บทที่ 4

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ความนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ S11 และค่าการสูญเสียการส่งผ่าน S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปโดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์ของ Randall (1995) และผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม EE. Sof. รวมทั้งผลการทดลองวัดวงจรตัวอย่างที่สร้างขึ้น อีกทั้งยังได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าฟังก์ชันของกรีนโดยใช้เทคนิคการอินทิเกรตสำหรับอินทิกรัลซอมเมอร์เฟลด์กับงานวิจัยในอดีต ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดสามารถแยกสรุปตามหัวข้อได้ดังนี้

ผลการทดสอบความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอในตัวอย่างวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป

การทดสอบความถูกต้องในส่วนนี้แยกออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม EE. Sof. และผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยของ Randall

2. ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองในตัวอย่างวงจรที่สร้างขึ้น

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม EE. Sof. และผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยของ Randall

สำหรับกรณีโครงสร้างของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปในรูปที่ 3.3 โดยมีค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 6.00 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากตารางที่ 3.1 และกราฟในรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าความถี่ค่ากลางและค่าความกว้างแถบที่ -3 dB. จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 1.27 GHz. และ 38.5 MHz. ตามลำดับ

แต่ความถี่ค่ากลางจากโปรแกรม EE. Sof. มีค่าเท่ากับ 1.268 GHz. และ 35 MHz. ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าแตกต่างกันอยู่ ทั้งนี้อาจเกิดจากการกำหนดจุดน้อยเกินไปในการวาดกราฟของโปรแกรม EE. Sof. แต่ถึงอย่างไรแนวโน้มของเส้นกราฟ S11 และ S21 ทั้งสองในรูปที่ 3.6 ยังคงสอดคล้องกัน ถึงแม้จะมีค่าแตกต่างกันอยู่บ้าง โดยเฉพาะช่วงความถี่ 1.22-1.47 GHz. ในเส้นกราฟ S11 และช่วงความถี่ 1.17-1.22 GHz. กับช่วงความถี่ 1.32-1.47 GHz. ในเส้นกราฟ S21 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปได้ โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรม EE. Sof. แต่ผลที่ได้ยังคงมีผลบางส่วนที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยของ Randall อีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากผลงานวิจัยของ Randall มีทั้งผลจากการจำลองแบบและผลจากการทดลอง

จากตารางที่ 3.1 และกราฟในรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นความถี่ค่ากลางและค่าความกว้างแถบจากผลงานวิจัยของ Randall มีค่าเท่ากับ 1.27 GHz. และ 40 MHz. ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเฉพาะบริเวณ -3 dB. ของค่าความกว้างแถบในกราฟรูปที่ 3.6 ค่า S11 และ S21 มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าขนาดของ S11 จะมีค่าแตกต่างกันในบริเวณนี้อยู่บ้าง แต่ก็เป็นค่าที่น้อยมาก ในช่วงความถี่นอกเหนือจาก -3 dB. ของค่าความกว้างแถบ พบว่ากราฟมีความแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามกราฟในช่วงนี้ไม่มีผลต่อคุณลักษณะของการกรองความถี่ในช่วงใช้งาน จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางด้านการจำลองแบบ จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีสอดคล้องกันและเพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ให้มีความเชื่อถือมากมากยิ่งขึ้น จึงทำการเทียบผลการวิเคราะห์กับผลที่ได้จากการทดลองดังรูปที่ 3.8

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าผลของความถี่ค่ากลางและค่าความกว้างแถบที่ได้จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ตรงกับผลการทดลองของ Randall โดยเฉพาะเส้นกราฟ S21 บริเวณ -3 dB. ของค่าความกว้างแถบมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมาก แต่สำหรับเส้นกราฟ S11 ที่บริเวณนี้มีค่าแตกต่างกัน โดยผลการวิเคราะห์จากวิธีที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอได้ -89.920 dB. แต่ผลจากการทดลองของ Randall ได้เท่ากับ -50 dB. ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าน้อยมาก จึงถือว่าประมาณให้เข้าใกล้ศูนย์ได้ทั้งสองค่า และสำหรับบริเวณนอกเหนือจาก -3 dB. ของค่าความกว้างแถบ จะเห็นว่ามีค่าแตกต่างกัน แต่ค่าที่ได้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับบริเวณ -3 dB. ของค่าความกว้างแถบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวิธี สมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปได้อย่างถูกต้อง โดยทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลที่ได้จากโปรแกรม EE. Sof. และผลที่ได้จากงานวิจัยของ Randall

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองวัดวงจรตัวอย่างที่สร้างขึ้น

สำหรับกรณีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปมีค่าเท่ากับ 4.00 จากรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นความถี่ค่ากลางและค่าความกว้างแถบจากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 1.48 GHz. และ 80 MHz. ตามลำดับ และจากกราฟรูปที่ 3.14 และ 3.16 ซึ่งเป็นผลการทดลอง จะได้ความถี่ค่ากลางและค่าความกว้างแถบจากการวัดมีค่าเท่ากับ 1.47 GHz. และ 100 MHz. ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ได้แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเกิดจากปัญหาทางด้านการทดลอง เช่น การกัดแผ่นลายวงจรไม่ละเอียดดีพอ หรืออาจจะเป็นเรื่องของสนามไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากฝุ่นละอองที่เกาะอยู่บนแผ่นวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป เป็นต้น ดังนั้นในทางปฏิบัติอาจใช้สเปรฉีดกันฝุ่นละอองเพื่อลดปัญหาในเรื่องนี้ แต่ถึงอย่างไรกราฟที่ได้ในรูปที่ 3.16 ก็มีแนวโน้มสอดคล้องกับกราฟในรูปที่ 3.8 และจากกราฟรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าค่า VSWR มีค่าเข้าใกล้ 1 แต่ก็ยังมีค่าห่างพอสมควร ทั้งนี้อาจเกิดจากการไม่ได้คำนึงถึงเรื่องการแมตช์โหลด ดังนั้นอาจจะต้องสร้างวงจรแมตช์โหลดสำหรับปรับค่าอิมพีแดนซ์ในการเชื่อมต่อระหว่างวงจรกรองความถี่ไมโครสตริปกับสายส่งสัญญาณ

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยของ Randall และผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม EE. Sof. รวมทั้งผลการทดลองจะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้สอดคล้องกันดี อาจจะมีบางส่วนที่แตกต่างกันอยู่บ้างแต่ก็ไม่มาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริปได้อย่างถูกต้อง

ผลการวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันของกรีน

ผลการวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันของกรีนที่ได้จากเทคนิคการอินทิเกรตสำหรับอินทิกรัลซอมเมอร์เฟลด์ มีค่าถูกต้องเหมือนกับวิธีอื่น แต่ค่าที่ตำแหน่งระยะห่างระหว่างจุดสังเกตและจุดแหล่งกำเนิดเข้าใกล้ศูนย์ค่าฟังก์ชันของกรีนมีการเปลี่ยนแปลงเร็วมาก ดังนั้นจึงต้องพิจารณาค่าฟังก์ชันของกรีนที่ตำแหน่งนี้ให้ดี ความถูกต้องของค่าฟังก์ชันของกรีนสามารถแยกพิจารณาได้ตามการแบ่งช่วงอินทิเกรต ช่วงการอินทิเกรตที่หนึ่งคือ $[0, k_o]$ ช่วงนี้ใช้การอินทิเกรตเชิงเลขตามวิธีของ Simpson ซึ่งผลการอินทิเกรตจะถูกต้องหรือไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนการแบ่งช่วงการอินทิเกรต การอินทิเกรตช่วงที่สองคือ $[k_o, k_o\sqrt{\varepsilon_r'}]$ ช่วงนี้จะมีค่าตำแหน่งโพลเกิดขึ้นในสมการ D_{TM} ซึ่งสามารถหาได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ ความถูกต้องของค่าตำแหน่งโพลจะเป็นตัวกำหนดค่าความถูกต้องของค่าฟังก์ชันของกรีนในช่วงนี้ การอินทิเกรตช่วงนี้ใช้การอินทิเกรตเชิงเลขตามวิธีของ Gaussian Quadrature ค่าความถูกต้องของการอินทิเกรตขึ้นอยู่กับจำนวนอันดับของการแตกอินทิแกรนด์ด้วยพหุนาม Legendre การอินทิเกรตช่วงสุดท้ายคือ $[k_o\sqrt{\varepsilon_r'}, \infty]$ เป็นช่วงที่เกิดการแกว่งของค่าฟังก์ชัน

อินทิแกรนด์และขอบเขตบนของการอินทิเกรตเป็นค่าอนันต์ ในทางปฏิบัติสามารถหาค่าขอบเขตบนได้จากการวาดกราฟและดูการลู่เข้าของฟังก์ชันอินทิแกรนด์ หรือใช้อัลกอริทึมแบบเฉลี่ยน้ำหนักหาค่าขอบเขตบนของการอินทิเกรต การอินทิเกรตในช่วงนี้ใช้การอินทิเกรตเชิงเลขตามวิธีของ Simpson ค่าความถูกต้องของการอินทิเกรตขึ้นอยู่กับจำนวนการแบ่งช่วงการอินทิเกรต

ข้อเสนอแนะ

จากข้อดีของวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถนำวิธีนี้ไปวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ไมโครสตริปที่มีชั้นไดอิเล็กตริกมากกว่าหนึ่งชั้นได้ ซึ่งงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ในส่วนนี้ และเพื่อขยายผลการศึกษาออกไปดังนั้นจึงควรนำวิธีการวิเคราะห์นี้ไปใช้งานกับกรณีวงจรกรองความถี่ไมโครสตริปที่มีชั้นไดอิเล็กตริกมากกว่าหนึ่งชั้น โดยที่แผ่นไมโครสตริปสามารถมีรูปร่างแบบไม่เจาะจง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ฟังก์ชันพื้นฐานชนิดเวกเตอร์อิงขอบของกระแสไฟฟ้าอันดับหนึ่ง ดังนั้นอาจลองใช้ฟังก์ชันพื้นฐานชนิดเวกเตอร์ของกระแสไฟฟ้าที่มีอันดับมากกว่านี้ เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้อาจให้ค่าความถูกต้องของค่าการกระจายความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

เวลาที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังมีค่ามากอยู่ แนวทางในการแก้ไขอาจคำนึงถึงความสมมาตรของโครงสร้างแผ่นไมโครสตริป เพื่อลดขั้นตอนการคำนวณซ้ำตำแหน่งกันในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสำหรับค่าฟังก์ชันของกรีนอาจจะใช้ผลการแปลงฟูริเยร์ผกผันอย่างเร็ว (inverse fast fourier transform, inverse FFT) ในการแปลงโดเมนจากโดเมนสเปกตรัมเป็นโดเมนอวกาศ เป็นต้น

ในการทดลองวัดวงจรตัวอย่างที่สร้างขึ้น ปัญหาที่พบประเภทหนึ่งคือเรื่องของสัญญาณรบกวน ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบป้องกันสัญญาณรบกวนจากกล่องครอบป้องกันสัญญาณรบกวน แต่ไม่ได้คำนึงถึงปัญหาเรื่องสนามไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากฝุ่นละอองที่เกาะอยู่บนแผ่นวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป และการแมตช์โหลด ดังนั้นในทางปฏิบัติอาจใช้สเปรยฉีดกันฝุ่นละอองเพื่อลดปัญหาในเรื่องนี้ และสร้างวงจรแมตช์โหลดสำหรับปรับค่าอิมพีแดนซ์ในการเชื่อมต่อระหว่างวงจรกรองความถี่ไมโครสตริปกับสายส่งสัญญาณ เป็นต้น

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาพบว่าการหาค่าฟังก์ชันของกรีนจากเทคนิคการอินทิเกรตสำหรับอินทิกรัลซอมเมอร์เฟลด์ ได้ค่าถูกต้อง แต่ใช้เวลาในการคำนวณนานโดยเฉพาะการอินทิเกรตในช่วงที่สาม เนื่องจากวิธีอินทิเกรตเชิงเลขตามวิธีของ Simpson ค่าความถูกต้องขึ้นอยู่กับจำนวนการแบ่งช่วงการอินทิเกรต ดังนั้นอาจ

ใช้วิธีอินทิเกรตเชิงเลขจากวิธีอื่นหรือลองหาค่าฟังก์ชันของกรีนจากวิธีอื่นตามเอกสารอ้างอิง เช่นงานวิจัยของ Annaert (1993) , Chow (1991) , Dunn (1991) , Fang (1988) และ Marchetti (1993 และ 1995) เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย