



การออกแบบอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านแบบอินเทอร์ดิจิทัล

The Study of Interdigital Band Pass Filter Design

นาย ชัยวัฒน์ สาณะเสน 34102089
นาย ชัยสิทธิ์ ธรรมรัตน์ 34102090
นาย สันทัต ชูวงศ์อินทร์ 34107413

วัน เดือน ปี... 19 ต.ค. 2539
เลขทะเบียน... 0329๖1
เลขเรียกหนังสือ... T 372๖1 ๕๖

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ปีการศึกษา 2537

ไปว่ากรณีใดที่สิ่งนี้ ล้างล้างเขาให้ด้วยใจและต้องจำไว้ว่าของเอกสารเหล่านี้ที่มีวางไว้ให้

The Study of Interdigital Band Pass Filter Design



Mr. Chaiwat Sanasen 34102089

Mr. Chaisit Thamrattanakorn 34102090

Mr. Santad Chuwong-in 34107413

A project submitted in partial fulfillment for Bachelor of Engineering

Department of Telecommunications Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านแบบอินเตอร์ดิจิตอล
THE STUDY OF INTERDIGITAL BAND-PASS FILTER DESIGN

โดย

นาย ชัยวัฒน์ สาณะเสน 34102089

นาย ชัยสิทธิ์ ธรรมรัตนากร 34102090

นาย สันทัต ชูวงศ์อินทร์ 34107413

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. สมผล โกศลวิตร

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2537

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านแบบ INTERDIGITAL

(THE STUDY OF INTERDIGITAL BAND PASS FILTER DESIGN)

ผู้จัดทำ

1. นายชัยวัฒน์ สามะเสน 34102089
2. นายชัยสิทธิ์ ธรรมรัตน์ 34102090
3. นายสัศทัต ชูวงศ์อินทร์ 34107413

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(.....)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อเรื่อง : การออกแบบอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านแบบอินเตอร์ดิจิตอล

ชื่อ : นาย ชัยวัฒน์ สาณะเสน 34102089

นาย ชัยสิทธิ์ ชรรรมรัตนกร 34102090

นาย สันทัต ชูวงศ์อินทร์ 34107413

สาขา : วิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาควิชา : วิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะ : วิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. สมผล โกศลวิตร

ปีการศึกษา : 2537

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอถึงผลการศึกษา การออกแบบอุปกรณ์กรองความถี่ผ่านความถี่ไมโครเวฟ แบบอินเตอร์ดิจิตอล โดยเป็นอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านชนิดแบนด์วิธแคบ (แบนด์วิธ = 10%)

การศึกษาเริ่มจาก การพิจารณาความสัมพันธ์พื้นฐานต่าง ๆ อันที่จะนำไปสู่สมการการออกแบบอุปกรณ์กรองความถี่ และในการศึกษานี้ได้ใช้แผ่นไดอิเล็กตริก (dielectric card) เป็นองค์ประกอบรีแอคทีฟ (Reactive element) ซึ่งมีประโยชน์คือ สะดวกในการประดิษฐ์ และประหยัด และสุดท้ายจะเป็นผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของชิ้นงานที่สร้างขึ้นมา

Abstract

In this thesis, we present the study of how to design microwave filter for Interdigital Band Pass Filter type. It is a Narrow Bandwidth band pass filter (Bandwidth = 10%)

We started with the basic relationship of coupling and designing equations. These relations will bring us to design the filter. In this study and experiment, our group use a dielectric card as a reactive element, The advantages are invented easily and economically. In the last we discuss about the result of the efficiency of the Interdigital Band Pass Filter we built.

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
สารบัญ	II
บทที่ 1 : บทนำ	1
บทที่ 2 : การออกแบบ	14
บทที่ 3 : การทดลองและผลการทดลอง	22
สรุปผลการทดลอง	29
กิตติกรรมประกาศ	30
หนังสืออ้างอิง	31



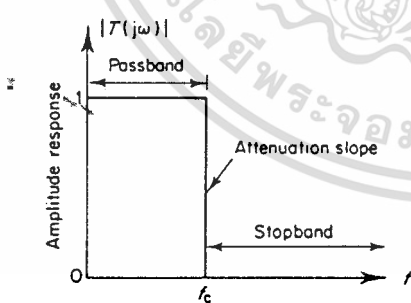
บทที่ 1

บทนำ

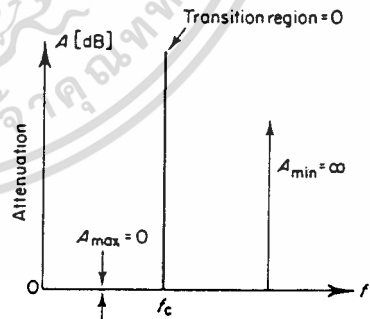
1.1 อุปกรณ์กรองความถี่ขั้นพื้นฐาน (The Basic Filter Types)

ชนิดของอุปกรณ์กรองความถี่ (filter) ที่สำคัญที่สุดที่มักจะถูกกล่าวถึงเสมอ ๆ ก็คือ อุปกรณ์กรองความถี่ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter) ซึ่งจะมีการตอบสนองทางแอมพลิจูดแบบเส้นตรง (linear amplitude response) ของอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติ (ideal lowpass filter) แสดงได้ ดังรูป 1.1(a) และมีการสูญเสียเนื่องจากการต่อของอุปกรณ์กรองความถี่ (insertion loss) ในหน่วยของเดซิเบล (decibel : dB) แสดงได้ดังรูปที่ 1.1(b) ซึ่งอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- จะต้องไม่มีการสูญเสีย (loss) และค่าริบเปิ้ล (ripple) ในย่านความถี่ผ่าน (passband)
- จะต้องมีค่าความชันของการลดทอน (attenuation slope) ที่แน่นอนที่ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency : f_c)
- จะต้องมีค่าการลดทอน (attenuation) ที่แน่นอนในย่านที่ไม่ให้ความถี่ผ่าน (stopband)



(a) amplitude response



(b) insertion loss

รูปที่ 1.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติที่มีคุณสมบัติพวกนี้ จะถูกเรียกว่า "วงจรถองความถี่แบบบรีควอลล์ (brick wall filter)" โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว การตอบสนองทางเฟสแบบเส้นตรง (linear phase response) จะถูกสมมติขึ้น และ อุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติจะถูกแยกแยะโดยอาศัยความจริงที่ว่า จะไม่มีอัตราส่วนของ ฟังก์ชันการแปลง (transfer function : $T(s)$) ใด ๆ ที่จะสามารถอธิบายได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น การอธิบายเกี่ยวกับการวิเคราะห์ของอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติสามารถที่จะเป็นการประมาณค่าได้ ซึ่งการประมาณค่าส่วนมากจะเป็นผลที่ได้จากทฤษฎีโครงข่ายสมัยเก่า (Classical Network Theory) พื้นฐานส่วนใหญ่ที่ดีที่สุดและถูกใช้มากที่สุดจะอยู่บนหลักการของแบบพื้นฐาน (basic type) ซึ่งคุณลักษณะของมันจะถูกแสดงในรูปที่ 1.2 และสามารถที่จะอธิบายได้อย่างย่อ ๆ ดังต่อไปนี้

อุปกรณ์กรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิร์ธ (Butterworth Filters)

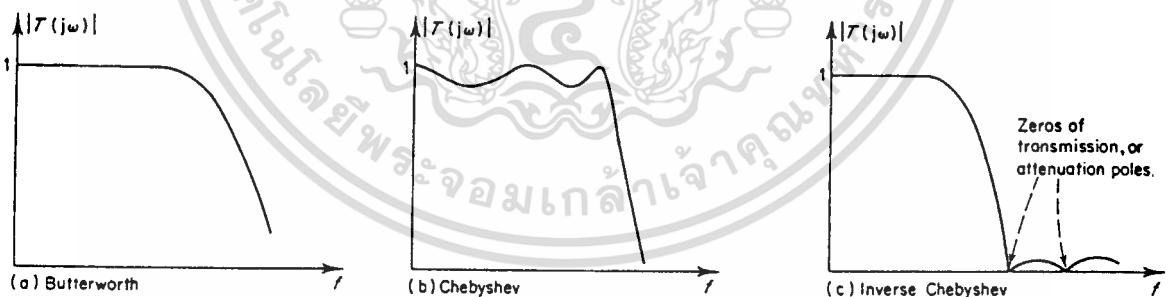
การประมาณค่าบัทเทอร์เวิร์ธ (Butterworth) ของอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านในทางอุดมคติใด ๆ จะแสดงดังในรูปที่ 1.2(a) อุปกรณ์กรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิร์ธเป็นอุปกรณ์กรองความถี่ที่มีความยืดหยุ่นของข้อตกลงหลาย ๆ อย่าง ซึ่งอุปกรณ์กรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิร์ธนี้จะมีการตอบสนองที่ชันอย่างมากในย่านความถี่ผ่าน แต่มันก็จะต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่สูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ค่าความชันของการลดทอนของอุปกรณ์กรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิร์ธจะดีขึ้น ถ้ามันมีการตอบสนองทางอิมพัลส์ (impulse response) ที่ดี และอุปกรณ์กรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิร์ธนี้ก็เป็นอุปกรณ์กรองความถี่ที่นิยมใช้มากที่สุดชนิดหนึ่ง

อุปกรณ์กรองความถี่แบบเชบชีฟหรืออิกวิริปเปิล (Equiripple or Chebyshev Filter)

ถ้าความชันของการลดทอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงคัทออฟ (cutoff) มีความสำคัญมากกว่าช่วงแคบของย่านความถี่ผ่านหรือความเป็นเส้นตรงของเฟส ลักษณะอย่างนี้คือ ลักษณะการตอบสนองแบบเชบชีฟ (Chebyshev) ดังแสดงในรูปที่ 1.2(b) อุปกรณ์กรองความถี่แบบเชบชีฟจะแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของโอเวอร์ชูต (overshoot) เมื่อถูกทำให้ทำงานโดยฟังก์ชันขั้นบันได (step function) และถูกออกแบบด้วยค่าริปเปิลที่ถูกกำหนดไว้แล้ว (นั่นคือ อิกวิริปเปิล : equiripple) ในย่านความถี่ผ่าน เช่น 0.01 เดซิเบล (dB) ถึง 3 เดซิเบล ริปเปิล เมื่อกล่าวถึงการตอบสนองที่ไม่เรียบ คือมีริปเปิลในย่านความถี่ผ่านนั้น มันจะมีข้อได้เปรียบในอัตราที่สูงกว่าคัทออฟ ในช่วงขอบ ๆ ของเส้นโค้งย่านความถี่ผ่าน (passband curve) ของการตอบสนองที่ความถี่เหนือกว่าช่วงคัทออฟซึ่งจะขนานไปด้วยกันกับช่วงความถี่ผ่าน แต่จะใกล้เคียงกันมากกว่าการเทียบเท่า (equivalent) ของอุปกรณ์กรองความถี่แบบบัทเทอร์เวิร์ธ

ทั้งอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำแบบบัทเทอร์เวิร์ธและเชปบีเชฟจะมีการลดทอนตามที่กำหนดไว้ที่ความถี่ที่กำหนดไว้เท่านั้น เช่น ค่าศูนย์ทั้งหมดของการส่ง (zeros of transmission) จะเกิดขึ้นที่ความถี่ที่กำหนดไว้แล้ว ส่วนที่ความถี่อื่น ๆ สัญญาณบางความถี่จะผ่านอุปกรณ์กรองความถี่ออกไป เช่น ในย่านที่ไม่ให้ความถี่ผ่าน ถ้าค่าการลดทอนที่กำหนดที่ความถี่ที่ต้องการในย่านที่ไม่ให้ความถี่ผ่านจำเป็นต้องมีการตอบสนองของเชปบีเชฟแบบย้อนกลับ (Inverse Chebyshev) ดังแสดงในรูปที่ 1.2(c) ก็จะถูกใช้ ซึ่งในรูปแสดงให้เห็นว่าจะไม่มีริบเปิดในย่านความถี่ผ่าน แต่จะมีริบเปิดในย่านที่ไม่ให้ความถี่ผ่าน และค่าการลดทอนจะถูกกำหนดที่ความถี่ที่แน่นอนค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า “ขั้วของการลดทอน (attenuation poles)”

โครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลไลน์ (Interdigital Line Structure) ที่เราได้รู้จักมาแล้ว จะมีจุดที่น่าสนใจ คือ สามารถใช้เป็นโครงสร้างแบบสโลว์เวฟ (slow wave structure) ได้ จากการศึกษาที่ผ่านมา โครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลไลน์จะมีคุณสมบัติของอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่าน (band-pass filter) ซึ่งในการศึกษาการเปลี่ยนคุณสมบัติของอิมเมจิมพีแดนซ์ (image-impedance) และ อิมเมจพรอพเพเกชันเฟส (image propagation phase) ถูกกำหนดอยู่ในโครงสร้างของอินเตอร์ดิจิตอลไลน์ ซึ่งผลก็จะเปลี่ยนไปตามการทดลอง จากการอธิบายที่ผ่านมาสามารถจะอธิบายประโยชน์ได้หลายแง่มุม ซึ่งก็คือ สมการการออกแบบโดยประมาณสำหรับอุปกรณ์กรองความถี่แบบอินเตอร์ดิจิตอล (Interdigital filter) โดยกำหนดลักษณะเฉพาะของย่านความถี่ผ่านและคัทออฟ



รูปที่ 1.2 การตอบสนองของอุปกรณ์กรองความถี่แบบพื้นฐาน

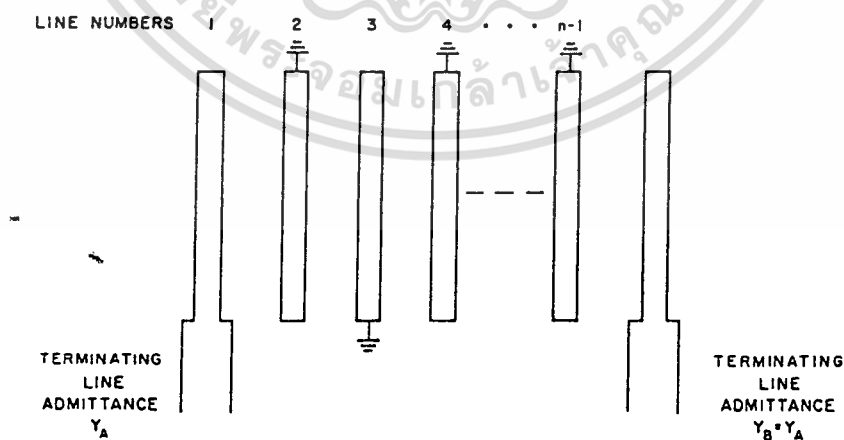
ในรูปที่ 1.3 แสดงอุปกรณ์กรองความถี่แบบอินเตอร์ดิจิตอลชนิดหนึ่ง ซึ่งจะอธิบายโครงสร้างที่แสดงประกอบด้วย TEM-โหมด (TEM mode) ของสตริปไลน์รีโซเนเตอร์ (strip-line resonator) ระหว่างระนาบกราวด์ที่ขนานกัน (parallel ground plane) อุปกรณ์รีโซเนเตอร์แต่ละตัวมีความยาวเป็น $1/4$ ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (λ) ที่ย่านความถี่กลาง (midband) และถูกลัดวงจร (short circuited) ที่ปลายข้างหนึ่ง และเปิดวงจร (open circuited) ที่ปลายอีกข้างหนึ่ง การคัปปลิง (Coupling) จะเกิดขึ้นโดยอาศัยสนามที่เกิดขึ้นระหว่างรีโซเนเตอร์แต่ละตัว สมการออกแบบที่แสดงให้เห็นในกรณีนี้ (สำหรับเทอร์มินเนตติ้งไลน์ (terminating-line) ที่ถูกลัดวงจร) จะให้ขนาดโครงสร้างของอุปกรณ์กรองความถี่ซึ่งอุปกรณ์กรองความถี่นี้จะทำงานที่แบนด์วิธแคบ ๆ (Narrow Band) หรือ ปานกลาง (moderate Band : 30% ของแบนด์วิธหรือน้อยกว่านั้น) โครงสร้างนี้แต่ละองค์ประกอบของไลน์จะถูกป้อนให้กับรีโซเนเตอร์ ยกเว้นอินพุต (input) และเอาต์พุต (output) ขององค์ประกอบของไลน์ซึ่งมีการทำการอิมพีแดนซ์แมตชิ่ง (impedance-matching)



รูปที่ 1.3 อุปกรณ์กรองความถี่แบบอินเตอร์ดิคัลที่มีการลัดวงจรที่ปลายแต่ละข้าง



รูปที่ 1.4 อุปกรณ์กรองความถี่แบบอินเตอร์ดิคัลที่มีการเปิดวงจรที่ปลายแต่ละข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 1.4 แสดงถึงอุปกรณ์กรองความถี่อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งแตกต่างจากรูปที่ 1.3 ที่มีเทอร์มินัลเปิด-ปิด ถูกเปิดวงจรแทนที่จะถูกลัดวงจร สมการการออกแบบชนิดที่ 2 นี้จะทำงานที่ผ่านแบนด์วิธกว้าง ๆ (30% ของแบนด์วิธหรือมากกว่านั้น) ในกรณีนี้องค์ประกอบของไลน์ทั้งหมดจะถูกป้อนให้กับรีโซเนเตอร์ร่วมกับเทอร์มินัลเปิด-ปิดที่เปิดวงจรที่แต่ละปลาย

อุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านแบบอินเตอร์ดิจิตอลมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่างดังนี้

1. มีขนาดกะทัดรัดมาก
2. ระยะห่างระหว่างรีโซเนเตอร์สามารถยืดหยุ่นได้
3. ช่วงผ่านช่วงที่ 2 จะมีความถี่ศูนย์กลาง (center frequency) อยู่ที่ 3 เท่าของความถี่ศูนย์กลางของช่วงผ่านที่ 1 และจะไม่มีผลตอบสนองเกิดขึ้นระหว่างช่วงห่างของทั้งสองย่านนี้
4. อัตราการคัทออฟและความมั่นคงของช่วงหยุด (strength of the stopband) จะมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยอาศัยขั้วลัดเทียลอเดอร์โพล (multiple-order pole) ของการลัดตอนที่ dc และการคูณความถี่ศูนย์กลางของช่วงผ่านช่วงที่ 1
5. อุปกรณ์กรองความถี่แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่ประดิษฐ์ขึ้นจะเป็นโครงสร้างที่เรียกว่าเป็นการสนับสนุนจากตัวอุปกรณ์เอง (self-supporting) ซึ่งวัสดุคุณวนวนนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากฉนวนจึงสามารถตัดทิ้งได้

ผลของการคับปลิงทั้งหมดที่กล่าวมานี้ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 และ 1.4 จะไม่สามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์อธิบายได้ เนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการกำหนดการตอบสนองไว้ก่อนจะเป็นปัญหาที่ยากกว่าการวิเคราะห์โครงสร้างที่ให้มา และเนื่องจากการวิเคราะห์ให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำของโครงสร้างนี้เป็นสิ่งที่ทำได้ยากมาก และโอกาสของการที่จะได้ขั้นตอนที่ถูกต้องแม่นยำในการวิเคราะห์ก็มีโอกาสน้อยมาก ดังนั้น ขั้นตอนของการวิเคราะห์ที่ให้มา ณ ที่นี้จะรวมถึงการประมาณอย่างง่าย ๆ ซึ่งสามารถใช้การคำนวณอย่างง่าย ๆ ถึงแม้ว่าสมการของการออกแบบจะเป็นสมการที่เป็นการประมาณค่าอย่างง่าย ๆ แต่ผลของการออกแบบจะคงยังมีผลที่ถูกต้องแม่นยำเพียงพอสำหรับการออกแบบ อุปกรณ์กรองความถี่แบบอินเตอร์ดิจิตอล ให้สามารถทำงานในย่านความถี่ที่ต้องการได้

สำหรับประโยชน์ของผู้ศึกษาที่จำเป็นต้องออกแบบอุปกรณ์กรองความถี่ แต่เป็นผู้ที่ไม่ใคร่ที่จะสนใจในทฤษฎีของอุปกรณ์กรองความถี่มากเท่าไรนัก ก็ควรที่จะศึกษาถึงสมการการออกแบบอุปกรณ์กรองความถี่แบบอินเตอร์ดิจิตอล และการใช้แบบฝึกหัดเพื่อความชำนาญ เป็นอันดับแรกก่อน

1.2 ต้นแบบอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่าน และการแปลงจากการกรองความถี่ต่ำผ่านไปเป็นการกรองช่วงความถี่ผ่าน (Low-Pass Prototype Filters and Use of a Low-Pass-to-Band-Pass Transformation)

หลักการใช้งานของอุปกรณ์กรองความถี่ชนิดความถี่ต่ำผ่านถูกนำมาใช้เป็นขั้นตอนในการออกแบบอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านซึ่งค่าองค์ประกอบ (element values) จะให้คุณสมบัติตามที่ต้องการ รูปที่ 1.5 แสดงอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านของแบบที่ทำการพิจารณาอยู่ และค่าองค์ประกอบจะเป็นจุดมุ่งหมายที่เราจะศึกษา

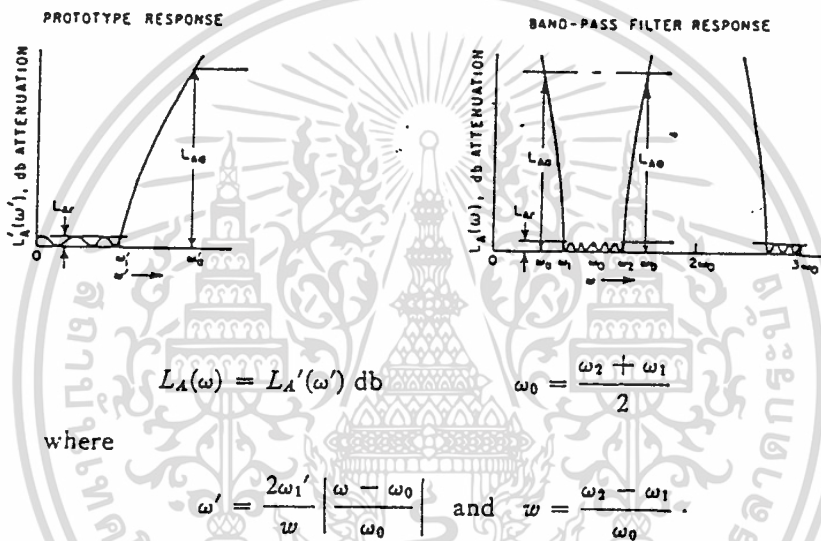
จากรูปที่ 1.6 ทางด้านซ้าย แสดงให้เห็นถึง ผลตอบสนองแบบเชปปีเซฟซึ่งได้จากอุปกรณ์ความถี่ชนิดความถี่ต่ำผ่าน ค่าองค์ประกอบสำหรับต้นแบบอุปกรณ์กรองความถี่ชนิดนี้จะมีการตอบสนองแบบเรียบกัน (tabulated) สังเกตว่า ค่าของ n จะเป็นจำนวนขององค์ประกอบรีแอคทีฟ (reactive element) มีช่วงจาก g_0 ถึง g_{n+1} รวมทั้งค่าความต้านทานที่ส่วนปลาย จากต้นแบบของอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านซึ่งมี n องค์ประกอบรีแอคทีฟจะนำไปหาอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านซึ่งมี n รีโชนเตอร์



รูปที่ 1.5 การกำหนดพารามิเตอร์ของต้นแบบอุปกรณ์กรองความถี่ $g_0, g_1, g_2, \dots, g_n, g_{n+1}$

จากทางด้านขวาของรูปที่ 1.6 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่าน ซึ่งสอดคล้องกับผลการตอบสนองของต้นแบบอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่าน ผลการตอบสนองของอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านจะมีรูปแบบของคุณสมบัติช่วงผ่านที่เหมือนกับต้นแบบ (Prototype) แต่ความกว้างของช่วงผ่านของอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านเราสามารถที่จะคาดหมายได้ จะสังเกตเห็นได้ว่า ผลการตอบสนองของอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านจะมีความสมมาตร และจะมีจุดศูนย์กลางของช่วงผ่านที่ซ้ำกัน ณ ตำแหน่ง $\omega_0, 3\omega_0, 5\omega_0, \dots$ ในหนังสือที่ Matthaei[1] เขียนไว้ จะมีสมการสำหรับหาค่าคุณสมบัติของการลดทอนของความชันที่มากที่สุด (maximally flat) และอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำแบบเชปปีเซฟซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรความถี่เชิงมุม (radian frequency) ω', ω_1' และ n ที่ส่วนล่างของรูปที่ 1.6 เป็นการแปลงจากความถี่ต่ำผ่านไปเป็นความถี่ช่วงผ่าน ซึ่งคุณสมบัตการลดทอนของต้นแบบอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านที่เป็นฟังก์ชันของ ω' จะถูกส่ง ไปเป็นคุณสมบัตการลดทอนของอุปกรณ์กรอง

ช่วงความถี่ผ่าน (จุดศูนย์กลางที่ ω_0) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรความถี่เชิงมุม (radian frequency variable : ω) ของอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่าน เนื่องมาจากการลดทอนที่เหมือนกันทั้งอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านและอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านที่ความถี่ ω' และ ω ตามลำดับ โดยทั้งสองค่านี้จะมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งเราสามารถที่จะทำนาย คุณสมบัติของการลดทอนของ อุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่าน โดยใช้ข้อมูลเหล่านี้ได้ ในหนังสือที่ Matthaei[1] เขียนไว้ ยังมีสมการสำหรับหาค่าของ n เพื่อหาค่าของการลดทอน L_{A_s} เดซิเบล ที่ความถี่ที่กำหนดให้ ω_s



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองของดินแบบของอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำผ่านกับผลตอบสนองของอุปกรณ์ช่วงความถี่ผ่าน

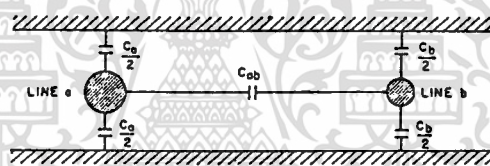
การแปลงจากความถี่ต่ำผ่านเป็นความถี่ช่วงผ่านที่ให้นิรูปที่ 1.6 จะเป็นการประมาณและปกติจะใช้พิจารณาสำหรับอุปกรณ์กรองความถี่แบบแบนด์วิธแคบหรือแบนด์วิธปานกลางเท่านั้น ตัวพารามิเตอร์ w ซึ่งอยู่ในสมการการส่ง คือ แฟรคชันนอลแบนด์วิธ (fractional bandwidth) ของอุปกรณ์กรองความถี่ ตัวพารามิเตอร์นี้ จะใช้ในสมการการออกแบบที่จะแสดงให้เห็นต่อไป เพราะว่าสมการการออกแบบ อาศัยหลักการประมาณค่า ซึ่งค่าแฟรคชันนอลแบนด์วิธที่แท้จริงของอุปกรณ์กรองความถี่จะมีค่าประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าค่าของ w ที่ใช้ในสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 คัปเปิลไลน์แบบขนาน (Parallel-Coupled Lines)

ในส่วนที่แล้วอุปกรณ์กรองความถี่แบบอินเตอร์ดิจิตอลจะประกอบด้วยอาร์เรย์ (array) ของไลน์ที่ขนานกัน (parallel lines) ที่อยู่ระหว่างระนาบกราวด์ (ground planes) สมการการออกแบบสำหรับอุปกรณ์กรองความถี่ที่ได้ให้ไว้ในที่นี้ จะเป็นผลจากไลน์คาปาซิแตนซ์ (line capacitance) ต่อหน่วยความยาวที่แตกต่างกัน เนื่องจากไลน์ต่าง ๆ ในอาร์เรย์ในอุปกรณ์กรองความถี่ จากค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหน่วยความยาวเหล่านี้จะสามารถหาขนาดที่แท้จริงของไลน์ออกมาได้ ซึ่งจะสามารถกำหนดขนาดของไลน์คาปาซิแตนซ์ ต่าง ๆ เหล่านี้ได้ และสมการที่ได้ออกมาจะหาได้จากคาปาซิแตนซ์ที่เจาะจง เพื่อที่จะมีส่วนสัมพันธ์กับวิธีการออกแบบ และอธิบายถึงการออกแบบข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งจะเป็นประโยชน์เมื่อมีการคัดแปลงสำหรับรูปแบบของอาร์เรย์ของไลน์ที่ขนานกัน กรณีแรกที่เราจะพิจารณาเป็นกรณีของ คัปเปิลไลน์ 2 ตัวที่ไม่สมมาตรกันวางขนานกัน (two unsymmetrical parallel-coupled lines)

กรณีของคัปเปิลไลน์สองตัวที่ไม่สมมาตรกันวางขนานกัน



รูปที่ 1.7 คัปเปิลไลน์ 2 ตัวที่ไม่สมมาตรกันวางขนานกัน (C_a , C_b และ C_c คือ ไลน์คาปาซิแตนซ์ต่อความยาวอินพุท)

จากรูปที่ 1.7 แสดงให้เห็นถึงคู่ที่ไม่สมมาตร (unsymmetrical pair) ของคัปเปิลไลน์ที่วางขนานกัน (parallel-coupled lines) และไลน์คาปาซิแตนซ์ต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า C_a เป็นคาปาซิแตนซ์ต่อหน่วยความยาวระหว่างไลน์ a กับกราวด์, C_{ab} เป็นคาปาซิแตนซ์ต่อหน่วยความยาวระหว่างไลน์ a กับไลน์ b และ C_b เป็นคาปาซิแตนซ์ต่อหน่วยความยาวระหว่างไลน์ b กับ กราวด์

เมื่อค่า C_a ไม่เท่ากับ C_b จะทำให้เกิดแอดมิตแตนซ์โหมดคู่ (even-mode admittance) กับแอดมิตแตนซ์โหมดคี่ (odd-mode admittance) ได้แสดงไว้ในสมการ (a) ในตารางที่ 1.1 ส่วนในเทอมของคาปาซิแตนซ์โหมดคู่ (even-mode capacitance) และคาปาซิแตนซ์โหมดคี่ (odd-mode capacitance) สำหรับไลน์ a นั้นเป็นไปตามสมการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$C_{00}^a = C_a + 2C_{ab}, \quad C_{oc}^a = C_a \quad \text{-----(1)}$$

และสำหรับไลน์ b จะเป็นดังสมการนี้

$$C_{00}^b = C_b + 2C_{ab}, \quad C_{oc}^b = C_b \quad \text{-----(2)}$$

v = velocity of light in medium of propagation
 $= 1.18 \times 10^{10} / \sqrt{\epsilon_r}$ inches/sec.

η_0 = intrinsic impedance of free space = 376.7 ohms

ϵ = dielectric constant = $0.225\epsilon_r \mu\text{mf/inch}$

$$\left. \begin{aligned} Y_{oo}^a &= vC_a, & Y_{oo}^a &= v(C_a + 2C_{ab}) \\ Y_{oo}^b &= vC_b, & Y_{oo}^b &= v(C_b + 2C_{ab}) \end{aligned} \right\} \quad \text{(a)}$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{oo}^a &= \frac{C_b + 2C_{ab}}{vF}, & Z_{oo}^a &= \frac{C_b}{vF} \end{aligned} \right\} \quad \text{(b)}$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{oo}^b &= \frac{C_a + 2C_{ab}}{vF}, & Z_{oo}^b &= \frac{C_a}{vF} \end{aligned} \right\} \quad \text{(b)}$$

where $F = C_a C_b + C_a C_{ab} + C_b C_{ab}$

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_a}{\epsilon} &= \frac{\eta_0 Y_{oo}^a}{\sqrt{\epsilon_r}}, & \frac{C_{ab}}{\epsilon} &= \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{Y_{oo}^a - Y_{oo}^b}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad \text{(c)}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_b}{\epsilon} &= \frac{\eta_0 Y_{oo}^b}{\sqrt{\epsilon_r}}, & \frac{C_{ab}}{\epsilon} &= \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{Y_{oo}^b - Y_{oo}^a}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad \text{(c)}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_a}{\epsilon} &= \frac{\eta_0 2Z_{oo}^b}{\sqrt{\epsilon_r} H}, & \frac{C_{ab}}{\epsilon} &= \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{Z_{oo}^b - Z_{oo}^a}{H} \right) \end{aligned} \right\} \quad \text{(d)}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_b}{\epsilon} &= \frac{\eta_0 2Z_{oo}^a}{\sqrt{\epsilon_r} H}, & \frac{C_{ab}}{\epsilon} &= \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{Z_{oo}^a - Z_{oo}^b}{H} \right) \end{aligned} \right\} \quad \text{(d)}$$

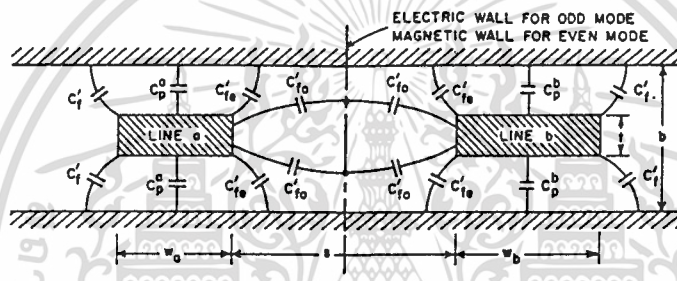
where $H = Z_{oo}^a Z_{oo}^b + Z_{oo}^b Z_{oo}^a$.

ตารางที่ 1.1

ความสัมพันธ์ระหว่างไลน์แอดมิตแดนซ์, อิมพีแดนซ์, และคาปาซิแตนซ์ต่อความยาวของคัปเปิลไลน์ที่ไม่สมมาตรกันวางขนานกัน

สำหรับคัปเปิลไลน์หลายตัวที่สมมาตรกันวางขนานกัน (symmetrical parallel-coupled lines) อิมพีแดนซ์โหมดคี่ (odd-mode impedance) จะเป็นทำนองเดียวกับแอดมิตแดนซ์โหมดคี่ ส่วนอิมพีแดนซ์โหมดคู่ (even-mode impedance) ก็จะเป็นทำนองเดียวกับแอดมิตแดนซ์โหมดคู่ซึ่งแสดงจากสมการ (b) ในตารางที่ 1.1 ซึ่งไม่ใช่กรณีของคัปเปิลไลน์หลายตัวที่ไม่สมมาตรกันวางขนานกัน สำหรับกรณีที่ไม่สมมาตร อิมพี

แดนซ์โหมคคู่และอิมพีแดนซ์โหมคคู่ จะไม่เป็นทำนองเดียวกับแอดมิตแดนซ์โหมคคู่และแอดมิตแดนซ์โหมคคู่ ซึ่งเหตุผลนี้จะแสดงให้เห็นจริงเมื่อได้คำนวณแอดมิตแดนซ์โหมคคู่และแอดมิตแดนซ์โหมคคู่ การกำหนดชั้นพื้นฐานของแอดมิตแดนซ์เหล่านี้ จะสมมติว่าไลน์ทั้งสองถูกขับโดยศักดาที่มีขนาดเท่ากัน (voltages of identical magnitude) ซึ่งมีเฟสเท่ากันหรือตรงข้ามกัน ขณะที่กระแสในไลน์ทั้งสองอาจจะมีขนาดที่แตกต่างกัน เมื่อทำการคำนวณอิมพีแดนซ์โหมคคู่และอิมพีแดนซ์โหมคคู่ การกำหนดชั้นพื้นฐานของอิมพีแดนซ์เหล่านี้ สมมติให้ว่าไลน์ทั้งสองถูกขับโดยกระแสที่มีขนาดเท่ากัน (currents of identical magnitude) ด้วยเฟสที่เหมือนหรือตรงข้ามกัน ขณะที่ขนาดของศักดาบนไลน์ทั้งสองอาจจะแตกต่างกัน จากทั้งสองกลุ่มที่มีเงื่อนไขขอบเขตที่ต่างกัน จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของศักดา ต่อ กระแส (voltage-current ratios) ที่ได้จะแตกต่างกัน ถ้าไลน์ทั้งสองไม่สมมาตรกัน



รูปที่ 1.8 ภาคตัดขวางของคัปเปิลไลน์หรือบาร์แบบสี่เหลี่ยมที่ไม่สมมาตรกันวางขนานกัน

คัปเปิลไลน์ที่ไม่สมมาตรกันวางขนานกันที่ง่ายต่อการออกแบบจะแสดงไว้ในรูปที่ 1.8 จะเห็นได้ว่าคาปาซิแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของแต่ละไลน์จะแยกออกเป็น ส่วน ๆ โดยที่คาปาซิแตนซ์ C_p^a จะเป็นแผ่นขนาน (parallel plate) คาปาซิแตนซ์ต่อหน่วยความยาวระหว่างด้านหนึ่งของไลน์ a และระนาบกราวน์ที่อยู่ติดกัน ขณะที่ C_p^b จะเป็นแผ่นขนานคาปาซิแตนซ์ต่อหน่วยความยาว ระหว่างไลน์ b กับระนาบกราวน์ที่อยู่ติดกัน คาปาซิแตนซ์ C_s จะเป็นคาปาซิแตนซ์ที่ขอบต่อหน่วยความยาวของสตริปไลน์ใด ๆ ที่อยู่ทีมนอกสุด คาปาซิแตนซ์ C_e จะเป็นคาปาซิแตนซ์ที่ขอบต่อหน่วยความยาวที่ขอบด้านในของแต่ละสตริปไลน์เมื่อสตริปถูกกระตุ้นในโหมคคู่ (เช่น ด้วยศักดาที่เท่ากันของเฟสที่เหมือนกัน) ค่าคาปาซิแตนซ์ C_o เป็นค่าเมื่อสตริปถูกกระตุ้นในโหมคคี่ (เช่น ด้วยศักดาที่มีแอมพลิจูดเท่ากันและมีเฟสตรงข้ามกัน) จากรูปที่ 1.8 จะสังเกตเห็นได้ว่าบาร์ทั้งสองมีความสูงเท่ากันซึ่งมีค่าเท่ากับ b โดยถูกสมมติให้มีความกว้างเพียงพอ ซึ่งผลกระทบระหว่างสนามที่ขอบด้านขวาและด้านซ้ายของแต่ละบาร์ถูกตัดทิ้งออกไปได้ หรือมีค่าน้อยมากซึ่งทำให้เกิดความถูกต้อง จากหลักการนี้ สนามที่ขอบจะเหมือนกันทั้งสองบาร์และความแตกต่างระหว่าง C_s และ C_o กับกราวน์ คือ แผ่นขนานคาปาซิแตนซ์ C_p^a และ C_p^b ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 C_a &= 2(C_p^a + C_f + C_{fe'}) \\
 C_{ab} &= (C_{fo'} - C_{fe'}) \\
 C_b &= 2(C_p^b + C_f + C_{fe'})
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Getsinger[4] ได้เรียบเรียงสมการสำหรับคาปาซิแตนซ์ที่ขอบ $C_{fe'}$, $C_{fo'}$ และ C_f และได้เตรียมแผนภาพ (charts) ซึ่งสัมพันธ์กับ $C_{fe'}/\epsilon$, $C_{fo'}/\epsilon$ และ C_f/ϵ ของขนาดของบาร์สี่เหลี่ยม ซึ่งค่า ϵ ในที่นี้เป็นค่าคงที่ของสารไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของตัวกลางการแพร่กระจาย ดังนั้นอัตราส่วนข้างต้นนี้จึงไม่มีหน่วย Getsinger[4] ได้ให้สมการสำหรับการออกแบบคัปเปิลไลน์ที่สมมาตรกันวางขนานกัน และสตรีฟไลน์สี่เหลี่ยมที่สมมาตรกัน ซึ่งเราต้องดัดแปลงสมการนี้ให้เหมาะสมกับกรณีที่ไม่สมมาตร

จะเห็นได้ว่ารูปร่างของไลน์ ในรูปที่ 1.8 ถูกกำหนดในเทอมของขนาด t , b , s , ω_a และ ω_b การออกแบบคู่ของไลน์ตามรูปที่ 1.8 จะมีแอดมิตแตนซ์โหมคี่และแอดมิตแตนซ์โหมคี่ หรืออิมพีแดนซ์โหมคี่และอิมพีแดนซ์โหมคี่ อันดับแรกจะใช้สมการ (c) หรือ (d) ในตารางที่ (1) คำนวณค่า C_a/ϵ , C_b/ϵ และ C_f/ϵ เลือกค่าของ t/b และค่าดังต่อไปนี้

$$\Delta C/\epsilon = C_{ab}/\epsilon \tag{4}$$

ใช้แผนภาพ Getsinger[4] ของ $\Delta C/\epsilon$ และ $C_{fe'}/\epsilon$ กับ s/b เพื่อหาค่า s/b และ $C_{fo'}/\epsilon$ การใช้ t/b และแผนภาพ Getsinger[4] ของ C_f/ϵ กับ t/b หาค่า $C_{fe'}/\epsilon$ และการคำนวณจะเป็นดังนี้

$$\frac{\omega_a}{b} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{t}{b} \right) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{C_a}{\epsilon} \right) - \frac{C_{fe'}}{\epsilon} - \frac{C_f'}{\epsilon} \right] \tag{5}$$

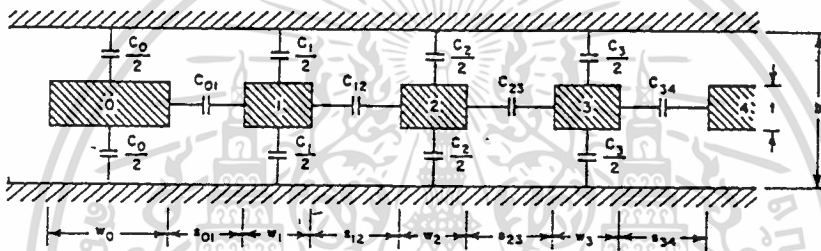
$$\frac{\omega_b}{b} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{t}{b} \right) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{C_b}{\epsilon} \right) - \frac{C_{fe'}}{\epsilon} - \frac{C_f'}{\epsilon} \right] \tag{6}$$

เมื่อช่องว่างระหว่างระนาบกราวน์มีค่าเท่ากับ b ความกว้างของบาร์ คือ ω_a และ ω_b จะสามารถหาออกมาได้ ขั้นตอนนี้จะสามารถปฏิบัติได้ ก็ต่อเมื่อเป็นกรณีสตรีฟแบบบาง เมื่อ $t/b = 0$ หรือถ้า ω_a/b หรือ ω_b/b มีค่าน้อยกว่า 0.35(1- t/b) ความกว้างของบาร์จะถูกต้องเมื่อใช้การประมาณตามสูตรดังนี้

$$\frac{w'}{b} = \frac{0.07 \left(1 - \frac{l}{b}\right) + \frac{w}{b}}{1.20} \quad \text{-----(7)}$$

โดย $0.1 < (w'/b)/(1-l/b) < 0.35$ ในสมการที่ 7 w คือ ความกว้างของบาร์ที่ไม่ถูกต้อง และ w' คือ ความกว้างของบาร์ที่ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องให้ความถูกต้องเพิ่มขึ้นเพราะผลกระทบของสนามที่ขอบทางด้านตรงข้ามของบาร์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อบาร์นั้นแคบ

กรณีของอาร์เรย์ของคัปเปิลไลน์ที่วางขนานกัน



รูปที่ 1.9 ภาคตัดขวางของอาร์เรย์ของคัปเปิลไลน์ที่วางขนานกันระหว่างระนาบกราวน์.

รูปที่ 1.9 แสดงให้เห็นถึงอาร์เรย์ของคัปเปิลไลน์ที่วางขนานกันที่ถูกใช้ในอุปกรณ์กรองความถี่แบบอินเตอร์ดิจิตอล จากโครงสร้างของบาร์ทั้งหมดจะมีอัตราส่วน w/b เหมือนกัน และขนาดอื่น ๆ ของบาร์จะได้ออกมาไม่ยากโดยใช้ขั้นตอนที่อธิบายในส่วนของ การออกแบบคัปเปิลไลน์ที่ไม่สมมาตรกันวางขนานกัน โครงสร้างในรูปที่ 1.9 จะแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างเป็นลักษณะในเทอมของเซลฟคาปาซิแตนซ์ (self-capacitances) ต่อหน่วยความยาวของบาร์แต่ละอันกับกราวน์แทนด้วย C_k และมิวชวลคาปาซิแตนซ์ (mutual capacitances) ต่อหน่วยความยาวระหว่างบาร์ k ที่อยู่ติดกับบาร์ $k+1$ แทนด้วย $C_{k,k+1}$ สิ่ง que แสดงให้เห็นไม่จำเป็นต้องมีความถูกต้องแม่นยำมากนัก จะใช้หาค่าคาปาซิแตนซ์ที่ขอบระหว่างไลน์ที่ให้น่าและไลน์ที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์กรองความถี่แบบอินเตอร์ดิจิตอลที่ได้อธิบายมาแล้ว สมการที่ได้สำหรับนอร์มัลไลซ์เซลฟคาปาซิแตนซ์ (normalized self-capacitance : C_k/ϵ) และนอร์มัลไลซ์

มีหวลคาปาซิแตนซ์ (normalized mutual capacitance : $C_{k,k+1}/\epsilon$) ต่อหน่วยความยาว สำหรับไล่น์ทั้งหมด ภายในโครงสร้าง ดังนั้นขนาดภาคตัดขวางของบาร์และช่องว่างระหว่างบาร์จะถูกคำนวณตามสมการ ขั้นตอนแรกเลือกค่า t และ b ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\frac{(\Delta C)_{k,k+1}}{\epsilon} = \frac{C_{k,k+1}}{\epsilon} \quad \text{-----}(8)$$

แผนภาพ Getsinger[4] จะใช้หาค่า $s_{k,k+1}/b$ ช่องว่าง $s_{k,k+1}$ ระหว่างบาร์ทั้งหมดจะได้ออกมา การนอร์มัลไลซ์คาปาซิแตนซ์ที่ขอบ $(C_{fe'})_{k,k+1}/\epsilon$ ซึ่งรวมกับช่องว่าง $s_{k,k+1}$ ระหว่างบาร์จะได้ออกมา ดังนั้นการนอร์มัลไลซ์ความกว้างของบาร์ที่ k^{th} จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\frac{w_k}{b} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{t}{b} \right) \cdot \left[\frac{1}{2} \left(\frac{C_k}{\epsilon} \right) - \frac{(C_{fe'})_{k-1,k}}{\epsilon} - \frac{(C_{fe'})_{k,k+1}}{\epsilon} \right] \quad \text{-----}(9)$$

ในกรณีที่ปลายของอาร์เรย์ (บาร์ทางด้านซ้ายสุดของรูปที่ 1.9), $C_{fe'}/\epsilon$ สำหรับที่ขอบของบาร์ที่ไม่มีบาร์ใกล้เคียงจะถูกแทนด้วย C_f ซึ่งได้จากแผนภาพ Getsinger[4] สำหรับตัวอย่างนี้คือ บาร์ที่ศูนย์ในรูปที่ 1.9

$$\frac{w_0}{b} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{t}{b} \right) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{C_0}{\epsilon} \right) - \frac{C_f'}{\epsilon} - \frac{(C_{fe'})_{01}}{\epsilon} \right] \quad \text{-----}(10)$$

ถ้าค่า $w_k/b < 0.35(1-t/b)$ สำหรับบาร์ใด ๆ ความกว้างที่ถูกต้องที่ให้ไว้ในสมการที่ 7 สามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ได้

บทที่ 2

การออกแบบอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านแบบอินเทอร์ดิจิตอล

การออกแบบอุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านแบบอินเทอร์ดิจิตอล ในการทดลองนี้ออกแบบโดยมีพื้นฐานมาจากวงจรต้นแบบชนิดเชปบีเชฟ โดยกำหนดให้มีความถี่กลาง $f_0 = 1.5$ GHz และอุปกรณ์กรองความถี่ในการทดลองนี้เป็นชนิดแบนด์พาส (แบนด์พาส = 10%) ดังนั้นช่วงความถี่ผ่านจึงอยู่ในช่วง 1.425 GHz ถึง 1.575 GHz ซึ่งขั้นตอนของการออกแบบมีดังต่อไปนี้

1. กำหนดคุณสมบัติการลดทอน (Attenuation Specification) ที่ต้องการ โดยมีสิ่งที่จะต้องกำหนด เช่น ระดับสัญญาณและความถี่ของช่วงความถี่ผ่านและช่วงที่ไม่ให้ความถี่ผ่าน, ระดับของริปเปิล ดังรูปที่ 1

จากภาพเราจะสามารถหาจำนวนขององค์ประกอบรีแอคทีฟ (n) ได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$n = \left\{ \cosh^{-1} \left[\frac{10^{0.1A_{\min}} - 1}{10^{0.1A_{\max}} - 1} \right]^{1/2} \right\} / \cosh^{-1} (\omega_s / \omega_c)$$

โดยที่ $\omega_s = \omega_b - \omega_a$ และ $\omega_0 = \omega_2 - \omega_1$

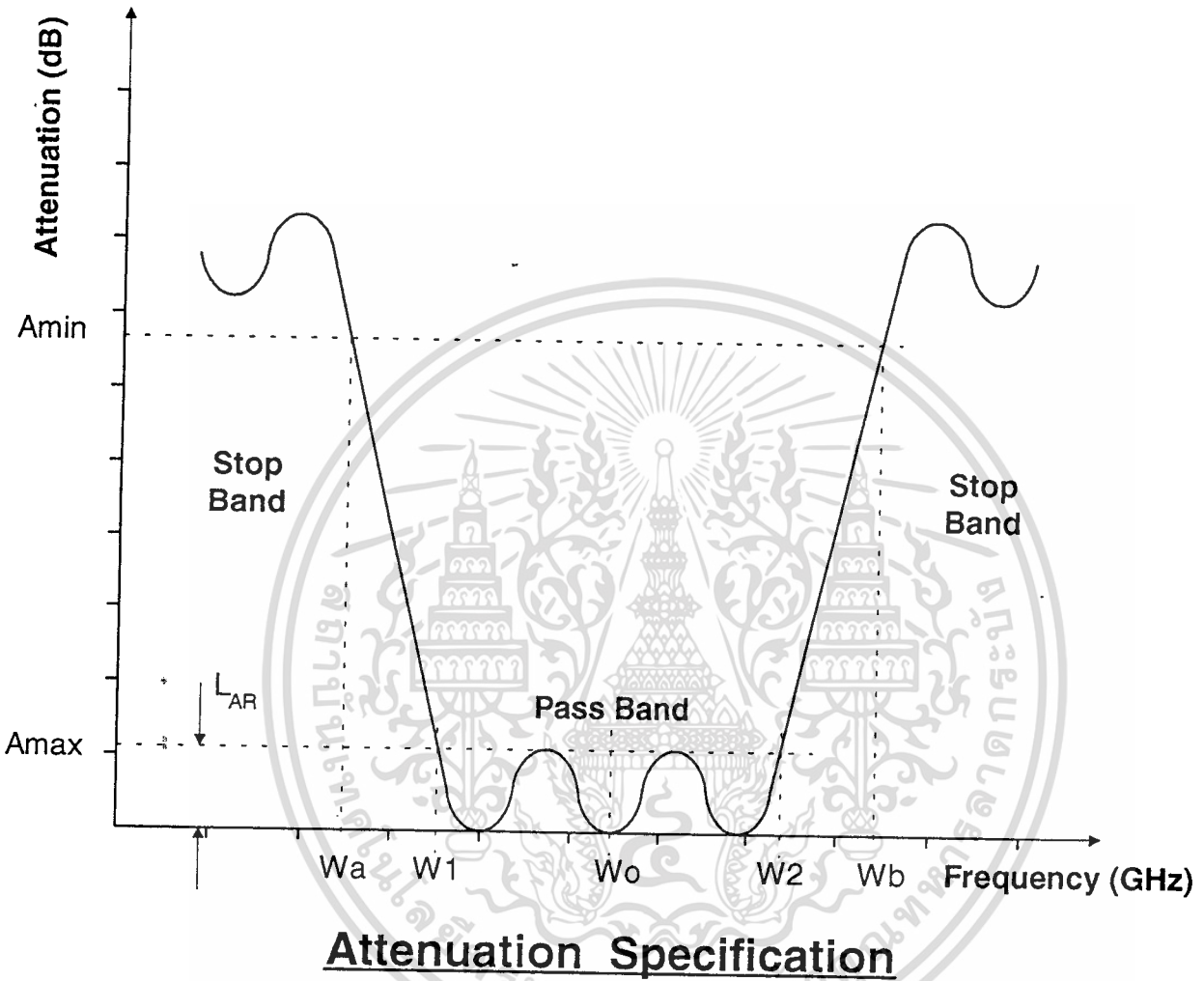
หาค่าแฟรคชันนอลแบนด์พาส (ζ)

$$\zeta = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_0$$

ค่าแฟรคชันนอลแบนด์พาสนี้ควรจะมีการออกแบบเพื่อเอาไว้ประมาณ 7% เพราะเมื่อทำชิ้นงานออกมาจริง ๆ แล้วจะเกิดการหดตัวของแบนด์พาส อันเนื่องมาจากการประมาณค่าในสมการการออกแบบในการทดลองนี้ค่าต่าง ๆ ที่ใช้เป็นพารามิเตอร์ เริ่มต้นแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการทดลอง

No. of Reactive element (n)	6
Ripple Level (L_{Ar})	0.1 dB
แฟรคชันนอลแบนด์พาส (ζ)	0.1
Center Frequency (f_0)	1.500 GHz
Upper Pass Band (f_2)	1.575 GHz
Lower Pass Band (f_1)	1.425 GHz
Bandwidth	150 MHz



รูปที่ 2.1 แสดงการกำหนดคุณสมบัติการลดทอนและพารามิเตอร์เบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ต้นแบบ (Prototype parameter)

ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7
1	1.1681	1.4039	2.0562	1.5170	1.9029	0.8618	1.3554

2. เลือกต้นแบบอุปกรณ์กรองความถี่ที่สอดคล้องกับค่า n ที่ได้ (ในการทดลองนี้เลือกแบบต้นแบบชนิดเชปปีเซฟ) โดยที่อินพุทและเอาต์พุทไลน์ของอุปกรณ์กรองความถี่ จะไม่นับรวมเป็นรีโซเนเตอร์ ดังนั้นต้นแบบที่มีองค์ประกอบรีแอคทีฟ n ตัวจะมีทั้งหมด $n+2$ ไลน์

ทำการคำนวณหาค่าอินเวอร์ทเตอร์แอดมิตแตนซ์ (Inverter Admittance)

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} \frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{u}{2} \right)$$

$$\frac{J_{01}}{Y_A} = \frac{1}{\sqrt{g_0 g_1 \omega_1'}}, \quad \left. \frac{J_{k,k+1}}{Y_A} \right|_{k-1 \text{ to } n-1} = \frac{1}{\omega_1' \sqrt{g_k g_{k+1}}}$$

$$\frac{J_{n,n+1}}{Y_A} = \frac{1}{\sqrt{g_n g_{n+1} \omega_1'}}$$

$$N_{k,k+1} \Big|_{k-1 \text{ to } n-1} = \sqrt{\left(\frac{J_{k,k+1}}{Y_A} \right)^2 + \frac{\tan^2 \theta_1}{4}}$$

$$M_1 = Y_A \left[\frac{J_{01}}{Y_A} \sqrt{h} + 1 \right], \quad M_n = Y_A \left[\frac{J_{n,n+1}}{Y_A} \sqrt{h} + 1 \right]$$

โดยที่ h คือ แอดมิตแตนซ์สเกลแฟกเตอร์ (Admittance scale factor) ซึ่งไม่มีหน่วย

ทำการคำนวณค่านอร์มัลไลซ์เซลฟคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของแต่ละไลน์ (C_k/ϵ)

$$\frac{C_0}{\epsilon} = \frac{376.7}{\sqrt{\epsilon_r}} [2Y_A - M_1]$$

$$\frac{C_1}{\epsilon} = \frac{376.7}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[Y_A - M_1 + h Y_A \left[\frac{\tan \theta_1}{2} + \left(\frac{J_{01}}{Y_A} \right)^2 + N_{12} - \frac{J_{12}}{Y_A} \right] \right]$$

$$\left. \frac{C_k}{\epsilon} \right|_{k=2 \text{ to } n-1} = \frac{376.7}{\sqrt{\epsilon_r}} h Y_A \left[N_{k-1,k} + N_{k,k+1} - \frac{J_{k-1,k}}{Y_A} - \frac{J_{k,k+1}}{Y_A} \right]$$

$$\frac{C_n}{\epsilon} = \frac{376.7}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[Y_A - M_n + h Y_A \left[\frac{\tan \theta_1}{2} + \left(\frac{J_{n,n+1}}{Y_A} \right)^2 + N_{n-1,n} - \frac{J_{n-1,n}}{Y_A} \right] \right]$$

$$\frac{C_{n+1}}{\epsilon} = \frac{376.7}{\sqrt{\epsilon_r}} [2Y_A - M_n]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ϵ คือ ค่าคงที่ของสารไดอิเล็กตริก และ ϵ_r คือ ค่าคงที่ของสารไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant) ของตัวกลางการแพร่กระจายที่จะสามารถหาค่านอร์มัลไลซ์มีวชวลคาปาซิแตนซ์ ต่อหนึ่งหน่วยความยาวระหว่างแต่ละไลน์ได้ ($C_{k,k+1}/\epsilon$)

$$\begin{aligned} \frac{C_{01}}{\epsilon} &= \frac{376.7}{\sqrt{\epsilon_r}} [M_1 - Y_A], \\ \frac{C_{k,k+1}}{\epsilon} \Big|_{k=1 \text{ to } n-1} &= \frac{376.7hY_A}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{J_{k,k+1}}{Y_A} \right), \\ \frac{C_{n,n+1}}{\epsilon} &= \frac{376.7}{\sqrt{\epsilon_r}} [M_n - Y_A]. \end{aligned}$$

ค่าของ h จะมีอิทธิพลต่อค่าโหลด-คิว (loaded Q) ของรีโซเนเตอร์ขนาดความกว้างยาวของแต่ละไลน์ ที่ทำให้ได้ค่า Q ที่เหมาะสมนั้นยังไม่สามารถทราบได้แน่ชัด ทราบแต่เพียงว่าในกรณี Air-filled, Coaxial-line Resonator นั้น จะได้ค่า Q ที่เหมาะสมเมื่อแต่ละไลน์มีอิมพีแดนซ์ 76 Ω ดังนั้นการหาค่า h ที่เหมาะสมนั้นจึงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ว่า สามารถทำให้

$$\begin{aligned} \frac{2C_{k-1,k}}{\epsilon} + \frac{C_k}{\epsilon} + \frac{2C_{k,k+1}}{\epsilon} \Big|_{\substack{k=n/2 \text{ for } n \text{ even} \\ k=(n+1)/2 \text{ for } n \text{ odd}}} \\ = (\text{around } 5.4) \end{aligned}$$

เมื่อหาค่า C_k/ϵ และ $C_{k,k+1}/\epsilon$ ได้แล้ว ค่าขนาดของไลน์ต่าง ๆ จะแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3

k	$J_{k,k+1}/Y_A$	$N_{k,k+1}$	$C_{k,k+1}/\epsilon$	$s_{k, k+1}$ (Inches)	k	C_k/ϵ	W_k (Inches)
0 and 6	0.9253		1.582	0.127	0 and 7	5.950	0.437
1 and 5	0.7809	6.401	0.301	0.419	1 and 6	3.390	0.152
2 and 4	0.5886	6.381	0.226	0.512	2 and 5	4.420	0.183
3	0.5662	6.379	0.218	0.520	3 and 4	4.496	0.183

$$w = 0.10$$

$$Y_A = 0.020 \text{ mho}$$

$$\epsilon_r = 1$$

$$\theta_1 = 1.492$$

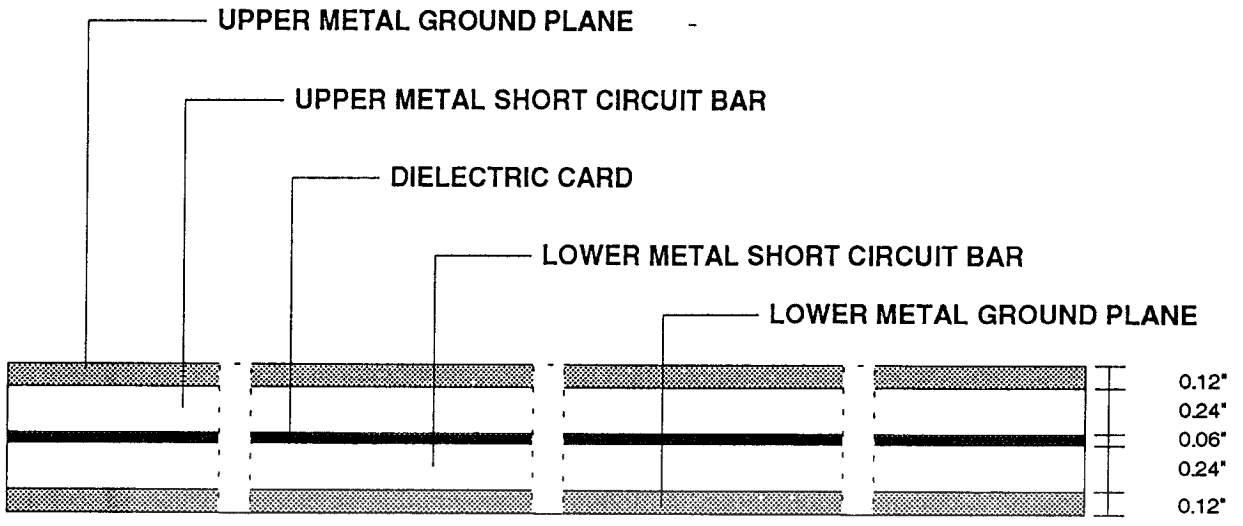
$$M_1 = M_6 = 0.02420$$

$$t = 0.187 \text{ inch}$$

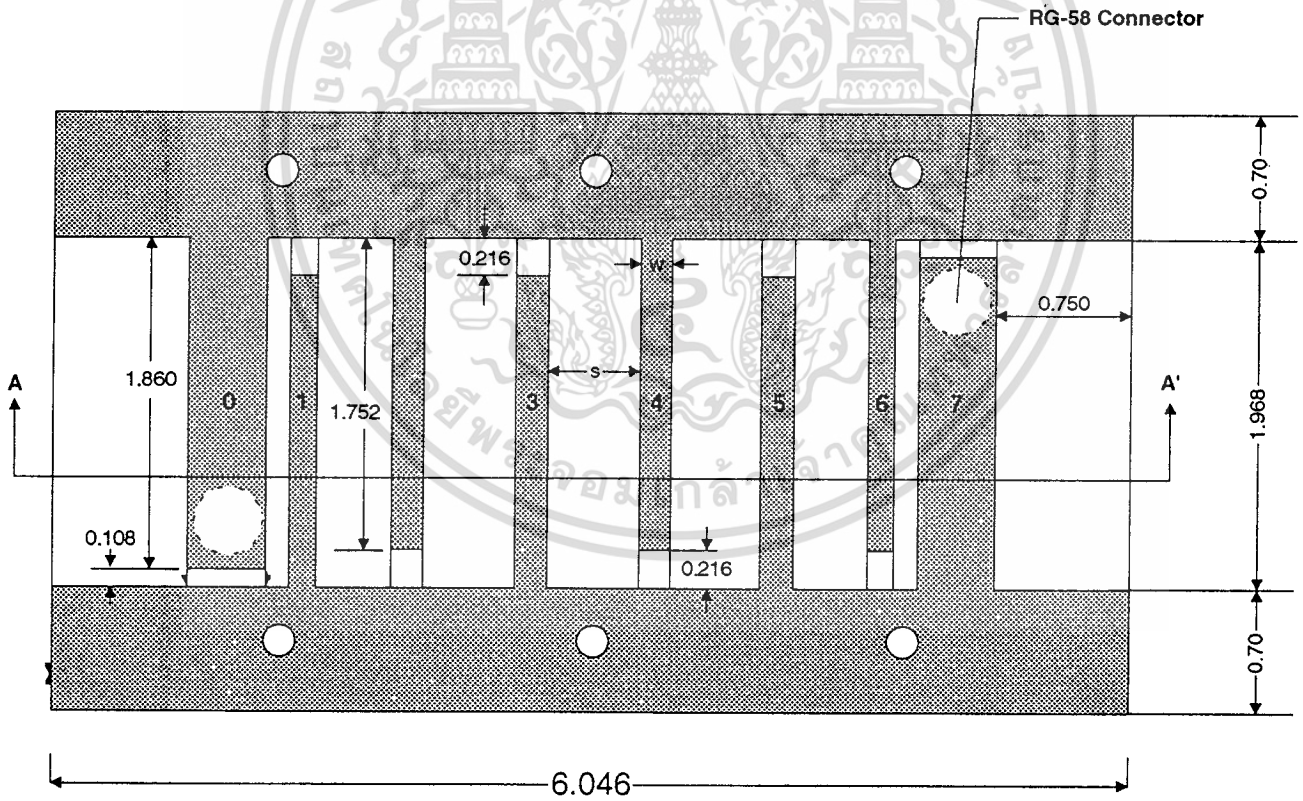
$$h = 0.05143$$

$$b = 0.625 \text{ inch}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



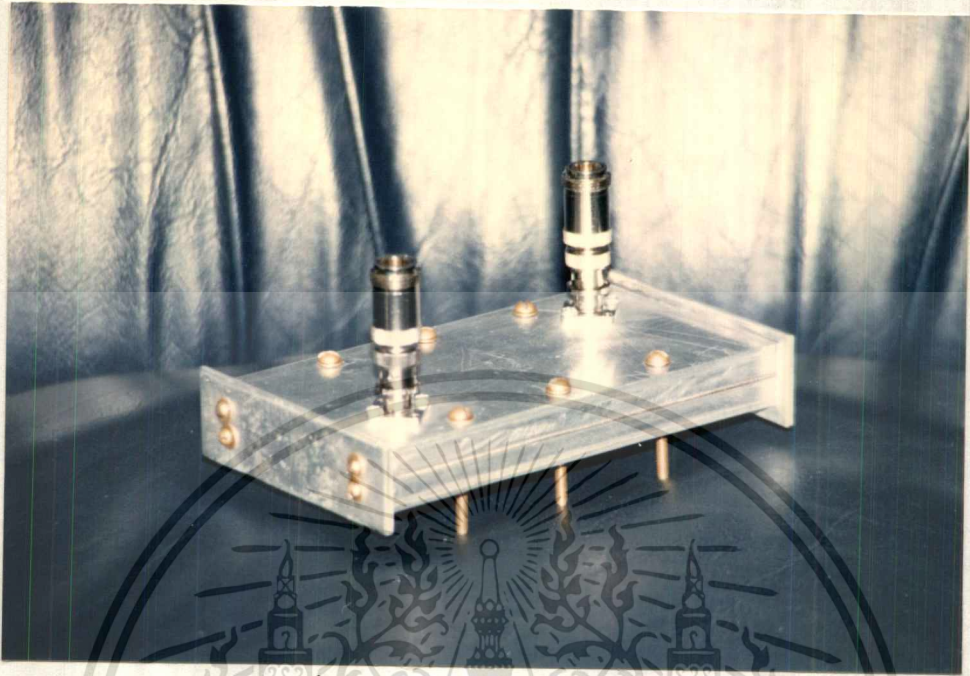
Section A - A'



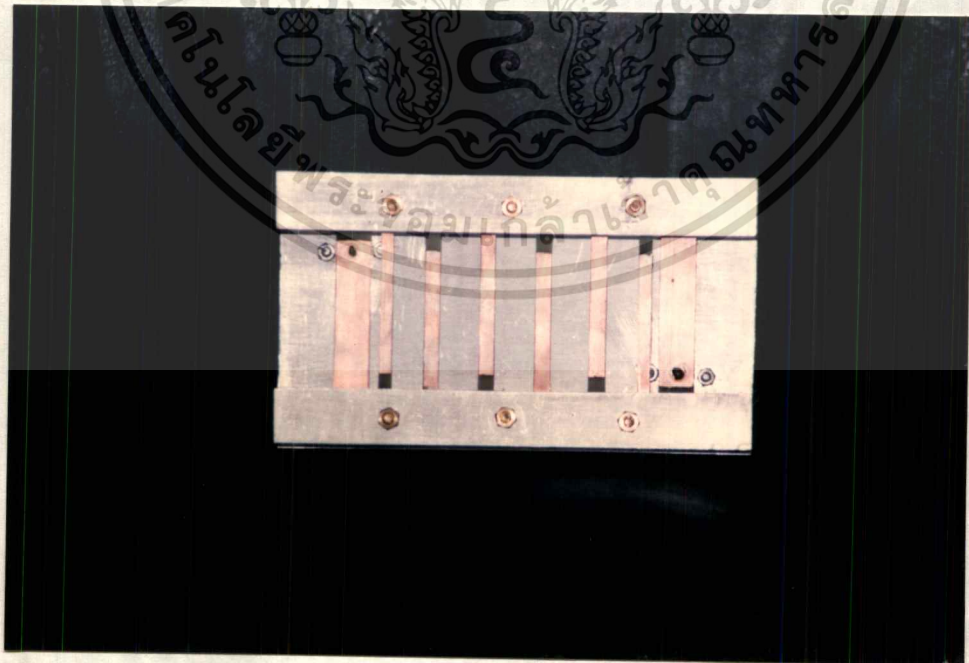
Top View, Upper Ground Plane Removed

รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

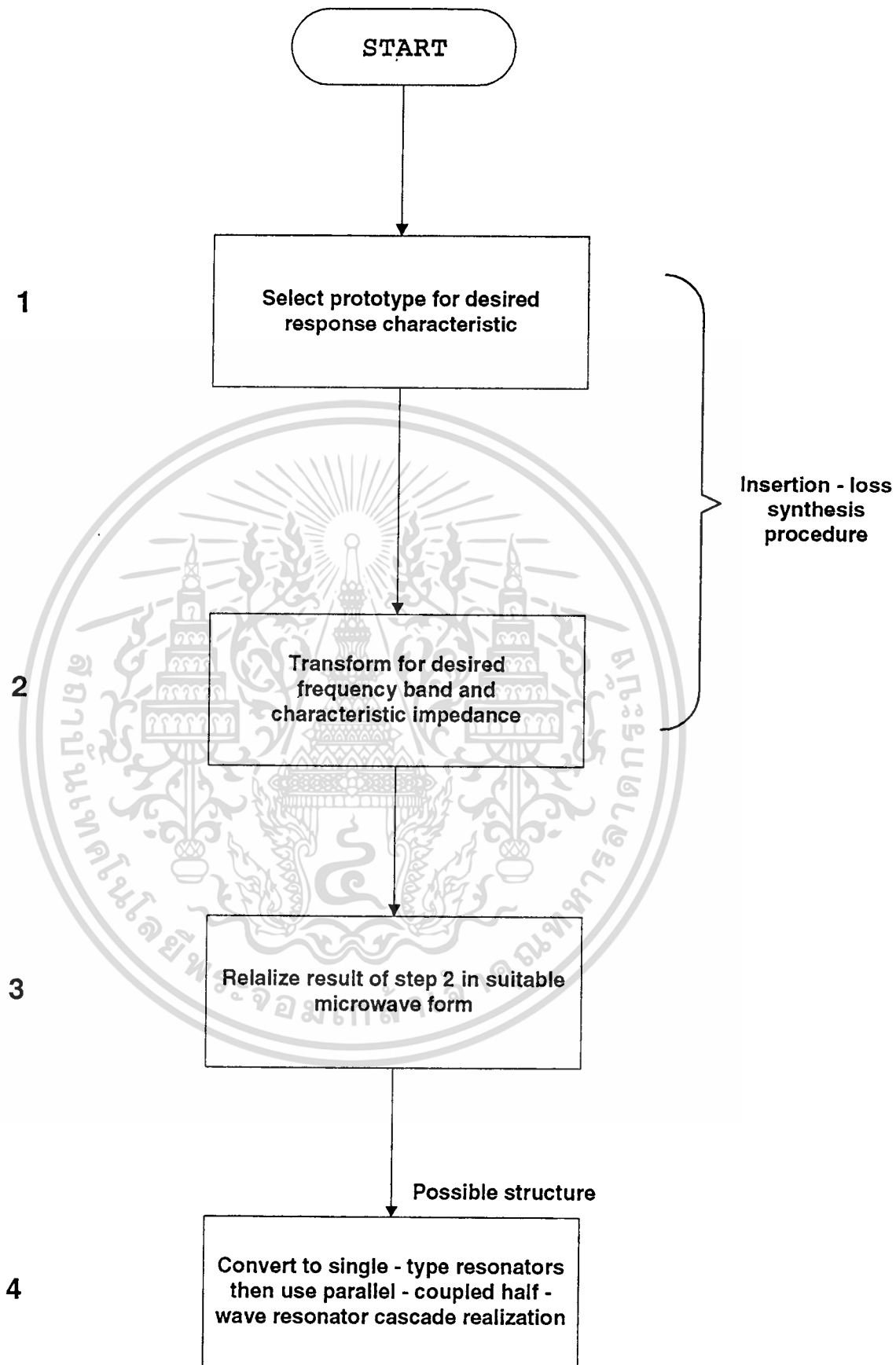


รูปที่ 2.3 แสดงรูปถ่ายภายนอกของชิ้นงาน



รูปที่ 2.4 แสดงรูปถ่ายภายในของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทที่ 3

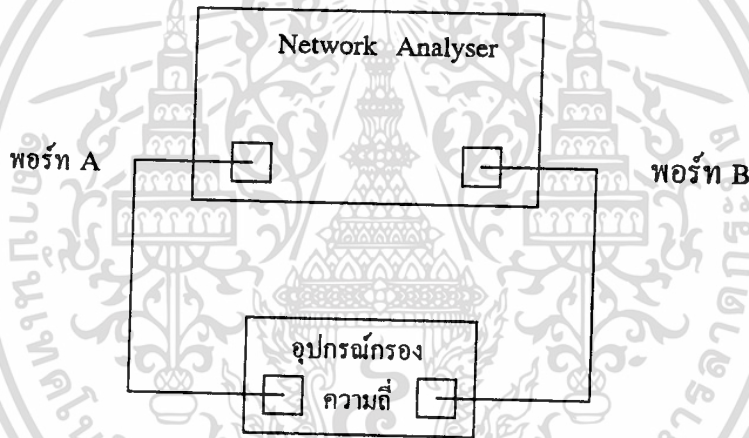
การทดลองและผลการทดลอง

อุปกรณ์

1. Network Analyser
2. อุปกรณ์กรองช่วงความถี่ผ่านแบบอินเตอร์ดิจิตอล

ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

1. ภายหลังจากการคาลิเบรท(Calibrate) สายโคแอกเชียลด้วยเครื่อง Network Analyser แล้วเราจะต่ออุปกรณ์เข้ากับเครื่อง Network Analyser ดังภาพข้างล่างนี้



2. เมื่อป้อน อิมพัลส์ ระดับ -10 dBm เข้าไปใน อุปกรณ์กรองความถี่ ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 3.1

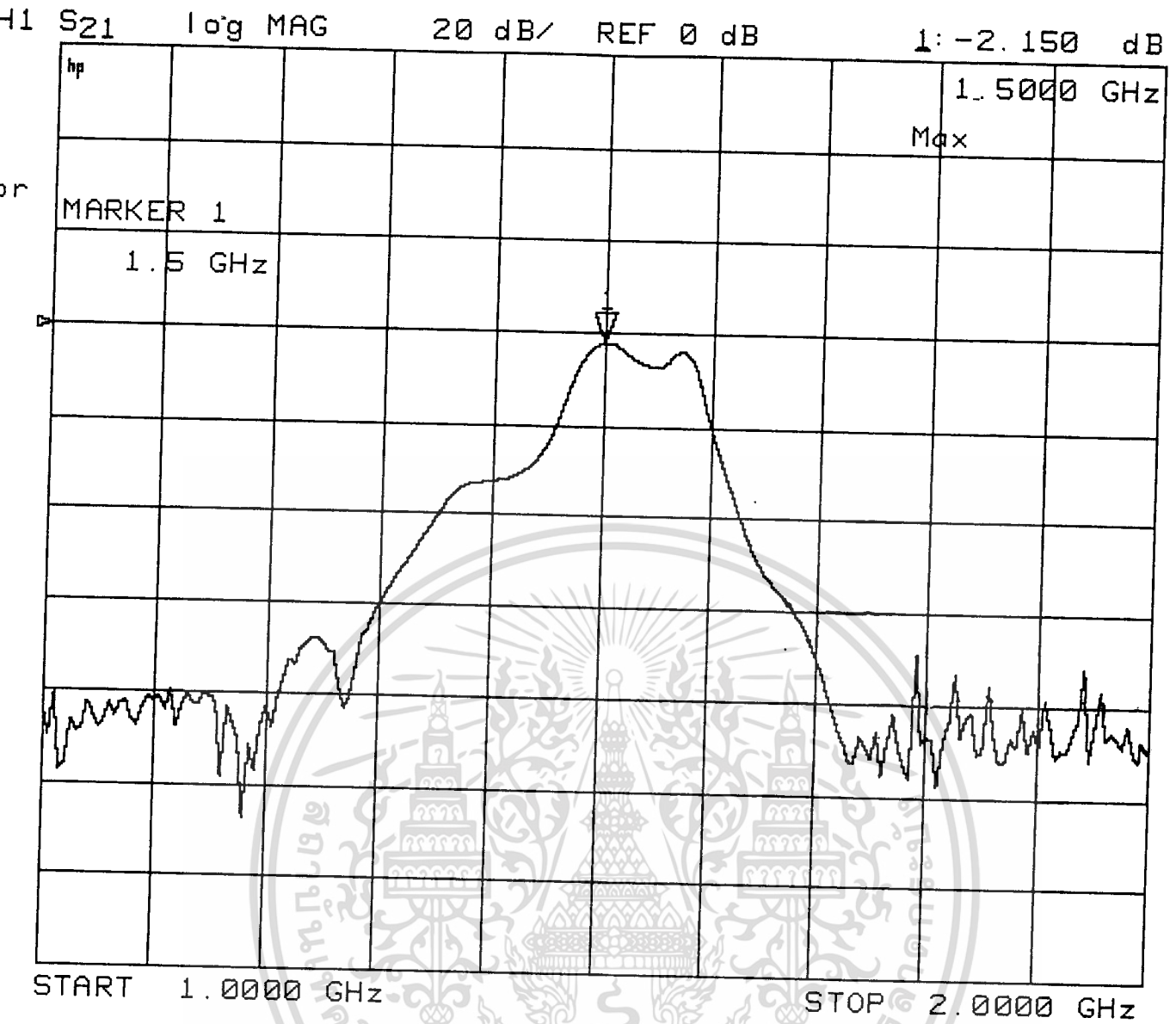
จากการทดลองสามารถวัดค่า พารามิเตอร์ ต่าง ๆ ได้ดังนี้

แบนด์วิธ = 22 เมกกะเฮิร์ต ที่ -3 เดซิเบล

ความถี่ศูนย์กลาง = 1.5017 จิกกะเฮิร์ต

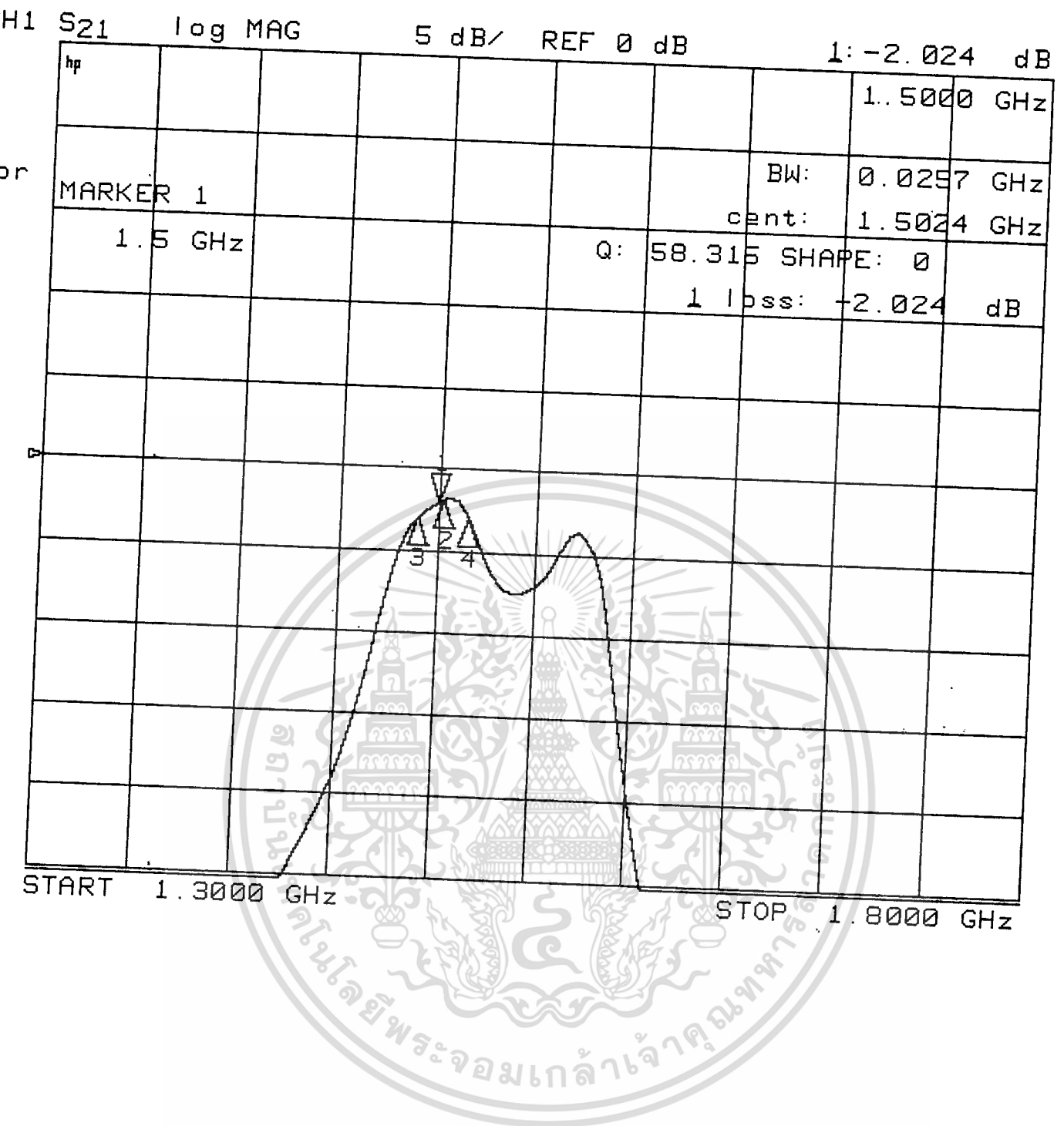
ระดับการลดทอนต่ำสุด = -2.059 เดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



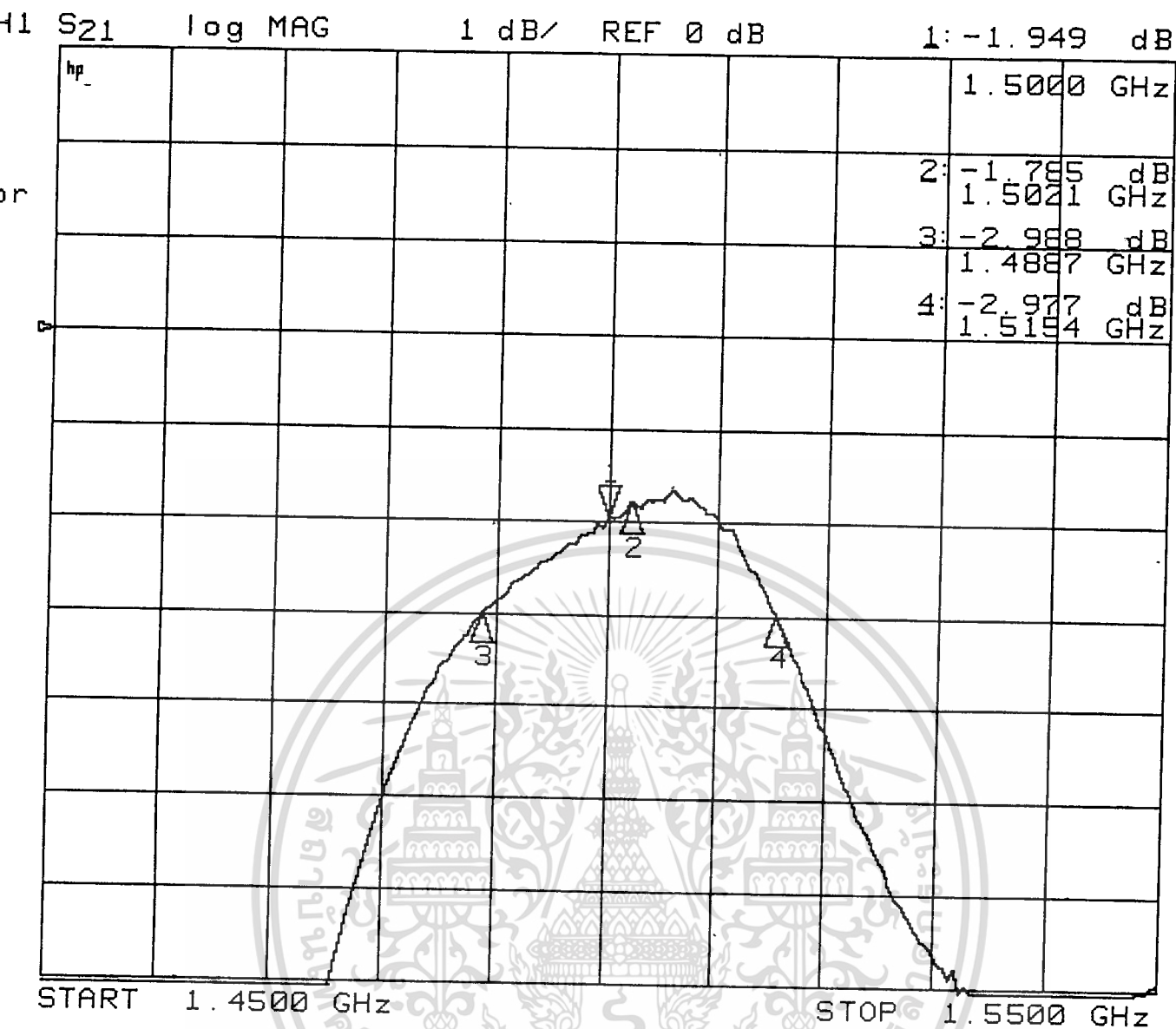
รูปที่ 8.1 แสดงการตอบสนองทางความถี่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 2 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



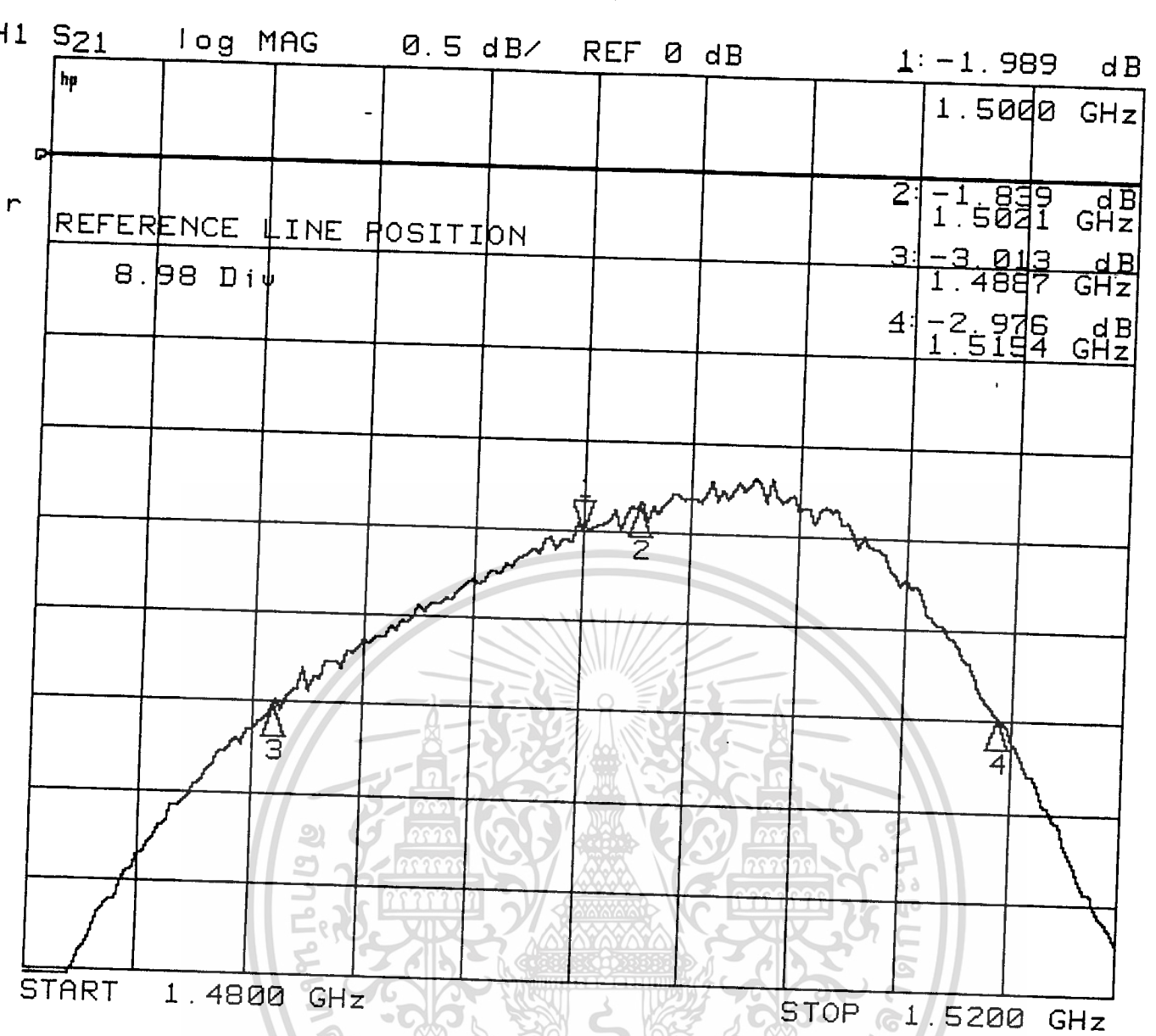
รูปที่ 8.2 แสดงการตอบสนองทางความถี่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.3 GHz ถึง 1.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



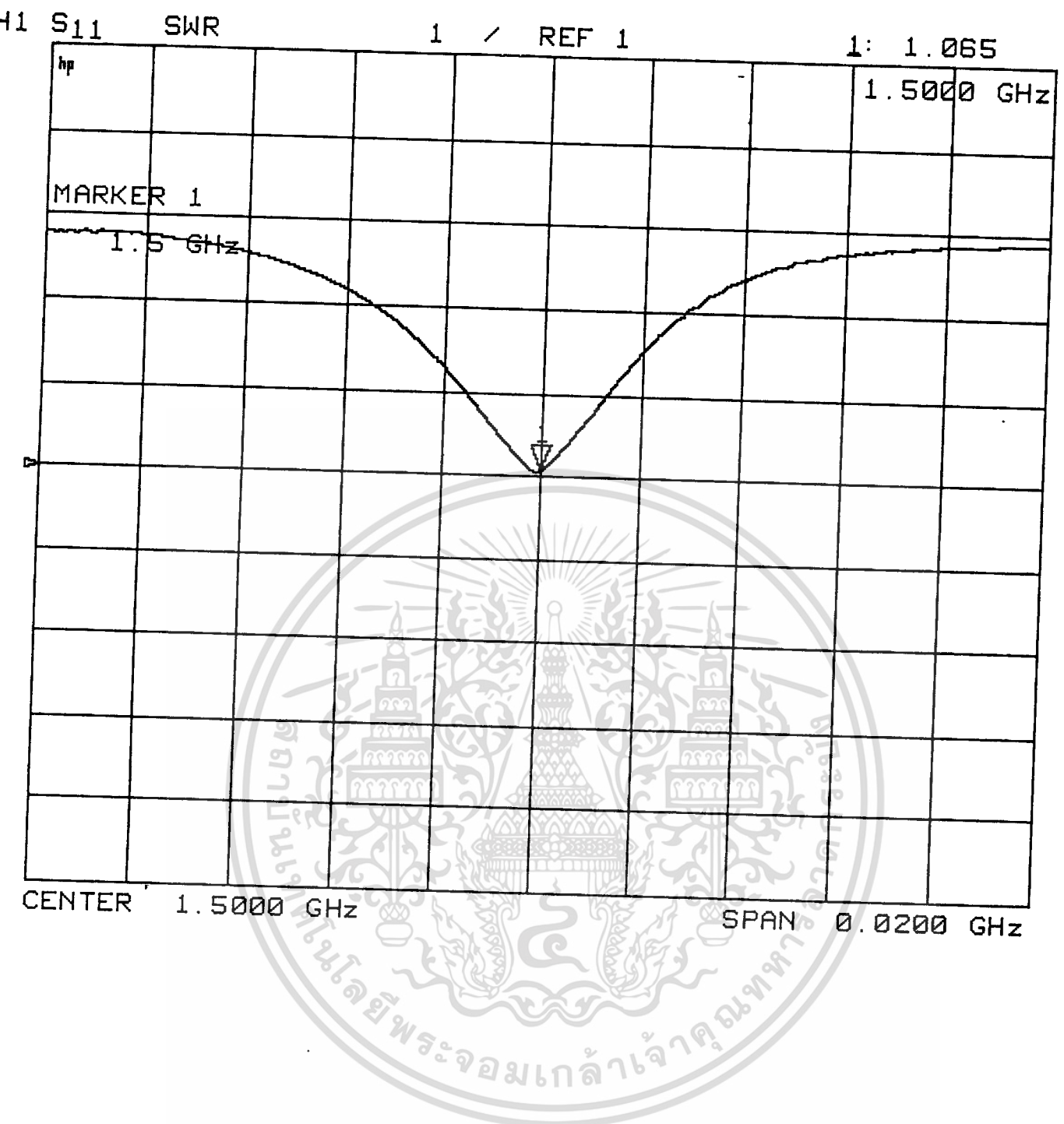
รูปที่ 3.8 แสดงการตอบสนองทางความถี่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.45 GHz ถึง 1.55 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.



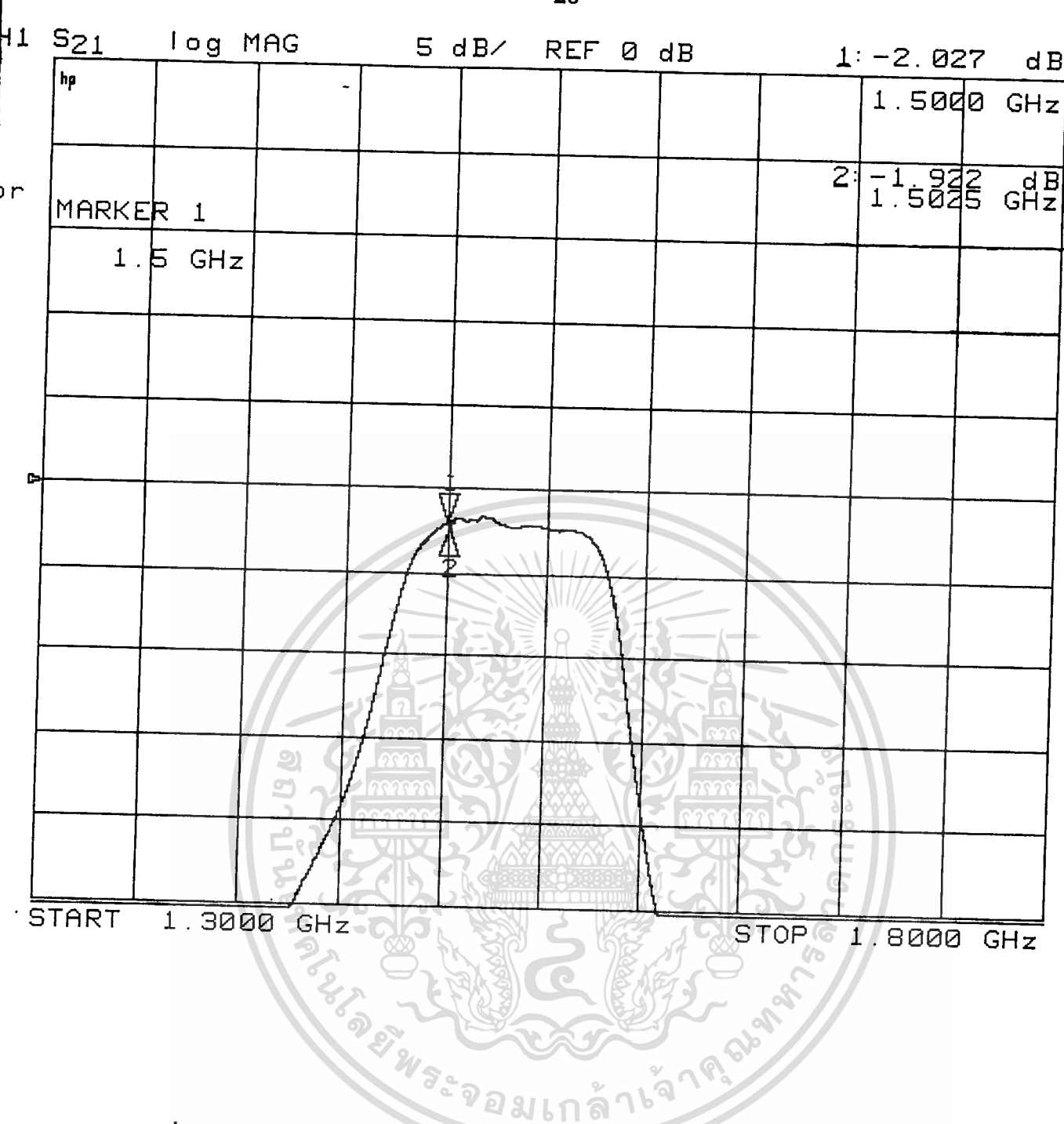
รูปที่ 8.4 แสดง -3 เดซิเบล แบนด์วิธ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดง SWR ของอุปกรณ์กรองช่วงความถี่แบบอินเตอร์ดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดง การตอบสนองทางความถี่ ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1.3 GHz ถึง 1.8 GHz เมื่อทำการปรับจูนแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ว่า

1. องค์ประกอบรีแอคทีฟที่ทำจากทองแดงจะให้ค่าโพลด-คิว มากกว่าอลูมิเนียมประมาณ 25%
2. องค์ประกอบรีแอคทีฟที่ทำจากแผ่นทองแดง (แผ่นปริน) มีข้อได้เปรียบคือ สามารถสร้างได้โดยง่ายและประหยัดค่าใช้จ่าย
3. แบนด์วิดธ์ของอุปกรณ์กรองความถี่จะมีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างไลน์คู่แรก (0,1) และไลน์คู่สุดท้าย (6,7) โดยถ้าระยะห่างเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้แบนด์วิดธ์แคบลง
4. การทำให้รีโชนเตอร์ยาวขึ้นอีก 2% จะทำให้ความถี่ศูนย์กลางที่ได้จากการทดลองมีค่าเข้าใกล้ความถี่ศูนย์กลางตามที่กำหนดเอาไว้



กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีก็เพราะความกรุณาและความช่วยเหลืออนุเคราะห์จากบุคคลต่าง ๆ คณะผู้จัดทำโครงการนี้จึงขอขอบพระคุณไว้เป็นอย่างสูง แต่

- 1.) ผศ. สมผล โกศลวิตร ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการฉบับนี้ ที่กรุณาให้แนวความคิด, หลักการ, คำปรึกษาแนะนำ และความช่วยเหลือทุก ๆ ด้าน ตลอดมา
- 2.) รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ที่อนุเคราะห์ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ Network Analyzer ที่ใช้ในการทดสอบ
- 3) รศ.ถวิล พึ่งมา ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ที่ให้ความอนุเคราะห์ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์ในการประดิษฐ์ชิ้นงาน
- 4) อาจารย์ นภัทร สระเอี่ยม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านอุปกรณ์คอมพิวเตอร์

หนังสืออ้างอิง

- [1]George L. Matthaei, "Interdigital Band-Pass Filters," IRE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-10, pp. 75-76; November, 1962.
- [2]S. B. Cohn, "Parallel-coupled transmission-line-resonator filter," IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-6, pp. 223-231; April, 1958.
- [3]E. M. T. Jones and J. T. Bolljahn, "Coupled-strip-transmission-line filters and directional couplers," IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-4, pp. 75-81; April, 1956.
- [4]W. J. Getsinger, "Coupled rectangular bars between parallel plates," IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-10, pp.65-72; January, 1962.