)+".DAT"
    'USE C$="FDATA"+M$(II)+".DAT" FOR LESSON 4
    OPEN C$ FOR INPUT AS #1
    FOR I=1 TO SS+1
    INPUT#1,MN(I)
    INPUT#1,YV(I)
    NEXT I
    INPUT#1,DA
    INPUT#1,NA
    INPUT#1,T
    CLOSE#1
    IF II>1 THEN CCC
    SCREEN 2
    VIEW(25,0)-(639,170)
 LINE (8,0)-(8,160)
 FOR Y=160 TO 0 STEP -16:LINE (5,Y)-(7,Y):NEXT Y
 DD=-3
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        FOR KK=19 TO 0 STEP -2
            LOCATE KK+1,1
            DD=DD+1
            PRINT USING "##.#";DD
        NEXT KK
        LINE (8,128)-(610,128)
        LOCATE 17,79
        'PRINT "W"
        FOR X=8 TO 610 STEP 150:LINE(X,128)-(X,132):NEXT X
        FOR KK=1 TO 4
            LOCATE 22,18+((KK-1)*19)
            PRINT USING "#.##";.25*KK;
            PRINT "II"
        NEXT KK
        CCC:
        D1=128
        D2=16
        IF II=1 THEN GOSUB P1
        IF II=2 THEN GOSUB P2
        IF II=3 THEN GOSUB P3
        IF II=4 THEN GOSUB P4
        IF II=5 THEN GOSUB P5
NEXT II
        LOCATE 24,14
        FOR II=1 TO E
            PRINT "M=";M$(II);A$;
        NEXT II
        GOSUB KIND
        LOCATE 25,14
        PRINT "T=";T$;B$;"N=";DA$
        LOCATE 25,15
        PRINT "        ***** GROUP DELAY PLOT *****"
        EEEE:
NEXT ID
CHAR$=" "
WHILE CHAR$<>"Y"
      CHAR$=INKEY$
WEND
'TEXT
screen 0
PRINT CHR$(7):INPUT "OKAY?";OK$
STOP
P1:
FOR I=1 TO SS+1
    X=8+(600/200*(I-1))
    Y=D1-(YV(I)*D2)
    IF I=1 THEN PSET(X,Y)
    LINE-(X,Y)
NEXT I
RETURN
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
P2:
FOR I=1 TO SS+1
    X=8+(600/200*(I-1))
    Y=D1-(YV(I)*D2)
    PSET(X,Y)
NEXT I
RETURN
P3:
FOR I=1 TO SS+1
    X=8+(600/200*(I-1))
    Y=D1-(YV(I)*D2)
    D=I/3
    L=I/3
    if d<>1 then pset(x,y)
    if d=1 then line-(x,y)
NEXT I
RETURN
P4:
FOR I=1 TO SS+1
    X=8+(600/200*(I-1))
    Y=D1-(YV(I)*D2)
    D=I/4
    L=I/4
    if d<>1 then pset(x,y)
    if d=1 then line-(x,y)
NEXT I
RETURN
P5:
FOR I=1 TO SS+1
    X=8+(600/200*(I-1))
    Y=D1-(YV(I)*D2)
    D=I/5
    L=I/5
    if d<>1 then pset(x,y)
    if d=1 then line-(x,y)
NEXT I
RETURN
KIND:
VIEW (20,0)-(639,189)
for ii=1 to e
    if ii=1 then gosub a1
    if ii=2 then gosub a2
    if ii=3 then gosub a3
    if ii=4 then gosub a4
    if ii=5 then gosub a5
next ii
RETURN
a1:
for i=62 to 80 step 3
    if i=62 then pset(i,189)
    line-(i,189)
next i
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'locate 23,7
'print "M=";M$(II)
return
a2:
for i=160 to 178 step 3
    pset(i,189)
next i
'locate 23,16
'print "M=";M$(II)
return
a3:
j=0
for i=260 to 278 step 3
    if i=260 then pset(i,189)
    j=j+1
    d=j/3
    l=j/3
    if d<>l then pset(i,189)
    if d=l then line-(i,189)
next i
'locate 23,25
'print "M=";M$(II)
return
a4:
j=0
for i=350 to 371  step 3
    if i=350 then pset(i,189)
    j=j+1
    d=j/4
    l=j/4
    if d<>l then pset(i,189)
    if d=l then line-(i,189)
next i
'locate 23,34
'print "M=";M$(II)
return
a5:
j=0
for i=460 to 481  step 3
    if i=450 then pset(i,189)
    j=j+1
    d=j/5
    l=j/5
    if d<>l then pset(i,189)
    if d=l then line-(i,189)
next i
'locate 23,43
'print "M=";M$(II)
return
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลลัพธ์ในบทที่ 5

```
'THE PLOTTING PROGRAM FOR LESSON 5
defint l
DIM YV(201),MN(201),PH(201),x1(5),x2(5),y1(5),y2(5)
DIM LL$(10)
PRINT "   *****  WELCOME TO PLOT SOFTWHARE   ******"
PRINT:PRINT
INPUT "   HOW MANY GRAPH DO YOU WANT TO PLOT?",E
FOR I=1 TO E
    INPUT "   ENTER 'L=' NUMBER_",LL$(I)
NEXT I
PRINT "   PLEASE ENTER YOUR DATA DISKETTES"
PRINT "   PRESS ANY KEY AFTER FINISH......"
WHILE NOT INSTAT
WEND
ss=200
for id=1 to 2
    SCREEN 0
    close #1
    IF ID=2 THEN CCCC
    FOR II= 1 TO E
        C$="FDATA"+LL$(II)+"DAT"
        open C$ FOR INPUT AS #1
        for s=1 to ss+1
            input#1,yv(s)
            input#1,PH(s)
        next s
        input#1,da
        input#1,na
        input#1,T
        close#1
        T$=STR$(T)
        T$=RIGHT$(T$,1)
        DA$=STR$(DA)
        DA$=RIGHT$(DA$,1)
        IF II>1 THEN GOTO DDD
        screen 2
        VIEW  (20,0)-(639,170)
        line(8,0)-(8,168)
        FOR Y=168 TO 0 STEP -24:line(5,Y)-(7,Y):NEXT Y
        DD=-20
        FOR KK=20 TO 0 STEP -3
            LOCATE KK+1,1
            DD=DD+20
            PRINT USING "#.#";DD/100
        NEXT KK
        LOCATE 22,79
        'PRINT "W"
        line(8,168)-(610,168)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    FOR X=8 TO 610 STEP 150:line(X,168)-(x,170):NEXT X
 FOR I=1 TO 4
        LOCATE 23,17+((I-1)*19)
        PRINT USING "#.##";.25*I;
        PRINT "II"
    NEXT I
    DDD:
    D1=168
    D2=24/.2
    IF II=1 THEN GOSUB P1
    IF II=2 THEN GOSUB P2
    IF II=3 THEN GOSUB P3
    IF II=4 THEN GOSUB P4
    if ii=5 then gosub p5
NEXT II
LOCATE 24,14
A$=SPACE$(9)
FOR II=1 TO E
    PRINT "L=";LL$(II);A$;
NEXT II
GOSUB KIND
B$=SPACE$(10)
locate 25,14
PRINT "T=";T$;B$;"N=";DA$;B$;"M=";NA
LOCATE 25,15
PRINT "      ***** MAGNITUDE PLOT *****"
while char$<>"Y"
      char$=inkey$
wend
GOTO EEEE
CCCC:
FOR II=1 TO E
    C$="FDATA"+LL$(II)+"DAT"
    OPEN C$ FOR INPUT AS #1
    FOR I=1 TO SS+1
    INPUT#1,MN(I)
    INPUT#1,YV(I)
    NEXT I
    INPUT#1,DA
    INPUT#1,NA
    INPUT#1,T
    CLOSE#1
    IF II>1 THEN CCC
    SCREEN 2
    VIEW(25,0)-(639,170)
 LINE (8,0)-(8,160)
 FOR Y=160 TO 0 STEP -16:LINE (5,Y)-(7,Y):NEXT Y
 DD=-3
 FOR KK=19 TO 0 STEP -2
        LOCATE KK+1,1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            DD=DD+1
            PRINT USING "##.#";DD
        NEXT KK
        LINE (8,128)-(610,128)
        LOCATE 17,79
        'PRINT "W"
        FOR X=8 TO 610 STEP 150:LINE(X,128)-(X,132):NEXT X
        FOR KK=1 TO 4
            LOCATE 22,18+((KK-1)*19)
            PRINT USING "#.##";.25*KK;
            PRINT "II"
        NEXT KK
        CCC:
        D1=128
        D2=16
        IF II=1 THEN GOSUB P1
        IF II=2 THEN GOSUB P2
        IF II=3 THEN GOSUB P3
        IF II=4 THEN GOSUB P4
        IF II=5 THEN GOSUB P5
NEXT II
        LOCATE 24,14
        FOR II=1 TO E
            PRINT "L=";LL$(II);A$;
        NEXT II
        GOSUB KIND
        LOCATE 25,14
        PRINT "T=";T$;B$;"N=";DA$;B$;"M=";NA
        LOCATE 25,15
        PRINT "       ***** GROUP DELAY PLOT *****"
        EEEE:
NEXT ID
CHAR$=" "
WHILE CHAR$<>"Y"
      CHAR$=INKEY$
WEND
'TEXT
screen 0
PRINT CHR$(7):INPUT "OKAY?";OK$
STOP
P1:
FOR I=1 TO SS+1
    X=8+(600/200*(I-1))
    Y=D1-(YV(I)*D2)
    IF I=1 THEN PSET(X,Y)
    LINE-(X,Y)
NEXT I
RETURN
P2:
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
FOR I=1 TO SS+1
    X=8+(600/200*(I-1))
    Y=D1-(YV(I)*D2)
    PSET(X,Y)
NEXT I
RETURN
P3:
FOR I=1 TO SS+1
    X=8+(600/200*(I-1))
    Y=D1-(YV(I)*D2)
    D=I/3
    L=I/3
    if d<>1 then pset(x,y)
    if d=1 then line-(x,y)
NEXT I
RETURN
P4:
FOR I=1 TO SS+1
    X=8+(600/200*(I-1))
    Y=D1-(YV(I)*D2)
    D=I/4
    L=I/4
    if d<>1 then pset(x,y)
    if d=1 then line-(x,y)
NEXT I
RETURN
P5:
FOR I=1 TO SS+1
    X=8+(600/200*(I-1))
    Y=D1-(YV(I)*D2)
    D=I/5
    L=I/5
    if d<>1 then pset(x,y)
    if d=1 then line-(x,y)
NEXT I
RETURN
KIND:


VIEW (20,0)-(639,189)
for ii=1 to e
    if ii=1 then gosub a1
    if ii=2 then gosub a2
    if ii=3 then gosub a3
    if ii=4 then gosub a4
    if ii=5 then gosub a5
next ii
RETURN
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
a1:
for i=62 to 80 step 3
    if i=62 then pset(i,189)
    line-(i,189)
next i
'locate 23,7
'print "M=";M$(II)
return
a2:
for i=160 to 178 step 3
    pset(i,189)
next i
'locate 23,16
'print "M=";M$(II)
return
a3:
j=0
for i=260 to 278 step 3
    if i=260 then pset(i,189)
    j=j+1
    d=j/3
    l=j/3
    if d<>l then pset(i,189)
    if d=l then line-(i,189)
next i
'locate 23,25
'print "M=";M$(II)
return
a4:
j=0
for i=350 to 371  step 3
    if i=350 then pset(i,189).
    j=j+1
    d=j/4
    l=j/4
    if d<>l then pset(i,189)
    if d=l then line-(i,189)
next i
return
a5:
j=0
for i=460 to 481  step 3
    if i=450 then pset(i,189)
    j=j+1
    d=j/5
    l=j/5
    if d<>l then pset(i,189)
    if d=l then line-(i,189)
next i
return
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลลัพธ์ในบทที่ ๖

```
'THE PLOTTING PROGRAM FOR INPUT & OUTPUT SIGNAL
DIM y(10000)
close#1
open "mix1.dat" for input as #1
'USING "MIX2.DAT" FOR OUTPUT SIGNAL PLOTTING
FOR J=0 TO 5000
    input#1,y(j)
NEXT J
close#1
screen 2
line (39,0)-(39,174)
line (39,89)-(639,89)
for i=0 to 4
    line (37,(169-i*40))-(41,(169-i*40))
next i
for i=1 to 6
    line((39+i*100),87)-((39+i*100),91)
next i
for i=0 to 4
    locate (22-i*5),1
    j=-2+i
    print j
next i
locate 1,8
print "f(t)"
locate 22,17
print "7"
locate 22,29
print "14"
locate 22,42
print "21"
locate 22,55
print "28"
locate 22,67
print "35"
locate 22,79
print "42"
locate 13,72
print "t(1000ms)"
    y(0)=0
    x=38
    m=0
    for i=0 to 600
        x=x+1
        m=m+7
        y=89-(y(m)*40)
        pset(x,y)
    next i
stop
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. " การออกแบบวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีเคอร์ซีฟชนิดความถี่สูงผ่านที่ให้ผลตอบสนองทั้งขนาด และกรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน " การประชุมทางวิชาการวิศกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 11 ณ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล เล่มที่ 2 หน้า 5-2-1 - 5-2-9 วันที่ 16-17 ธันวาคม 2531

2. " การประยุกต์ใช้สูตรสำเร็จในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองความถี่ดิจิตอลแบบรีคอร์ซีฟ ชนิดความถี่สูงผ่าน " การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หน้า 182-191 วันที่ 16-17 พฤศจิกายน 2532

3. " การควบคุมผลการตอบสนองของวงจรกรองความถี่ดิจิตอลชนิดความถี่สูงผ่าน ที่มีผลตอบสนองขนาด และกรุ๊ฟดีเลย์ราบเรียบที่สุดพร้อมๆ กัน " การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หน้า 192-201 วันที่ 16-17 พฤศจิกายน 2532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้