การวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป โดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์

นาย ชาญไชย ไทยเจียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-639-080-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17897021X

ANALYSIS OF A MICROSTRIP HAIRPIN-LINE BANDPASS FILTER BY USING INTEGRAL EQUATION METHOD WITH FINITE ELEMENT TECHNIQUE

Mr. Chanchai Thaijiam

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic year 1997

ISBN 974-639-080-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป
โดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย นายชาญไชย ไทยเจียม
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. ทับทิม อ่างแก้ว

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุฒิ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชาญไชย ไทยเจียม : การวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปโดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ (ANALYSIS OF A MICROSTRIP HAIRPIN-LINE BANDPASS FILTER USING INTEGRAL EQUATION METHOD WITH FINITE ELEMENT TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว , 100 หน้า. ISBN 974-639-080-5.

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริป โดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ ในตัวอย่างวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป การวิเคราะห์อาศัยสมการอินทิกรัลในรูปศักย์แม่เหล็กชนิดเวกเตอร์ ศักย์ไฟฟ้าชนิดสเกลาร์ และฟังก์ชันของกรีน ผลเฉลยของสมการอินทิกรัลสามารถหาได้โดยใช้เทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปของค่าพารามิเตอร์กระจัดกระจาย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยในอดีต และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมอีอี ซอฟ รวมถึงผลการวัดที่ได้จากวงจรตัวอย่างที่สร้างขึ้น พบว่ามีค่าสอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่แบบไมโครสตริปได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่อนิสิต** ชาญไชย ไทยเจียม
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**
ปีการศึกษา 2540	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**

#c715484 : MAJOR MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: HAIRPIN-LINE / INTEGRAL EQUATION / GREEN'S FUNCTION
FINITE ELEMENT
CHANCHAI THAIJIAM : ANALYSIS OF A MICROSTRIP HAIRPIN-LINE BANDPASS FILTER USING INTEGRAL EQUATION METHOD WITH FINITE ELEMENT TECHNIQUE
THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. TUPTIM ANGKAEW, Ph.D. 99 pp.
ISBN 974-639-080-5

This thesis has the objective to analyze microstrip filter by using the Integral Equation Method with Finite Element tecnique via the example of microstrip hairpin-line bandpass filter. The integral equation in forms of magnetic vector potential, electric scalar potential and Green's function is solved by means of Finite Element tecnique.

The results in scattering parameter show that this method provides results correspond with previous method including results obtained from EE. sof. program and experiment. Therefore, the Integral Equation Method with Finite Element tecnique can be used to analysis microstip filter as well.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ชาญไชย ไทยเจียม

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำแนวทางการวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษารวมทั้งจัดหาอุปกรณ์เพื่อดำเนินการวิจัยด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม รองศาสตรจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุฒิ และ ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สุวิทย์ นาคพีระยุทธ ที่ได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการพื้นฐานไฟฟ้าสื่อสารที่ได้ให้คำแนะนำและกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สุดท้าย ใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่ได้เมตตาและให้โอกาสทางการศึกษาแก่ข้าพเจ้าทั้งด้านทุนทรัพย์และกำลังใจด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฐ

คำอธิบายศัพท์และสัญลักษณ์ ..... ณ

บทที่ 1 บทนำ 1

ความเบื้องต้น 1

เค้าโครงของวิทยานิพนธ์ 4

วัตถุประสงค์ 4

ขอบเขตของการวิจัย 4

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย 4

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย 5

บทที่ 2 การวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปโดยใช้วิธีสมการอินทิกรัล
ร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย 6

ความนำ 6

แนวทางในการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ 7

สมการอินทิกรัลศักย์ผสม 9

ฟังก์ชันของกรีน 13

คลื่นผิวและระนาบสเปกตรัม 14

เทคนิคการอินทิเกรตสำหรับอินทริกรัลซอมเมอร์เฟลด์ 6

แนวทางการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 20

การกระตุ้นของสายป้อนกำลัง 24

การกระตุ้นแบบสายแกนร่วม 25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

การกระตุ้นแบบสายป้อน 26
การคิดการเชื่อมร่วมระหว่างแผ่นไมโครสตริปที่มีแหล่งกำเนิดกับแผ่นไมโครสตริปที่ไม่มีแหล่งกำเนิดโดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ 27
การหาค่าพารามิเตอร์การกระจัดกระจาย 29

บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ของงานวิจัย 32
ความนำ 32
ผลการวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันของกรีน 32
ผลการวิเคราะห์ค่า S11 และ S21 ของวงกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป 35

บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 46
ความนำ 46
ผลการทดสอบความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอในตัวอย่างวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป 46
ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม EE. Sof. และผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยของ Randall 46
ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดวงจรตัวอย่างที่สร้างขึ้น 48
ผลการวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันของกรีน 48
ข้อเสนอแนะ 49

รายการอ้างอิง 51
ภาคผนวก 55
ภาคผนวก ก โดเมนสเปกตรัม 56
ภาคผนวก ข การหาฟังก์ชันของกรีน 58
ภาคผนวก ค รหัสต้นฉบับที่ได้จากการแปลงแผนภาพของโปรแกรม Libra 93

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง ตารางตัวต่อชนิด SMA 98
ประวัติผู้เขียน 100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างระบบป้อนสายนำสัญญาณ 25
ตารางที่ 3.1 ค่า S11 และ S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป 39
ตารางที่ ข.1 ค่าของสัมประสิทธิ์ U_i และ L_i ในส่วนบนและส่วนล่างของชั้น i ที่มีแหล่งกำเนิด 80

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างวงจรกรองความถี่ไมโครสตริป 3
รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการคำนวณของวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ 8
รูปที่ 2.2 ตัวนำหลายชั้นฝังอยู่ในตัวกลางที่เป็นชั้น ๆ ซ้อนกัน 9
รูปที่ 2.3 โครงสร้างไมโครสตริปรูปร่างไม่เจาะจง 12
รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งของโพลเป็นฟังก์ชันของค่าการสูญเสียของสารไดอิเล็กตริก 15
รูปที่ 2.5 แสดงค่านอร์แมลไลน์ของอินทิแกรนด์ของกรีนซนิดสเกลาร์ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแบบ
จุดวางตัวในแนวนอน 17
รูปที่ 2.6 ส่วนจริงของอินทิแกรนด์ของรูปที่ 2.5 ในช่วง $[k_o, k_o\sqrt{\varepsilon_r'}]$ 19
รูปที่ 2.7 ส่วนจริงของอินทิแกรนด์ของรูปที่ 2.5 ในช่วง $[k_o\sqrt{\varepsilon_r'}, \infty]$ 20
รูปที่ 2.8 แสดงโนดของเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม 22
รูปที่ 2.9 การแบ่งพื้นที่โดเมนรูปสามเหลี่ยมบนแผ่นตัวนำไมโครสตริป 22
รูปที่ 2.10 การกระตุ้นแบบสายแกนร่วม 25
รูปที่ 2.11 แผ่นไมโครสตริปมีการเชื่อมร่วม 28
รูปที่ 2.12 โครงข่ายความไม่ต่อเนื่องสองพอร์ต 30
รูปที่ 3.1 ค่าสัมพันธ์ของฟังก์ชันของกรีนซนิดสเกลาร์ 33
รูปที่ 3.2 ค่าเฟสของฟังก์ชันของกรีนซนิดสเกลาร์ 34
รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป 35
รูปที่ 3.4 แผนภาพของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป 37
รูปที่ 3.5 การแบ่งพื้นผิวของลายวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปด้วยพื้นที่
เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 38
รูปที่ 3.6 ค่า S11 และ S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปจากผลการ
วิเคราะห์ของ Randall, EE. Sof. และผลจากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์
เอลิเมนต์ 39
รูปที่ 3.7 ค่า S11 และ S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปจากผลการ
ทดลองของ Randall และผลจากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ 40

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.8 ค่า S11 และ S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปจากผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับค่าไดอิเล็กสัมพัทธ์เท่ากับ 4.00 41
รูปที่ 3.9 วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปที่สร้างขึ้น 42
รูปที่ 3.10 วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปและกล่องครอบป้องกันสัญญาณรบกวน 42
รูปที่ 3.11 วงจรผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปพร้อมกล่องครอบป้องกันสัญญาณรบกวน 42
รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจร 43
รูปที่ 3.13 การต่อวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรเพื่อหาค่า VSWR 43
รูปที่ 3.14 ค่า VSWR ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป 44
รูปที่ 3.15 การต่อวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรเพื่อหาค่า S21 44
รูปที่ 3.16 ค่า S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป 45
รูปที่ ข.1 แหล่งกำเนิดแบบจุดวางตัวในแนวนอน 68
รูปที่ ข.2 ตัวกลางหลายชั้นมีแหล่งกำเนิดแบบจุดวางอยู่ในชั้น I 70
รูปที่ ข.3 ตัวกลาง 2 ชั้น ปราศจากแหล่งกำเนิด 71
รูปที่ ข.4 ชั้น i มีแหล่งกำเนิดแบบจุดวางตัวในแนวนอน 72
รูปที่ ข.5 แหล่งกำเนิดแบบจุดวางตัวในแนวแกน z 73
รูปที่ ข.6 แหล่งกำเนิดแบบจุดวางตัวในแนวแกน x 76
รูปที่ ข.7 แหล่งกำเนิดแบบจุดวางตัวในแนวแกน y 78
รูปที่ ข.8 ชั้นไดอิเล็กตริกมีแผ่นกราวนด์และแหล่งกำเนิดแบบจุดวางตัวที่รอยต่อระหว่างอวกาศว่างกับชั้นไดอิเล็กตริก 84

คำอธิบายศัพท์และสัญลักษณ์

angular velocity	ω	ความเร็วเชิงมุม
area coordinate	L_i	พิกัดพื้นที่
Bessel function of the first kind of order 0	J_0	ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งอันดับศูนย์
Bessel function of the first kind of order 1	J_1	ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งอันดับหนึ่ง
characteristic impedance	Z_o	อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ
coupling		การเชื่อมร่วม
delta function	δ	ฟังก์ชันเดลต้า
dielectric substrate		ชั้นไดอิเล็กตริก
dyadic Green 's function	$\overline{\overline{G}}_A$	ฟังก์ชันของกรีนชนิดไดอะดิก
electric charge	q_e	ประจุไฟฟ้า
electric charge density	ρ_e	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า
electric current density	$\vec{J}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
electric field	$\vec{E}$	สนามไฟฟ้า
electric flux density	$\vec{D}$	ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า
electric vector potential	$\vec{F}$	ศักย์ไฟฟ้าชนิดเวกเตอร์
finite element method	FEM	วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
frequency	f	ความถี่
incident electric field	$\vec{E}^i$	สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ
loss tangent	$\tan\delta$	แทนเจนต์การสูญเสีย
magnetic flux density	$\vec{B}$	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
magnetic current density	$\vec{M}$	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก
magnetic field	$\vec{H}$	สนามแม่เหล็ก
magnetic vector potential	$\vec{A}$	ศักย์แม่เหล็กชนิดเวกเตอร์
mixed potential integral equation	MPIE	สมการอินทิกรัลของศักย์แม่เหล็กและไฟฟ้า
observation point	$\vec{r}$	ตำแหน่งของจุดสังเกต
permeability	μ	ค่าความทราบซึมได้
permeability in free space	μ_o	ค่าความทราบซึมได้ในอวกาศว่าง

คำอธิบายศัพท์และสัญลักษณ์ (ต่อ)

permittivity	ε	ค่าสภาพยอม
permittivity in free space	ε_o	ค่าสภาพยอมในอวกาศว่าง
propagation constant	γ	ค่าคงตัวการแพร่กระจาย
relative permeability	μ_r	ค่าความทราบซึมได้สัมพัทธ์
relative permittivity	ε_r	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์
scalar Green 's function	G_V	ฟังก์ชันของกรีนชนิดสเกลาร์
scalar potential	V	ศักย์ไฟฟ้าชนิดสเกลาร์
scattered electric field	$\bar{E}^s$	สนามไฟฟ้ากระเจิง
source point	$\bar{r}'$	ตำแหน่งของแหล่งกำเนิด
speed of light in free space	c_o	ความเร็วของแสงในอวกาศว่าง
surface electric current density	$\bar{J}_s$	ความหนาแน่นกระแสผิว
thickness of substrate	h	ความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก
unknow expansion coefficient	α_j	สัมประสิทธ์การกระจายที่ไม่ทราบค่า
current vector basis function	$\bar{s}_j$	ฟังก์ชันพื้นฐานชนิดเวกเตอร์ของกระแส
wave number	k	ค่าคงตัวเลขคลื่น
weighting function	$\bar{s}_i$	ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย