



รายงานการวิจัย

การพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ใน
ท่อนำคลื่นเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม

The Development of Simulation Program for Analysis and Design of
Waveguide Filters for Application in Satellite Communication Systems

ศรัณย์ ชูคดี

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

พ.ศ. 2559

ชื่องานวิจัย การพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่
 ในท่อนำคลื่นเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม

ผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ ชุกคิ

คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ปี 2558

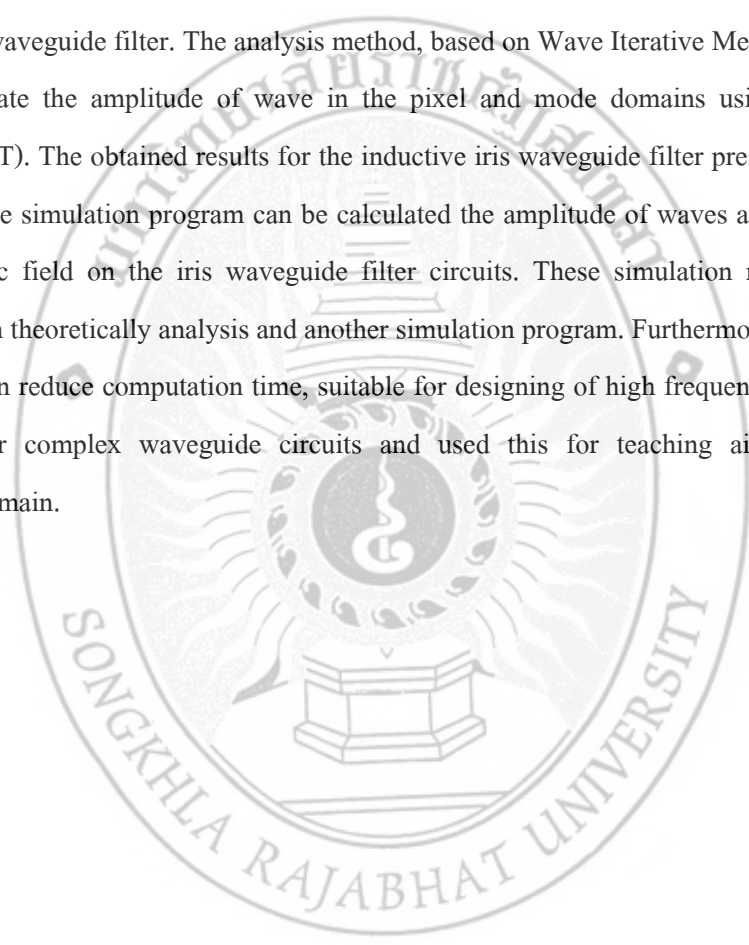
บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่อง การพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นโดยการวางตัวเรียงกันของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยอาศัยหลักการของคลื่นที่มีการกระทำซ้ำ (WIM : Wave Iterative Method) ซึ่งจะคำนวณหาค่าขนาดของคลื่นสลับกันระหว่างโดเมนทางพิกเซล (Pixels) และโดเมนทางโหมด (Mode) โดยการใช้การแปลงฟูเรียร์ความเร็วสูง (Fast Fourier Transform) ในการแปลงสภาพระหว่างโหมดกับพิกเซล ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นโดยการวางตัวเรียงกันของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำจะแสดงค่าของพารามิเตอร์การกระจาย และสามารถแสดงรูปร่างขนาดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏบนวงจรช่องแคบ ซึ่งผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่ได้จะให้ค่าใกล้เคียงกันกับการคำนวณทางทฤษฎี และมีความสอดคล้องกับผลของการจำลองโดยโปรแกรมจำลองอื่น ๆ สำหรับประโยชน์ของการคำนวณแบบนี้ให้ผลดีคือ เวลาในการประมวลผลลดลง สามารถนำไปใช้ออกแบบวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นได้ง่าย สามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์วงจรไมโครเวฟที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้ และยังสามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนในสาขาวิชาด้านวิศวกรรมไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี

Research Title	The Development of Simulation Program for Analysis and Design of Waveguide Filters for Application in Satellite Communication Systems
Researcher	Assistant Professor Dr. Sarun Choocadee
Faculty	Industrial Technology
Year	2016

Abstract

The objective of the research was to study and analyze of an electromagnetic wave of inductive iris waveguide filter. The analysis method, based on Wave Iterative Method (WIM) was used to calculate the amplitude of wave in the pixel and mode domains using Fast Fourier Transform (FFT). The obtained results for the inductive iris waveguide filter presented scattering parameters. The simulation program can be calculated the amplitude of waves and presented the electromagnetic field on the iris waveguide filter circuits. These simulation results are good agreement with theoretically analysis and another simulation program. Furthermore, the benefit of this method can reduce computation time, suitable for designing of high frequency circuit. It can be applied for complex waveguide circuits and used this for teaching aide in electrical engineering domain.



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจากหลายส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจาก กองทุนวิจัยสำนักวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่เป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ผู้ดำเนินงานขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ทุกท่านใน โปรแกรมวิชาอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ได้ให้คำปรึกษางานวิจัย พร้อมทั้งให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา คณะผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างในความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง

คุณค่าและประโยชน์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ หวังว่าคงเป็นแนวทางการศึกษาของผู้ที่มีความสนใจทางด้านพลังงานทดแทน นักวิจัย นักศึกษา และผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง

ท้ายนี้ ประโยชน์อันพึงมีจากการดำเนินงานในครั้งนี้ ขอมอบแด่ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

ศรัณย์ ชุกดี

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

สิงหาคม 2559

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ท่อนำคลื่น (Waveguide)	5
2.2 วงจรกรองความถี่พาสซีฟ	11
2.3 วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม	16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 หลักการและการวนรอบของคลื่น	23
3.2 วิธีกรคำนวณแบบวนรอบของคลื่นในท่อนำคลื่น	27
3.3 การออกแบบโปรแกรมจำลองการคำนวณวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น	32
3.4 การศึกษาและออกแบบท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม	36
3.5 การออกแบบวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำภายในท่อนำคลื่น	40

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การทดสอบวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ	44
4.2 การทดสอบวงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุ	48
4.3 ผลการสร้างและทดสอบวงจรกรองความถี่โดยใช้วงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ	51
4.4 ผลการสร้างและทดสอบวงจรกรองความถี่โดยใช้วงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุ	53

บทที่ 5 สรุปข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง	55
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	55
5.3 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	56
5.4 ข้อเสนอแนะ	56

บรรณานุกรม	58
------------	----

ภาคผนวก ก	61
-----------	----

ภาคผนวก ข	73
-----------	----

ประวัติผู้วิจัย	76
-----------------	----

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2-1	5
ภาพที่ 2-2	7
ภาพที่ 2-3	8
ภาพที่ 2-4	11
ภาพที่ 2-5	12
ภาพที่ 2-6	12
ภาพที่ 2-7	13
ภาพที่ 2-8	13
ภาพที่ 2-9	14
ภาพที่ 2-10	14
ภาพที่ 2-11	15
ภาพที่ 2-12	15
ภาพที่ 2-13	16
ภาพที่ 2-14	16
ภาพที่ 2-15	17
ภาพที่ 2-16	18
ภาพที่ 2-17	18
ภาพที่ 2-18	18
ภาพที่ 3-1	24
ภาพที่ 3-2	25
ภาพที่ 3-3	27
ภาพที่ 3-4	28
ภาพที่ 3-5	32
ภาพที่ 3-6	33
ภาพที่ 3-7	33
ภาพที่ 3-8	34

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 3-9 การเลือกวิเคราะห์โปรแกรมการคำนวณวงจรช่องแคบแบบเรโซแนนซ์	34
ภาพที่ 3-10 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรมการคำนวณ	35
ภาพที่ 3-11 การกำหนดค่าความถี่เริ่มต้นให้กับโปรแกรมการคำนวณ	35
ภาพที่ 3-12 โครงสร้างจำลองที่โอนำคลื่น	38
ภาพที่ 3-13 ผลการจำลองโครงสร้างที่โอนำคลื่น	37
ภาพที่ 3-14 การศึกษาและวิเคราะห์แหล่งกำเนิดพลังงานที่ใช้สายอากาศแบบโมโนโพล	39
ภาพที่ 3-15 ด้านข้างวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ	40
ภาพที่ 3-16 วงจรสมมูล	40
ภาพที่ 3-17 ผลการจำลองของการเพิ่มขนาดความกว้างวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียว	41
ภาพที่ 3-18 โครงสร้างวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียว	42
ภาพที่ 3-19 ผลการจำลองของการเพิ่มขนาดความกว้างวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียว	42
ภาพที่ 3-20 ชิ้นงานจริงของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียวภายในที่โอนำคลื่น	43
ภาพที่ 4-1 โครงสร้างของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ	44
ภาพที่ 4-2 การกำหนดค่าที่ใช้ในการออกแบบวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ	45
ภาพที่ 4-3 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์เอสกับ โปรแกรมเชิงพาณิชย์ CST® เมื่อ $d/a = 0.375$	46
ภาพที่ 4-4 เปรียบเทียบค่ารีแอกแตนซ์โดยเพิ่มขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบ	46
ภาพที่ 4-5 ค่าของสนามไฟฟ้าบนวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ เมื่อ $d/a = 0.5$	47
ภาพที่ 4-6 ค่าของสนามแม่เหล็กบนวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ เมื่อ $d/a = 0.5$	47
ภาพที่ 4-7 โครงสร้างของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ	48
ภาพที่ 4-8 การกำหนดค่าที่ใช้ในการออกแบบวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ	48
ภาพที่ 4-9 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์เอสกับ โปรแกรมเชิงพาณิชย์ CST® เมื่อ	49
ภาพที่ 4-10 เปรียบเทียบค่ารีแอกแตนซ์โดยเพิ่มขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ	50
ภาพที่ 4-11 ค่าของสนามไฟฟ้าบนวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ เมื่อ	50
ภาพที่ 4-12 ค่าของสนามแม่เหล็กบนวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ เมื่อ	51
ภาพที่ 4-13 การทดสอบวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำในที่โอนำคลื่น	52

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
ภาพที่ 4-14	การเปรียบเทียบค่า dB(S11) และ dB(S21) โดยการทดลองวัดจริงและการจำลอง	52
ภาพที่ 4-15	การทดสอบวงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุตัวเดียวในท่อนำคลื่น	53
ภาพที่ 4-16	การเปรียบเทียบค่า dB(S11) และ dB(S21) โดยการทดลองวัดจริงและการจำลอง	53
ภาพที่ ก-1	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลอง	63
ภาพที่ ก-2	ส่วนของเมนูหลัก	64
ภาพที่ ก-3	การเลือกวิเคราะห์โปรแกรมการคำนวณวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ	65
ภาพที่ ก-4	การออกแบบโครงสร้างของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ	65
ภาพที่ ก-5	วงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ	67
ภาพที่ ก-6	การกำหนดค่าที่ใช้ในการออกแบบวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ	68
ภาพที่ ก-7	โครงสร้างของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ	69
ภาพที่ ก-8	การแสดงผลของโปรแกรมการคำนวณสนามไฟฟ้าของวงจร	69
ภาพที่ ก-9	การแสดงผลของโปรแกรมการคำนวณความหนาแน่นกระแสของวงจร	70
ภาพที่ ก-10	การแสดงผลของโปรแกรมการคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ของวงจร	71
ภาพที่ ก-11	การแสดงผลของโปรแกรมการคำนวณค่าอินดักแตนซ์ของวงจร	71
ภาพที่ ก-12	การแสดงผลของโปรแกรมการคำนวณค่าผลตอบแทนตามความถี่ของวงจร	72
ภาพที่ ข-1	โปรแกรมจำลองการคำนวณวงจรกรองความถี่ที่มีโครงสร้างของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ	74
ภาพที่ ข-2	การแสดงผลการตอบสนองตามความถี่ของวงจรกรองความถี่ของโปรแกรมGWT	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน การพัฒนาของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมาก ตัวอย่างเช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบสื่อสารอินเทอร์เน็ต ระบบการสื่อสารไมโครเวฟ และระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ซึ่งในระบบการสื่อสารดังกล่าวจะมีการกำหนดความถี่ในการใช้งานภายในระบบ จึงจำเป็นต้องมีวงจรกรองความถี่เพื่อให้ระบบดังกล่าวสามารถใช้งานได้ ดังนั้น วงจรกรองความถี่ในระบบดังกล่าวนี้จึงมีบทบาทที่สำคัญมากในระบบสื่อสาร โดยหน้าที่หลักของวงจรคือการคัดแยกสัญญาณที่ต้องการออกจากสัญญาณที่ไม่ต้องการเพื่อป้องกันสัญญาณต่าง ๆ ของระบบต่อไป โดยใช้คุณสมบัติทางความถี่เป็นเกณฑ์ในการคัดแยกสัญญาณ ดังนั้นการออกแบบวงจรกรองความถี่ในย่านความถี่สูงจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ ส่วนใหญ่แล้ววงจรกรองความถี่สามารถพบกันมากในรูปแบบที่เรียกว่าพาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter) ซึ่งวงจรกรองในลักษณะนี้จะประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor) , ตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวต้านทาน (Resistor) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่เริ่มแรกที่ใช้กันมานาน และอีกรูปแบบหนึ่งที่พบกันมากคือ อุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ (Active Filter) เช่น ออปแอมป์ (Op-Amp) , ทรานซิสเตอร์ (Transistor) เป็นต้น โดยวงจรกรองความถี่ทั้งสองรูปแบบนี้นำไปใช้ในระบบการสื่อสารในช่วงความถี่ใช้งานที่ไม่สูงมากนัก สำหรับวงจรกรองความถี่ที่ใช้กับระบบไมโครเวฟความถี่สูง จะมีโครงสร้างเป็นสายแถบแคบ (Strip line) สายไมโครสตริป (Microstrip Line) หรือท่อนำคลื่น (Waveguide) แต่เนื่องจากการออกแบบวงจรกรองความถี่ในระบบไมโครเวฟความถี่สูงมักประสบปัญหาในเรื่องของอุปกรณ์ คือ ขาดอุปกรณ์และเครื่องมือในการสร้าง ข้อมูลของการออกแบบค่อนข้างซับซ้อน และที่สำคัญคือซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการออกแบบมีราคาค่อนข้างแพง ด้วยสาเหตุนี้จึงได้มีการคิดค้นในการที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบและสร้างวงจรดังกล่าว

ในปัจจุบันมีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นมาอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปการวิเคราะห์และการคำนวณผลทางคณิตศาสตร์ของวงจรที่ออกแบบมานั้น สามารถทำได้โดยใช้วิธีการ

ต่างๆทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีหลายวิธี เช่น FDTD (Finite Differential Time Domain) , TLM (Transmission Line Matrix) , MMM (Mode-Matching Method) หรือ Method of Moment เป็นต้น แต่เนื่องจากวิธีเหล่านี้มีความยุ่งยากและซับซ้อน ตลอดจนจำกัดด้านความเร็วในการคำนวณ เป็นสิ่งที่นักวิจัยให้ความสนใจเป็นพิเศษ จึงได้พัฒนาวิธีการใหม่ ๆ เพื่อทดแทนวิธีการคำนวณแบบเดิมเหล่านี้ ตลอดจนการคิดค้นประสิทธิภาพการคำนวณให้เร็วขึ้นกว่าเดิมอีกด้วย (Carlos Alberto Andrade , 2001)

ท่อนำคลื่นเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นส่งผ่านพลังงานในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ออกแบบใช้งานได้ง่ายสามารถทนกำลังไฟฟ้าสูงๆได้เป็นอย่างดี ตลอดจนสามารถออกแบบสร้างเป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ เช่น ช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductor Iris) และช่องแคบแบบตัวเก็บประจุ (Capacitor Iris) ได้ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้สร้างวงจรกรองความถี่ไมโครเวฟ เช่น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรกรองความถี่สูงผ่าน วงจรกรองความถี่แถบผ่านหรือแถบหยุด ซึ่งวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นดังกล่าวมีความสำคัญในระบบสื่อสารเป็นอย่างมากและได้มีการพัฒนาวงจรดังกล่าวมาอย่างต่อเนื่อง (Mediavilla, A., A. Tazon, et al., 2000 และ Boria, V. E. and B. Gimeno, 2007) ในปัจจุบันโครงสร้างของวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะบางๆ วางขวางที่ผนังด้านในของท่อนำคลื่นที่ก่อให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ที่ต้องการ โดยส่วนประกอบของวงจรดังกล่าวไม่ซับซ้อนและสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อให้เกิดคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แต่เนื่องจากการออกแบบวงจรไมโครเวฟโดยทั่วไปมักประสบปัญหาในเรื่องของการออกแบบ การจัดหาอุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิเคราะห์ เนื่องจากมีราคาที่สูง ข้อมูลในการออกแบบค่อนข้างซับซ้อน ด้วยสาเหตุนี้จึงได้มีการคิดค้นในการที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบและสร้างวงจรดังกล่าว โดยจากการศึกษาวิจัยที่ได้มีการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์และคำนวณผลทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีขั้นตอนและการคำนวณที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน โดยต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น ระเบียบวิธีเชิงอนุพันธ์จำกัด FDTD (Finite Differential Time Domain) (Hiraoka, T., C. P. Chen, et al., 2005) ระเบียบวิธี TLM (Transmission Line Matrix) (Bandler, J.W., A. S. Mohamed, et al., 2005) ระเบียบวิธีโมเมนต์ (Moment Method) (Seunghyun, S., K. Hyeong-Seok, et al., 2006) เป็นต้น และได้มีการนำวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมาสร้าง

เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่รู้จักกันทั่วไป ได้แก่ โปรแกรม CST Microwave Studio® โปรแกรม GWT (Guide Wave Technology) เป็นต้น แต่เนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวมีขีดจำกัดในการออกแบบ มีความยุ่งยากในการคำนวณ และราคาของโปรแกรมที่สูงมาก ดังนั้นจึงได้มีนักวิจัย (S. Akatimagool, D. Bajon, and H. Baudrand, 2001) ทำการคิดค้น พัฒนา และออกแบบวิธีการคำนวณแบบใหม่ เพื่อให้การคำนวณที่ง่ายและรวดเร็วมากขึ้น เรียกวิธีการคำนวณนี้ว่าวิธีการวนรอบของคลื่น (Wave Iterative Method) โดยใช้หลักการของการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (John R. Reitz, Frederick J. Milford and Robert W. Christy, 1993) ร่วมกับวิธีการคำนวณแบบวนรอบที่สามารถลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณโดยตรง (A. Gharsallah, R. Garcia, A. Gharbi, H. Baudrand, 2001) วิธีการนี้อาศัยหลักการคำนวณหาค่าขนาดของคลื่นที่ปรากฏบนพิกเซล (Pixel) กับขนาดของคลื่นในโดเมนสเปกตรัมหรือโหมด (Mode) ที่อยู่ในชั้นของไดอิเล็กตริกหรือในอากาศ โดยการใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ซึ่งวิธีการดังกล่าวง่ายต่อการเรียนรู้ และสามารถวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบโปรแกรมจำลองต่อไป

จากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะทำการศึกษาและวิเคราะห์วงจรความถี่ใน โครงสร้างของท่อนำคลื่นที่มีการวางตัวเรียงกันของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยพัฒนาวิธีการคำนวณแบบใหม่ซึ่งอาศัยหลักการของคลื่นที่มีการกระทำซ้ำ (WIM : Wave Iterative Method) โดยการคำนวณขนาดและทิศทางของคลื่นตกกระทบ (Incident Wave) คลื่นสะท้อน (Reflected Wave) และคลื่นส่งผ่าน (Transmitted Wave) ในโครงสร้างของวงจรไมโครเวฟที่จำแนกออกเป็นสองโดเมน ซึ่งได้แก่โดเมนทางขนาด (Spatial Domain) หรือพิกเซล (Pixel) ซึ่งเป็นการแบ่งวงจรออกเป็นส่วนเล็กๆ ในลักษณะพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับคลื่นที่สัมผัสผิวของวงจร (Surface of Circuit) และโดเมนของสเปกตรัม (Spectrum Domain) หรือโหมด (Modes) ของคลื่น สำหรับคลื่นที่ปรากฏอยู่ภายนอกของวงจรหรือในชั้นของไดอิเล็กตริก (Dielectric) การเชื่อมโยงหรือการแปลงสภาพระหว่างคลื่นทั้งสองโดเมนนี้ จะอาศัยตัวแปลงสภาพของโหมดความเร็วสูง (Fast Modal Transform) ซึ่งอาศัยหลักการของฟูเรียร์ทรานสฟอร์มความเร็วสูง (FFT: Fast Fourier Transform) เพื่อคำนวณหาคลื่นที่ตกกระทบและสะท้อนไปมาในวงจรโดยแบ่งเป็นโหมด TE และโหมด TM แล้วนำผลการวิเคราะห์หาค่าคำนวณหาคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจร เปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองแบบอื่นๆ ซึ่งผลของการวิเคราะห์ที่

ได้นี้ มีความถูกต้องและสอดคล้องกับทฤษฎี สามารถลดเวลาการคำนวณเพื่อหาค่าคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่นด้วยวิธีการคำนวณแบบวนรอบของคลื่น

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองของค่าพารามิเตอร์แบบต่างๆ ที่มีผลต่อวงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่นที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 โปรแกรมจำลองที่สร้างและพัฒนาขึ้น ใช้การประมวลผลภายใต้การทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB® เป็นโปรแกรมหลัก

1.3.2 โปรแกรมจำลองที่สร้างขึ้นสามารถวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรองความถี่ภายในท่อนำคลื่น และแสดงรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโปรแกรมจำลองวงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่นที่สร้างขึ้นกับผลทางทฤษฎีและโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำโปรแกรมจำลองที่สร้างขึ้นไปใช้ในการออกแบบวงจรรองความถี่ภายในท่อนำคลื่นที่ซับซ้อนได้อย่างถูกต้อง สะดวก และรวดเร็ว และสามารถพัฒนาในการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมในเชิงพาณิชย์ได้ ตลอดจนผลของงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยวิธีการอื่น ๆ

1.5.2 สามารถนำโปรแกรมจำลองวงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่นที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นสื่อการเรียนรู้สำหรับนักศึกษา และนักวิจัยในการวิเคราะห์ออกแบบวงจรท่อนำคลื่นสำหรับระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม และยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นงานวิจัยต่อไปในอนาคต

1.5.3 สามารถนำผลงานวิจัยไปตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ วารสารวิชาการในระดับชาติและระดับนานาชาติ เพื่อเผยแพร่และส่งเสริมให้นักวิจัยและผู้สนใจนำผลการวิจัยไปใช้ในการพัฒนาหรือใช้ประโยชน์ต่อไป

บทที่ 2

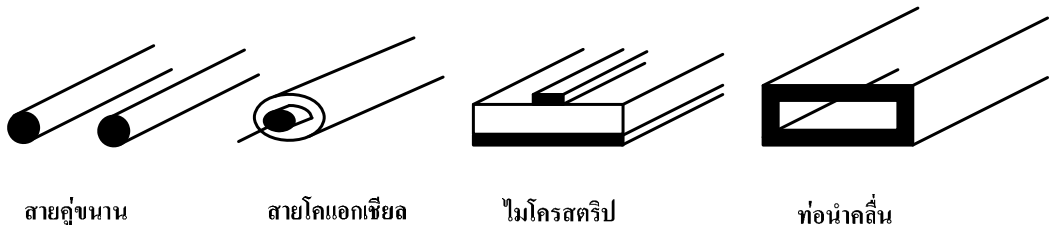
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องในการดำเนินงานวิจัย การพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์และออกแบบวงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่นเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อนำคลื่น วงจรรองความถี่พาสซีฟ วงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม เพื่ออธิบายลักษณะพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรที่ทำการศึกษา ผู้วิจัยได้ศึกษาทางด้านทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเสนอตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- 2.1 ท่อนำคลื่น (Waveguide)
- 2.2 วงจรรองความถี่พาสซีฟ
- 2.3 วงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม
- 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ท่อนำคลื่น (Waveguide)

ท่อนำคลื่นเป็นสายนำสัญญาณชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับการส่งสัญญาณในรูปคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยมีการสูญเสียพลังงานที่น้อย โครงสร้างของท่อนำคลื่นมีลักษณะเป็นโลหะตัวนำเดี่ยวภายในกลวง ที่มีใช้งานทั่วไปจะมีพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม หรือ วงรี โดยทั่วไปท่อนำคลื่นถูกนำมาใช้งานย่านความถี่สูงๆ ในย่านความถี่ไมโครเวฟ (ประมาณ 500MHz -30GHz) แทนสายโคแอกเซียล เพราะว่าในท่อนำคลื่นนั้นจะให้การสูญเสียน้อยกว่าสายโคแอกเซียล



ภาพที่ 2-1 สายนำสัญญาณชนิดต่างๆ

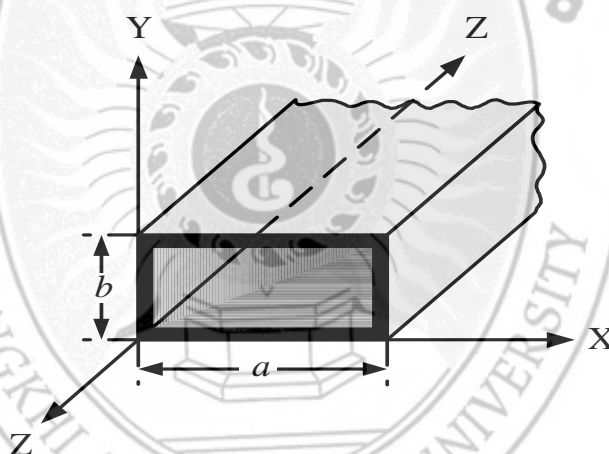
ปัจจุบันระบบการติดต่อสื่อสารจะประกอบด้วยตัวส่งและตัวรับ สำหรับช่องทางในการสื่อสารจะใช้สายส่งหรือตัวนำสัญญาณที่มีลักษณะและรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยส่วนประกอบของสายนำสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 2-1 สายนำสัญญาณที่ใช้ในความถี่วิทยุแต่เดิมจะมีอยู่ 2 แบบหลักๆ คือ แบบสายคู่ขนาน และแบบสายโคแอกเชียล สายคู่ขนานเป็นสายนำสัญญาณที่เส้นลวดตัวนำ 2 เส้น วางขนานกัน และห่างกันเป็นความกว้างที่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นแล้วต้องสั้นกว่ามากๆ และตามโครงสร้างจะไม่มีกั้นปิดกั้นคลื่น เงามโซลที่ระยะห่างสั้นกว่าความยาวคลื่นมากๆ นี้ในย่านความถี่ไมโครเวฟจะทำได้ยาก ทำให้การส่งผ่านของคลื่นไม่ได้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการ นอกจากนั้น โครงสร้างที่ไม่มีกั้นปิดกั้นคลื่นจึงเป็นโอกาสให้มีการรั่วของคลื่นออกไปได้ง่าย โดยเฉพาะบริเวณที่มีการโค้งงอของสาย ดังนั้นสายคู่ขนานจึงไม่มีใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟ สำหรับสายโคแอกเชียลนั้น เนื่องจากครีมนอกของโลหะนอกต้องมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นมากๆ และมักจะต้องใช้สารไดอิเล็กทริกคั่นระหว่างโลหะในกับโลหะนอก การที่สายตัวนำมีขนาดเล็กนั้นจะมีข้อเสียคือ นอกจากจะสร้างยากแล้ว การคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและขนาดของส่วนต่างๆ จะมีผลทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงได้มาก นอกจากนั้นสารไดอิเล็กทริกที่ใช้คั่น โดยทั่วไปจะมีการสูญเสียที่ค่อนข้างสูงนั้น ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับคลื่นกำลังสูงๆ อย่างไรก็ตามสายโคแอกเชียลมีข้อดีที่มีการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ดังนั้นสายโคแอกเชียลจึงมีใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยใช้เป็นช่วงความยาวสั้นๆ เท่านั้น เช่น ใช้เชื่อมต่อระหว่างโมดูลต่างๆ ในอุปกรณ์ไมโครเวฟ เป็นต้น สายนำสัญญาณที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟอีกประเภทหนึ่งดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-1 คือสายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปเป็นสายนำสัญญาณที่ใช้สารไดอิเล็กทริกคั่นระหว่างแผ่นกราวด์กับสายไมโครสตริปซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับลายวงจรบนแผ่นวงจรที่ใช้ในความถี่ต่ำกว่า VHF ทั่วไป แต่ข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่งของไมโครสตริปคือในความถี่ต่ำกว่านั้นความยาวของไมโครสตริปมักจะไม่ค่อยมีปัญหา เพราะเงามโซลความยาวไมโครสตริปสั้นกว่าความยาวคลื่นมากๆ แต่ในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้นความยาวของไมโครสตริปที่เดินบนแผ่นวงจรมักจะไม่สามารถละเอียดได้ เนื่องจากความยาวคลื่นสั้นลงจะส่งผลให้เฟสของสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ บนไมโครสตริปมีค่าไม่เท่ากันซึ่งทำให้ต้องคิดรายละเอียดเชิงแม่เหล็กไฟฟ้ามากขึ้น แต่เนื่องจาก ไมโครสตริปมีขนาดเล็กกะทัดรัด จึงเหมาะสำหรับใช้กับวงจรไมโครเวฟที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีขนาดเล็ก ข้อจำกัดของไมโครสตริปคือ ความสามารถในการรับกำลังคลื่นได้ต่ำ จึงเหมาะสำหรับใช้ในวงจรภาครับ หรือวงจรภาคส่งที่ส่งด้วยกำลังคลื่นต่ำๆ เท่านั้น

สายนำสัญญาณที่ใช้ได้ดีในย่านความถี่ไมโครเวฟคือ ท่อนำคลื่น ซึ่งมีโครงสร้างเป็นรูปท่อโลหะกลวง โดยที่พื้นที่หน้าตัดอาจเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม หรือวงรีก็ได้ ขนาดด้านหน้าตัดของท่อจะอยู่ในช่วง $\frac{\lambda}{2}$ ถึง λ ซึ่งในย่านความถี่ไมโครเวฟจะมีขนาดไม่ใหญ่นัก ข้อดีของท่อนำ

คลื่นคือ ไม่จำเป็นต้องใช้สารไดอิเล็กตริกซึ่งส่งผลให้มีการสูญเสียต่ำ และสามารถรับกำลังคลื่นได้สูง (บัณฑิต, 2536: 9)

2.1.1 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Waveguide)

ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเป็นสายนำสัญญาณที่ใช้ได้ดีในการใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยทั่วไปจะมีรูปหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความกว้าง a ความสูง b และมีความยาวไปตามแนวแกน Z ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2-2 ซึ่งจัดว่าเป็นสายนำสัญญาณของคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ถึง 40 GHz ท่อนำคลื่นแบบนี้มักใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ เช่น ตัวลดทอน (Attenuator) ตัวเชื่อมต่อ (Coupler) และสล็อตไลน์ (Slotted Line) เป็นต้น โดยการวิจัยจะกล่าวถึงคุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม โดยพิจารณาท่อนำคลื่นที่ภายในเป็นอากาศ แกนของท่อเป็นเส้นตรงไม่คดงอ และรูปร่างหน้าตัดของท่อนำคลื่นไม่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน Z

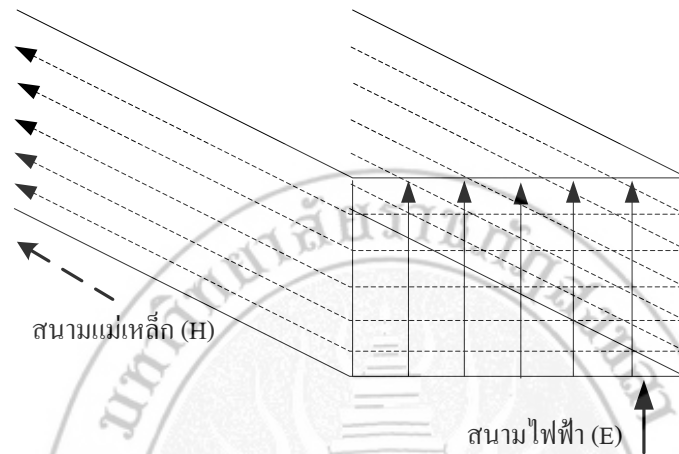


ภาพที่ 2-2 โครงสร้างท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะเกิดคุณลักษณะเฉพาะของสนามไฟฟ้า (E-Field) และสนามแม่เหล็ก (H-Field) ที่ประกอบกันเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้

1. สนามไฟฟ้า ที่เกิดอยู่ภายในท่อนำคลื่น มีจุดความเข้มสูงสุดอยู่ที่กึ่งกลางของด้านยาวของท่อนำคลื่นและมีความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ที่ผนัง หรือด้านกว้างของท่อนำคลื่น (สนามไฟฟ้า ที่ขนานกับผิวตัวนำมีค่าความเข้มเป็นศูนย์)

2. สนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นจะต่อเนื่องกัน และวนไปรอบท่อนำคลื่น โดยที่เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็ก จะไม่ตั้งฉากกับผนังของตัวนำด้านใดเลย สนามแม่เหล็กจะวนต่อกันเป็นวงรอบ (Complete loop) และจะขนานไปกับผนังทุกๆด้านดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

การคำนวณหาความถี่จากความยาวคลื่น กรณีของอวกาศว่าง (Free space) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$c = f \cdot \lambda_0 \quad (2-1)$$

ส่วนความยาวคลื่นใน Free space สำหรับ $TE_{m,n}$ หรือ $TE_{m,n}$ - Modes ในท่อนำคลื่นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นดังนี้

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left[\frac{\lambda_0}{\lambda_c} \right]^2}} \quad (2-2)$$

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2}} \quad (2-3)$$

เมื่อ	c	คือ ความเร็วของคลื่นในที่ว่าง (Free space) มีค่าเท่ากับความเร็วแสง เท่ากับ 3×10^8 m/s หรือ 3×10^{11} mm/s
	f	คือ ความถี่ (Hz)
	λ_o	คือ ความยาวคลื่นในที่ว่าง (m)
	λ_g	คือ ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (m)
	λ_c	คือ ความยาวคลื่น Cutoff ในท่อนำคลื่น (m)
	a	คือ ขนาดด้านกว้างของท่อนำคลื่น (m)
	b	คือ ขนาดด้านแคบของท่อนำคลื่น (m)

สำหรับท่อนำคลื่นในอุดมคติที่มีโครงสร้างที่ผนังเป็นตัวนำไฟฟ้าที่สมบูรณ์ และในท่อนำคลื่นเป็นอวกาศว่าง (Free space) โดยที่ $\epsilon = \epsilon_0$, $\mu = \mu_0$ และ $\sigma = \rho = 0$ ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของ E และ H ในรูปของสมการเคิร์ลของ Maxwell โดยสนามทั้งหมดแปรตามเวลาจะได้ว่า

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0 \vec{H} \quad (2-4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon_0 \vec{E} \quad (2-5)$$

สมการเวกเตอร์ (2-4) และ (2-5) สามารถเขียนในรูปของสมการสเกลาร์ได้ 6 สมการ ดังนี้

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + \gamma E_y = -j\omega\mu H_x \quad (2-6)$$

$$-\gamma E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = j\omega\mu H_z \quad (2-8)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + \gamma H_y = j\omega\epsilon E_x \quad (2-9)$$

$$-\gamma H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon E_y \quad (2-10)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \quad (2-11)$$

จากสมการ (2-7) และ (2-9) เมื่อกำจัด H_y ออกไป จะได้

$$k^2 E_x = -j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2-12)$$

โดยที่ $k^2 = \omega^2 \varepsilon \mu + \gamma^2$

จากสมการ (2-6) และ (2-11) เมื่อกำจัด H_x ออกไป จะได้

$$k^2 E_y = -j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} - \gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2-13)$$

จากสมการ (2-6) และ (2-10) เมื่อกำจัด E_y ออกไป จะได้

$$k^2 H_x = -j\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2-14)$$

จากสมการ (2-7) และ (2-9) เมื่อกำจัด E_x ออกไป จะได้

$$k^2 H_y = -j\omega\varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2-15)$$

เมื่อแทนค่าของ E_x , E_y , H_x และ H_y จากสมการข้างต้นลงในสมการ (2-8) และ (2-11) จะได้

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k^2 E_z = 0 \quad (2-16)$$

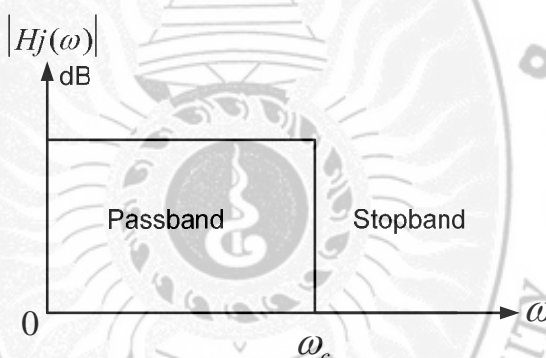
$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k^2 H_z = 0 \quad (2-17)$$

สมการทั้งสองเป็นสมการเชิงเส้นที่เป็นอิสระจากกันในรูปแบบของ E_z และ H_z ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วน และเป็นนิยามที่ใช้อธิบายพื้นฐานของคลื่น 2 ชนิดที่สามารถแพร่กระจายออกไปในท่อนำคลื่น โดยถูกเรียกว่าโหมดของการแพร่กระจายคลื่น

2.2 วงจรกรองความถี่พาสซีฟ

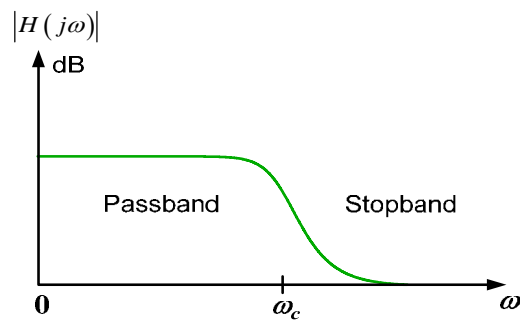
วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟเป็นวงจรกรองความถี่สัญญาณแบบต่อเนื่อง (Analog Filter) ที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และขดลวดเหนี่ยวนำ ใช้ในการกรองสัญญาณที่มีความถี่ตั้งแต่ 0 Hz (สัญญาณไฟ DC) เป็นต้นไป ตัวอย่างเช่น ในวิทยุเอฟเอ็มความถี่กลางที่ใช้ประมาณ 10.7 MHz ดังนั้นความถี่อื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้องจะต้องถูกตัดทิ้งไป ซึ่งในข่ายงานสองขั้วที่ถูกออกแบบให้ใช้งานในด้านนี้เรียกว่า ข่ายงานกรองความถี่สัญญาณไฟฟ้า (Electric Filter Network) ตัวอย่างเช่น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ความถี่ที่มีค่าต่ำกว่าความถี่คัตออฟของวงจร วงจรจะยอมให้ความถี่ดังกล่าวผ่านไปยังเอาต์พุตได้ ส่วนความถี่ที่มีค่ามากกว่าความถี่คัตออฟของวงจร ไม่สามารถผ่านได้ เป็นต้นซึ่งในส่วนประเภทของวงจรกรองความถี่สามารถแบ่งได้ตามลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) ดังนี้

2.4.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)



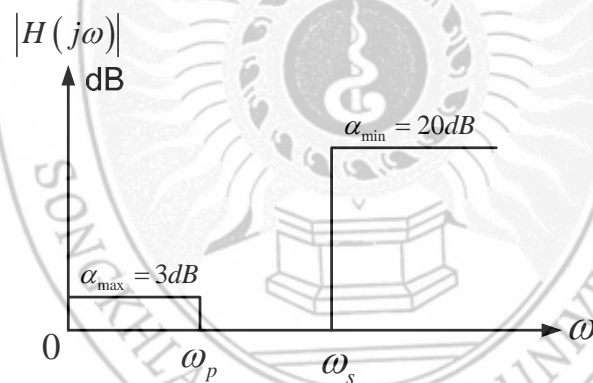
ภาพที่ 2-4 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ

เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำผ่านและกันสัญญาณความถี่สูงไว้ ดังภาพที่ 2-4 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในอุดมคติ โดยเรียกความถี่ที่วงจรยอมให้ผ่านว่า ย่านความถี่ผ่าน (Passband) หรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth: BW) ของวงจร ส่วนย่านความถี่ที่วงจรไม่ยอมให้ความถี่ผ่าน เรียกว่า ย่านความถี่หยุด (Stopband) จากภาพที่ 2-4 ย่านความถี่ผ่านอยู่ระหว่าง 0 ถึง ω_c โดยเรียกความถี่ ω_c ว่าเป็นความถี่คัตออฟ (cut-off frequency)



ภาพที่ 2-5 ผลการตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำจากการประมาณ

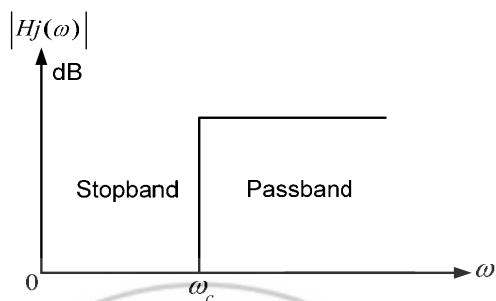
จากภาพที่ 2-5 ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบคัตวีกซ์ คือ ย่านความถี่ที่อัตราขยายของวงจรตกลงมาจากค่าอัตราขยายสูงสุดไม่เกินค่าที่กำหนด (โดยปกติกำหนดไว้ไม่เกิน 3 dB) ย่านความถี่ผ่านอยู่ระหว่าง 0 ถึง ω_c หรือ ω_p และย่านความถี่หยุดเป็นช่วงความถี่ที่มีค่ามากกว่า ω_s ส่วนย่านความถี่ระหว่าง ω_p และ ω_s เรียกว่า ย่านความถี่เปลี่ยน (Transition Band) ซึ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของย่านความถี่เปลี่ยนจะขึ้นอยู่กับอันดับ (Order) ของวงจรกรองความถี่ที่ออกแบบ



ภาพที่ 2-6 ตัวอย่างการลดทอนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

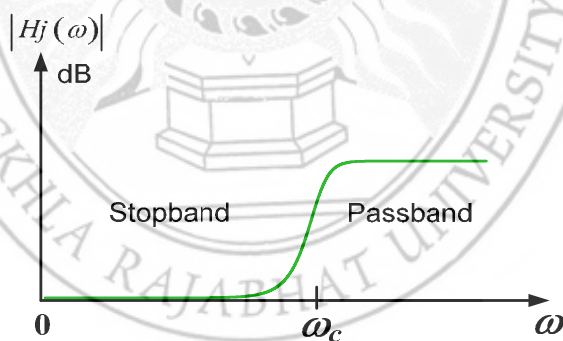
จากภาพที่ 2-6 ช่วงระหว่าง ความถี่ 0 - ω_p จะมีการลดทอนสูงสุดไม่เกิน 3dB ในช่วงความถี่นี้ ซึ่งหมายถึงสัญญาณสามารถผ่านไปยังเอาต์พุตได้โดยมีการลดทอนต่ำ แต่สำหรับในช่วงความถี่ระหว่าง ω_s - ∞ จะมีการลดทอนต่ำสุด 20 dB ซึ่งเมื่อมีการลดทอนมากขึ้นทำให้สัญญาณในช่วงความถี่ดังกล่าวผ่านไปยังเอาต์พุตได้น้อย หรือช่วงความถี่สูงไม่สามารถผ่านไป จึงเป็นคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

2.4.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)

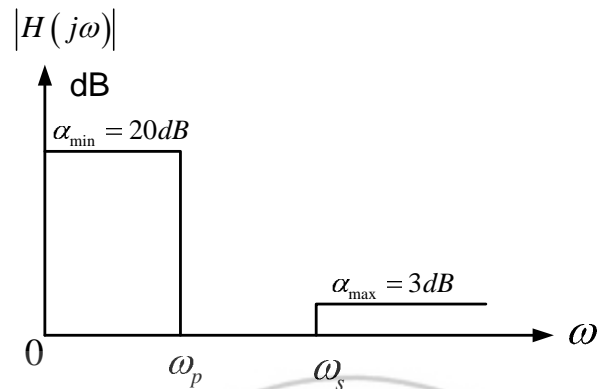


ภาพที่ 2-7 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านในอุดมคติ

เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่คutoff ผ่าน และกั้นสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่คutoff ไว้ แสดงดังภาพที่ 2-7 ความถี่คutoff ω_c ถ้าเป็นการตอบสนองทางด้านอุดมคติจะเห็นช่วงของความถี่ผ่านและช่วงความถี่หยุดได้อย่างชัดเจน แต่ในลักษณะของการตอบสนองของอุปกรณ์ในวงจรกรองความถี่ในการใช้งานจริง จะมีช่วงเวลาในการไต่ขึ้นและลงของสัญญาณระหว่างช่วงความถี่ผ่านกับช่วงความถี่หยุด แตกต่างกับการตอบสนองของช่วงความถี่ในด้านอุดมคติ ดังแสดงในภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 ผลการตอบสนองของวงจรกรองความถี่สูงผ่านจากการประมาณ

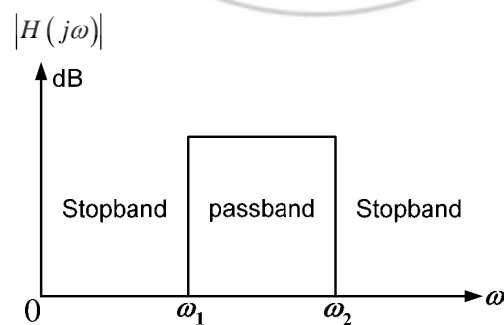


ภาพที่ 2-9 ตัวอย่างการลดทอนวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

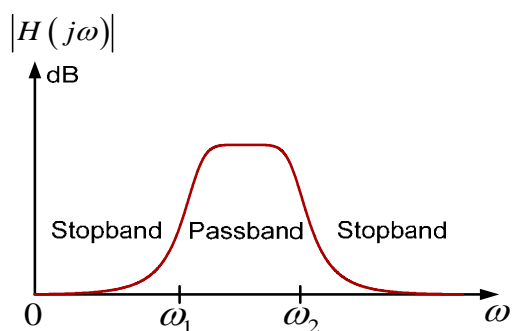
จากภาพที่ 2-9 ในช่วงความถี่ระหว่าง $0 - \omega_s$ จะมีการลดทอนต่ำสุด 20 dB ซึ่งเมื่อมีการลดทอนมากขึ้นทำให้สัญญาณในช่วงความถี่ดังกล่าวผ่านไปยังเอาต์พุตได้น้อยหรือเป็นช่วงความถี่หยุดของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ช่วงระหว่าง ความถี่ $\omega_p - \infty$ จะมีการลดทอนสูงสุดไม่เกิน 3 dB ในช่วงความถี่นี้ ซึ่งหมายถึงสัญญาณสามารถผ่านไปยังเอาต์พุตได้โดยมีการลดทอนต่ำในช่วงความถี่ จึงเป็นคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่สูงผ่านนั้นจะตรงข้ามกับคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งการนำไปใช้งานนั้นก็ต้องแตกต่างกันออกไปด้วย การนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปใช้งาน เช่น ในการป้องกันสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงที่ปะปนมากับความถี่สัญญาณไฟฟ้า 50 Hz ที่ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ไปตามบ้านเรือน เป็นต้น ส่วนในการใช้งานของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน อุปกรณ์บางตัวสามารถทำงานได้ดีกับช่วงความถี่สูง เพราะฉะนั้นการป้องกันไม่ให้ความถี่ต่ำผ่านเข้าไปรบกวนนั้น สามารถใช้วงจรกรองความถี่สูงผ่านมาใช้งานได้

2.4.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)



ภาพที่ 2-10 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านในอุดมคติ



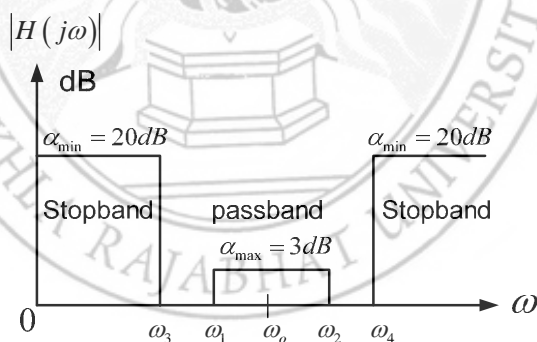
ภาพที่ 2-11 ผลตอบสนองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านการประมาณ

เป็นวงจรกรองความถี่ที่ยอมให้สัญญาณในช่องความถี่ใดๆที่กำหนดไว้สามารถผ่านได้ ดังภาพที่ 2-11 ถ้าให้ ω_1 และ ω_2 เป็นจุดปลายของช่องความถี่ผ่าน โดย $\omega_1 < \omega_2$ จะได้แบนด์วิดท์ของช่องความถี่ผ่านคือ

$$B = \omega_2 - \omega_1 \tag{2-87}$$

ความถี่กึ่งกลาง (Center Frequency) ω_o คือ

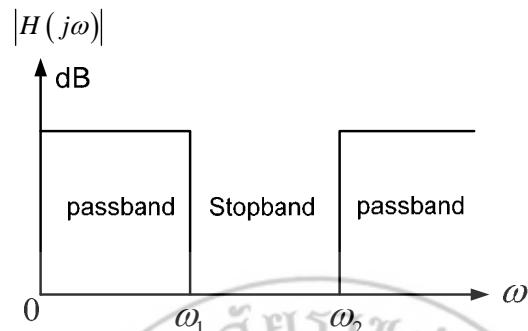
$$\omega_o = \sqrt{\omega_1 \times \omega_2} \tag{2-88}$$



ภาพที่ 2-12 ตัวอย่างการลดทอนวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

จากตัวอย่างของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านช่วงความถี่ระหว่าง ω_1 และ ω_2 เป็นช่วงที่มีการลดทอนของสัญญาณน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ความถี่ที่อยู่ในช่วงดังกล่าวสามารถผ่านไปเอาต์พุตได้ ส่วนช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าช่วงความถี่ดังกล่าวที่กำหนดไว้ จะไม่สามารถผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่านไปได้

2.4.4 วงจรกรองแถบความถี่หยุด (Band Stop Filter)

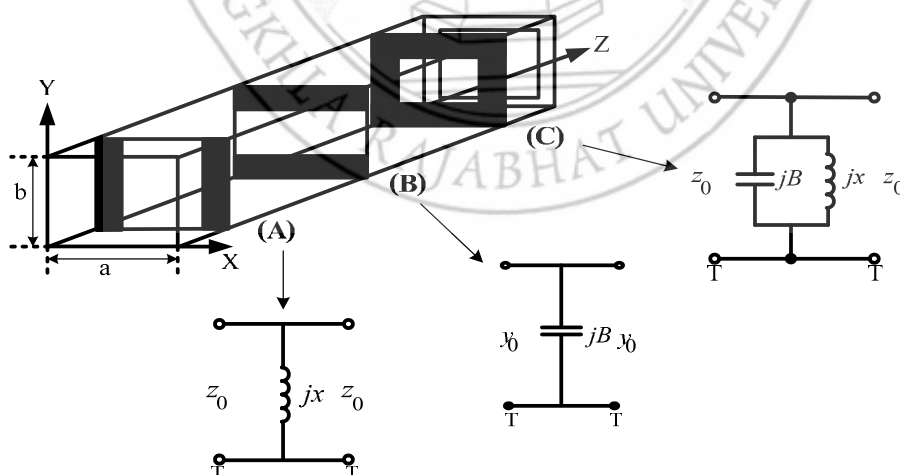


ภาพที่ 2-13 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่หยุดในอุดมคติ

วงจรกรองแถบความถี่หยุดจะทำหน้าที่ตรงข้ามกับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน คือ จะไม่ยอมให้สัญญาณในช่วงความถี่ใดๆที่กำหนดไว้ผ่านไปได้ ดังภาพที่ 2-14 ช่วงความถี่หยุดที่กำหนดไว้คือ ω_1 และ ω_2 ซึ่งความถี่ในช่องนี้ไม่สามารถผ่านวงจรกรองแถบความถี่หยุดไปได้ ส่วนความถี่ที่มีความถี่ต่ำหรือสูงกว่าช่วงความถี่นั้นจะสามารถผ่านวงจรกรองแถบความถี่หยุดไปได้

2.3 วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

โครงสร้างของวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นที่มีโครงสร้างของวงจรช่องแคบในลักษณะต่างๆ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-20

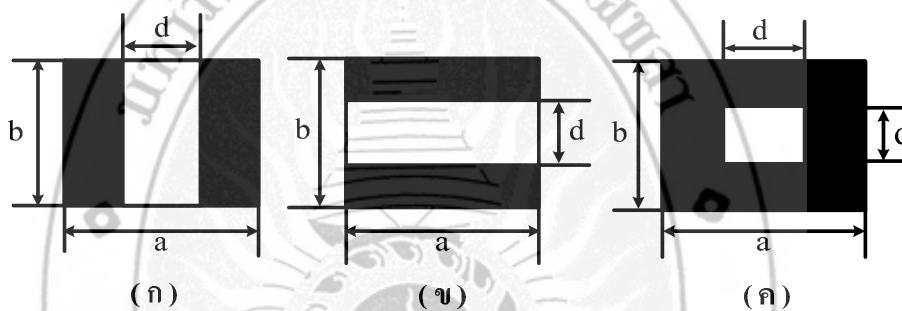


ภาพที่ 2-14 โครงสร้างวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น

วงจรกรองความถี่มีบทบาทและความสำคัญต่อการออกแบบวงจรประเภทต่างๆ มีหน้าที่สำคัญคือ ขอมให้สัญญาณความถี่ที่ต้องการผ่านไปได้ ในขณะที่เดียวกันก็จะกำจัดหรือลดทอนความถี่อื่นที่นอกเหนือจากความถี่อื่นที่ต้องการ

2.6.1 วงจรกรองความถี่แบบช่องแคบหรือ ไอริส (Iris)

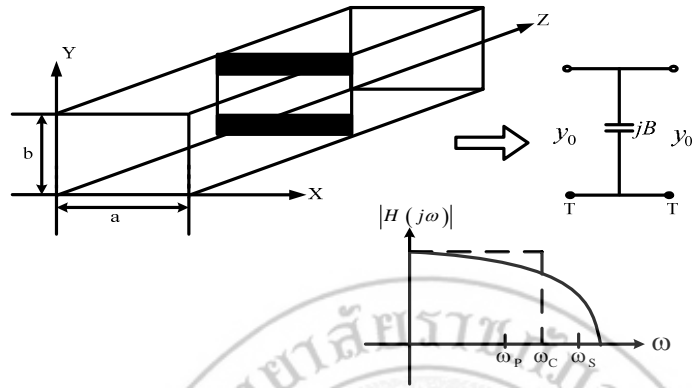
วงจรช่องแคบหรือไอริส คือ แผ่นโลหะลักษณะบางๆ วางขวางที่ผนังด้านในของท่อนำคลื่น ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อการแมตซ์โหลด (Matching Load) ของท่อนำคลื่น โดยคลื่นที่ส่งเข้าไปในท่อนำคลื่นเป็นโหมดโดมิแนนท์ TE_{10} ซึ่งการวางตัวของไอริสในท่อนำคลื่นนั้นมีหลายรูปแบบด้วยกัน ซึ่งแต่ละแบบนั้นความสมมูลย์ทางไฟฟ้าเทียบได้กับการต่อตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุแบบขนาน หรือเป็นทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อกันในแบบขนานหรืออนุกรมก็ได้



ภาพที่ 2-15 วงจรกรองความถี่แบบช่องแคบชนิดต่างๆ

ลักษณะการวางตัวของไอริสแสดงได้ดังภาพที่ 2-15 (ก) เป็นการวางตัวของไอริสที่ทำให้ความสมมูลย์ทางไฟฟ้าเทียบได้กับตัวเหนี่ยวนำ การวางไอริสในลักษณะที่แสดงความสมมูลย์ทางไฟฟ้าแบบตัวเหนี่ยวนำอาศัยหลักการที่ว่าถ้ามีความไม่ต่อเนื่องอยู่ในท่อนำคลื่นจะมีโหมดอันดับสูงซึ่งเป็นโหมดจางหาย (Evanescent Mode) ถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้น และพลังงานของโหมดจางหายนี้จะสะสมอยู่รอบๆบริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดค่ารีแอกแตนซ์โดยทั่วไป จากหลักการนี้ทำให้สามารถสร้างชิ้นส่วนรีแอกแตนซ์ที่มีค่าตัวเหนี่ยวนำได้ โดยกระตุ้นให้เกิดโหมดจางหายที่พลังงานส่วนใหญ่อยู่ในสนามแม่เหล็ก ในทำนองเดียวกันการวางไอริสดังภาพที่ 2-15 (ข) ซึ่งแสดงความสมมูลย์ทางไฟฟ้าเทียบได้กับค่าตัวเก็บประจุก็จะทำได้โดยอาศัยการกระตุ้นให้เกิดโหมดจางหายที่พลังงานส่วนใหญ่อยู่ในสนามไฟฟ้า และในภาพที่ 2-15 (ค) แสดงการวางตัวของวงจรช่องแคบแบบสี่เหลี่ยมที่มีวงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าเป็นวงจรของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อขนานกันก่อให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ ที่แถบความถี่หนึ่งๆ ที่ส่งผลให้วงจรทำหน้าที่กรองให้ความถี่แถบนั้นผ่านไปได้ ประเภทของวงจรกรองความถี่สามารถแบ่งตามลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency Response) ได้ดังนี้

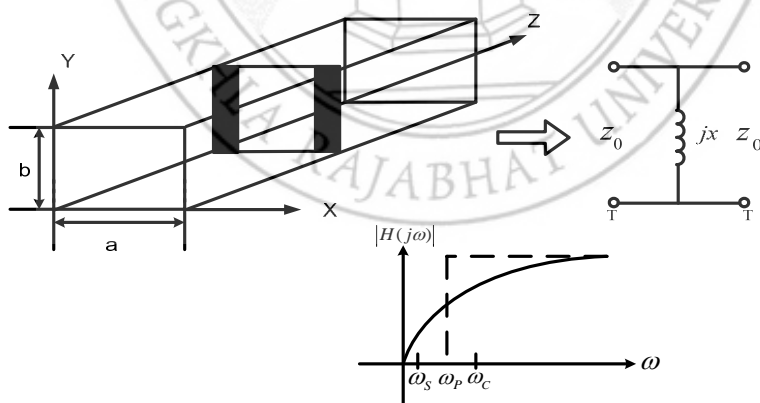
2.6.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในท่อนำคลื่น



ภาพที่ 2-16 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในท่อนำคลื่น

ภาพที่ 2-16 แสดงการวางวงจรช่องแคบในลักษณะที่วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุ โดยเมื่อพิจารณาความไม่ต่อเนื่องที่รอยต่อของวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่นจะทำให้โหมดอันดับสูงเกิดการจางหาย (Evanescent Mode) และมีพลังงานส่วนใหญ่ในโหมด TM สะสมอยู่รอบๆ บริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดค่ารีแอกแตนซ์ที่มีค่าของความจุต่างๆ โดยพลังงานที่เกิดการจางหายส่วนใหญ่เป็นสนามแม่เหล็ก ดังนั้นในวงจรตัวเก็บประจุจะมีพลังงานส่วนใหญ่เป็นสนามไฟฟ้า ส่งผลให้วงจรทำหน้าที่กรองไม่ให้ความถี่สูงผ่าน

2.6.3 วงจรกรองความถี่สูงผ่านในท่อนำคลื่น

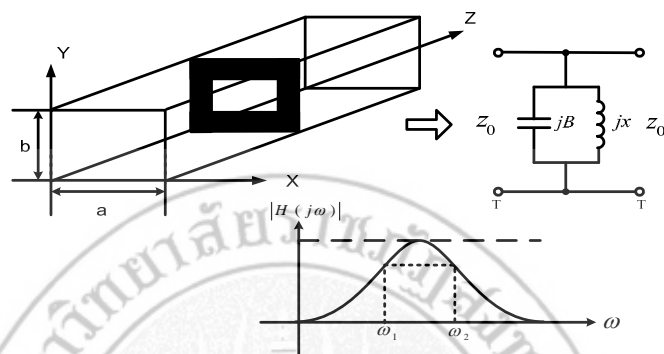


ภาพที่ 2-17 วงจรกรองความถี่สูงผ่านในท่อนำคลื่น

ภาพที่ 2-17 แสดงการวางวงจรช่องแคบที่มีผลทำให้วงจรเทียบเคียงเป็นตัวเหนี่ยวนำ ที่ทำให้โหมดจางหายที่พลังงานส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสนามไฟฟ้า โดยมีพลังงานส่วนใหญ่ในโหมด TE

สะสมอยู่รอบๆ บริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นในวงจรตัวเหนี่ยวนำจะมีพลังงานส่วนใหญ่เป็นสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้วงจรทำหน้าที่กรองไม่ให้ความถี่ต่ำผ่าน

2.6.4 วงจรกรองความถี่แถบผ่านในท่อนำคลื่น



ภาพที่ 2-18 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านในท่อนำคลื่น

ภาพที่ 2-18 แสดงการวางตัวของวงจรช่องแคบแบบสี่เหลี่ยมที่มีวงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าเป็นวงจรของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อขนานกันก่อให้เกิดสถานะโซแนนซ์ที่แถบความถี่หนึ่งๆ ที่ส่งผลให้วงจรทำหน้าที่กรองไม่ให้ความถี่แถบนั้นผ่านไป

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนารูปแบบการคำนวณวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น การจัดการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมไมโครเวฟ และการพัฒนารูปแบบการเรียนการสอนสาขาวิชาอื่นๆ เพิ่มเติมจากที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทนำ โดยทำการศึกษารายละเอียดของการดำเนินการวิจัย ข้อดี และข้อเสียของการวิจัยในแต่ละเรื่อง เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการดำเนินการวิจัย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

A.Mediavilla, A.Tazón, J.A.Pereda, M.Lázaro, I.Santamaría, C.Pantaleon, (2000) Neuronal Architecture for Waveguide Inductive Iris Bandpass Filter Optimization การออกแบบและวิเคราะห์วงจรกรองแถบความถี่ผ่านของวงจรท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีโครงสร้างของวงจรช่องแคบความถี่สูงแบบตัวเหนี่ยวนำแบบสมมาตร โดยอาศัยแบบจำลองการคำนวณแบบ Smoothed Piecewise Linear model (SPWL) และโปรแกรมการคำนวณออกแบบโดยใช้ MMICAD (Monolithic and Microwave Integrated Circuit Analysis and Design) ซึ่งผลของการวิเคราะห์ที่ได้นี้สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำ

Carlos Alberto Andrade (2001) CAD of Rectangular-Ridged Waveguide Band pass filters การออกแบบและวิเคราะห์วงจรกรองแถบความถี่ผ่านของวงจรท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีโครงสร้างของการเชื่อมต่อกันระหว่างวงจรท่อนำคลื่นสองวงจรที่มีส่วนตัดขวางที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะวิเคราะห์และคำนวณโดยอาศัยหลักการของ Mode-Matching Method (MMM) และเมตริกซ์กระจัดกระจาย (GSM: Generalized Scattering Matrix) ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและรวดเร็ว โปรแกรมการคำนวณออกแบบโดยใช้ Computer Aid Design (CAD) และ Graphic User Interface (GUI) ผลของการวิเคราะห์ให้ค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากทฤษฎี

M. Kaddour , A. Mami , A. Gharsallah , A. Gharbi , H. Baudrand (2003) Analysis of Multilayer Microstrip Antennas By Using Iterative Method การศึกษาและพัฒนาวีธีการคำนวณเพื่อวิเคราะห์สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า สำหรับวงจรสายอากาศแบบไมโครสตริป (Microstrip Line) ที่มีโครงสร้างของวงจรประกอบไปด้วยชั้นของตัวนำหรือชั้นของวงจรหลายๆ ชั้น โดยอาศัยทฤษฎีการคำนวณของคลื่นสนามแม่เหล็กและคลื่นสนามไฟฟ้า ที่แพร่กระจายอยู่ภายใน โครงสร้างของชั้นต่างๆ ของวงจร และหลักการของคลื่นระหว่างต้นกำเนิดคลื่นและคลื่นที่สะท้อนจากแนวระนาบเข้าไปในแต่ละเซลล์ โดยใช้ตัวแปลงฟูเรียร์ความเร็วสูง (Fast Fourier Transform) ร่วมกับการคำนวณแบบวนรอบ (Iterative Method) ซึ่งผลของการวิเคราะห์ที่ได้นี้มีความถูกต้องที่สอดคล้องกับทฤษฎี และผลที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ลดเวลาการคำนวณเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรไมโครเวฟ

Tarek Bdour, Noemen Ammar, Taoufik Aguilu and Henri Baudrand (2007) ทำการวิจัยเรื่องรูปแบบการผ่านทะลุของคลื่นในรูปทรงกระบอกโดยใช้วิธีการวนรอบบนหลักการของคลื่นตามขวาง (Modeling of Wave Penetration through Cylindrical Aperture using an Iterative Method Based on Transverse Wave Concept) โดยทำการศึกษาค้นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทะลุผ่านภายในรูปทรงกระบอก ซึ่งผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพและความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอมีความสอดคล้องกับวิธีการอื่นๆ

Wolfgang (2003) ทำการวิจัยเรื่องการศึกษาผลกระทบของคลื่นไมโครเวฟด้วยวิธีการเคลื่อนไหวของการแพร่กระจายคลื่น (Microwave Education Supported by Animations of Wave Propagation Effects) โดยทำการประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณแบบเมตริกของสายส่ง (Transmission Line Model:TLM) มาสร้างเครื่องมือจำลองเป็นภาพเคลื่อนไหวของการแพร่กระจายของคลื่นบนตัวนำแบบคู่ขนานในท่อนำคลื่น การตกกระทบของคลื่นบนตัวนำที่มีการสูญเสีย การจำลองวงจรไมโครสตริป และวงจรกรองความถี่ เพื่อนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนทางด้านไมโครเวฟ ผลการวิจัยพบว่า เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถจำลองสนามแม่เหล็กได้ถูกต้อง และสามารถเพิ่มความเข้าใจในการเรียนรู้เรื่องดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

ศัทธิตยา (2547) การศึกษาและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กในวงจรช่องแคบความถี่สูง โดยศึกษาและวิเคราะห์ คลื่นสนามแม่เหล็ก และคลื่นสนามไฟฟ้า ของวงจรช่องแคบความถี่สูง แบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ โดยอาศัยหลักการของคลื่นที่มีการกระทำซ้ำ (WCIP:Wave Concept Iterative Procedure) ซึ่งจะคำนวณหาค่าขนาดของคลื่น สลับกันระหว่างโดเมนทางพิกเซล(Pixel) ที่ปรากฏบนพื้นที่วงจรและโดเมนทางโหมด (Mode) โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ความเร็วสูง (Fast Fourier Transform) ในการแปลงสภาพระหว่างโหมดกับขนาด ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สำหรับวงจรตัวเก็บประจุและวงจรตัวเหนี่ยวนำ แสดงค่าของการลู่เข้าหาค่าตอบเมื่อจำนวนการวนรอบเพิ่มขึ้น อิมพีแดนซ์ของวงจรในเทอมของความถี่และในเทอมขนาดความกว้างของช่องแคบ ซึ่งจะได้ผลใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2% และผลดีคือเวลาในการประมวลผลลดลง สามารถนำไปใช้ออกแบบวงจรความถี่สูงได้ง่ายและสามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์วงจรไมโครเวฟที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้อีกด้วย

ทวีศักดิ์ และ สมศักดิ์ (2551) นำเสนอเรื่องการศึกษาและวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นโดยการวางตัวเรียงกันของวงจรช่องแคบ แบบตัวเหนี่ยวนำ โดยอาศัยหลักการของการวนรอบของคลื่น ซึ่งจะคำนวณหาค่าขนาดของคลื่นในสองโดเมน คือพิกเซล (Pixels) และโหมด (Mode) โดยใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่นี้จะแสดงค่าของพารามิเตอร์การกระจายและสามารถแสดง

รูปร่างของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏบนวงจรช่องแคบได้ และจากการทดสอบพบว่าการวิเคราะห์ที่ได้จะให้ค่าใกล้เคียงกันกับการคำนวณทางทฤษฎี และมีความสอดคล้องกับผลของการจำลองโดยโปรแกรมจำลองอื่นๆ

สมศักดิ์ (2545) การศึกษาและพัฒนาวิธีการคำนวณแบบใหม่เพื่อวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับวงจรไมโครเวฟ โดยอาศัยหลักการของคลื่นที่มีการกระทำซ้ำ (WCIP: Wave Concept Iterative Procedure) ซึ่งจะคำนวณหาค่าขนาดของคลื่นสลับกันระหว่างโดเมนทางขนาดหรือพิกเซล (Pixel) ที่ปรากฏบนพื้นที่ของวงจร และโดเมนทางสเปกตรัม หรือโหมด (Modes) ที่อยู่ในชั้นของไดอิเล็กตริกหรือชั้นในอากาศ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ความเร็วสูงในการแปลงสภาพระหว่างโหมดกับขนาด ซึ่งให้ผลดีในด้านความเร็วในการประมวลผล

สรุปได้ว่างานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจะทำการศึกษาและพัฒนาโปรแกรมจำลองวงจรไมโครเวฟในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมสำหรับประยุกต์ใช้ในการระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยพัฒนาวิธีการคำนวณแบบใหม่ซึ่งอาศัยหลักการของคลื่นที่มีการกระทำซ้ำ (WIM : Wave Iterative Method) ในโครงสร้างของวงจรไมโครเวฟ แล้วนำผลการวิเคราะห์หาค่าขนาดหาคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจร เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับทฤษฎี โปรแกรมการจำลองในเชิงพาณิชย์อื่นๆ และเครื่องมือวิเคราะห์ข่ายงาน (Network Analyzer) สำหรับการออกแบบโปรแกรมจำลองวงจรไมโครเวฟในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีการใช้งานง่าย การคำนวณที่รวดเร็ว ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปพัฒนางานด้านการออกแบบวงจรองความถี่ไมโครเวฟในท่อนำคลื่นสำหรับระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม และประยุกต์ใช้ในภาคการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมทางด้านโทรคมนาคม

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้เพื่อการพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์และออกแบบวงจรองความถี่ในท่อนำคลื่นเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมด้วยวิธีการคำนวณแบบวนรอบของคลื่น ผู้วิจัยมีวิธีการดำเนินงานในการทำโครงการวิจัยโดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องนำเสนอตามหัวข้อดังนี้

- 3.1 หลักการและการวนรอบของคลื่น
- 3.2 วิธีการคำนวณแบบวนรอบของคลื่นในท่อนำคลื่น
- 3.3 การออกแบบโปรแกรมจำลองการคำนวณวงจรองความถี่ในท่อนำคลื่น
- 3.4 การศึกษาและออกแบบท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม
- 3.5 การออกแบบวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำภายในท่อนำคลื่น

3.1 หลักการและการวนรอบของคลื่น

วิธีการคำนวณแบบใหม่นี้ จะอาศัยหลักการของคลื่น (Wave Concept) ที่มีการสะท้อนไปมาในโครงสร้างของวงจรในแต่ละขบวนการที่มีการกระทำซ้ำๆ กัน (Iterative procedure) ซึ่งหลักการนี้สามารถที่จะคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ปรากฏบนพื้นผิววงจรทั้งส่วนที่เป็นตัวนำแบบโลหะ (Metal) และส่วนที่เป็นฉนวน หรือส่วนที่ไม่ใช่ตัวนำ โดยใช้สมการของคลื่น (Wave Equation) และจากคุณสมบัติของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ประกอบไปด้วยโหมดต่าง ๆ ทั้งแบบ TE และ แบบ TM การคำนวณที่ใช้ส่วนใหญ่จึงเป็นการหาค่าในรูปของโดเมนทางสเปกตรัม (Spectral Domain) โดยอาศัยสมการของการรวมแบบอนุกรม (Series Integration Equation) ในการคำนวณหาค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แต่การคำนวณด้วยสมการดังกล่าว จะเขียนในรูปของเมตริกที่พบว่าจำนวนของตัวแปรของตัวกระทำ (Operators) จะมีขนาดใหญ่มากเมื่อจำนวนโหมดของคลื่นมีค่ามากซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในด้านเวลาและความซับซ้อนในการคำนวณ ซึ่งในวงจรที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากๆ อาจจะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก

ในการวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในวิธีแบบใหม่ โดยอาศัยหลักการของคลื่นที่มีการกระทำซ้ำ (WIM : Wave Iterative Method) โดยการคำนวณขนาดและทิศทางของคลื่นตกกระทบ (Incident Wave) คลื่นสะท้อน (Reflected Wave) และคลื่นส่งผ่าน (Transmitted Wave) ในโครงสร้างของวงจรไมโครเวฟที่จำแนกออกเป็นสองโดเมน ซึ่งได้แก่โดเมนทางขนาด

(Spatial Domain) หรือ พิกเซล (Pixel) ซึ่งเป็นการแบ่งวงจรออกเป็นส่วนเล็กๆ ในลักษณะพื้นที่สี่เหลี่ยมสำหรับคลื่นที่สัมผัสผิวของวงจร (Surface of Circuit) และโดเมนของสเปกตรัม (Spectrum Domain) หรือ โหมด (Modes) ของคลื่น สำหรับคลื่นที่ปรากฏอยู่ภายนอกของวงจรหรือในชั้นของไดอิเล็กตริก (Dielectric) การเชื่อมโยงหรือการแปลงสภาพระหว่างคลื่นทั้งสองโดเมนนี้ จะอาศัยตัวแปลงสภาพของโหมดความเร็วสูง (Fast Modal Transform) ซึ่งอาศัยหลักการของฟูเรียร์ทรานสฟอร์มความเร็วสูง (FFT : Fast Fourier Transform) เพื่อคำนวณหาคลื่นที่ตกกระทบและสะท้อนไปมาในวงจร โดยแบ่งเป็นโหมด TE และ โหมด TM กำหนดให้มีพื้นที่ใดๆ ที่มีคลื่นเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นสมการของคลื่นในเทอมความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้ว่า (สมศักดิ์, 2545)

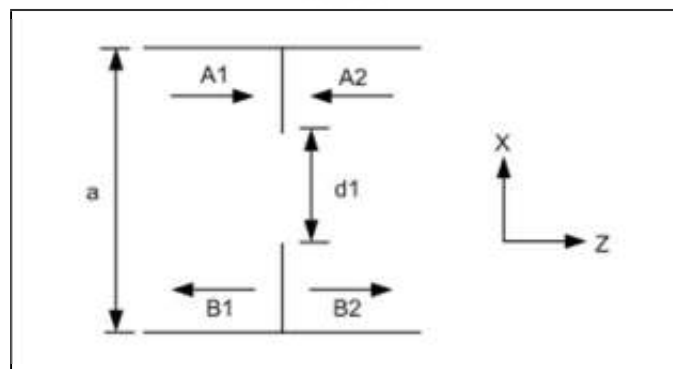
$$A = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(E + Z_0 H) \quad \text{และ} \quad B = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(E - Z_0 H) \quad (3-1)$$

โดยที่ A คือ คลื่นตกกระทบ และ B คือ คลื่นสะท้อนเมื่อ E และ H แทน สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัสผิวส่วนและ Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่น และความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในเทอมของคลื่นตกกระทบ (A) และคลื่นสะท้อน (B) สามารถเขียนได้ดังนี้

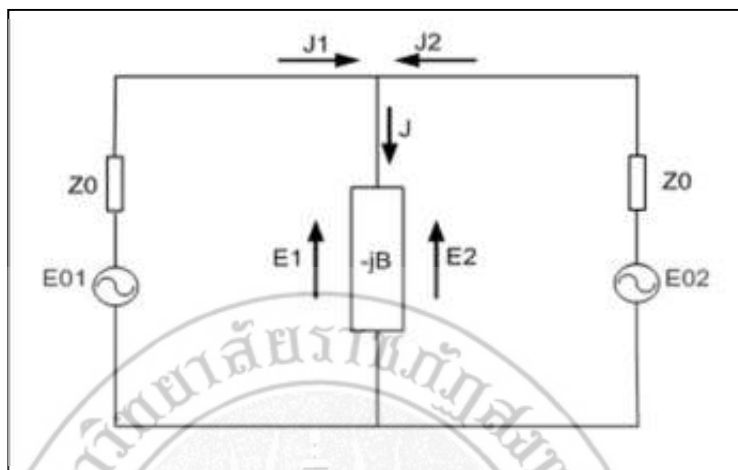
$$E = \sqrt{Z_0}(A + B) \quad \text{และ} \quad H = \frac{1}{\sqrt{Z_0}}(A - B) \quad (3-2)$$

3.1.1 สมการความสัมพันธ์ของคลื่นในวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ

พิจารณาพื้นผิวของวงจร สามารถเขียนเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ได้โดยจำแนกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของตัวนำโลหะ ส่วนของไดอิเล็กตริก (Dielectric) และส่วนของแหล่งกำเนิด



ภาพที่ 3-1 การเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบ (A_1, A_2) และคลื่นสะท้อน (B_1, B_2)



ภาพที่ 3-2 วงจรเทียบเคียงของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ

จากภาพที่ 3-1 และภาพที่ 3-2 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และในส่วนตัว่างๆ ของวงจรได้ดังนี้ สำหรับส่วนที่เป็นไดอิเล็กตริก

$$J_1 + J_2 = 0 \quad (3-3)$$

$$E_1 = E_2 \quad (3-4)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อน

$$A_1 - B_1 = -A_2 + B_2 \quad (3-5)$$

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \quad (3-6)$$

หรือ

$$A_1 + A_2 = B_1 + B_2 \quad (3-7)$$

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \quad (3-8)$$

ดังนั้น สรุปได้ว่า

$$A_2 = B_1 \quad (3-9)$$

$$A_1 = B_2 \quad (3-10)$$

สำหรับส่วนที่เป็นตัวนำ (โลหะ)

$$J_1 + J_2 = J_s \quad (3-11)$$

$$E_1 = E_2 = 0 \quad (3-12)$$

สรุปได้ว่า

$$A_1 = -B_1 \quad (3-13)$$

$$A_2 = -B_2 \quad (3-14)$$

จัดกลุ่มใหม่ระหว่าง สมการ (3-9) และ (3-10) กับสมการ (3-13) และ (3-14) ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_M & S_I \\ S_I & -S_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

โดยนิยามให้ S_M คือ Metal scattering และ S_I คือ Isolate scattering ของวงจรช่องแคบ และเมื่อพิจารณาค่า Reflection Coefficient (Γ) ระหว่างพื้นผิวที่เป็นโลหะ และไม่ได้เป็นโลหะที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3-15) และ (3-16) และ ทำให้ได้ว่า

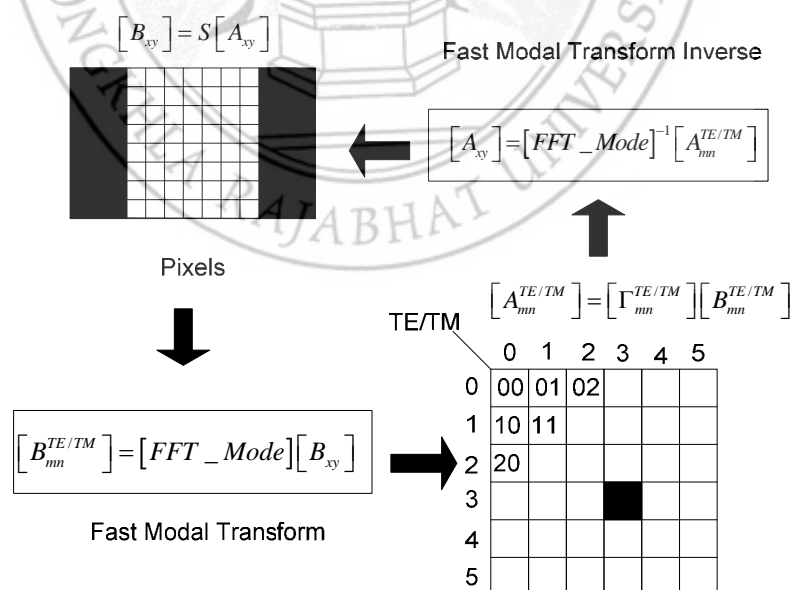
$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_M & S_I \\ S_I & -S_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -S_M A_0 \\ S_I A_0 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

เมื่อ A_0 คือ คลื่นที่ตกกระทบครั้งแรก และเมื่อคลื่นกระทำซ้ำๆกัน เป็นจำนวน n ครั้ง จะได้สมการที่ (3-17) เป็น

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}^{(n)} = \begin{bmatrix} -S_M & S_I \\ S_I & -S_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Gamma_1 & 0 \\ 0 & \Gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}^{(n-1)} + \begin{bmatrix} -S_M A_0 \\ S_I A_0 \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

3.2 วิธีการคำนวณแบบวนรอบของคลื่นในท่อนำคลื่น

การคำนวณใช้วิธีการคำนวณค่าของคลื่นในสองโดเมน คือ โดเมนทางขนาด (Pixels) ซึ่งเป็นการคำนวณหาขนาดของคลื่นที่ตกกระทบ และที่สะท้อนออกมาจากพื้นที่ของวงจร โดยมีค่าปรากฏอยู่ตามตำแหน่งพื้นที่ทั้งหมดของวงจร และโดเมนทางสเปกตรัมหรือทางโหมด โดยที่คลื่นสะท้อนออกมาจากวงจร จะปรากฏมีส่วนองค์ประกอบของคลื่นที่มีอยู่มากมายหลายโหมด อันเนื่องมาจากการหักเห และการกระจายของคลื่นนั่นเอง ซึ่งขั้นตอนการแปลงสภาพทางโหมดด้วยความเร็วสูง (Fast Modal Transform) โดยมีรูปแบบการแปลงสภาพที่อาศัยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มความเร็วสูง หรือ FFT (Fast Fourier-Mode Transform) ดังแสดงในภาพที่ 3-10



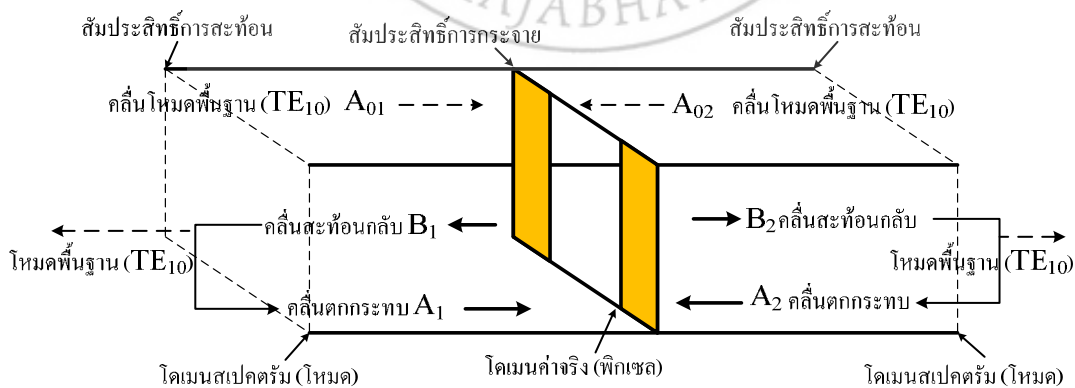
ภาพที่ 3-3 วิธีการคำนวณแบบวนรอบของคลื่น

วิธีการคำนวณเริ่มต้นด้วยการส่งคลื่นตกกระทบที่ส่งด้วยโหมดพื้นฐาน แทนด้วย

$$a_1^{(0)} = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & \dots & a_{0n} \\ a_{10} & a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{m0} & a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad a_2^{(0)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อ $a_{0i} = -\sqrt{\frac{2}{abZ_0}} \sin \frac{\pi x_i}{a}$ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, N$ และ N คือ จำนวนพิกเซล

หลักการของการคำนวณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในท่อนำคลื่น โดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น (S. Akatimagool, D. Bajon, and H. Baudrand, 2001) จะมีกระบวนการดังแสดงในภาพที่ 3-11 ซึ่งจะอาศัยการคำนวณขนาดและทิศทางของคลื่นตกกระทบ (Incident Wave) คลื่นสะท้อน (Reflected Wave) และคลื่นส่งผ่าน (Transmitted Wave) ที่แพร่กระจายผ่านวงจรช่องแคบ โดยที่วงจรช่องแคบจะคำนวณขนาดของคลื่นใน โดเมนบนพื้นที่จริง (Real Domain) สำหรับคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นอากาศว่างจะคำนวณในโดเมนทางความถี่ (Frequency Domain) โดยใช้การแปลงสภาพฟูเรียร์อย่างรวดเร็วทางโหมด-พิกเซล (Fast Pixel-Mode Fourier Transform) ในการเปลี่ยนสภาพระหว่าง โดเมนทั้งสอง ที่พบว่าคลื่นในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ด้วยหลักการของการเมทริกซ์ทางโหมดที่ทางเข้าและทางออกของท่อนำคลื่น สำหรับคลื่นในโหมดที่สูงกว่าซึ่งเกิดจากการกระจัดกระจายของคลื่นบนส่วนของแผ่นตัวนำ จะเกิดการแพร่กระจายสะท้อนไปมาอยู่ตลอดเวลาภายในท่อนำคลื่น ซึ่งส่งผลทำให้การคำนวณรวดเร็วมากยิ่งขึ้นและสามารถแสดงรูปคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏบนพื้นผิวของวงจรช่องแคบได้อีกด้วย



ภาพที่ 3-4 กระบวนการวนรอบของคลื่นในท่อนำคลื่น

จากภาพที่ 3-4 กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของคลื่นในโหมดพื้นฐานเป็นดังนี้

$$A_{0i} = -\sqrt{\frac{2}{ab}} \sin \left[\frac{\pi x}{a} \right] \quad (3-19)$$

เมื่อ A_{0i} คือ Initial incident wave ของโหมด TE_{10} ซึ่งเป็นค่าของแหล่งกำเนิดที่ป้อนเข้าไปยังท่อนำคลื่น

คลื่นสะท้อนกลับ (B_i) จากวงจรตัวนำหรือช่องแคบ (Iris) ในลำดับโหมดที่ n ในโดเมนบนพื้นที่จริงที่มีสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของตัวนำ (S_m) และไดอิเล็กตริก (S_i)

$$B_1^{(n)} = -S_M (A_1^{(n-1)} + A_1^{(0)}) + S_I A_2^{(n-1)} \quad (3-20)$$

$$B_2^{(n)} = S_I (A_1^{(n-1)} + A_1^{(0)}) + S_M A_2^{(n-1)} \quad (3-21)$$

สมการของคลื่น b ในโดเมนทางความถี่ เมื่อ M แทนการแปลงสภาพทางความถี่โดยใช้ FFT (Fast Fourier Transform) เขียนได้ดังนี้

$$B_{(m,n)} = M[b_{(x,y)}] \quad (3-22)$$

$$B_{(m,n)} = \sum_i^{2n} B_{(x_i, y_i)} e^{\left(\frac{-2j\pi m x_i}{a} \right)} \quad (3-23)$$

ในสมการ (3-23) คลื่น a จากผลของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) มีดังนี้

$$a_{(m,n)} = \Gamma b_{(m,n)} \quad (3-24)$$

$\Gamma = \frac{1 - Z_0 Y}{1 + Z_0 Y}$ เมื่อ Z_0 คือ Intrinsic Impedance ในโหมดพื้นฐาน TE_{10} และ Y_{mn} คือ

TE/TM Mode Admittance ในลำดับโหมดที่ m, n และในทำนองเดียวกัน สามารถหาการแปลงผกผันของฟูเรียร์ทางความถี่ (Inverse Fast Fourier Transform : M^{-1}) ได้คือ

$$A_{(x,y)} = M^{-1}[a_{(m,n)}] \quad (3-25)$$

ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณแบบวนรอบ ที่ลำดับ $n-1$ ในโดเมนบนพื้นที่จริง จากสมการที่ (3-32) ถึงสมการที่ (3-37) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$A_1^{(n-1)} = M^{-1}(\Gamma M(B_1^{(n-1)})) \quad (3-26)$$

$$A_2^{(n-1)} = M^{-1}(\Gamma M(B_2^{(n-1)})) \quad (3-27)$$

เมื่อ A_i คือ คลื่นตกกระทบที่ส่งเข้าไปในท่อนำคลื่นและเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} B_1^{(n)} \\ B_2^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_M M^{-1} \Gamma & S_I M^{-1} \Gamma M \\ S_I M^{-1} \Gamma & -S_M M^{-1} \Gamma M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1^{(n-1)} \\ B_2^{(n-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -S_M A_1^{(0)} \\ S_I A_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

การแปลงฟูเรียร์ที่ใช้ในการวิจัยนั้นพิจารณาอนุกรมฟูเรียร์ของฟังก์ชันซายน์ เมื่อกำหนดค่าให้

$$e'(m, n) = \sum_i^{2N} E(x_i, y_i) e^{-2j \frac{\pi m x_i}{a}} \quad (3-29)$$

พิจารณา

$$E(x_i, y_i) = -E(2a - x_i, y_i) \quad (3-30)$$

$$e'(x, y) = \sum_i^N E(x_i, y_i) \left(e^{-2j \frac{\pi m x_i}{a}} - e^{-4j \frac{\pi m a}{a}} e^{-2j \frac{\pi m x_i}{a}} \right)$$

$$e'(x, y) = \sum_i^N E(x_i, y_i) e^{-2j \pi m} \left\{ e^{2j \frac{\pi m x_i}{a}} e^{+2j \pi m} - e^{+2j \frac{\pi m x_i}{a}} e^{-2j \pi m} \right\}$$

$$e'(x, y) = \sum_i^N E(x_i, y_i) e^{-2j \pi m} \left\{ e^{-2j \left(\frac{\pi m x_i}{a} - \pi m \right)} - e^{+2j \left(\frac{\pi m x_i}{a} - \pi m \right)} \right\}$$

$$e'(x, y) = \sum_i^N E(x_i, y_i) e^{-2j \pi m} (-2j) \sin\left(\frac{2\pi m x_i}{a}\right)$$

เมื่อ

$$e(m, n) = \sum_i^N E(x_i, y_i) \sin \frac{2\pi m x_i}{a} \quad (3-31)$$

ดังนั้น

$$e(m, n) = \left(\frac{j}{2}\right) e^{+2j \pi m} e'(m, n) \quad (3-32)$$

ในทำนองเดียวกัน การแปลงฟูเรียร์กลับสามารถทำได้โดยกำหนด

$$E'(m, n) = \sum_m^{2M} e(m, n) e^{2j \frac{\pi m x}{M}} \quad (3-33)$$

และ
$$e(m, n) = -e(2M - m, n) \quad (3-34)$$

$$E'(x, y) = \sum_m^M e(m, n) \left(e^{+2j \frac{\pi m x}{M}} - e^{+4j \frac{\pi M x}{M}} \cdot e^{+2j \frac{\pi m x}{M}} \right)$$

$$E'(x, y) = \sum_m^M e(m, n) e^{+2j \pi x} \left\{ e^{+2j \frac{\pi m x}{M}} \cdot e^{-2j \pi x} - e^{-2j \frac{\pi m x}{M}} \cdot e^{+2j \pi x} \right\}$$

$$E'(x, y) = \sum_m^M e(m, n) e^{+2j \pi x} \left\{ e^{+2j \left(\frac{\pi m x}{M} - \pi x \right)} - e^{-2j \left(\frac{\pi m x}{M} - \pi x \right)} \right\}$$

$$E'(x, y) = \sum_m^M e(m, n) e^{+2j \pi x} (2j) \sin \left[\frac{2\pi m x}{M} \right]$$

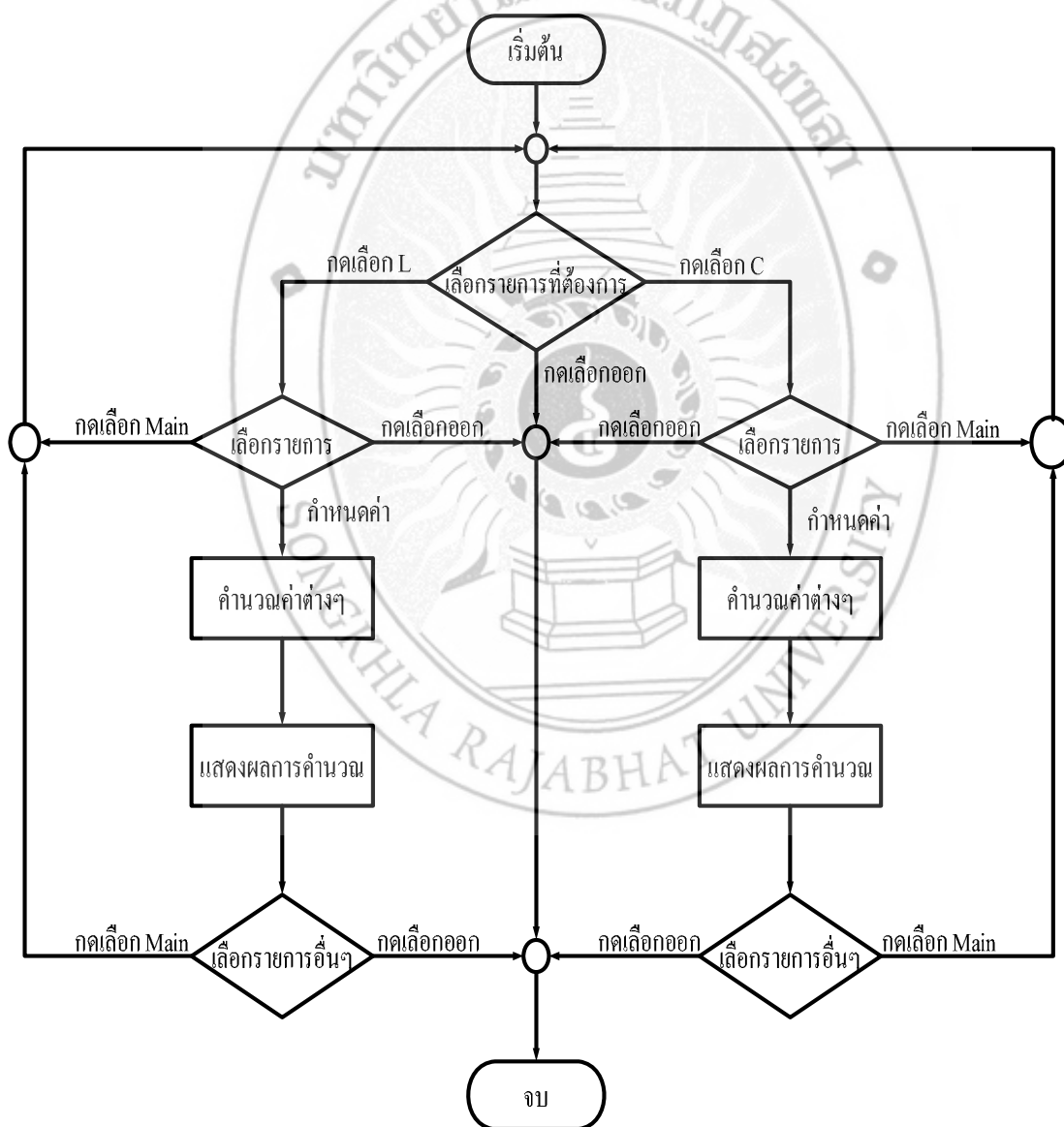
เมื่อ
$$E(x, y) = \sum_m^M e(m, n) \sin \left[\frac{2\pi m x}{M} \right] \quad (3-35)$$

ดังนั้นจะได้
$$E(x, y) = \frac{e^{-2j \pi x}}{2j} E'(x, y) \quad (3-36)$$

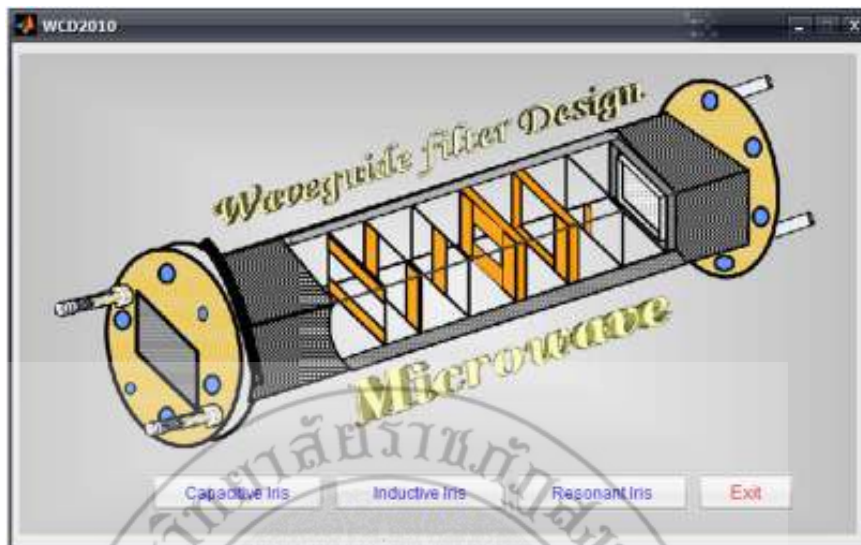
จากอนุกรมฟูเรียร์ซายน์ในสมการที่ (3-29) ต้องกำหนดค่าฟังก์ชันที่ต้องการหา คือ ฟังก์ชัน $E(x_i, y_i)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันคู่ ดังสมการที่ (3-30) และเป็นฟังก์ชันที่ต้องการแปลงจากโดเมนทางขนาดไปเป็นโดเมนทางสเปกตรัมและทำการคำนวณ สามารถสรุปผลได้คือ การแปลงจากโดเมนทางสเปกตรัมเป็นโดเมนทางขนาด ต้องนำฟังก์ชันในโดเมนทางสเปกตรัม คูณกับค่าคงที่ คือ $\left(\frac{j}{2}\right) e^{+2j \pi m}$ ดังสมการที่ (3-32) จะได้ฟังก์ชันในโดเมนของพิกเซลตามที่ต้องการ เช่นเดียวกันการหาการแปลงฟูเรียร์กลับจากโดเมนของสเปกตรัม เป็นโดเมนของพิกเซล ดังสมการที่ (3-33) สามารถหาค่าได้ โดยนำฟังก์ชันในโดเมนขนาดคูณกับค่าคงที่ $\frac{e^{-2j \pi x}}{2j}$ ดังสมการที่ (3-36)

3.3 การออกแบบโปรแกรมจำลองการคำนวณวงจรกรงความถี่ในท่อนำคลื่น

เมื่อทำการออกแบบวงจรช่องแคบภายในในท่อนำคลื่น และกำหนดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ในการคำนวณแล้ว จึงออกแบบโปรแกรมจำลองการคำนวณที่ทำงานภายใต้โปรแกรม MATLAB® ซึ่งมีลักษณะเป็นรายการให้เลือกหรือใส่ค่าลงไป โดยใช้ Graphic User Interface (GUI) ในโปรแกรมของ MATLAB® เพื่อเป็นส่วนในการติดต่อระหว่างโปรแกรมและผู้ใช้งาน ซึ่งง่ายในการแสดงผล โดยลักษณะการทำงานของโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 3-5 และส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน แสดงดังภาพที่ 3-11 ถึงภาพที่ 3-14



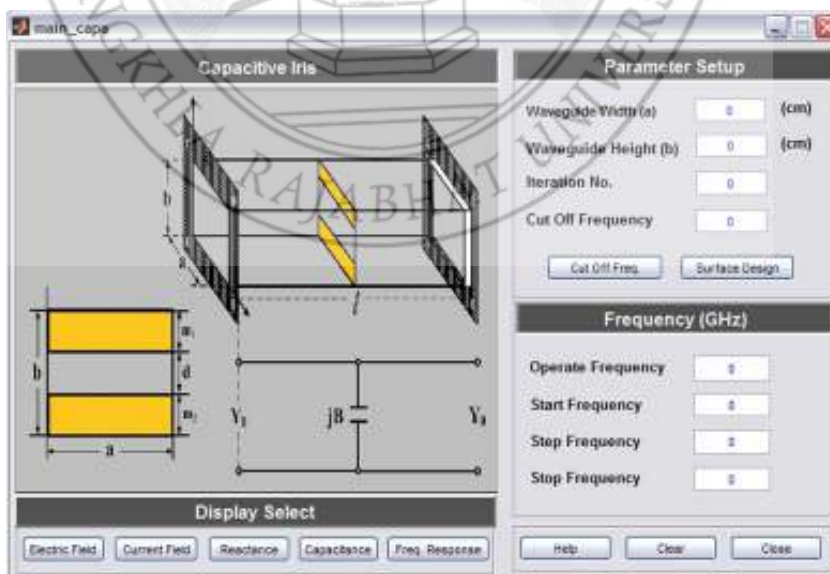
ภาพที่ 3-5 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองการคำนวณ



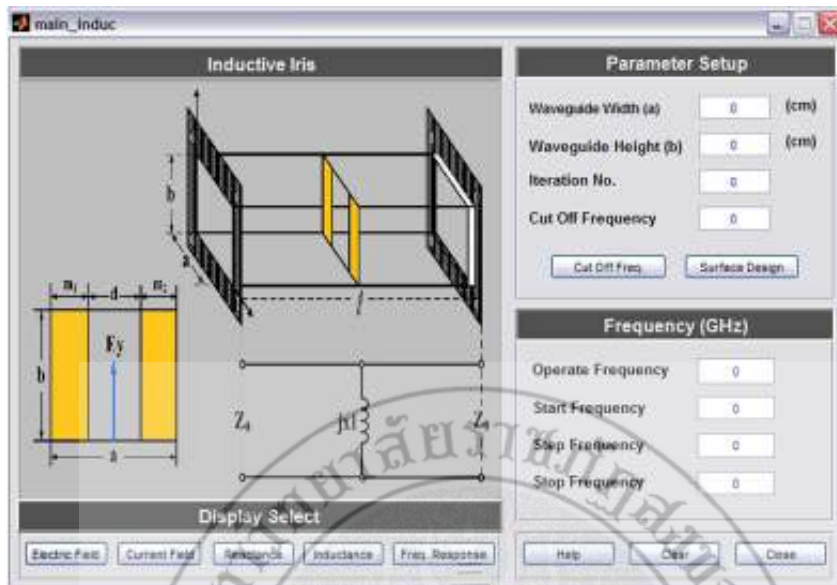
ภาพที่ 3-6 การออกแบบในส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งานส่วนแรก

จากภาพที่ 3-6 ผู้ใช้งานโปรแกรมจำลองการคำนวณวงจรความถี่ในท่อนำคลื่นสามารถเลือกคดปุ่ม เพื่อทำการใช้งานในส่วนของโปรแกรมที่ต้องการคำนวณได้ดังนี้

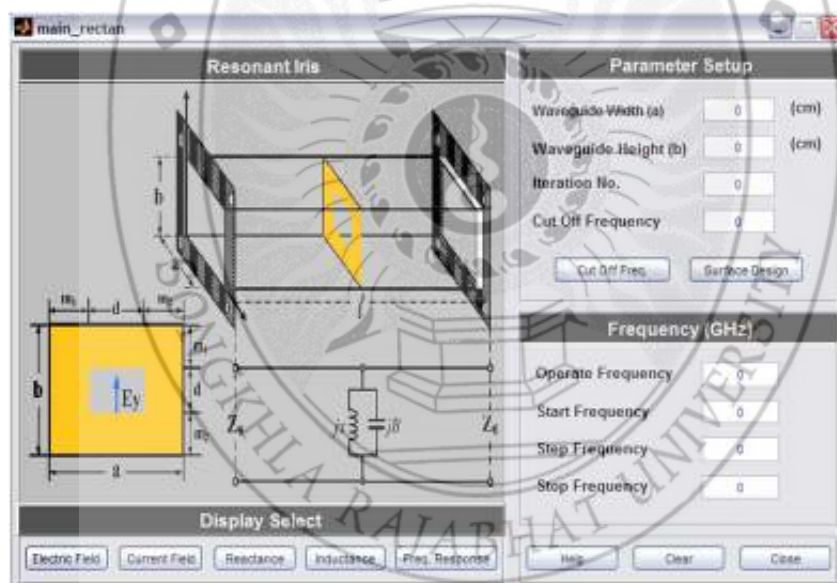
- ปุ่ม Capacitive Iris เข้าสู่โปรแกรมการคำนวณ วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ
- ปุ่ม Inductive Iris เข้าสู่โปรแกรมการคำนวณ วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ
- ปุ่ม Resonance Iris เข้าสู่โปรแกรมการคำนวณวงจรช่องแคบแบบเรโซแนนซ์
- ปุ่ม Exit ออกจากโปรแกรม



ภาพที่ 3-7 การเลือกวิเคราะห์โปรแกรมการคำนวณวงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 3-8 การเลือกวิเคราะห์โปรแกรมการคำนวณวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 3-9 การเลือกวิเคราะห์โปรแกรมการคำนวณวงจรช่องแคบแบบเรโซแนนซ์

จากภาพที่ 3-7 แสดงโปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ส่วนภาพที่ 3-8 แสดงโปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม และ ภาพที่ 3-9 แสดง โปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรช่องแคบแบบเรโซแนนซ์ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งการเริ่มต้นในการใช้งานจะต้องทำการกำหนดค่าเริ่มต้นก่อน จากภาพที่ 3-10 เป็นส่วนของการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรม

ภาพที่ 3-10 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับโปรแกรมการคำนวณ

โดยที่ส่วนของการกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณ (Parameter Setup) ประกอบด้วย

Waveguide Width (a)	การกำหนดค่าความกว้างของท่อนำคลื่น มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
Height (b)	การกำหนดค่าความสูงของท่อนำคลื่น มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
Iteration No.	จำนวนรอบในการคำนวณซ้ำ
Cutoff Frequency	สามารถกดปุ่มเพื่อแสดงค่าความถี่คัตออฟ ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณมาจากสูตร $c/(2a)$ โดยเป็นความถี่ที่ต่ำที่สุดที่คลื่นสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในท่อนำคลื่นได้

เมื่อทำการกำหนดค่าความถี่เริ่มต้นให้กับโปรแกรมโดยสามารถแสดงค่าความถี่คัตออฟได้ โดย ปุ่ม Cutoff Frequency แล้วจึงกำหนดค่าความถี่ใช้งานให้กับโปรแกรม โดยต้องมีค่าความถี่ที่ใช้งานสูงกว่าความถี่คัตออฟ คลื่นจึงสามารถเคลื่อนที่ไปได้ ส่วนในช่อง Start Frequency, Step Frequency และ Stop Frequency คือ ค่าความถี่เริ่มต้น ขึ้นของการเพิ่มความถี่ และความถี่สุดท้าย ดังภาพที่ 3-11

ภาพที่ 3-11 การกำหนดค่าความถี่เริ่มต้นให้กับโปรแกรมการคำนวณ

จากภาพที่ 3-11 เป็นภาพที่แสดงการกำหนดค่าความถี่เริ่มต้นให้กับโปรแกรมการคำนวณ เพื่อการคำนวณค่าความถี่ของท่อนำคลื่นที่ใช้งาน ค่าความถี่เริ่มต้น ช่วงขั้นของการเพิ่มค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป และค่าความถี่สุดท้ายมีรายละเอียดดังนี้

Operate Frequency	ค่าความถี่ของท่อนำคลื่นที่ใช้งาน โดยต้องกำหนดให้มีค่ามากกว่าความถี่คัตออฟ
Start Frequency	ค่าความถี่เริ่มต้น
Step Frequency	ช่วงขั้นของการเพิ่มค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป
Stop Frequency	ค่าความถี่สุดท้าย

การใช้งานของโปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่นที่ผู้วิจัยได้สร้างและพัฒนาขึ้น เมื่อผู้ใช้งานเข้ามาสู่ส่วนของการคำนวณ จะมีส่วนที่กำหนดค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ให้ผู้ใช้กำหนดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ของการคำนวณ ปุ่มให้ผู้ใช้สามารถเลือกการคำนวณและวิเคราะห์ผล และส่วนที่แสดง โครงสร้างของท่อนำคลื่นที่มีโครงสร้างของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ วงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุ และวงจรช่องแคบแบบเรโซแนนซ์ เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นได้ถูกต้อง และครบถ้วนแล้ว สามารถกดปุ่มที่กำหนดเพื่อแสดงกราฟการคำนวณของโปรแกรมตามที่ต้องการได้และกราฟการคำนวณจะถูกแสดงขึ้นมาแทนที่ภาพของโครงสร้างของท่อนำคลื่นในแต่ละชนิด

3.4 การศึกษาและออกแบบท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

การศึกษาและออกแบบท่อนำคลื่นเริ่มจากการศึกษาโหมดการแพร่กระจายคลื่นภายในท่อนำคลื่น โดยทั่วไปโหมดการแพร่กระจายคลื่นสามารถแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือท่อนำคลื่นโหมด TM และท่อนำคลื่นโหมด TE สำหรับโครงการวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกใช้ท่อนำคลื่นโหมด TE เพื่อทำการศึกษาและออกแบบท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม จากการศึกษาขนาดมาตรฐานของท่อนำคลื่นจะใช้ที่ขนาด $a=2b$ และโหมดที่มีความถี่ตัดน้อยที่สุดจะเรียกว่า โดมิแนนท์โหมด (Dominant mode) ซึ่งภายในท่อนำคลื่นก็คือโหมด TE_{10} ที่มีขนาด $a > b$ และกำหนดความถี่ตัดในโหมดพื้นฐาน (Cutoff frequency) เท่ากับ 2.34 GHz ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดความกว้างของท่อนำคลื่น (a) ได้ดังนี้

$$f_{cmn} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

เมื่อ f_{cmn} = Cutoff frequency

$m = 1; n = 0;$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \text{ เป็นค่าความเร็วของแสงในอวกาศว่างมีค่าเท่ากับ } 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

จะได้

$$2.34 \times 10^9 = \frac{3 \times 10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2}$$

$$2.34 \times 10^9 = \frac{3 \times 10^8}{2} \left(\frac{1}{a}\right)$$

$$a = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.34 \times 10^9}$$

$$a = 0.064 \text{ m} = 6.4 \text{ cm}$$

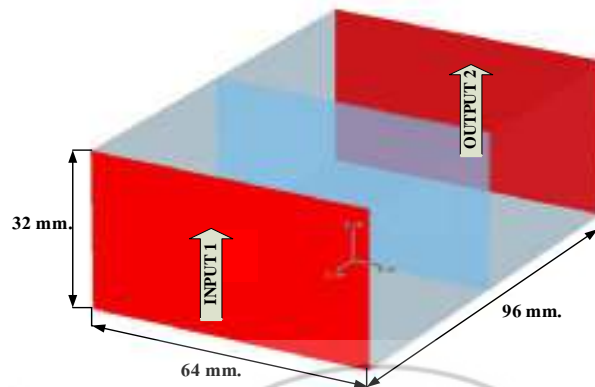
ดังนั้นค่าความสูง (b) ของท่อนำคลื่นสามารถหาได้จาก

$$a = 2b$$

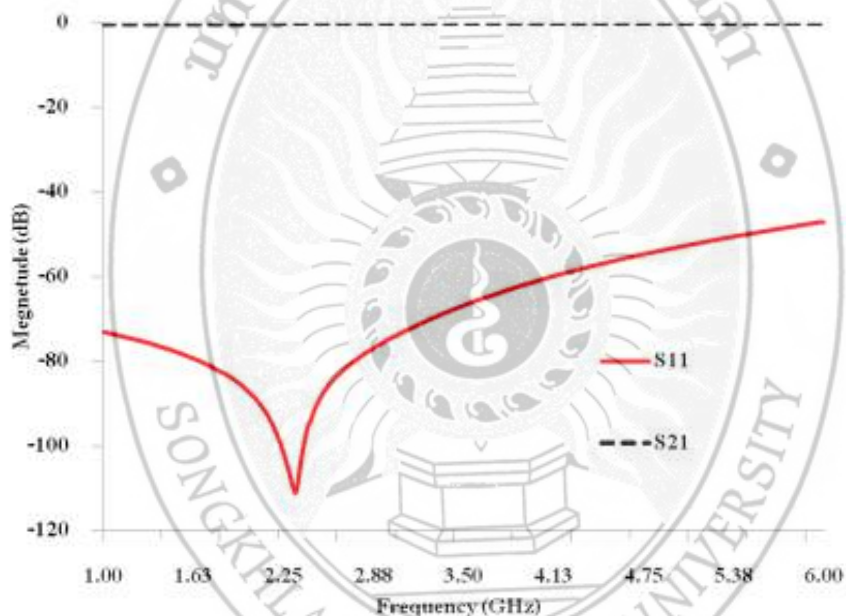
$$6.4 \text{ cm} = 2b$$

$$b = 3.2 \text{ cm}$$

จากการคำนวณค่าความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่น สามารถออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นด้วยโปรแกรมจำลอง CST Microwave Studio[®] ได้ดังนี้ความกว้าง (a) เท่ากับ 64 mm ความสูง (b) เท่ากับ 32 mm ความยาวท่อนำคลื่น เท่ากับ 96 mm ดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 โครงสร้างจำลองท่อนำคลื่น

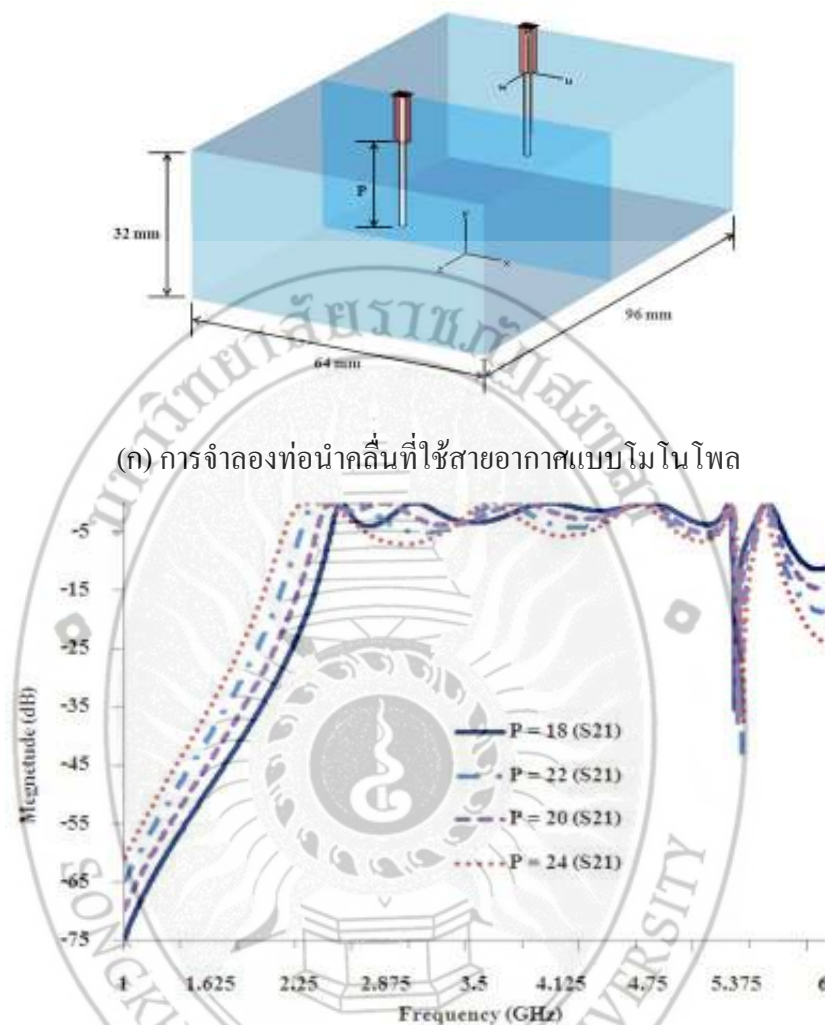


ภาพที่ 3-13 ผลการจำลองโครงสร้างท่อนำคลื่น

จากภาพที่ 3-13 เป็นผลการตอบสนองทางความถี่ของท่อนำคลื่น โดยการป้อนกำลังคลื่นเข้าสู่ ท่อนำคลื่นนั้นจะเป็นการป้อนแบบอุดมคติ คือ การป้อนอินพุตเข้าที่พอร์ต 1 และเอาต์พุตออกที่พอร์ต 2 ดังภาพที่ 3-12 พบว่าท่อนำคลื่นสามารถทำงานได้ในช่วง 2.34 – 4.68 GHz

จากหลักการการออกแบบการป้อนกำลังคลื่นเข้าสู่ท่อนำคลื่นโดยใช้โพรบ ผู้วิจัยจึงทำการสร้างสายอากาศแบบโมโนโพลวางอยู่ที่ตำแหน่งห่างจากผนังปลายปิดของพอร์ตทางเข้าและทางออกประมาณ $\frac{1}{4}$ เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน โดยการเพิ่มความยาวของสายอากาศ (P) ตามอัตราส่วนตั้งแต่ 18-24 mm โครงสร้างท่อนำคลื่นที่ใช้ทดสอบ แสดงดังภาพที่ 3-14 (ก)

โดยท่อนำคลื่นมีขนาดความกว้าง (a) เท่ากับ 64 mm ความสูง (b) เท่ากับ 32 mm และท่อนำคลื่นมีความยาวเท่ากับ 96 mm



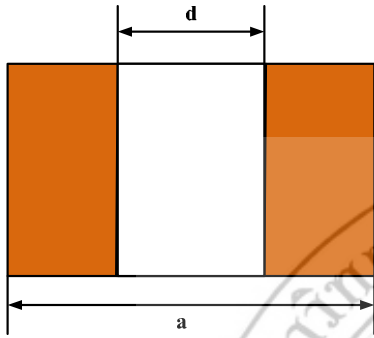
(ข) ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่าน (S_{21})

ภาพที่ 3-14 การศึกษาและวิเคราะห์แหล่งกำเนิดพลังงานที่ใช้สายอากาศแบบโมนิโพล

จากภาพที่ 3-14(ข) แสดงผลการจำลองการตอบสนองทางความถี่ของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่าน (S_{21}) ในท่อนำคลื่นที่ใช้สายอากาศแบบโมนิโพลตั้งแต่ช่วงความถี่ 1-6 GHz จากการจำลองพบว่าช่วงการใช้งานของการตอบสนองทางความถี่ที่สามารถใช้งานได้ดีสำหรับย่านการสื่อสารช่วงตั้งแต่ 1.8-5 GHz

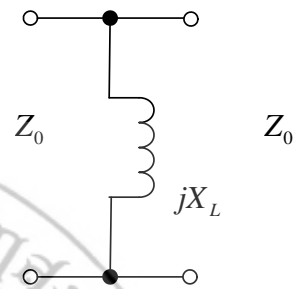
3.5 การออกแบบวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำภายในท่อนำคลื่น

โครงสร้างวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำที่มีความสมมาตรกัน สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3-15 และวงจรสมมูลเปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-15 ด้านข้างวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ

(Cross sectional view)



ภาพที่ 3-16 วงจรสมมูล

(Equivalent circuit)

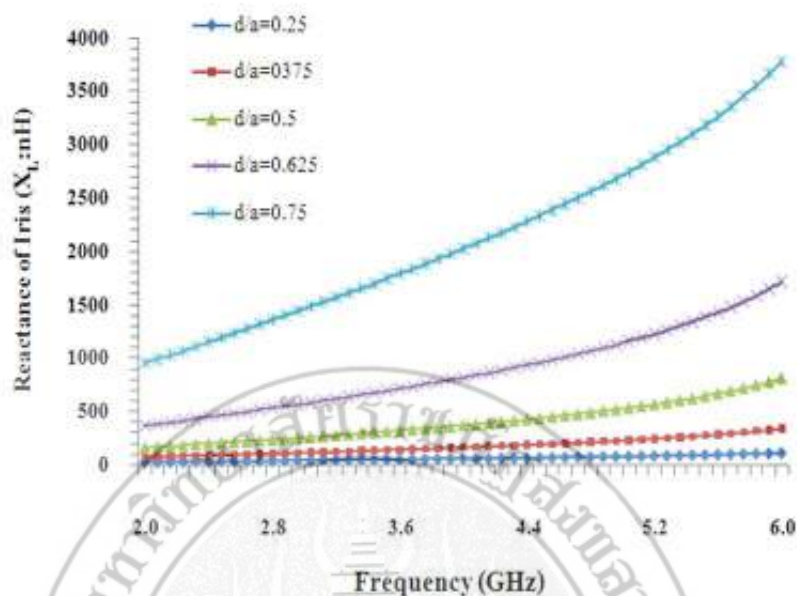
ค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ของตัวเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ (N.Marcuvitz, 1951)

$$X_L = Z_0 \frac{a}{\lambda_g} \tan^2 \left(\frac{\pi d}{2a} \right) \left[1 + \frac{3}{4} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2a}{3\lambda} \right)^2}} - 1 \right\} \sin^2 \frac{\pi d}{a} \right]$$

เมื่อ

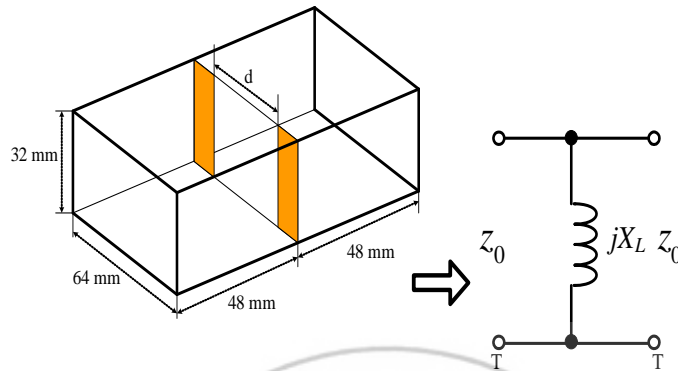
$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2}}$$

จากนั้นใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และคำนวณหาค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) โดยการใช้การเพิ่มขนาดความกว้างของช่องแคบ (d) กับความกว้างของท่อนำคลื่น (a) ตามอัตราส่วนตั้งแต่ 0.125 – 0.5 ตามลำดับ

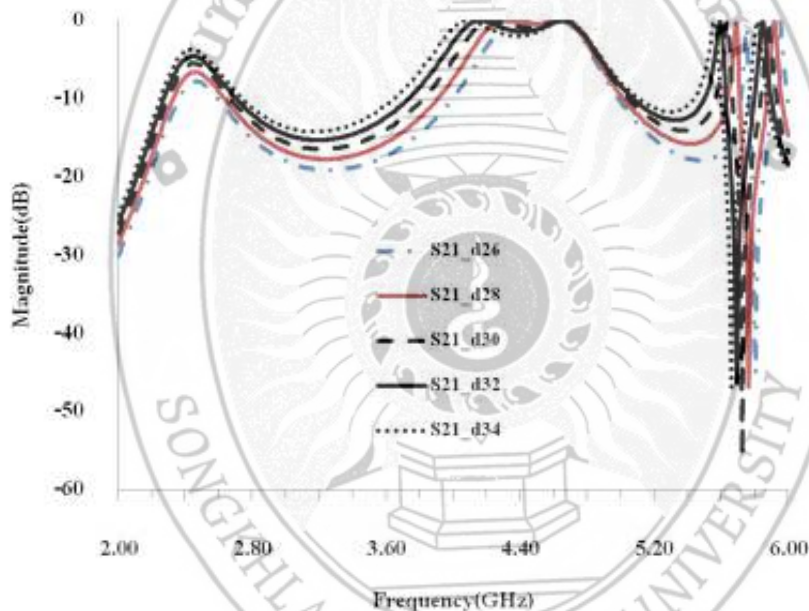


ภาพที่ 3-17 ผลการจำลองของการเพิ่มขนาดความกว้างวงจรวงแคบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียว

จากผลการจำลองของการเพิ่มขนาดความกว้างวงจรวงแคบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียว ดังแสดงในภาพที่ 3-17 โดยการใช้โปรแกรม MATLAB วิเคราะห์หาค่ารีแอกแตนซ์ พบว่าเมื่อ อัตราส่วนระหว่างความกว้างวงจรวงแคบกับความกว้างของท่อ นำคลื่นเพิ่มมากขึ้น ค่ารีแอกแตนซ์จะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ จากหลักการดังกล่าว ผู้วิจัยจึงนำมาใช้ในการออกแบบวงจร กรองผ่านแถบความถี่ โดยใช้โปรแกรมจำลอง CST Microwave Studio® เป็นเครื่องมือในการ วิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในท่อ นำคลื่นประกอบด้วยขั้นตอน และรายละเอียดดังนี้ โครงสร้างของวงจรวงแคบตัวเหนี่ยวนำภายในท่อ นำคลื่นที่ใช้ทดสอบ แสดงในภาพที่ 3-18 โดยมีขนาดความกว้างของท่อ นำคลื่น (a) เท่ากับ 64 mm ความสูง (b) เท่ากับ 32 mm ส่วนของขนาดวงจรวงแคบจะปรับเปลี่ยนช่วงแถบความถี่ โดยใช้การเพิ่มขนาดตามอัตราส่วนความกว้างของวงจรวงแคบ (d)



ภาพที่ 3-18 โครงสร้างวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียว

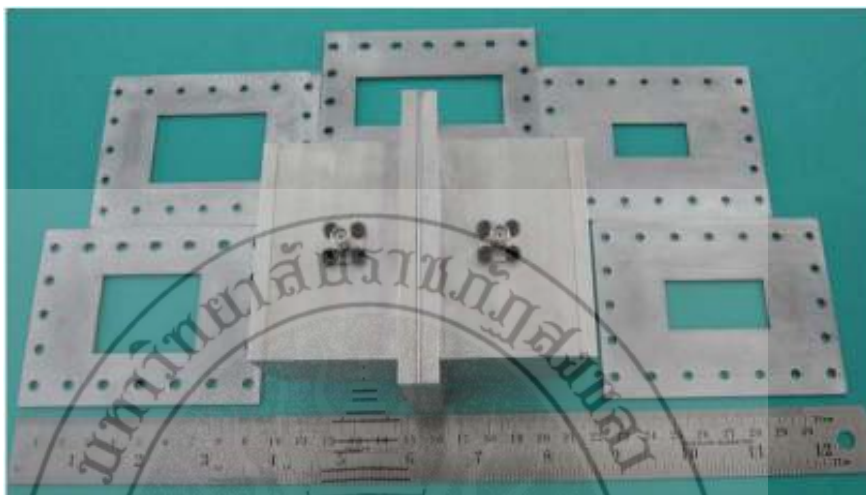


ภาพที่ 3-19 ผลการจำลองของการเพิ่มขนาดความกว้างวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียว

จากภาพที่ 3-19 แสดงผลการจำลองการตอบสนองทางความถี่ของค่าพารามิเตอร์การส่งผ่าน (S_{21}) ในท่อนำคลื่นที่ใช้วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียวตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.0 – 6.0 GHz โดยการเพิ่มขนาดความกว้างของช่องแคบตามอัตราส่วนตั้งแต่ 26 – 34 mm ผลการจำลองพบว่าช่วงการใช้งานของการตอบสนองทางความถี่ที่สามารถใช้งานได้ดีสำหรับย่านการสื่อสารช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.34 – 4.68 GHz

เมื่อได้ขนาดโครงสร้างทั้งหมดดังภาพที่ 3-18 จากนั้นทำการสร้างชิ้นงานจริงและประกอบวงจรช่องแคบเข้ากับท่อนำคลื่นเพื่อทำการวัดและทดสอบผลการทดลอง โดยชิ้นงานจริงที่ทำการ

สร้างเสร็จเรียบร้อยแสดงดังภาพที่ 3-20 ขนาดโครงสร้างคือ a เท่ากับ 64 mm, b เท่ากับ 32 mm, d เท่ากับ 32 mm



ภาพที่ 3-20 ชิ้นงานจริงของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียวภายในท่อนำคลื่น



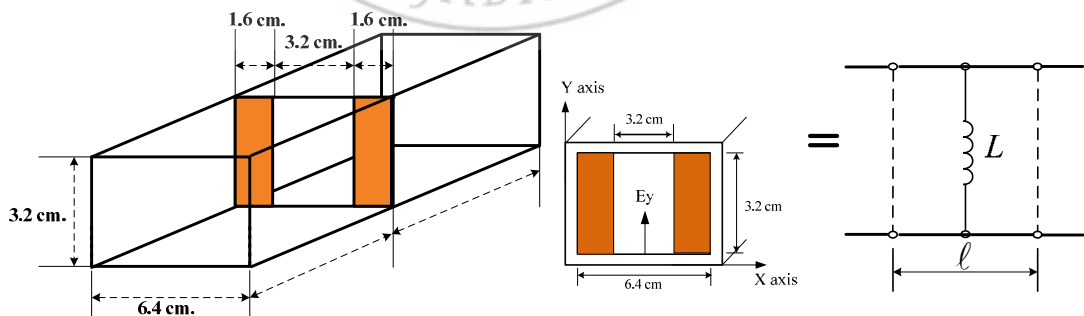
บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการดำเนินโครงการวิจัยในการพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นโดยการวางตัวเรียงกันของวงจรช่องแคบชนิดต่าง ๆ ด้วยการคำนวณภายใต้โปรแกรม MATLAB[®] ซึ่งมีลักษณะเป็นรายการให้เลือกหรือใส่ค่าลงไป โดยใช้คุณสมบัติของ Graphic User Interface (GUI) เพื่อเป็นส่วนในการติดต่อระหว่างโปรแกรมจำลองและผู้ใช้งาน ซึ่งง่ายในการกำหนดค่าเริ่มต้นของการใช้งาน และการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจร และเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio[®] จะให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกัน มีรายละเอียดและผลการทดลองดังนี้

4.1 การทดสอบวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ

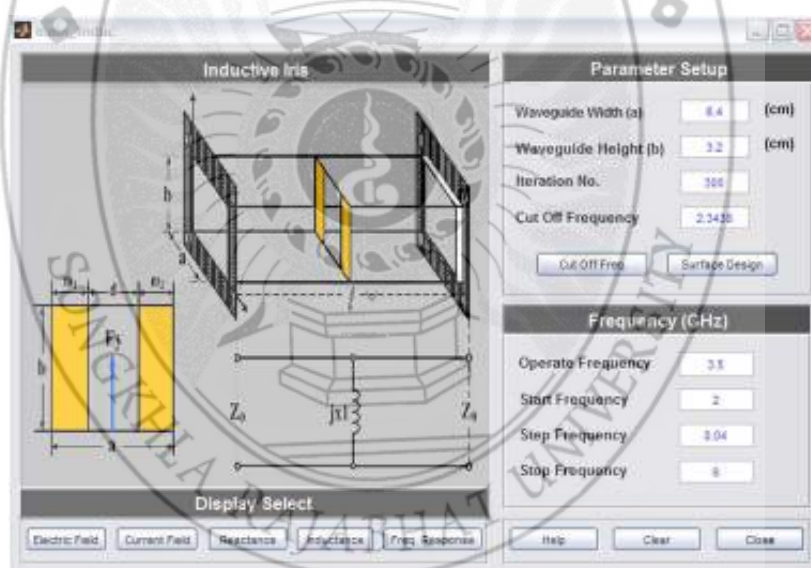
การวิเคราะห์วงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียวที่วางขวางอยู่ในโครงสร้างท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 4-1 ด้วยโปรแกรมจำลองที่ผู้วิจัยสร้างและพัฒนาขึ้น ซึ่งจะกำหนดให้จ่ายพลังงานจากแหล่งกำเนิดของคลื่นในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) สำหรับวงจรทดสอบนี้จะมีความกว้าง (a) เท่ากับ 6.4 เซนติเมตร และความสูง (b) เท่ากับ 3.2 เซนติเมตร โดยการตอบสนองจะยอมให้ความถี่ที่มีค่าสูงกว่าความถี่คัตออฟในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) ที่ 2.34 GHz ผ่านไปได้ และกำหนดให้ส่วนของวงจรช่องแคบมีขนาดความกว้าง (d) เท่ากับ 3.2 และ 2.4 เซนติเมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 4-1 โครงสร้างของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

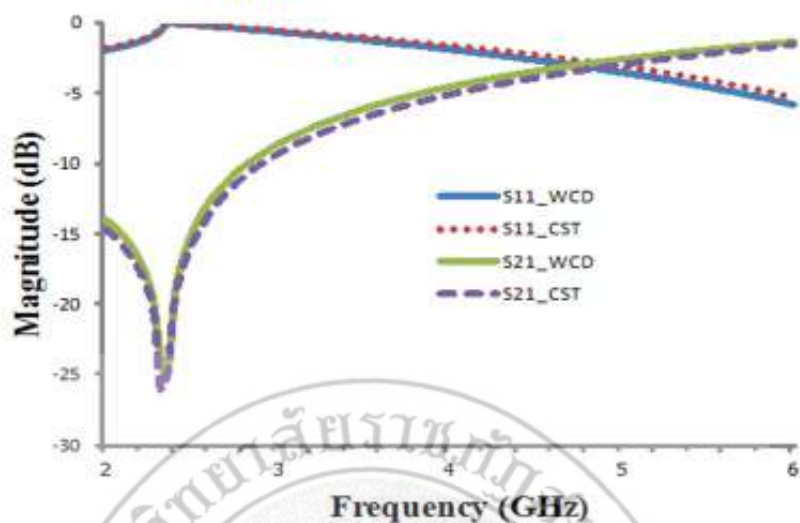
จากภาพที่ 4-1 ทำการกำหนดค่าที่โปรแกรมต้องการ โดยกำหนดค่าเริ่มต้นดังนี้

ความกว้างของท่อนำคลื่น (a)	6.4	เซนติเมตร
ความสูงของท่อนำคลื่น (b)	3.2	เซนติเมตร
ค่า Ratio of d/a	0.5	
จำนวนพิกเซล (p)	32	พิกเซล
จำนวนการคำนวณซ้ำ	300	รอบ
แสดงความถี่คัตออฟ	3.34	GHZ
ความถี่ใช้งาน	3.5	GHz
ความถี่เริ่มต้น	2.0	GHz
ขั้นความถี่	0.04	GHz
ความถี่สุดท้าย	6.0	GHz



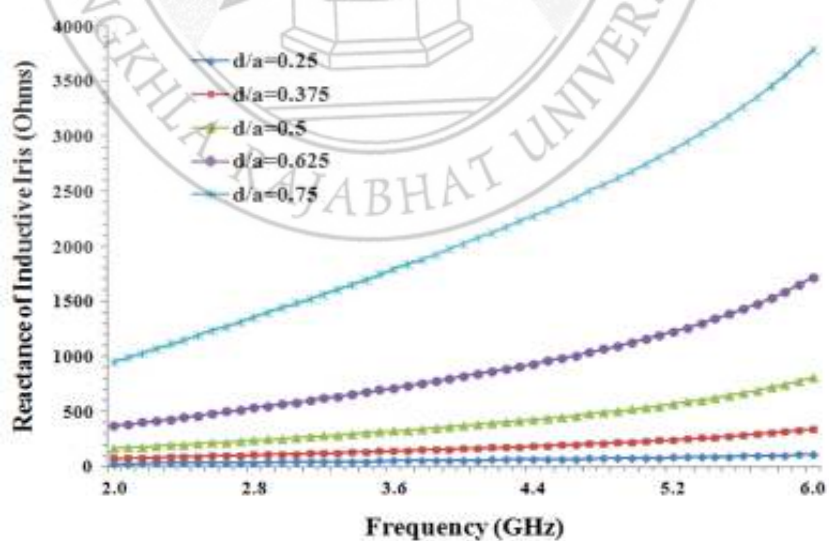
ภาพที่ 4-2 การกำหนดค่าที่ใช้ในการออกแบบวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

การกำหนดค่าที่ใช้ในการออกแบบวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่ทำการทดสอบด้วยโปรแกรมจำลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น แสดงโดยภาพที่ 4-2 โดยจะตอบสนองที่ยอมให้ความถี่ที่มีค่าสูงกว่าความถี่คัตออฟในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) ที่ 2.34 GHz ผ่านไปได้ที่ระดับ -3 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.0 – 6.0 GHz และกำหนดอัตราส่วนระหว่างความกว้าง (d) ของวงจรช่องแคบต่อความกว้างของท่อนำคลื่น (a) มีค่า $d/a = 0.5$ หรือ 3.2 เซนติเมตร และค่า $d/a = 0.375$ หรือ 2.4 เซนติเมตร



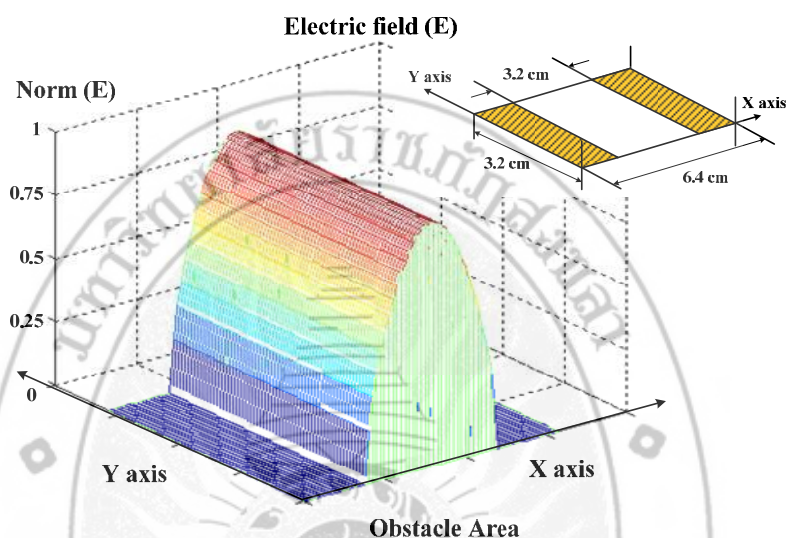
ภาพที่ 4-3 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์เอสกับโปรแกรมเชิงพาณิชย์ CST[®] เมื่อ $d/a = 0.375$

ภาพที่ 4-3 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างความกว้างช่องแคบ (d) ต่อความกว้างท่อนำคลื่น (a) มีค่าเท่ากับ 0.375 ที่มีลักษณะของผลตอบสนองทางไฟฟ้าเป็นวงจรรองความถี่สูงผ่าน โดยมีความถี่คutoffของวงจรช่องแคบที่ค่าเท่ากับ 3.24 GHz ที่ระดับ -3 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.0 – 6.0 GHz และเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio[®] จะให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกันโดยค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทั้งสองโปรแกรมมีค่าประมาณ 2.14 เปอร์เซ็นต์

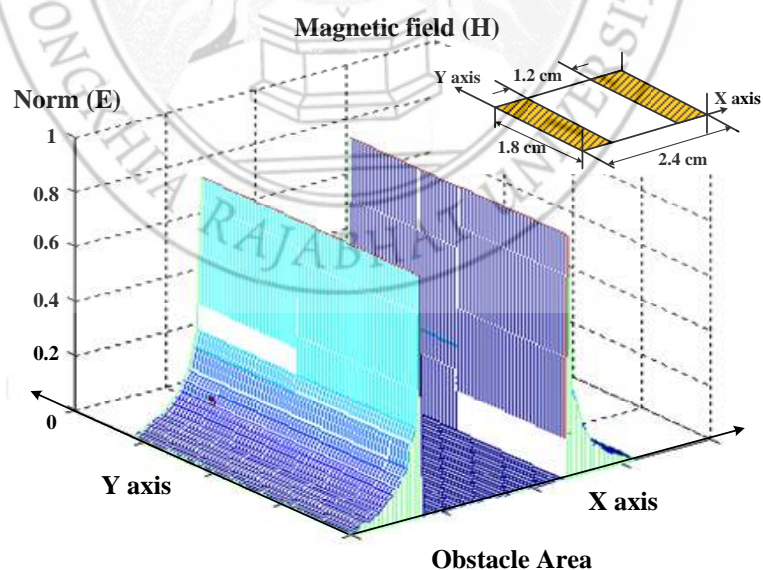


ภาพที่ 4-4 เปรียบเทียบค่ารีแอคแตนซ์โดยเพิ่มขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบ

ภาพที่ 4-4 แสดงการเปรียบเทียบค่ารีแอกแตนซ์ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำโดยการเพิ่มขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบที่ระยะห่างระหว่าง $d/a = 0.25 - 0.75$ ด้วยโปรแกรมจำลองที่ผู้วิจัยสร้างและพัฒนาขึ้น โดยทำการกำหนดค่าความถี่ตั้งแต่ 2.0 – 6.0 GHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดความกว้างของช่องแคบเพิ่มขึ้นค่ารีแอกแตนซ์ของวงจรช่องแคบก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม



ภาพที่ 4-5 ค่าของสนามไฟฟ้าบนวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ เมื่อ $d/a = 0.5$

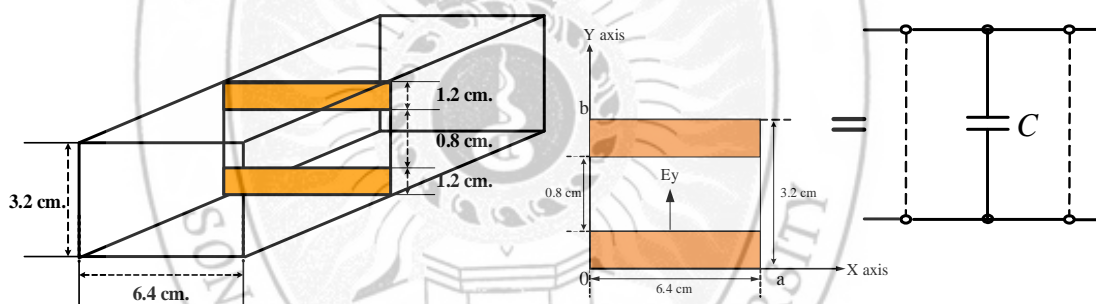


ภาพที่ 4-6 ค่าของสนามแม่เหล็กบนวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ เมื่อ $d/a = 0.5$

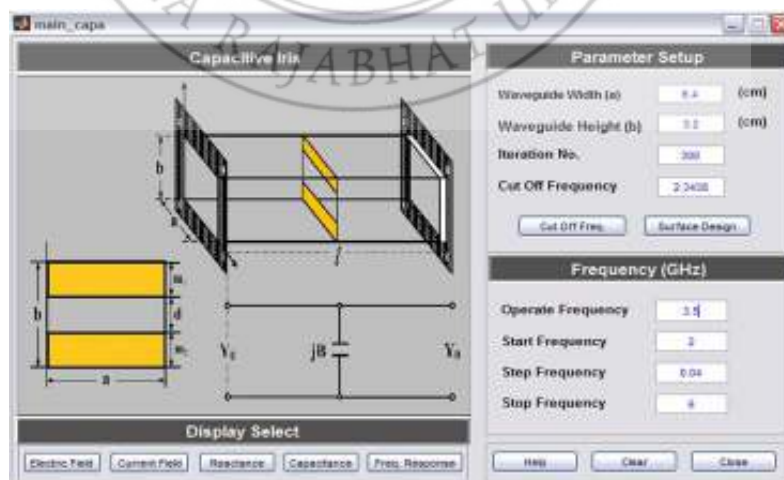
ภาพที่ 4-5 แสดงค่าสนามไฟฟ้าของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่าในส่วนของพื้นที่ของช่องแคบจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสนามไฟฟ้าโดยมีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางและจะมีค่าเป็นศูนย์ที่พื้นที่ตัวนำ และภาพที่ 4-6 แสดงค่าสนามแม่เหล็กของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กจะปรากฏอยู่บนพื้นที่ตัวนำของวงจรช่องแคบที่แสดงค่าขนาดในรูปของความหนาแน่นของกระแส โดยบริเวณขอบของแผ่นตัวนำจะมีค่าสูงสุดและมีค่าต่ำสุดที่ผนังติดกับท่อนำคลื่น

4.2 การทดสอบวงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุ

การวิเคราะห์ห้วงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุที่วางขวางอยู่ในโครงสร้างท่อนำคลื่น ภาพที่ 4-7 โดยกำหนดให้จ่ายพลังงานแหล่งกำเนิดของคลื่นในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) สำหรับวงจรทดสอบมีความกว้าง (a) เท่ากับ 6.4 เซนติเมตร และความสูง (b) เท่ากับ 3.2 เซนติเมตร โดยจะยอมให้ความถี่ที่มีค่าต่ำกว่าความถี่คัตออฟในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) ที่ 2.34 GHz ผ่านไปได้ และกำหนดให้ส่วนของวงจรช่องแคบมีความกว้าง (d) เท่ากับ 0.8 และ 0.4 เซนติเมตร ตามลำดับ

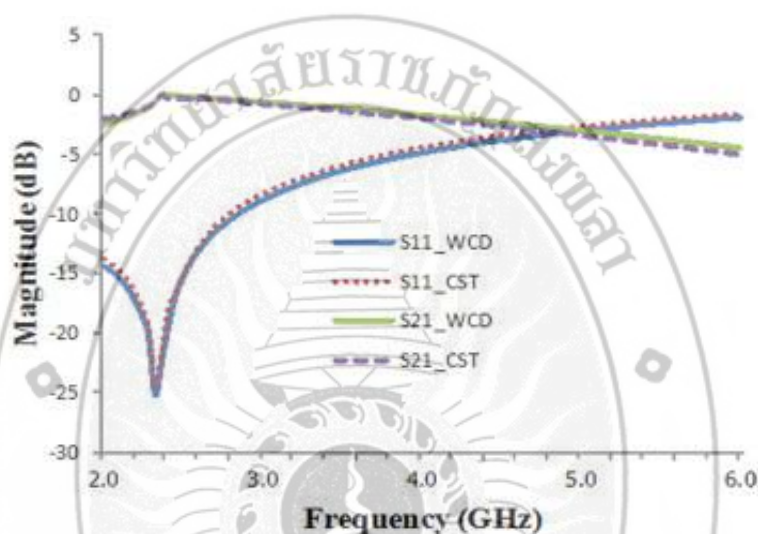


ภาพที่ 4-7 โครงสร้างของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 4-8 การกำหนดค่าที่ใช้ในการออกแบบวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ

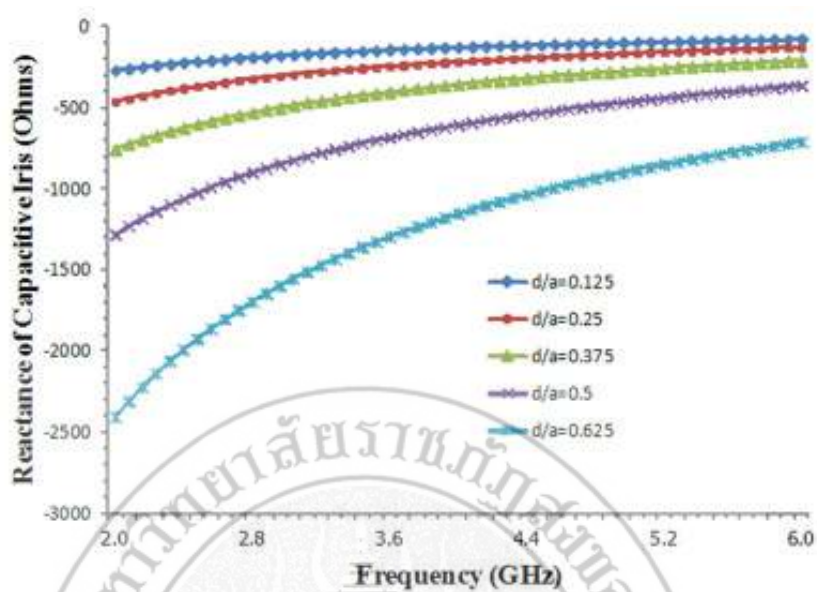
การกำหนดค่าที่ใช้ในการออกแบบวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุที่ทำการทดสอบด้วยโปรแกรมจำลองที่ผู้วิจัยสร้างและพัฒนาขึ้น แสดงโดยภาพที่ 4-8 โดยจะตอบสนองที่ยอมรับให้ความถี่ที่มีค่าสูงกว่าความถี่ตัดในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) ที่ 2.34 GHz ผ่านไปได้ที่ระดับ -3 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.0-6.0 GHz และกำหนดอัตราส่วนระหว่างความกว้าง (d) ของวงจรช่องแคบต่อความกว้างของท่อนำคลื่น (a) มีค่า $d/a = 0.25$ หรือ 0.8 เซนติเมตร และค่า $d/a = 0.125$ หรือ 0.4 เซนติเมตร



ภาพที่ 4-9 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์เอสกับโปรแกรมเชิงพาณิชย์ CST[®] เมื่อ $d/a = 0.25$

ภาพที่ 4-9 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรช่องแคบชนิดตัวเก็บประจุที่กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างความกว้างช่องแคบ (d) ต่อความกว้างท่อนำคลื่น (a) มีค่าเท่ากับ 0.25 ที่มีลักษณะของผลตอบสนองทางไฟฟ้าเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยมีค่าความถี่คutoff ของวงจรช่องแคบเท่ากับ 4.95 GHz ที่ระดับ -3 dB และเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio[®] จะให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกัน โดยค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างทั้งสองโปรแกรมมีค่าประมาณ 2.36 เปอร์เซ็นต์

จากภาพที่ 4-10 แสดงการเปรียบเทียบค่ารีแอกแตนซ์ของวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุโดยการเพิ่มขนาดความกว้างของวงจรช่องแคบที่ระยะห่างระหว่าง $d/a = 0.125 - 0.625$ ด้วยโปรแกรมจำลองที่ผู้วิจัยสร้างและพัฒนาขึ้น โดยทำการกำหนดค่าความถี่ตั้งแต่ 2.0 - 6.0 GHz ซึ่งจากการจำลองจะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดความกว้างของช่องแคบเพิ่มขึ้น ค่ารีแอกแตนซ์ของวงจรจะมีค่าลดลงตาม

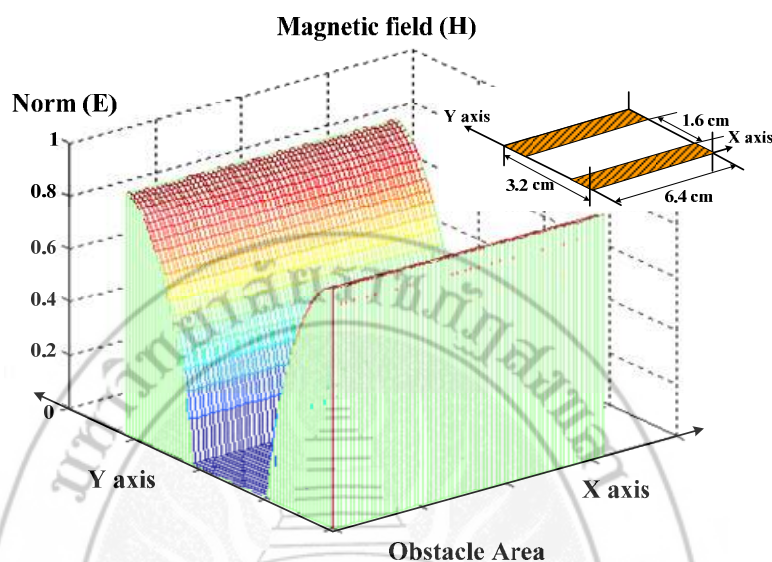


ภาพที่ 4-10 เปรียบเทียบค่ารีแอกแตนซ์โดยเพิ่มขนาดความกว้างของวงจรวงแคบตัวเก็บประจุ

ภาพที่ 4-11 ค่าของสนามไฟฟ้าบนวงจรวงแคบตัวเก็บประจุ เมื่อ $d/a = 0.5$

ภาพที่ 4-11 แสดงค่าสนามไฟฟ้าของวงจรวงแคบตัวเก็บประจุ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่ามากที่สุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นตัวนำ และบริเวณช่องว่าง และจากภาพที่ 4-12 จะเห็นว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบด้านนอกของแผ่นโลหะตัวนำทั้งสองด้าน แต่ที่ขอบรอยต่อด้านในระหว่างแผ่นตัวนำจะมีค่าสนามแม่เหล็กต่ำสุด และ

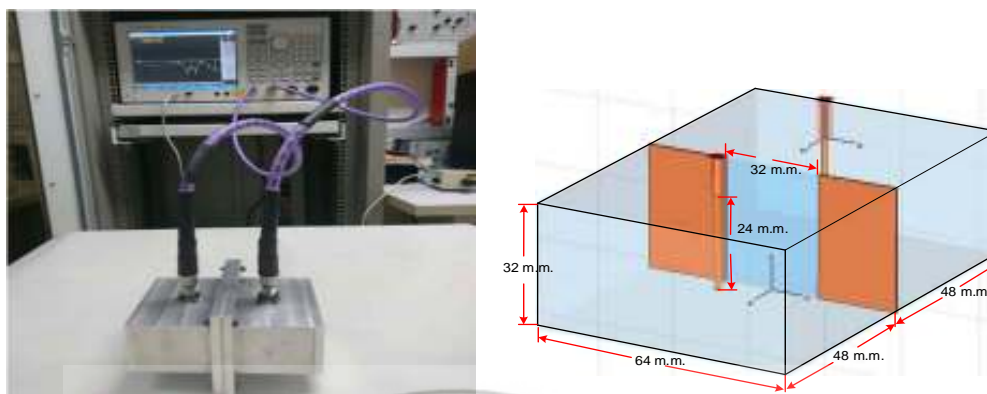
บริเวณช่องว่างของท่อนำคลื่น จะไม่ปรากฏค่าของสนามแม่เหล็กใด ๆ ทั้งสิ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



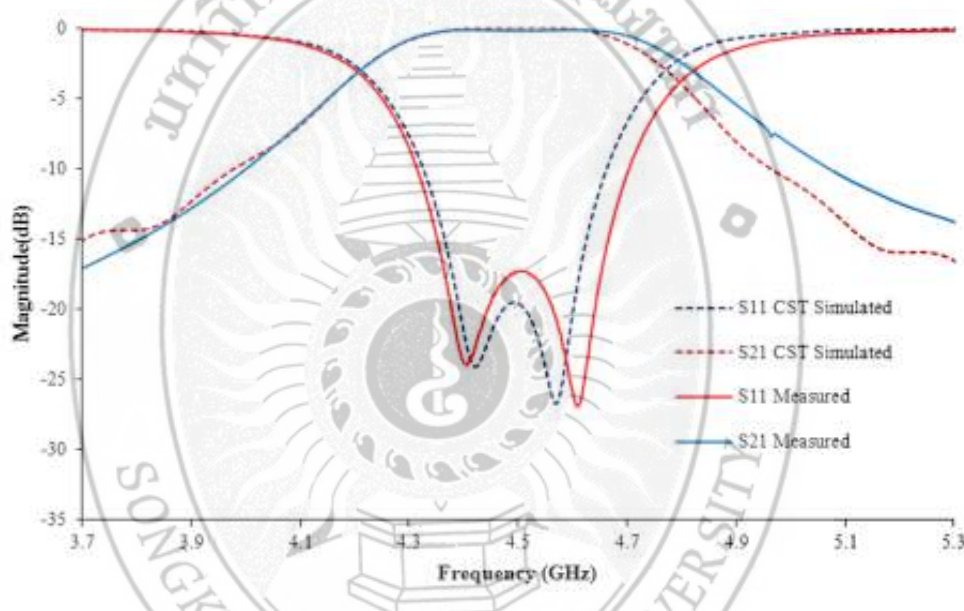
ภาพที่ 4-12 ค่าของสนามแม่เหล็กบนวงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ เมื่อ $d/a = 0.5$

4.3 ผลการสร้างและทดสอบวงจรรองความถี่โดยใช่วงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ

พารามิเตอร์ที่ทำการวัดทดสอบมี 2 พารามิเตอร์ คือ ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่าน (S_{21}) และค่าพารามิเตอร์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ด้วยวิธีการวัดทดสอบที่ใช้เครื่องวัดข่ายงานไฟฟ้า ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่าน (S_{21}) และค่าพารามิเตอร์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลอง CST Microwave Studio[®] เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงด้วยเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานไฟฟ้า วงจรรองแถบผ่านความถี่โดยใช่วงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำตัวเดียวอย่างง่ายได้วิเคราะห์และออกแบบโดยกำหนดให้มีค่าความถี่ตัดในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) เท่ากับ 2.34 GHz โดยโครงสร้างชิ้นส่วนของท่อนำคลื่นที่ทำการทดสอบจะเลือกใช้วัสดุประเภทอลูมิเนียม จากนั้นทำการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์เอส โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent Technologies รุ่น E5071C แสดงดังภาพที่ 4-31



ภาพที่ 4-13 การทดสอบวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำในท่อนำคลื่น

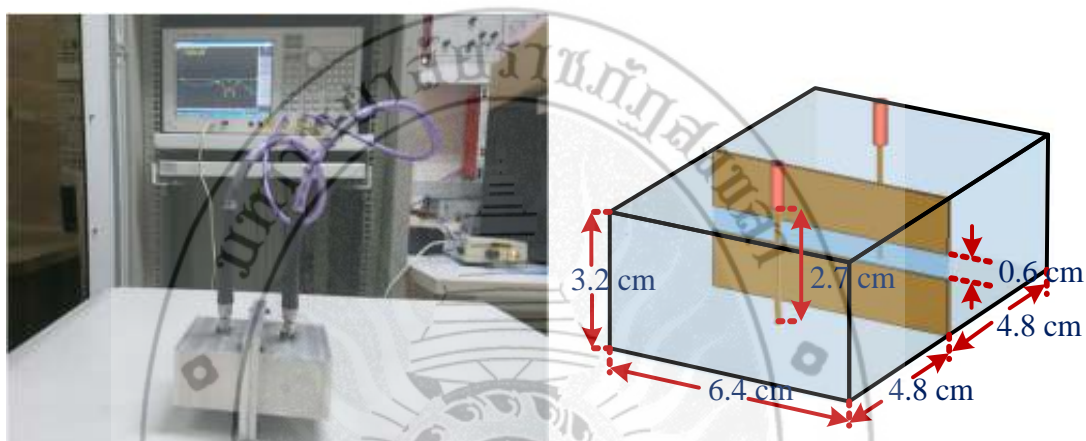


ภาพที่ 4-14 การเปรียบเทียบค่า dB(S11) และ dB(S21) โดยการทดลองวัดจริงและการจำลอง

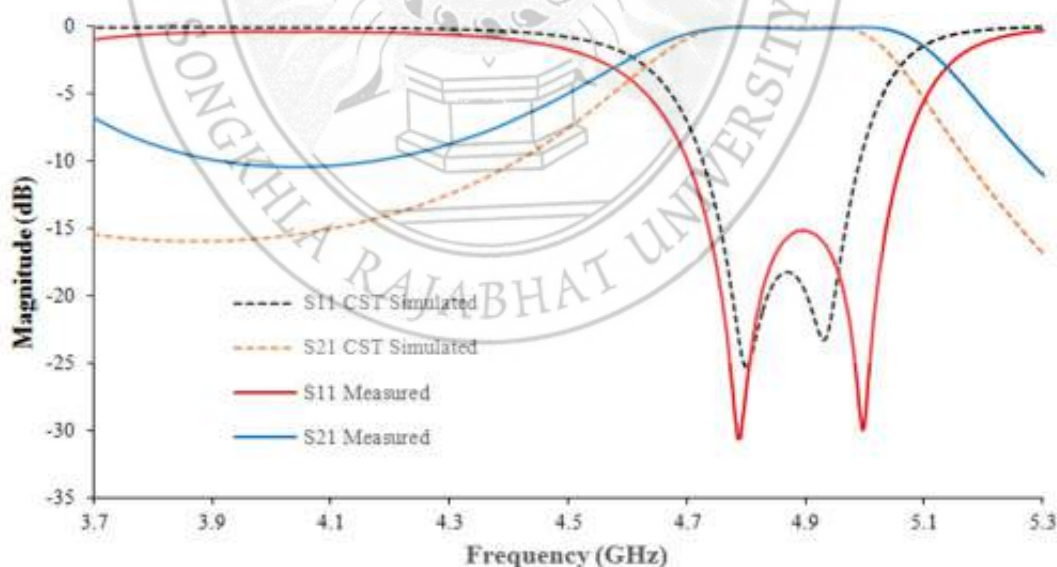
ภาพที่ 4-14 แสดงกราฟการตอบสนองทางความถี่ในช่วง 2.0 - 5.0 GHz พบว่าโครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่ออกแบบสามารถทำงานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.34 GHz ถึง 4.68 GHz ที่เป็นความถี่ตัดผ่านในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) และความถี่ในโหมดลำดับที่สอง (TE_{20}) อย่างไรก็ตามเมื่อออกแบบนำเอาวงจรช่องแคบที่มีอัตราส่วนความกว้างของช่องแคบต่อความกว้างของท่อนำคลื่น $d/a = 0.375$ มาวางในท่อนำคลื่นที่มีความยาว 9.6 เซนติเมตร ที่ส่งผลทำให้ได้ผลตอบสนองเป็นแถบผ่านความถี่ที่ความถี่ตัดด้านล่างอยู่ที่ 4.19 GHz และความถี่ตัดด้านบนเท่ากับ 8.14 GHz มีความกว้างของแบนด์วิธเท่ากับ 620 MHz ซึ่งพบว่าผลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลอง CST Microwave Studio[®] มีความสอดคล้องกันกับผลการวัดจากเครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย

4.4 ผลการสร้างและทดสอบวงจรความถี่โดยใช้วงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุ

วงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยทำการกำหนดวงจรทดสอบแบบวงจรช่องแคบชนิดตัวเก็บประจุตัวเดียวภายในโครงสร้างของท่อนำคลื่นได้วิเคราะห์และออกแบบโดยกำหนดค่าให้มีความถี่ตัดในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) เท่ากับ 2.34 GHz โดยโครงสร้างชิ้นส่วนของท่อนำคลื่นที่ทำการทดสอบจะเลือกใช้วัสดุประเภทอลูมิเนียม จากนั้นทำการทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์เอสโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent Technologies รุ่น E5071C แสดงดังภาพที่ 4-15



ภาพที่ 4-15 การทดสอบวงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุตัวเดียวในท่อนำคลื่น



ภาพที่ 4-16 การเปรียบเทียบค่า dB(S11) และ dB(S21) โดยการทดลองวัดจริงและการจำลอง

ภาพที่ 4-16 แสดงกราฟการตอบสนองทางความถี่ในช่วง 2.0 - 6.0 GHz พบว่าโครงสร้างของ วงจรช่องแคบแบบตัวเก็บประจุตัวเดียวภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่ออกแบบ สามารถ ทำงานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.34 GHz ถึง 4.68 GHz ที่เป็นความถี่ตัดผ่านในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) และความถี่ในโหมดลำดับที่สอง (TE_{20}) เมื่อออกแบบนำเอาวงจรช่องแคบแบบเรโซแนนซ์ที่มี อัตราส่วนความกว้างของช่องแคบต่อความกว้างของท่อนำคลื่น $d/a = 0.375 \times 0.375$ มาวางในท่อนำคลื่นที่มีความยาว 9.6 เซนติเมตร ที่ส่งผลทำให้ได้ผลตอบสนองเป็นแถบผ่านความถี่ที่ความถี่ตัด ด้านล่างอยู่ที่ 4.56 GHz และความถี่ตัดด้านบนเท่ากับ 5.16 GHz มีความกว้างของแบนด์วิธเท่ากับ 600 MHz ซึ่งพบว่าผลจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมจำลอง CST Microwave Studio[®] มีความ สอดคล้องกันกับผลการวัดจากเครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์หาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมไมโครเวฟนั้นเป็นเรื่องที่ยู่ยากในการใช้วิธีแบบเดิม และโปรแกรมสำเร็จรูปในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันมีขีดจำกัดในการทำงาน และมีราคาสูง จึงได้มีการคิดวิธีการวิเคราะห์ใหม่ ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของโปรแกรมให้สูงขึ้น และใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น จึงได้นำวิธีการคำนวณทางตัวเลขมาใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยนำเสนอวิธีการคำนวณที่ใช้หลักการการกระทำซ้ำของคลื่น (Wave Concept Iteration Procedure) ในโหมด TE_{10} และทำการออกแบบ วิเคราะห์ วงจรความถี่ย่านไมโครเวฟ ซึ่งวงจรมีลักษณะเป็นท่อนำคลื่นที่กั้นด้วยไอริส (Iris) แบ่งเป็น 2 แบบ คือ วงจรแบบตัวเก็บประจุ และวงจรแบบตัวเหนี่ยวนำ โปรแกรมคำนวณออกแบบโดยใช้ GUI (Graphic User Interface) ทำการประมวลผลภายใต้การทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB[®] เป็น โปรแกรมหลัก ทำให้สามารถแสดงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน 2 มิติ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรภายในท่อนำคลื่น ทำให้สะดวกในการใช้งาน ผลจากการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าค่าของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กได้ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีประมาณ ± 2.5 เปอร์เซ็นต์

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยเพื่อศึกษาและวิเคราะห์วงจรช่องแคบความถี่สูงแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ เป็นการออกแบบวงจรและส่งคลื่นที่ความถี่ไมโครเวฟ ในโหมด TE_{10} โดยเลือกใช้ความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัตออฟ จากการวิจัยพบว่า สามารถแสดงค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของวงจรได้ง่ายยิ่งขึ้น ทั้งยังทำให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบได้ จากการวิจัยสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบวงจรช่องแคบความถี่สูงได้ดังนี้

1. การส่งคลื่นที่ความถี่ใดนั้น ขึ้นอยู่กับการออกแบบขนาดของวงจร โดยความถี่ของคลื่นที่

$$\text{ส่งออกไปต้องสูงกว่าความถี่คัตออฟที่สามารถคำนวณได้จากสมการ } \frac{c}{2a}$$

2. การกำหนดอัตราส่วนของ $\frac{d}{a}$ มีผลต่อค่าตัวเหนี่ยวนำคือ เมื่อค่าอัตราส่วนของ $\frac{d}{a}$ มากขึ้น ค่าอินดักแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มมากขึ้นด้วย
3. การกำหนดอัตราส่วนของ $\frac{d}{a}$ มีผลต่อค่าตัวเก็บประจุคือ เมื่อค่าอัตราส่วนของ $\frac{d}{a}$ มากขึ้น ค่าคาปาซิแตนซ์ของตัวเก็บประจุลดลง
4. เมื่อทำการออกแบบวงจรช่องแคบ ให้มีจำนวนพิกเซลมากขึ้น จะมีผลทำให้ค่าของจำนวนโหมคมมากขึ้นด้วย การหาค่าของอิมพีแดนซ์ของวงจรช่องแคบชนิดตัวเหนี่ยวนำและวงจรช่องแคบชนิดตัวเก็บประจุ จะมีค่าที่ถูกต้อง ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี แต่การกำหนดจำนวนพิกเซลมากขึ้น จะมีผลทำให้ใช้เวลาการคำนวณมากขึ้น
5. ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรช่องแคบ ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณ ยังมีจำนวนรอบมากทำให้ค่าของคำตอบของวงจรจะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ (Convergence) และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นค่าที่ถูกต้องด้วยเช่นกัน

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการใช้งานวงจรให้สามารถใช้งานได้ง่ายโดยใช้ GUI (Graphic User Interface) ทำการประมวลผลภายใต้การทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB[®] เป็นโปรแกรมหลัก และเพื่อให้การวิเคราะห์ห้วงจรนั้นสามารถทำได้อย่างสะดวก และรวดเร็ว

5.3 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ปัญหาในการออกแบบวงจรที่แบ่งจำนวนของพิกเซลมากเกินไป ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก ทำให้ได้เมตริกซ์ซึ่งมีขนาดใหญ่ และเมื่อกำหนดจำนวนการคำนวณซ้ำ (Iteration) หลาย ๆ ครั้ง ยิ่งทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น วิธีการแก้ไขการใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการคำนวณ หรือการออกแบบเป็น 1 มิติ แทน 2 มิติ ซึ่งจะช่วยให้การคำนวณมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้หลักการของคลื่นในการกระทำซ้ำก็ยังสามารถลดเวลาในการคำนวณได้มากกว่าวิธีการคำนวณแบบโดยตรง

5.4 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอการหาค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรที่สามารถแบ่งพิกเซลได้ง่าย ดังนั้นสำหรับวงจรที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน จะทำให้การแบ่งพิกเซลของวงจรเป็นไปได้ยาก และซับซ้อนซึ่งจำเป็นต้องหาวิธีการอื่นในการออกแบบต่อไป นอกจากนั้นการคำนวณโดยวิธีนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้อีก เช่น วงจรไมโครสตริป วงจรที่สั้น

ด้วยแผ่นไอริส (Iris) หลาย ๆ ชั้น เป็นต้น สำหรับผลที่ได้จากการวิเคราะห์อาจมีความคลาดเคลื่อนจากผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองเชิงพาณิชย์ CST Microwave Studio® ด้วยสาเหตุจากการกำหนดจำนวนโหมดที่ใช้ในการคำนวณ การกำหนดโครงสร้างของวงจรที่มีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย เช่น ความหนาของวงจรช่องแคบหรือแผ่นไอริส (Iris) จึงส่งผลต่อความละเอียดในการคำนวณ นอกจากนี้การออกแบบวงจรรองความถี่ที่สมบูรณ์แบบจำเป็นต้องเพิ่มเติมรายละเอียดในการนำไปใช้ในการออกแบบ เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดของความกว้างของช่องแคบ การใช้วงจรช่องแคบแบบไม่สมมาตร การกำหนดจำนวนช่องแคบให้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้มีจำนวนโหมดมากขึ้น เป็นต้น



บรรณานุกรม

ภาษาไทย

คัทลียา บุญสนิท. การศึกษาและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรช่องแคบความถี่สูง.

วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 254 ,7.

ทวีศักดิ์ เชียรวิชัย. การศึกษาและวิเคราะห์วงจรรองความถี่ในท่อนำคลื่นโดยการวางตัวเรียงกันของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 254 ,9.

นิรันดร์ คำประเสริฐ. วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้าและวิศวกรรมไมโครเวฟ เล่มที่ 3. ศูนย์สื่อเสริม กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์บริษัท พิมพ์ดี จำกัด, 2545.

บัณฑิต วิจารณ์อารยานนท์. วิศวกรรมไมโครเวฟ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

สมศักดิ์ อรรถทิมากุล. การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบใหม่สำหรับวงจรไมโครเวฟโดยใช้หลักการของคลื่น. ประชุมวิชาการ วิศวกรรมไฟฟ้า (EECON) ครั้งที่ 25 สงขลา ,2545.

_____. โปรแกรมการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับวงจรความถี่สูงไมโครเวฟ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545.

_____. เอกสารประกอบการสอน วิชาการวิเคราะห์และออกแบบวงจรไมโครเวฟ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2551.

สมศักดิ์ อรรถทิมากุล และคมศักดิ์ หอมทอง. การวิเคราะห์รูปแบบการสูญเสียของวงจรไมโครเวฟโดยใช้การจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26, โรงแรมโกลเด้นท์แซนด์ ชะอำ เพชรบุรี ประเทศไทย, 6-7 พฤศจิกายน 2546.

ภาษาอังกฤษ

- A. Gharsallah, R. Garcia, A. Gharbi, H. Baudrand. "Wave concept iteration merges with model Fast Fourier Transformation to analyze micro-tstrip filter." Applied computed electromagnetics Society (March 2001) : 142-148.
- A. Mediavilla, A. Tazón, J.A. Pereda, M. Lázaro, I. Santamaría, "Neuronal Architecture for Waveguide Inductive Iris Bandpass Filter Optimization." IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'00) -Volume 4, 2000. : 1064-1071.
- Bandler, J. W., A. S. Mohamed, et al. "TLM-based modeling and design exploiting space mapping." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on .53(9) (2005) : 2801-2811.
- Boria, V. E. and B. Gimeno "Waveguide filters for satellites." Microwave Magazine, IEEE .8(5) (2007) : 60-70.
- Chaudhary, V. K., P. Verma, et al. "Field theory based CAD of inductive iris waveguide filter." Microwave Conference, 2001. APMC 2001. Asia-Pacific. (2001) : 318-321.
- H. Baudrand. Introduction Au Calcul De Circuits Microonde. INP ENSEEIHT, Toulouse, 1993.
- Hiraoka, T., C. P. Chen, et al. "Electric field distributions in microwave planar circuits by small coaxial probe and comparison with FDTD method." Microwave Conference, European 2005 : 348-351.
- Hirsh, I., M. Horowitz, et al. "Design of Planar Waveguides With Prescribed Mode-Profile Using Inverse Scattering Theory." Quantum Electronics, IEEE Journal of .45(9) (2009) : 1133-1141.
- Hoefler, W. J. R. "A Visual Electromagnetics Laboratory for Microwave Education Using TLM." Microwave Conference, 20th European. 1990 : 279-283.
- John R. Reitz, Frederick J. Milford and Robert W. Christy. "Foundations of Electromagnetic Theory." Addison-Wesley Publishing Company, 1993 : 1624-1628.
- Levy, R. "A New Class of Distributed Prototype Filters with Applications to Mixed Lumped/Distributed Component Design." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on .18(12) (1970) : 1064-1071.
- Marcuvitz N. Waveguide Handbook. United Kingdom : [n.p.], 1986.

- Mediavilla, A., A. Tazon, et al. "Neuronal architecture for waveguide inductive iris bandpass filter optimization." Neural Networks, IJCNN 2000, Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on, 2000 : 395-399.
- Menzel, W. "Microwave education supported by animations of wave propagation effects." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on .51(4) (2003): 1312-1317.
- M. Kaddour , A. Mami , A. Gharsallah , A. Gharbi , H. Baudrand "Analysis of Multilayer Microstrip Antennas By Using Iterative Method" Journal of Microwaves and Optoelectronics, Vol. 3, No.1. (April, 2003) : 486-492.
- Navarro, M. S., T. E. Rozzi, et al. "Propagation in a Rectangular Waveguide Periodically Loaded with Resonant Irises." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on .28(8) (1980) : 857-865.
- S. Akatimagool, D. Bajon, and H. Baudrand. "Analysis of multi-layer integrated inductors with wave concept iterative procedure (WCIP)." Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International, vol.3. (2001) : 1941-1944.
- Sallier, A., J. Bornemann, et al. "Field-Based Waveguide Filter Synthesis in the Time Domain." AEU-International Journal of Electronics and Communications .57(2) (2003) : 119-127.
- Seunghyun, S., K. Hyeong-Seok, et al. "Frequency domain analysis of microstrip filters and antennae using an adaptive frequency sampling moment method." Magnetics, IEEE Transactions on .42(4) (2006) : 607-610.
- Tarek Bdour, Noemen Ammar, Taoufik Aguilu and Henri Baudrand. "Modeling of Wave Penetration through Cylindrical Aperture using an Iterative Method Based on Transverse Wave Concept." Microwave Conference, 2007. KJMW 2007. Korea-Japan, 15-16 Nov. 2007 : 191-195.
- Torgow, E. N. and G. E. Collins "Band-Stop Filters For High-Power Applications." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on .13(5) (1965) : 508-513.
- Yanfen Z., Qingyuan W., Zheyu W. and Xiu Xiao G. "The Design of an Iris Waveguide Filters at 35.75 GHz". GSMM 2008. 22 (April 2008) : 348-350.



ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานโปรแกรมจำลองสำหรับวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น

คู่มือการใช้งานโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์และออกแบบวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น

การวิเคราะห์และออกแบบวงจรช่องแคบชนิดต่าง ๆ ภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมเป็นการวิเคราะห์วงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ, ตัวเก็บประจุ และ เรโซแนนซ์ (Resonant) ซึ่งผู้วิจัยได้สร้างและพัฒนาารูปแบบการคำนวณขึ้น สำหรับใช้จำลองการคำนวณวงจรช่องแคบลักษณะต่าง ๆ เพื่อหาลักษณะคุณสมบัติของวงจรแต่ละชนิด โดยใช้วิธีการวนรอบของคลื่น จากการออกแบบโปรแกรมจำลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักประกอบด้วย ส่วนรับข้อมูล ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผล โดยสามารถแสดงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรช่องแคบ ค่ารีแอกแตนซ์ของวงจรช่องแคบ และค่าการตอบสนองทางความถี่ของวงจรช่องแคบแต่ละชนิด

ส่วนประกอบของโปรแกรม แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

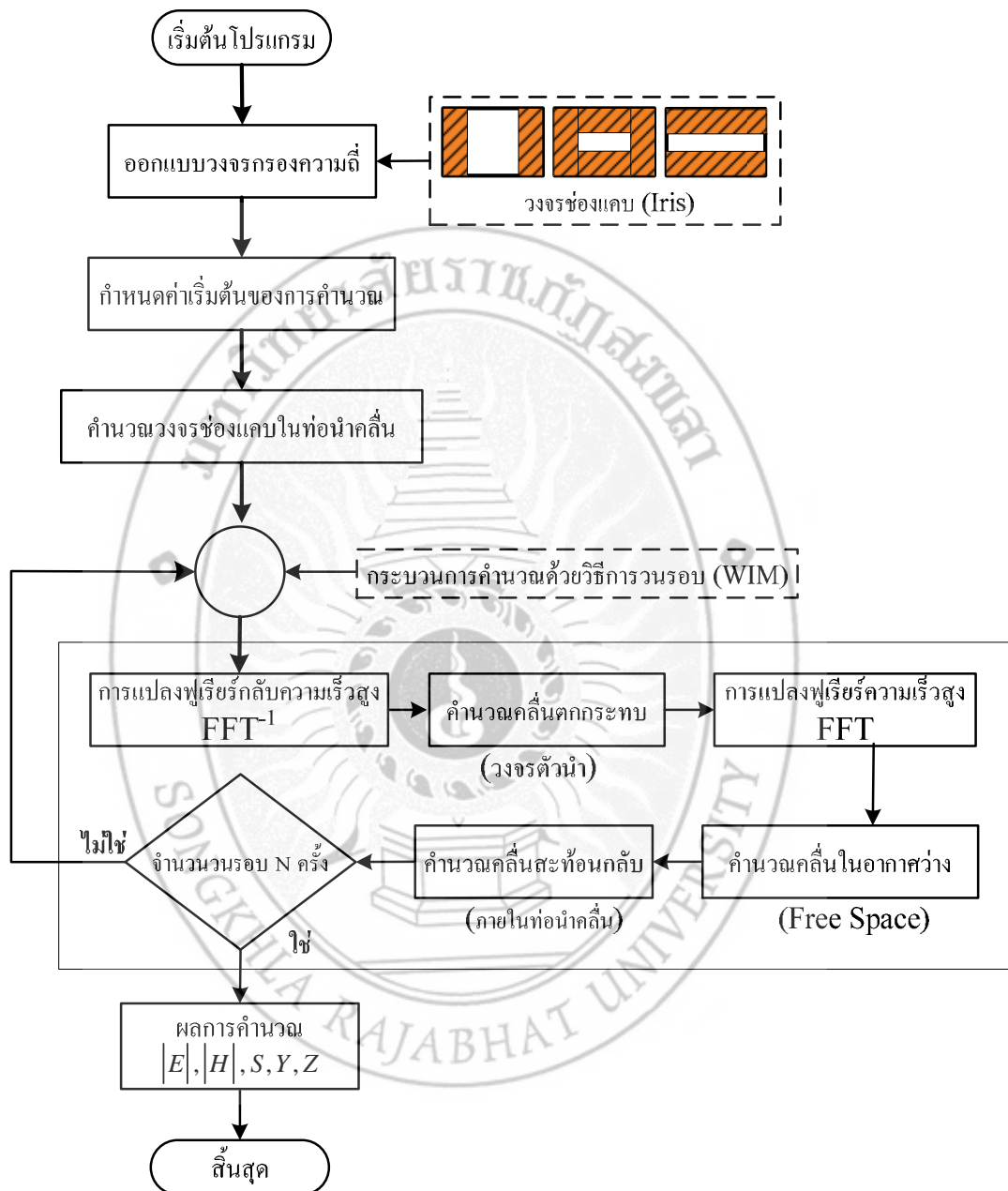
- ส่วนของหน้าต่างเมนูหลัก
- ส่วนของการกำหนดค่าการออกแบบวงจร
- ส่วนของการแสดงผล

ความสามารถของโปรแกรมออกแบบวงจรช่องแคบในท่อนำคลื่น

- วิเคราะห์และออกแบบการทำงานของวงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่นลักษณะต่าง ๆ โดยการวางตัวเรียงกันของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Iris), ตัวเก็บประจุ (Capacitive Iris), ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจูด่อนานกัน (Resonant Iris)
- แสดงค่าสนามไฟฟ้าบนวงจรตามความถี่ของการทดสอบ
- แสดงค่าสนามแม่เหล็กบนวงจรตามความถี่ของการทดสอบ
- แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ

การออกแบบโปรแกรมจำลองการคำนวณที่ทำงานภายใต้โปรแกรม MATLAB[®] ซึ่งมีลักษณะเป็นรายการให้เลือกหรือใส่ค่าลงไป เพื่อเป็นส่วนในการติดต่อระหว่างผู้ใช้งานและส่วนของการคำนวณ ซึ่งง่ายในการแสดงผล โดยทำงานภายใต้ฟังก์ชัน Graphic User Interface (GUI) ซึ่งผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าพื้นฐานการคำนวณในการออกแบบได้เอง เช่น ขนาดความสูง ความกว้างของท่อนำคลื่น โครงสร้างของแผ่นตัวนำ (Iris Structure) ช่วงความถี่ในการทำงาน และอัตราส่วนพื้นผิว

ตัวนำและขนาดช่องว่างของวงจรวงแหวน โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลอง แสดงดังภาพที่ ก-1



ภาพที่ ก-1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลอง

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลอง แสดงดังภาพที่ ก-1 มีกระบวนการทำงานตามไดอะแกรมดังนี้

1) เริ่มต้นโปรแกรมจำลองจากเมนูหลัก ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์วงจรช่องแคบที่มีโครงสร้างวางขวางในท่อนำคลื่นแบบตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุต่อขนานกันหรือเรียกว่าโครงสร้างช่องแคบแบบสี่เหลี่ยม

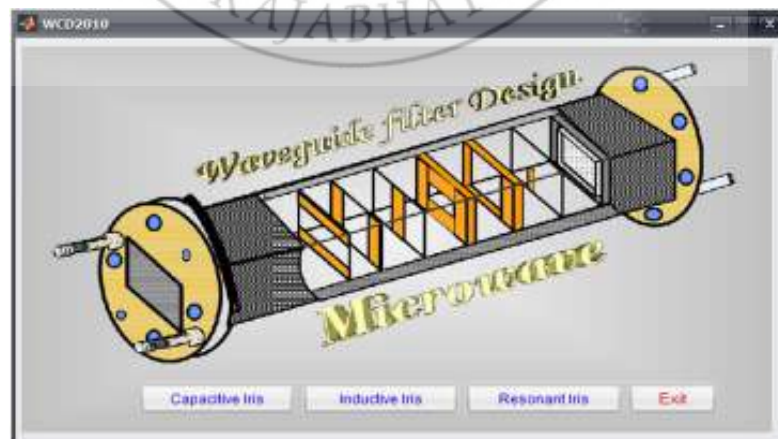
2) ออกแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่น ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดค่าพื้นฐานการคำนวณในการออกแบบได้เอง เช่น ขนาดความสูง ความกว้างของท่อนำคลื่น ช่วงความกว้างของความถี่ในการทำงาน และอัตราส่วนพื้นผิวตัวนำและขนาดช่องว่างของวงจรช่องแคบ

3) กำหนดค่าขนาดของคลื่นที่ตกกระทบในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) ของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

4) กำหนดค่าขนาดของคลื่นที่สะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่านบนพื้นผิวตัวนำในโดเมนบนพื้นที่จริง (Real domain) และภายในอากาศว่างในโดเมนทางความถี่ (Frequency domain) ในกระบวนการนี้จะปรากฏค่าของคลื่นสะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่านเป็นจำนวนมากที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นที่ของวงจรช่องแคบ ซึ่งกระบวนการคำนวณจะสิ้นสุดลงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของจำนวนการวนรอบ

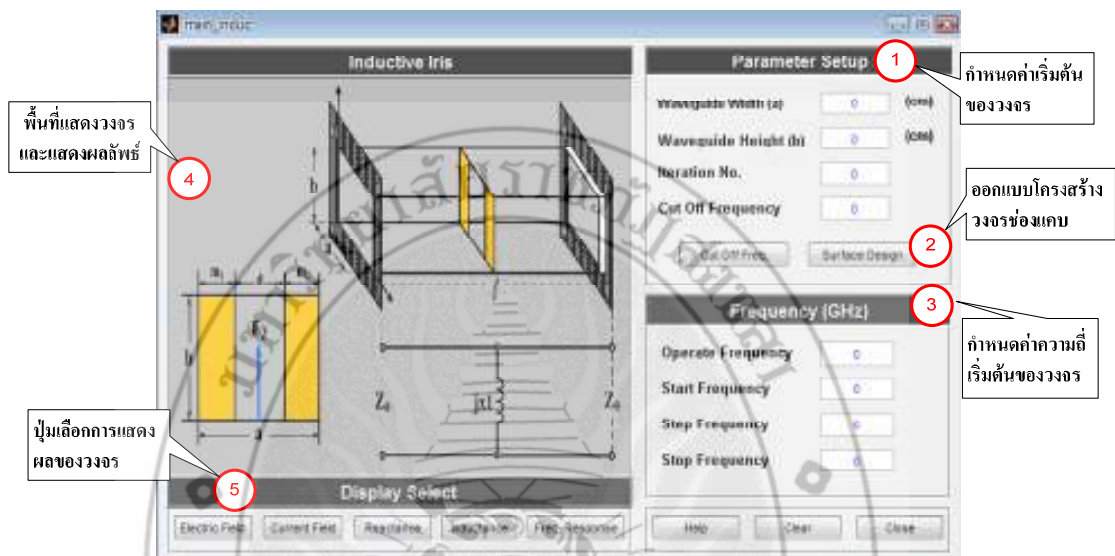
5) ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะแสดงค่าปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ปรากฏบนพื้นที่ช่องแคบ และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ

การใช้งานของโปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรช่องแคบภายในท่อนำคลื่น เมื่อผู้ใช้งานเข้ามาสู่ส่วนของการคำนวณ จะมีส่วนที่กำหนดค่าเริ่มต้นของโปรแกรมให้ผู้ใช้กำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ ของการคำนวณ และมีปุ่มให้ผู้ใช้สามารถเลือกการคำนวณและวิเคราะห์ผล และส่วนที่แสดงโครงสร้างของท่อนำคลื่นที่มีโครงสร้างของวงจรช่องแคบลักษณะต่าง ๆ เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นได้ถูกต้องและครบถ้วนแล้ว สามารถกดปุ่มที่กำหนดเพื่อแสดงกราฟการคำนวณของโปรแกรมตามที่ต้องการได้ และกราฟการคำนวณจะถูกแสดงขึ้นมาแทนที่ภาพของโครงสร้างของท่อนำคลื่น จากภาพที่ ก-2 ผู้ใช้สามารถเลือกกดปุ่ม เพื่อทำการใช้งานในส่วนของโปรแกรมที่ต้องการคำนวณได้

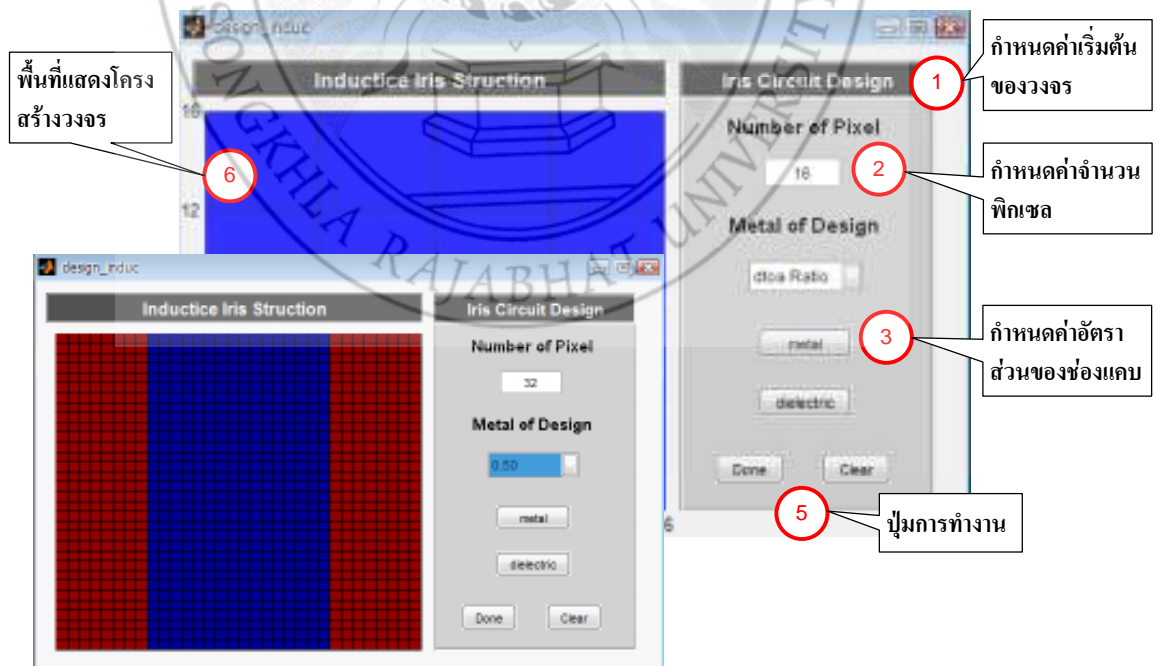


ภาพที่ ก-2 ส่วนของเมนูหลัก

- ปุ่ม Capacitive Iris เข้าสู่โปรแกรมการคำนวณ วงจรช่องแคบตัวเก็บประจุ
- ปุ่ม Inductive Iris เข้าสู่โปรแกรมการคำนวณ วงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ
- ปุ่ม Resonant Iris เข้าสู่โปรแกรมการคำนวณวงจรช่องแคบแบบเรโซแนนซ์
- ปุ่ม EXIT ออกจากโปรแกรม



ภาพที่ ก-3 การเลือกวิเคราะห์โปรแกรมการคำนวณวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ



ภาพที่ ก-4 การออกแบบโครงสร้างของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

จากรูปโปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรช่องแคบภายในท่อนำคลื่น โดยการวางตัวเรียงกันของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำแบ่งเป็น 4 ส่วนหลักๆ ดังนี้

1. Set Initial Value (กำหนดค่าเริ่มต้นของวงจร)

Waveguide Width (a)	การกำหนดค่าความกว้างของท่อนำคลื่น มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
Height (b)	การกำหนดค่าความสูงของท่อนำคลื่น มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
Length of Resonator (l)	การกำหนดค่าระยะห่างระหว่างวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วย เป็น เซนติเมตร
No. Pixels (p)	การกำหนดจำนวนของพิกเซล โดยเลือกจากค่าที่กำหนดไว้ คือ 16, 32, 64, 128 หรือ 512
Ratio of d/a	การกำหนดค่าอัตราส่วนระหว่างช่องว่างของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำกับความกว้างของท่อนำคลื่น โดยเลือกจากค่าที่กำหนดไว้ คือ 0.125, 0.25, 0.375, 0.50, 0.625 หรือ 0.75
No. Iteration	จำนวนรอบในการคำนวณซ้ำ

2. Set Frequency (กำหนดค่าความถี่เริ่มต้นของวงจร)

Cutoff Frequency	สามารถกดปุ่มเพื่อแสดงค่าความถี่คัตออฟ ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณมาจากสูตร $c/(2a)$ โดยเป็นความถี่ที่ต่ำที่สุดที่คลื่นสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในท่อนำคลื่นได้
Operate Frequency	ค่าความถี่ของท่อนำคลื่นที่ใช้งาน โดยต้องกำหนดให้มีค่ามากกว่าความถี่คัตออฟ
Start Frequency	ค่าความถี่เริ่มต้น
Step Frequency	ช่วงค่าความถี่ที่เปลี่ยนไป
Stop Frequency	ค่าความถี่สุดท้าย

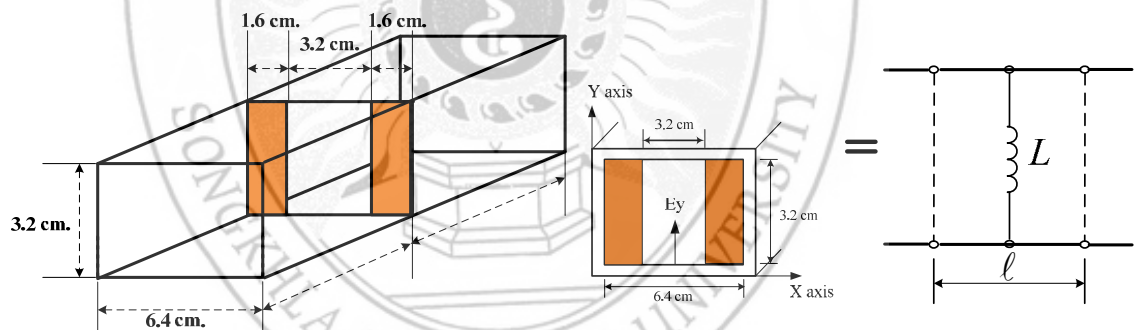
3. Display Select (ส่วนของการแสดงผล)

เป็นส่วนของการแสดงผลที่เป็น Graphic แสดงค่าสนามไฟฟ้า ความหนาแน่นของกระแส ค่ารีแอกแตนซ์ของวงจร และผลตอบสนองตามความถี่ของวงจร ตามปุ่มที่กดทางด้านขวามือ

4. Display Select (ปุ่มเลือกการแสดงผล)

ปุ่ม Electric Field	ปุ่มที่แสดงกราฟของสนามไฟฟ้าของวงจรช่องแคบ
ปุ่ม Current Field	ปุ่มที่แสดงกราฟของความหนาแน่นกระแสของวงจรช่องแคบ
ปุ่ม Reactance	ปุ่มที่แสดงกราฟของค่ารีแอกแตนซ์ของวงจรช่องแคบ
ปุ่ม Freq. Response	ปุ่มที่แสดงกราฟผลตอบสนองตามความถี่ของวงจรช่องแคบ
ปุ่ม HELP	เรียกโปรแกรมช่วยอธิบายการทำงาน และการใช้โปรแกรม
ปุ่ม EXIT	ออกจากโปรแกรม

ตัวอย่างที่ 1 การใช้งาน โปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรช่องแคบภายในท่อนำคลื่น โดยทำการกำหนดวงจรทดสอบแบบวงจรช่องแคบตัวหนึ่งขว้างภาพที่ 2-37 ความกว้างของท่อนำคลื่น (a) เท่ากับ 6.4 เซนติเมตร และความสูงของท่อนำคลื่น (b) เท่ากับ 3.2 เซนติเมตร ส่วนของวงจรช่องแคบแบบตัวหนึ่งขว้างมีขนาด 6.4 x 3.2 ตารางเซนติเมตร อัตราส่วนของ $\frac{d}{a}$ เท่ากับ 0.5 จำนวน 64 พิกเซล และจำนวนการวนรอบ 300 รอบ

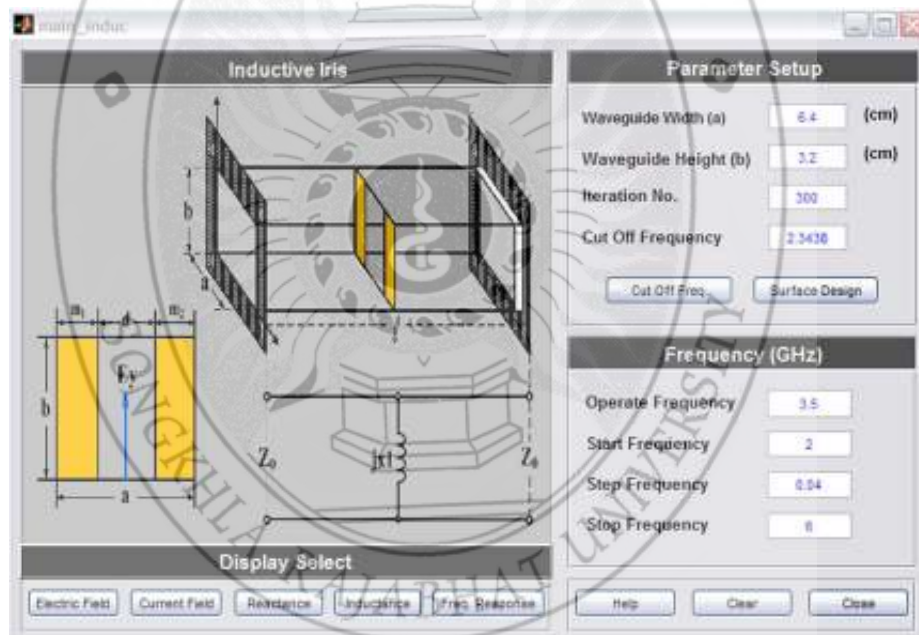


ภาพที่ ก-5 วงจรช่องแคบแบบตัวหนึ่งขว้าง

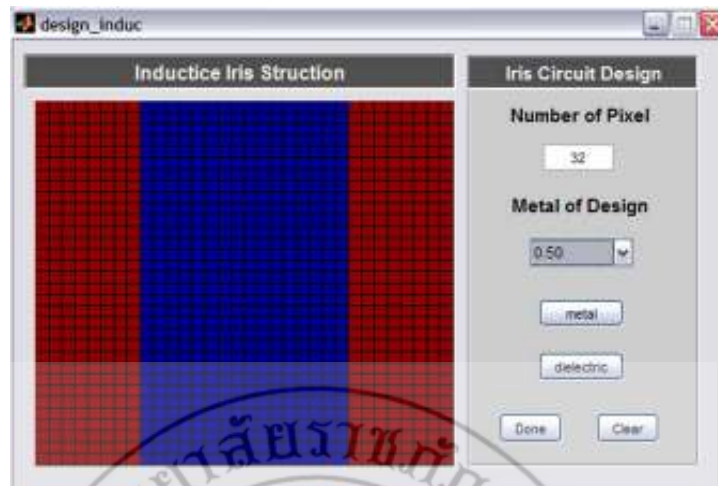
จากภาพที่ ก-5 ทำการกำหนดค่าที่โปรแกรมต้องการ โดยกำหนดค่าเริ่มต้นดังนี้

ความกว้างของท่อนำคลื่น (a)	6.4	เซนติเมตร
ความสูงของท่อนำคลื่น (b)	3.2	เซนติเมตร
ค่า Ratio of d/a	0.5	

จำนวนพิกเซล (p)	64	พิกเซล
จำนวนการคำนวณซ้ำ	300	รอบ
แสดงความถี่คัตออฟ	3.34	GHZ
ความถี่ใช้งาน	3.5	GHZ
ความถี่เริ่มต้น	2.0	GHZ
ขั้นความถี่	0.04	GHZ
ความถี่สุดท้าย	6.0	GHZ



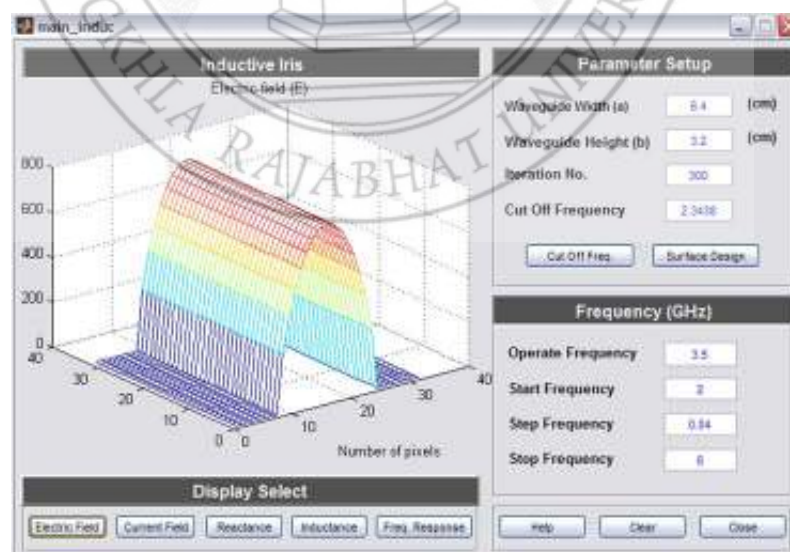
ภาพที่ ก-6 การกำหนดค่าที่ใช้ในการออกแบบวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ



ภาพที่ ก-7 โครงสร้างของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ

โครงสร้างของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่ทดสอบแสดงโดยภาพที่ ก-5 มีความกว้าง (a) เท่ากับ 6.4 เซนติเมตร และความสูง (b) เท่ากับ 3.2 เซนติเมตร โดยจะตอบสนองที่ยอมให้ความถี่ที่มีค่าสูงกว่าความถี่ตัดในโหมดพื้นฐาน (TE_{10}) ที่ 2.34GHz ผ่านไปได้ที่ระดับ -3 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.0 - 6.0 GHz แสดงการกำหนดค่าที่ใช้ในการออกแบบของโปรแกรมดังภาพที่ 1-29 และกำหนดให้ส่วนของวงจรช่องแคบมีความกว้าง (d) ต่อความกว้างท่อนำคลื่น (a) มีค่า $d/a = 0.5$ หรือ 3.2 เซนติเมตร แสดงโดยภาพที่ ก-7

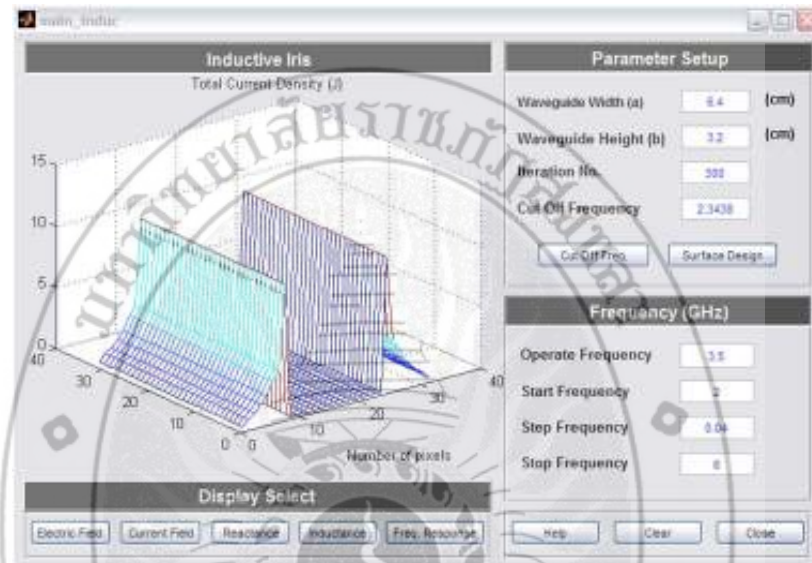
- ผลการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ



ภาพที่ ก-8 การแสดงผลของโปรแกรมการคำนวณสนามไฟฟ้าของวงจร

ในภาพที่ ก-8 แสดงค่าสนามไฟฟ้าของวงจรตัวเหนี่ยวนำ จะเห็นได้ว่าในส่วนของพื้นที่ของช่องแคบจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสนามไฟฟ้าโดยจะมีค่ามากที่สุดที่กึ่งกลางด้านกว้างของท่อนำคลื่น และจะเป็นศูนย์ที่ส่วนของโลหะ

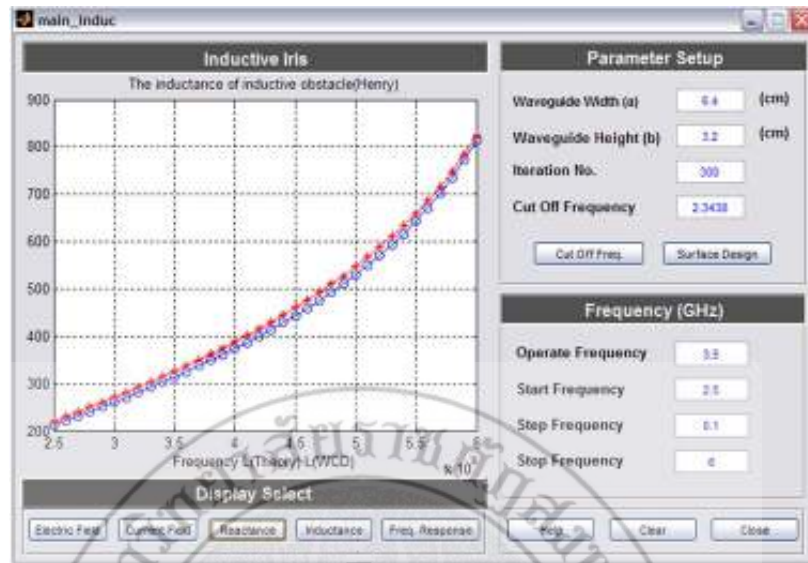
- ผลการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ



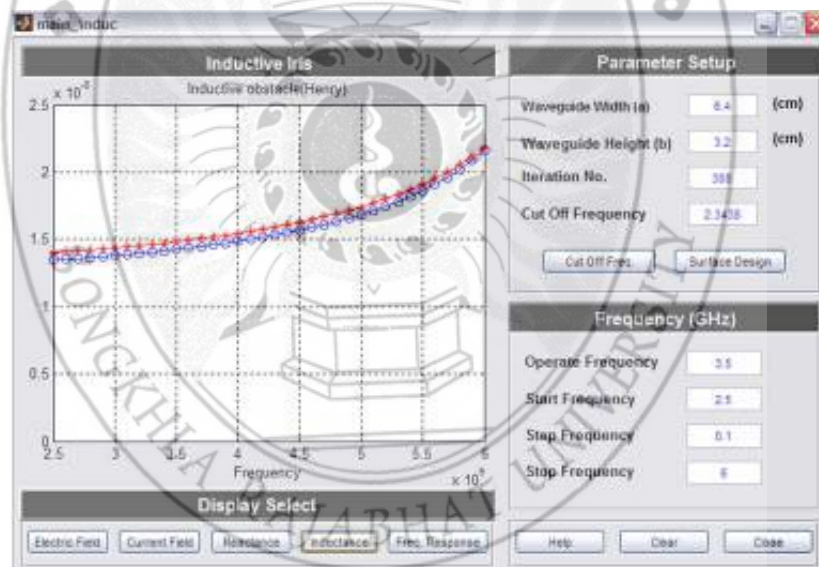
ภาพที่ ก-9 การแสดงผลของโปรแกรมการคำนวณความหนาแน่นของกระแสของวงจร

ในภาพที่ ก-9 แสดงค่าสนามแม่เหล็กของวงจรตัวเหนี่ยวนำ จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กจะปรากฏอยู่บนพื้นที่ตัวนำของวงจรช่องแคบที่แสดงค่าขนาดในรูปของความหนาแน่นของกระแส โดยบริเวณขอบของแผ่นตัวนำจะมีค่าสูงสุดและมีค่าต่ำสุดที่พ้องติดกับท่อนำคลื่น

- ผลการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอกแตนซ์และค่าอินดักแตนซ์ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำ



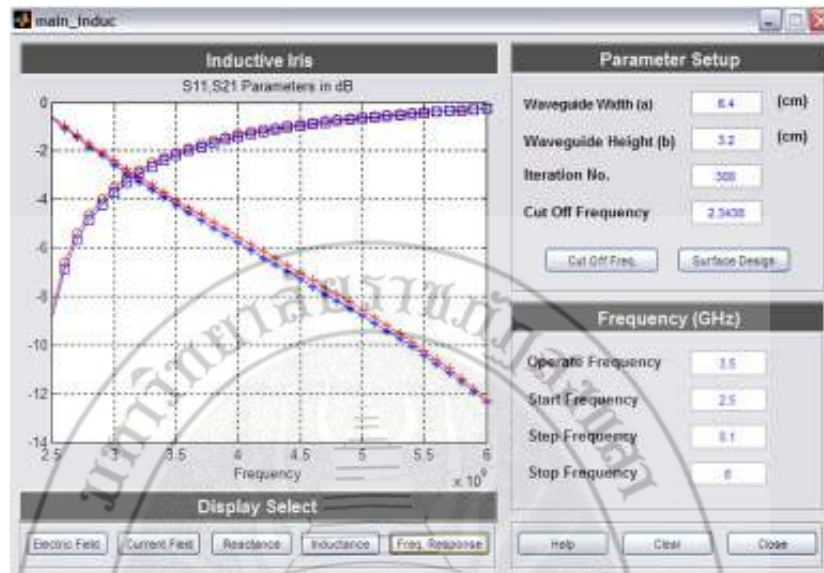
ภาพที่ ก-10 การแสดงผลของโปรแกรมการคำนวณค่ารีแอคแตนซ์ของวงจร



ภาพที่ ก-11 การแสดงผลของโปรแกรมการคำนวณค่าอินดักแตนซ์ของวงจร

ในภาพที่ ก-10 แสดงค่ารีแอคแตนซ์และภาพที่ ก-11 แสดงค่าอินดักแตนซ์ของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรช่องแคบภายในท่อนำคลื่น และทำการเปรียบเทียบค่าทางทฤษฎีที่ความถี่ตั้งแต่ 2.5-6.0 GHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ค่ารีแอคแตนซ์และค่าอินดักแตนซ์ของวงจรช่องแคบจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

- ผลตอบสนองตามความถี่ของวงจรความถี่ที่มีโครงสร้างของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ



ภาพที่ ก-12 การแสดงผลของโปรแกรมการคำนวณค่าผลตอบสนองตามความถี่ของวงจร

ในภาพที่ ก-12 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่โดยใช้โปรแกรมจำลองการออกแบบวงจรช่องแคบภายในท่อนำคลื่นของวงจรช่องแคบตัวเหนี่ยวนำที่กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างความกว้างช่องแคบ (d) ต่อความกว้างท่อนำคลื่น (a) มีค่าเท่ากับ 0.5 ที่มีลักษณะของผลตอบสนองทางไฟฟ้าเป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยจะยอมให้ความถี่ตั้งแต่ความถี่คัตออฟเป็นต้นไปผ่านไปได้ ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่คัตออฟจะถูกกำจัดไป ค่าความถี่คัตออฟของวงจรช่องแคบมีค่าเท่ากับ 3.24 GHz ที่ระดับ -3 dB ตั้งแต่ช่วงความถี่ 2.5–6.0 GHz

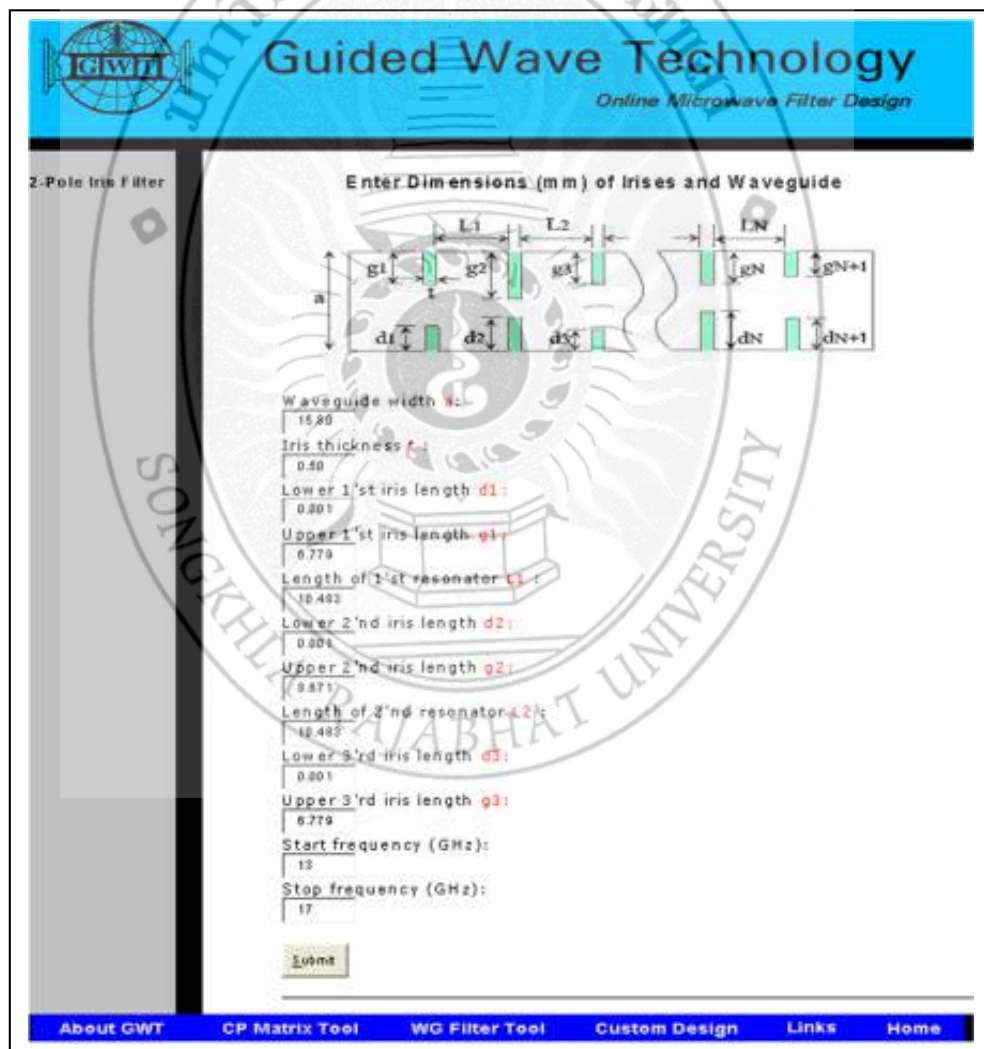


ภาคผนวก ข

การใช้งานโปรแกรมออนไลน์สำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่
ในวงจรท่อนำคลื่น (Online Microwave Filter Design: GWT)

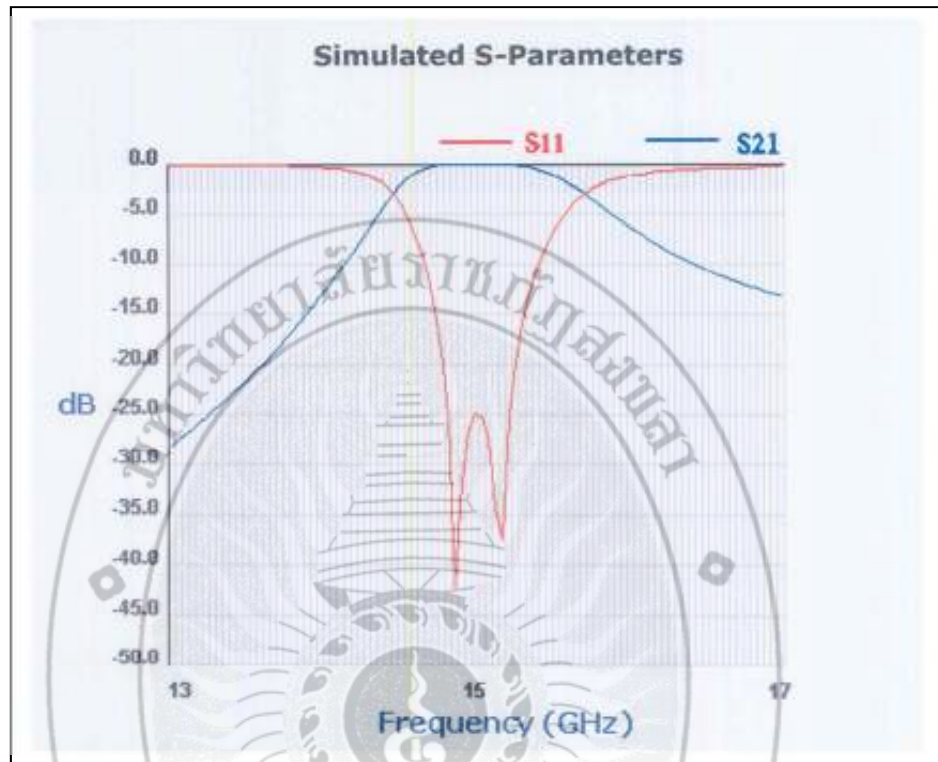
ข.1 โปรแกรมออนไลน์สำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่ในวงจรท่อนำคลื่น (Online Microwave Filter Design: GWT)

โปรแกรมนี้ถูกสร้างเพื่อใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ย่านไมโครเวฟสำหรับท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีโครงสร้างของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Iris) URL ของเว็บไซต์นี้ คือ <http://www.guidewavetech.com> ซึ่งจะวิเคราะห์และคำนวณโดยอาศัยหลักการของ Mode-Matching Method (MMM) จัดทำขึ้นโดยบริษัท Guided Wave Technology โดยบริษัทดังกล่าวเป็นบริษัทที่ออกแบบและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์สื่อสารไมโครเวฟ ได้แก่ วงจรกรองความถี่ในท่อนำคลื่น และส่วนประกอบต่างๆ ของท่อนำคลื่น



ภาพที่ ข-1 โปรแกรมจำลองการคำนวณวงจรกรองความถี่ที่มีโครงสร้างของวงจรช่องแคบแบบตัวเหนี่ยวนำ

เมื่อทำการกำหนดค่าต่าง ๆ แล้วสามารถแสดงผลตอบสนองตามความถี่ของวงจรได้โดยการกดปุ่ม Submit จะแสดงผลตอบสนองตามความถี่ของวงจร ดังภาพที่ ข-2



ภาพที่ ข-2 การแสดงผลการตอบสนองตามความถี่ของวงจรกรองความถี่ของโปรแกรม GWT

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ ชुकดี

วุฒิการศึกษา ปรัชญาคุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้าศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ตำแหน่งปัจจุบัน: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โปรแกรมวิชาอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

โทรศัพท์/โทรสาร 0-7432-4406, 0-7455-8197

E-mail: sarunskru@hotmail.com

