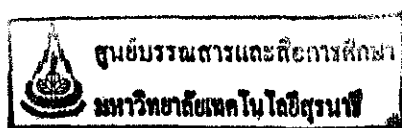


CONTRIBUTION

การศึกษาสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของ
โพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ
สำหรับสถานีส่งโทรทัศน์ ย่านความถี่ UHF

นางสาวจิตตนันท์ กุลศิริ
นางสาวพรรณนิภา จันโทศรี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2545

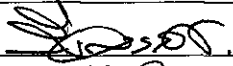
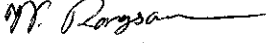
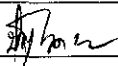


Special Project in Telecommunication Report Certification

School of Telecommunication Engineering

Suranaree University of Technology

Project Title The Study on an Axial Slot on the Sectoral Cylindrical Cavity for the UHF TV Broadcasting Station
Student Miss Jittanan Kulsiri No.B4204008
Miss Phannipha Junthosri No.B4200932
Degree Bachelor in Engineering
Programme Telecommunication Engineering
Project Advisor Mr.Rangsan Wongsan

Examiners	Sinatures
Dr.Rangsan Tongta	
Mr.Rangsan Wongsan	
Miss Priyaphorn Krachodnok	

Date 28 May 2003 Time 16.00-17.30 p.m.

Place Telecommunication Laboratory

หัวข้อโครงการ	การศึกษาสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของ โพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับ สถานีส่งโทรทัศน์ ย่านความถี่ UHF
นักศึกษา	นางสาวพรรณนิภา จันโทศรี รหัส B4200932 นางสาวจิตตนันท์ กุลศิริ รหัส B4204008
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
พ.ศ.	2545
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	อ.รังสรรค์ วงศ์สวรรค์

บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ ทดสอบและประเมินคุณสมบัติของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบสำหรับสถานีส่งโทรทัศน์ ย่านความถี่ UHF ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโพรงประกอบด้วยผนังทรงกระบอก 2 ชั้น ที่มีรัศมีต่างกัน โดยด้านบนและด้านล่างเป็นแผ่นตัวนำผนังทั้งหมดถือว่าเป็นตัวนำที่สมบูรณ์แบบ ไม่มีความหนา มีลักษณะเป็นเซกเตอร์ของทรงกระบอกที่มีแกน z เป็นแกนร่วม ตำแหน่งของช่องเปิดบนโพรงถูกตัด ณ ผนังผิวภายนอกของโพรงทรงกระบอก โดยศูนย์กลางของช่องเปิดจะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของชิ้นส่วนเพื่อให้ได้แบบรูปสมมาตรในแนวตั้ง ส่วนการป้อนสัญญาณให้โพรงทำได้โดยโพรบที่มีจุดกระตุ้นอยู่ตำแหน่งศูนย์กลางของพื้นผิวตัวนำรัศมีชั้นใน การวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันของสายอากาศทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงโมเมนต์โดยการใช้โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (NEC 2) และทำการคำนวณอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยจำลองสายอากาศต้นแบบขึ้นมา เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงการสื่อสารภายใต้สภาพแวดล้อมการใช้งานจริงในระบบการสื่อสาร ณ ความถี่ปฏิบัติการ 806 MHz และทำการทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลการคำนวณ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการคำนวณ จากผลการคำนวณและผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่นำเสนอในโครงการนี้ มีคุณสมบัติเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งาน โดยมีอัตราขยายสูงถึง 5.03 dB และมีความกว้างแถบของสายอากาศอยู่ที่ประมาณ 2.25% ของความถี่ใช้งาน หรือเท่ากับ 18.135 MHz

กิตติกรรมประกาศ

คุณความดีอันใดที่เกิดจากโครงการฉบับนี้ ขอมอบแต่บิดาและมารดาของข้าพเจ้า ผู้ที่คอยห่วงใย ให้โอกาส ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด

โครงการเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา อ.รังสรรค์ วงศ์สวรรค์ ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิดเริ่มแรกของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้แนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ซึ่งแนะนำพร่องที่ข้าพเจ้ามองข้าม ตลอดจนฝึกฝนและสนับสนุนข้าพเจ้าให้มีความสามารถในการทำโครงการจนสามารถนำเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ดังนี้

บุคลากรอาคารเครื่องมือ 1 ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตัดชิ้นงานบางส่วนให้ด้วยความเต็มใจ คุณเลอเกียรติ งามรัตนดริย ที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านด้วยดีมาโดยตลอด ไม่ว่าจะความอนุเคราะห์เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการทำโครงการ ช่วยเหลือด้านโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 และ Microsoft Visio รวมถึงการทดสอบสายอากาศต้นแบบ คุณเด่น กากแก้ว และคุณศิริภรณ์ ศิริภากรชัย ที่เอื้อเฟื้อรถจักรยานยนต์ใช้ในการเดินทาง คุณรักศักดิ์ เกื้อเพชรแก้ว ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์หน่วยความจำสำรอง (Random Access Memory, RAM) เพื่อความสะดวกในการคำนวณของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 เจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยประจำอาคารเครื่องมือ 3 ที่อำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาที่ทำโครงการ และท้ายที่สุดเพื่อนนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่เป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

นางสาวจิตตนันท์ กุลศิริ

นางสาวพรรณนิภา จันทศิริ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ.....	4
2.1 วิธีโมเมนต์.....	4
2.2 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2	6
2.3 การจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2.....	7
2.4 การใช้งานโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2.....	10
2.5 สรุป	18
บทที่ 3 สายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วมที่ ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ.....	19
3.1 โครงสร้างของสายอากาศ.....	19
3.2 การจำลองโครงสร้างของสายอากาศ	20
3.3 การวิเคราะห์ผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2.....	22
3.4 สรุป.....	32
บทที่ 4 ผลจากการทดสอบสายอากาศ.....	33
4.1 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	33
4.2 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ.....	35
4.3 แบบรูปการแผ่พลังงาน.....	37
4.4 ความกว้างแถบของสายอากาศ.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 อัตรายาย.....	41
4.6 สรุป.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	43
บรรณานุกรม.....	45
ประวัติผู้เขียน.....	46

สารบัญตาราง

	หน้า
4.1 แสดงขนาดพารามิเตอร์อ้างอิงของสายอากาศ.....	33

สารบัญรูป

	หน้า
2.1 หน้าจอโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2.....	10
2.2 หน้าจอการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศ.....	12
2.3 หน้าจอแสดงค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศ.....	12
2.4 พิกัดสนามการแผ่พลังงาน.....	16
3.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรง รูปทรงกระบอกแกนร่วม ที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรง.....	19
3.2 โครงสร้างจำลองที่สร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 2.....	21
3.3 อิมพีแดนซ์คูลักษณะ เมื่อ $z_d = 2\lambda$ และ 4λ	23
3.4 อิมพีแดนซ์คูลักษณะ เมื่อ $\phi = 7.5^\circ, 15.0^\circ$ และ 22.5°	25
3.5 อิมพีแดนซ์คูลักษณะ เมื่อ $l_s = 0.4\lambda, 0.5\lambda$ และ 0.6λ	28
3.6 อิมพีแดนซ์คูลักษณะ เมื่อ $l_f = 0.125\lambda, 0.25\lambda$ และ 0.375λ	30
4.1 ภาพถ่ายสายอากาศต้นแบบ.....	34
4.2 การวัดค่าอิมพีแดนซ์คูลักษณะ.....	35
4.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลจากการคำนวณกับการวัด.....	36
4.4 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xz	38
4.5 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xy	38
4.6 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xz ระหว่างผลที่ได้จากการวัดและจากการ คำนวณ.....	39
4.7 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xy ระหว่างผลที่ได้จากการวัดและจากการ คำนวณ.....	40
4.8 อัตราขยายสายอากาศทดสอบ.....	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันนี้การใช้งานคลื่นความถี่สูงมาก (Very High Frequency, VHF) ซึ่งมีช่วงความถี่ตั้งแต่ 30-300 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) เป็นช่วงความถี่ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาใช้งานแพร่สัญญาณภาพและเสียงของสถานีส่งโทรทัศน์ช่องต่างๆ ในประเทศไทย จนกระทั่ง ในบางพื้นที่การใช้ช่องสัญญาณในย่านความถี่ดังกล่าวถูกใช้จนหมดสิ้น ไม่เหลือช่องสัญญาณเพื่อแพร่สัญญาณภาพและเสียงสำหรับสถานีใหม่ๆ ได้อีก ดังนั้นจึงต้องขยายไปใช้งานในย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency, UHF) ที่มีช่วงความถี่ตั้งแต่ 300-3000 MHz แทน ส่งผลให้ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแพร่สัญญาณความถี่ภาพและเสียง ต้องเปลี่ยนไปเพื่อให้สอดคล้องและสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด อุปกรณ์ดังกล่าวก็คือ สายอากาศ (Antenna) นั่นเอง

สำหรับโครงการฉบับนี้ได้เน้นการวิเคราะห์สายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ เนื่องจาก สายอากาศแบบช่องเปิดบนตัวนำได้รับความสนใจและมีการศึกษากันอย่างแพร่หลายและต่อเนื่องมานานเริ่มตั้งแต่ช่วงปี 1940 จนกระทั่งปัจจุบัน และจากลักษณะทางกายภาพของสายอากาศแบบช่องเปิดที่มีความโดดเด่นหลายประการ นั่นคือ ทนกำลังงานสูง มีน้ำหนักเบา โครงสร้างกะทัดรัด สร้างได้ง่าย และสายอากาศแบบช่องเปิดนี้เมื่อติดตั้งแล้วสายอากาศจะมีลักษณะราบเรียบไปกับพื้นผิว โดยไม่มีส่วนที่โผล่ยื่นออกมา ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ ที่ต้องการความเรียบ ไม่ต้านลม อีกทั้งยังสามารถจัดเรียงเป็นสายอากาศแบบช่องเปิดแถวลำดับให้เหมาะสมเพื่อปรับปรุงอัตราขยายกำลังงาน สภาพเจาะจงทิศทาง และแบบรูปการแผ่พลังงานได้อีกด้วย

ในระบบสถานีส่งโทรทัศน์ต้องการสายอากาศที่ให้อัตราขยายกำลังงานสูง แบบรูปการแผ่พลังงานอาจเป็นสายอากาศเซกเตอร์หรือสายอากาศรอบทิศทาง และความกว้างแถบ (Bandwidth) ที่กว้างเพียงพอ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กล่าวมานี้ทำให้สายอากาศที่ใช้อยู่หลายๆ แบบมีข้อจำกัด จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาสายอากาศให้เข้ากับความต้องการดังกล่าว นอกจากนั้นสายอากาศจะต้องมีคุณสมบัติทางกลที่แข็งแรง ทนกำลังได้สูง ประกอบง่าย และที่สำคัญต้องมีต้นทุนต่ำ ดังนั้นด้วยลักษณะโครงสร้างสายอากาศแบบช่องเปิดแถวลำดับในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบสามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม ในส่วนของการป้อนสัญญาณจะใช้โพรบซึ่งมีข้อดีคือ ไม่ต้องการระบบป้อนสัญญาณที่ซับซ้อนและสามารถทนกำลังได้สูง หากนำแต่ละเซกเตอร์มา

ประกอบเป็นทรงกระบอกเต็มใบสามารถใช้ตัวแบ่งกำลังงานส่งผ่านให้โพรบในแต่ละจุดป้อนสัญญาณ จะเห็นว่าสามารถทำได้อย่างสะดวกและง่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วม สำหรับสถานีส่งโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) อิมพีแดนซ์ต้านเข้า (Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing-Wave Ratio, VSWR) และ อัตราขยาย (Gain)

1.2.2 ศึกษาสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วม สำหรับสถานีส่งโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF

1.2.3 ศึกษาการทำงานและการใช้งานของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetics Code 2: NEC2) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศต้นแบบที่ใช้สำหรับสถานีส่งโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF

1.2.4 เพื่อพัฒนาคุณภาพและประสิทธิภาพของสายอากาศต้นแบบให้มีความเหมาะสมกับย่านความถี่ UHF

1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการฉบับนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบซึ่งมีโครงสร้างที่ง่าย แข็งแรง ทนกำลังได้สูง เป้าหมายการประยุกต์ใช้งานเพื่อเป็นสายอากาศสำหรับสถานีส่งโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF สายอากาศที่นำเสนอมีลักษณะเป็นช่องเปิดในแนวแกนบนผิวตัวนำด้านนอกของเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วม โดยที่โพรบจะทำหน้าที่ป้อนสัญญาณภายในโพรง การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศทำได้โดยเริ่มจาก

1.3.1 เพื่อความสะดวกในการสร้างสายอากาศต้นแบบให้มีขนาดเล็ก จึงเลือกวิเคราะห์ที่ความถี่ 806 MHz ซึ่งความถี่ดังกล่าวเป็นความถี่ที่สูงสุดที่มีช่องสัญญาณรองรับและใช้งานจริง ในย่าน UHF

1.3.2 ศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วม ที่ความถี่ 806 MHz ได้แก่ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน อิมพีแดนซ์ต้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และ อัตราขยาย โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 ในการวิเคราะห์

1.3.3 สร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1.4.1 ศึกษาพารามิเตอร์ที่จำเป็นของสายอากาศ

1.4.2 ศึกษาการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับโครงการของโปรแกรมสำเร็จรูปคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

1.4.3 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

1.4.4 สร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

1.4.5 สรุปผลการทำงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ

ในอดีตต้องใช้ความพยายามอย่างมากในการที่จะลดรูปของระบบสมการที่มีความยุ่งยากให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการหาคำตอบของสมการนั้นๆ ในปัจจุบันเพื่อแบ่งเบาภาระของกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้มีการนำคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงมาใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ ทำให้สามารถคำนวณระบบที่มีความซับซ้อนได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความซ้ำซากที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยมืออีกด้วย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศไดเวอร์ซิตีเชิงการโพลาไรซ์ ซึ่งโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetics Code 2: NEC2) จะวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ โดยใช้หลักการของวิธีเชิงโมเมนต์ (Method of Moments : MoM)

2.1 วิธีโมเมนต์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อแก้สมการเชิงเส้นโดยใช้วิธีโมเมนต์ [1] พิจารณาสมการต่อไปนี้

$$L(f) = g \quad (2.1)$$

เมื่อ L คือ ตัวดำเนินการเชิงเส้น (Linear Operator)

g คือ ฟังก์ชันกระตุ้นหรือแหล่งกำเนิด (Excitation Function or Source) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่รู้ค่า

f คือ ผลตอบสนอง (Response) หรือ สนาม (Field) ซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่รู้ค่าที่ต้องการหา

ให้ f ซึ่งแสดงด้วยอนุกรมของฟังก์ชัน $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ ในโดเมนของ L นั่นคือ

$$f = \sum_n \alpha_n f_n \quad ; n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2)$$

โดยที่ α_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ที่ไม่ทราบค่า (Unknown Coefficient)

f_n คือ ฟังก์ชันการแผ่ขยาย (Expansion Function) หรือ ฟังก์ชันฐาน (Basis Function)

ในสมการ (2.2) สำหรับผลเฉลยเที่ยงตรง (Exact Solution) จะได้จากผลรวมของอนุกรมจำนวนอนันต์เทอม โดยทั่วไปจำนวนเทอมของอนุกรมจะเป็นจำนวนจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้นและผลรวมที่ได้เราจะเรียกว่าผลเฉลยประมาณ (Approximate Solution) โดยการแทนสมการ (2.2) ลงในสมการ (2.1) และใช้ความเป็นเชิงเส้นของ L จะได้ว่า

$$\sum_n \alpha_n L(f_n) = g \quad (2.3)$$

โดยที่การคูณภายใน (Inner Product) ที่เหมาะสมกับเงื่อนไขของปัญหา $\langle f, g \rangle$ มีค่าจริง เรานิยามฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (Weighting Function) หรือ ฟังก์ชันทดสอบ (Testing Function) $w_1, w_2, w_3, \dots, w_m$ ซึ่งอยู่ในช่วงของ L และคูณภายในของสมการ (2.3) ด้วยแต่ละ w_m แสดงได้ดังนี้

$$\sum_n \alpha_n \langle w_m, Lf_n \rangle = \langle w_m, g \rangle \quad (2.4)$$

ซึ่ง $m = 1, 2, 3, \dots$ และชุดของสมการเหล่านี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$[l_{mn}][\alpha_n] = [g_m] \quad (2.5)$$

โดยที่

$$[l_{mn}] = \begin{bmatrix} \langle w_1, Lf_1 \rangle & \langle w_1, Lf_2 \rangle & \dots \\ \langle w_2, Lf_1 \rangle & \langle w_2, Lf_2 \rangle & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$[\alpha_n] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad [g_m] = \begin{bmatrix} \langle w_1, g \rangle \\ \langle w_2, g \rangle \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

ถ้าเมตริกซ์ $[l_{mn}]$ ไม่เป็นเมตริกซ์เอกฐาน จะได้เมตริกซ์ผกผัน $[l_{mn}]^{-1}$ ดังนี้

$$[\alpha_n] = [l_{mn}]^{-1} [g_m] \quad (2.8)$$

และผลเฉลยสำหรับ f จะมีค่าตามสมการ (2.2) ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบที่กะทัดรัดเข้าใจง่าย โดยจะนิยามเมตริกซ์ของฟังก์ชัน

$$[f'] = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ \dots] \quad (2.9)$$

และจะได้ว่า

$$f = [f'_n][\alpha_n] = [f'_n][l_{mn}]^{-1}[g_m] \quad (2.10)$$

วิธีการลดรูปสมการเชิงเส้นที่ซับซ้อนมาเป็นสมการเมตริกซ์และการทำเมตริกซ์ผกผันเพื่อหาผลเฉลยจะเหมาะสมอย่างยิ่งกับการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือ และยิ่งกว่านั้นเมตริกซ์ผกผันนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบได้อีกด้วย นั่นคือเราสามารถหาทุกอย่าง ผลตอบสนองที่เกิดจากการกระตุ้นแบบใด ๆ ได้ โดยใช้เมตริกซ์ผกผันเดิมซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแทนของระบบนั้น

ถ้าเมตริกซ์ $[I]$ มีขนาดอนันต์ ดังนั้นเมตริกซ์ผกผัน $[I]^{-1}$ จะมีค่าได้ในบางกรณีเท่านั้น เช่น เมตริกซ์นั้นเป็นเมตริกซ์ทแยง (Diagonal Matrix) ในกรณีทั่วไปที่ชุดของ f_n และ w_m มีค่าจำกัดทำให้เมตริกซ์ $[I]$ มีขนาดจำกัดด้วย ดังนั้นสามารถหาเมตริกซ์ผกผัน $[I]^{-1}$ ได้ด้วยรูปแบบเชิงตัวเลขทั่ว ๆ ไปได้ ผลเฉลยที่ได้นี้จะมีความถูกต้องแม่นยำอย่างไรนั้น ปัจจัยหนึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการเลือก f_n และ w_m ให้เหมาะสม

2.2 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC2 เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอเรนซ์ลิเวอร์มอร์ (Lawrence Livermore National Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา และเป็นโปรแกรมประเภทฟรีแวร์ ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดมาใช้ได้โดยง่ายจาก <http://www.qsl.net/wb6tpu/swindex.html> การจะสั่งให้โปรแกรมทำงานนั้น ผู้ใช้จะต้องจัดเรียงรหัสทางคอมพิวเตอร์ (User-Oriented Computer Code) ให้กับโปรแกรม เพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้า ของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใดๆ ที่มีรูปทรงไม่เจาะจง รหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้จะต้องใส่เข้าไปนั้น คือการสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดเล็กๆ (Wire) หรือพื้นผิว (Surface) จำนวนมาก ซึ่งในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation: EFIE) ในการหากระแสเหนี่ยวนำ (Induced Current) บนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด หรือ สนามที่ตกกระทบ (Incident Field) และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Integral Equation: MFIE) ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ้นสามารถที่จะเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป (Applied Voltage Source) หรือ คลื่นระนาบที่ตกกระทบ (Incident Plane Wave) NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กระยะใกล้และไกล ภาคตัดขวางเป้าเรดาร์ (Radar Cross Section: RCS) อิมพีแดนซ์ แอดมิตแตนซ์ (Admittance) อัตราขยาย

และสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) การใช้กำลังงาน (Power Budget) และการต่อเชื่อมร่วมระหว่างสายอากาศ (Mutual Coupling)

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในโครงการฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศ โดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก ดังนั้น สมการที่ใช้จึงเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้านี้เหมาะที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นผิวที่มีความหนาไม่มาก และไม่มีลักษณะเป็นตัวนำปิดทึบ ได้ดีกว่าการใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก

2.3 การจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

สำหรับการจำลองโครงสร้างด้วยเส้นลวดนั้น อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยรหัส NEC2 คือ เซกเมนต์ที่มีลักษณะตรงและสั้น การกำหนดเซกเมนต์สำหรับการออกแบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ จำนวนของเซกเมนต์ควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะต้องการสำหรับความถูกต้อง เพราะโปรแกรมจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเซกเมนต์เพิ่มขึ้น

เซกเมนต์เส้นลวดจะถูกกำหนดโดยระบบพิกัด (Co-Ordinate) ของจุดปลายทั้งสองของเซกเมนต์ และขนาดของรัศมี การกำหนดความยาวเซกเมนต์ (Segment Length: Δ) จะสัมพันธ์กับค่าของความยาวคลื่น λ โดยปกติ Δ ควรมีค่าน้อยกว่า 0.1λ ที่ความถี่ที่ต้องการ ในบางครั้งอาจมีการใช้เซกเมนต์ที่ความยาวมากกว่านี้บนเส้นลวดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ในขณะที่เซกเมนต์ที่สั้นกว่า เช่น 0.05λ หรือน้อยกว่านี้ อาจจะต้องใช้ในการจำลองบริเวณที่มีความสำคัญของสายอากาศ ขนาดของเซกเมนต์จะเป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนแบบจำลอง เนื่องจากกระแสจะถูกคำนวณที่ตรงกลางของแต่ละเซกเมนต์ เซกเมนต์ที่มีขนาดสั้นมาก ๆ เช่น น้อยกว่า $10^{-3}\lambda$ ไม่ควรนำมาใช้ เพราะความเหมือนกันขององค์ประกอบค่าคงที่และโคไซน์ของการกระจายของกระแสจะทำให้ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไม่แม่นยำ

รัศมีของเส้นลวด (Wire Radius: a) ซึ่งสัมพันธ์กับ λ จะถูกจำกัดโดยการประมาณที่ใช้ในเคอร์เนล (Kernel) ของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งมีการประมาณ 2 แบบ ด้วยกันที่ใช้ใน NEC2 คือ เคอร์เนลแบบเส้นลวดบาง และเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง สำหรับเคอร์เนลแบบเส้นลวดบางนั้น กระแสบนพื้นผิวของแต่ละเซกเมนต์จะถูกลดกลายเป็นเส้นลวดนำไฟฟ้าเล็กๆ ของกระแสบนแกนเซกเมนต์ ส่วนในเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง กระแสจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบพื้นผิวของเซกเมนต์นั้น

การกระจายกระแสที่ใช้ใน NEC2 จะบังคับเงื่อนไขกระแสและความหนาแน่นประจุตามแนวเส้นลวด ที่จุดเชื่อมต่อและที่ปลายเส้นลวด จากเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้เซกเมนต์จะต้องต่อกันทางไฟฟ้าที่จุดปลาย ถ้าเซกเมนต์มีการซ้อนทับกันเกิดขึ้นที่ปลายของแต่ละอัน NEC2 จะไม่ยอมให้กระแสไหลจากเซกเมนต์หนึ่งไปยังเซกเมนต์อื่น ๆ เซกเมนต์จะเหมือนกับต่อกันเมื่อ

ระยะห่างของจุดปลายของแต่ละด้านมีค่าน้อยกว่า 10^{-3} เท่าของความยาวเซกเมนต์ที่สั้นที่สุด ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้ควรเชื่อมต่อเซกเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดระบบพิกัดที่เหมือนกัน

ข้อจำกัดของการจำลองโครงสร้างด้วยตาข่ายเส้นลวด (Wire-Grid) มีดังต่อไปนี้

(1) เซกเมนต์จะต้องไม่ซ้อนทับกัน เนื่องจากการแบ่งกระแสรหว่างสองเซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันนั้น ไม่สามารถสรุปได้ เซกเมนต์ที่ซ้อนทับกัน อาจจะมีผลในสมการเมตริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix Equation)

(2) การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเซกเมนต์ที่เชื่อมต่อกัน อาจจะมีผลทำให้ความแม่นยำลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ค่า Δ/a มีค่าน้อย ปัญหานี้สามารถแก้ได้ โดยการให้รัศมีลดลงตามลำดับ ตลอดหลายเซกเมนต์

(3) จำเป็นที่จะต้องมิเซกเมนต์ที่จุดซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโครงข่าย หรือ แหล่งกำเนิดแรงดัน สำหรับช่องว่างการกระตุ้น ก็จำเป็นต้องมีเส้นลวดต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่ต้องการสามารถระบุให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

(4) จำนวนเส้นลวดที่จะนำมาต่อที่จุดเชื่อมต่อใดๆ นั้น ไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้ เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส NEC2

ข้อมูลที่ใช้อธิบายสายอากาศและสภาพแวดล้อม และคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการจะคำนวณ จะเป็นอินพุตที่จะใส่เข้าไป คล้ายกับบัตรเจาะรูที่เป็นข้อมูลใส่ให้กับคอมพิวเตอร์เมนเฟรมในสมัยก่อน กลุ่มของรหัสข้อมูลในการทำงานครั้งหนึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ประเภทด้วยกัน ส่วนแรกเริ่มต้นด้วยรหัสหนึ่งชุดหรือมากกว่านั้นซึ่งบรรจุรายละเอียดของการทำงาน ซึ่งจะพิมพ์เป็นตัวหนังสือที่จุดเริ่มต้นของไฟล์เอาต์พุต ต่อมาจะตามด้วยรหัสข้อมูลระบุแบบทางเรขาคณิตซึ่งจะระบุรูปทรงของสายอากาศ และสุดท้ายจะเป็นส่วนของรหัสควบคุมโปรแกรมซึ่งจะระบุตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ความถี่ การโหลด (Loading) การกระตุ้น (Excitation) รวมทั้ง ความต้องการให้คำนวณกระแสและสนามของสายอากาศ

รหัสข้อมูลทุกๆ รหัส จะมีตัวอักษร 2 ตัว ในคอลัมน์ที่หนึ่งและที่สอง เพื่อเป็นการระบุรหัสให้กับโปรแกรม ตัวอย่างเช่น รหัสระบุข้อมูลเส้นลวด (Wire Specification: GW) ซึ่งจะเป็นรหัสที่ใช้ในการกำหนดเส้นลวดขึ้นมาระหว่างจุดสองจุด ซึ่งมีลักษณะของข้อมูลที่จะต้องใส่ลงไป ดังนี้

GW	I1	I2	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
	ITG	NS	XW1	YW1	ZW1	XW2	YW2	ZW2	RAD

ความหมายของตัวแปรแต่ละตัวที่จะต้องใส่ลงไป คือ

ITG (I1) คือ ป้ายแสดงหมายเลข (Tag) ที่จะกำหนดให้เส้นลวดมีหมายเลขประจำเส้นลวดเป็นค่าเท่าใด รวมทั้งเซกเมนต์ทุกเซกเมนต์ของเส้นลวดก็จะมีหมายเลขตามหมายเลขเส้นลวดนั้นด้วย

NS (I2) คือ จำนวนเซกเมนต์ที่จะแบ่งให้กับเส้นลวด

XW1 (F1) คือ พิกัด x ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

YW1 (F2) คือ พิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

ZW1 (F3) คือ พิกัด z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

XW2 (F4) คือ พิกัด x ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

YW2 (F5) คือ พิกัด y ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

ZW2 (F6) คือ พิกัด z ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด

RAD (F7) คือ รัศมีของเส้นลวด

การกำหนดรัศมีของเส้นลวดนั้นจะต้องเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดที่ทำให้พื้นที่ผิวรวมของเส้นลวดทั้งหมดมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวของตัวนำของสายอากาศ

จากรหัสตัวอย่างข้างต้น เมื่อทำการใส่ตัวแปรต่างๆ ลงไปแล้ว และสั่งให้โปรแกรมทำงาน NEC2 จะสร้างเส้นลวดให้ 1 เส้น ซึ่งเส้นลวดนี้จะถูกแบ่งเป็นเซกเมนต์เล็กๆ จำนวน NS เซกเมนต์ การสร้างแบบจำลองของสายอากาศสามารถทำได้โดยการใส่รหัสที่มีลักษณะเดียวกันไปเรื่อยๆ ก็จะทำให้สามารถสร้างโครงสร้างสายอากาศและหาคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการได้ นอกจากนี้ โครงสร้างที่สร้างขึ้นโดย NEC2 ยังสามารถกำหนดสภาพนำ (Conductivity) ให้เท่ากับสภาพนำของโลหะที่จะใช้ทำสายอากาศได้ เช่น ในกรณีนี้สายอากาศต้นแบบจะสร้างขึ้นโดยใช้อะลูมิเนียม ดังนั้นในการคำนวณโดยใช้ NEC2 ก็จะมีการกำหนดสภาพนำของโครงสร้างด้วยค่าสภาพนำของอะลูมิเนียม คือ 5.08×10^7 S/m โดยการใช้คำสั่ง โหลด (Load)

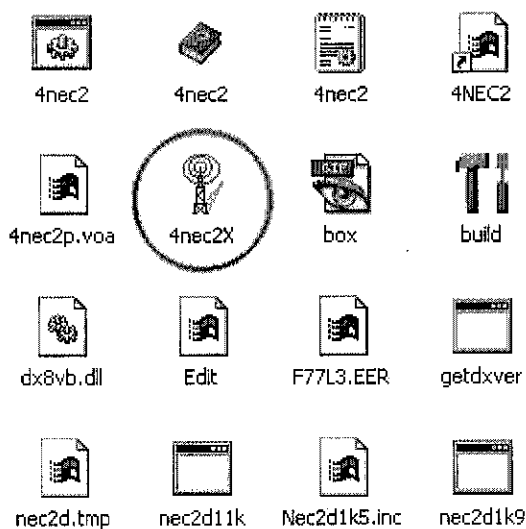
ในการตรวจสอบโครงสร้างของสายอากาศว่าได้สร้างถูกต้องเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่นั้น สามารถดูได้โดยใช้โปรแกรม Necview ซึ่งจะแสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ใส่รหัสใน NEC2 ออกมาเป็นตาข่ายเส้นลวด ตามที่กำหนดในระบบพิกัด x, y และ z นอกจากนี้โปรแกรม Necview ยังใช้ในการดูผลแบบรูปการแผ่พลังงาน ในระบบพิกัด x, y และ z ของสายอากาศที่ NEC2 คำนวณออกมาได้ด้วย สำหรับไฟล์เอาต์พุตที่ได้ออกมาจากการรันโปรแกรม NEC2 นั้น จะเป็นไปตามรูปแบบของข้อมูลที่ใส่เข้าไป เริ่มต้นด้วยการอธิบาย ตามมาด้วยข้อมูลทางเรขาคณิต และจากนั้นเป็นผลของตัวแปรที่ต้องการจะคำนวณ

NEC2 ได้รับการยอมรับว่า เป็นโปรแกรมที่สามารถคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ แต่สำหรับการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศด้วย NEC2 นั้น ยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม NEC2 เอง จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิธีการแก้ไขปัญหาการคำนวณอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ผิดพลาดนี้

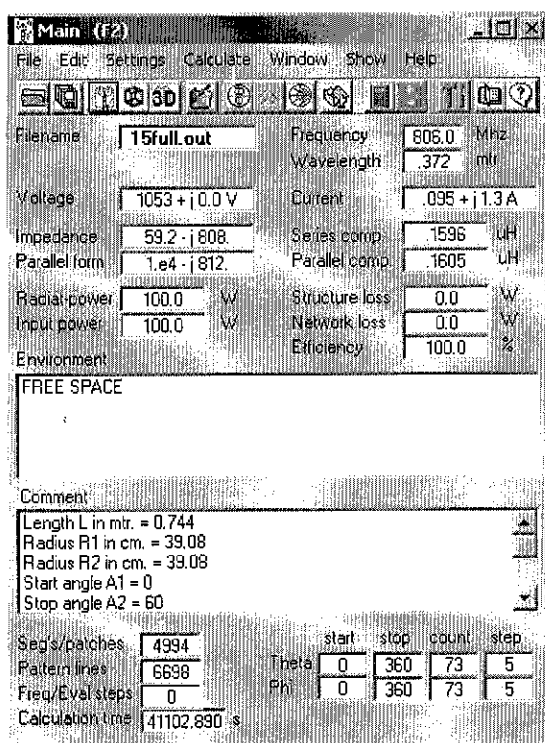
2.4 การใช้งานโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

2.4.1 การเข้าใช้งานโปรแกรม

ดับเบิลคลิกที่ไอคอนโปรแกรม 4nec2



จะเห็นหน้าจอโปรแกรม ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หน้าจอโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

โดยแต่ละส่วนมีความหมาย ดังนี้

Filename : เป็นการแสดงชื่อไฟล์ที่ใช้ทำงานอยู่

Frequency : แสดงค่าความถี่ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างสายอากาศ ในหน่วย MHz

Wavelength : ค่าความยาวคลื่นที่คำนวณจากค่าความถี่ใช้งาน ในหน่วยเมตร

Voltage : ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับโปรแกรม

Current : ค่ากระแสเหนี่ยวนำที่โปรแกรมคำนวณได้

Impedance : ค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม ณ ความถี่ใช้งาน

Series comp. : เป็นค่าที่ได้จากการแมตช์ของสายอากาศแบบอนุกรมที่ความถี่ใช้งาน

Parallel form : ค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้จากโปรแกรม ณ ความถี่ใช้งานแบบขนาน

Parallel comp. : เป็นค่าที่ได้จากการแมตช์ของสายอากาศแบบขนานที่ความถี่ใช้งาน

Radiat-power : ค่าพลังงานที่ใช้ในการแผ่พลังงาน ในหน่วยวัตต์

Input power : ค่าพลังงานด้านเข้า ในหน่วยวัตต์

Structure loss : ค่าความสูญเสียเนื่องจากโครงสร้าง ในหน่วยวัตต์

Network loss : ค่าความสูญเสียเนื่องจากโครงข่าย ในหน่วยวัตต์

Efficiency : ค่าประสิทธิภาพ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์

Environment : ใช้แสดงเมื่อมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจากการทำงานของโปรแกรม

Comment : แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างโครงสร้าง

Seg's/patches : แสดงจำนวนเซกเมนต์ทั้งหมดในโครงสร้าง

Pattern line : แสดงจำนวนบรรทัดในการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน

Freq/Eval steps : จำนวนความถี่ที่ต้องการผันแปร

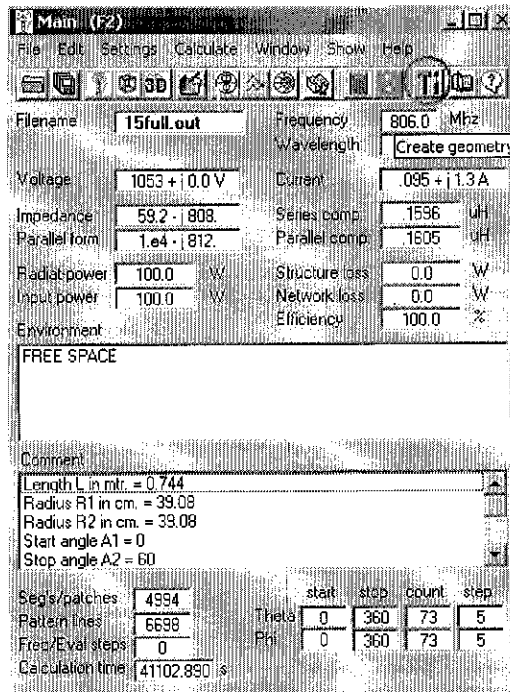
Calculation time : เวลาที่โปรแกรมใช้ในการทำงานของไฟล์นั้น

Theta : การกำหนดมุมในการหมุนเริ่มต้นและสิ้นสุดของมุม theta โดยเพิ่มค่าที่ละเท่า ๆ กัน จนครบ 360°

Phi : การกำหนดมุมในการหมุนเริ่มต้นและสิ้นสุดของมุม phi โดยเพิ่มค่าที่ละเท่า ๆ กัน จนครบ 360°

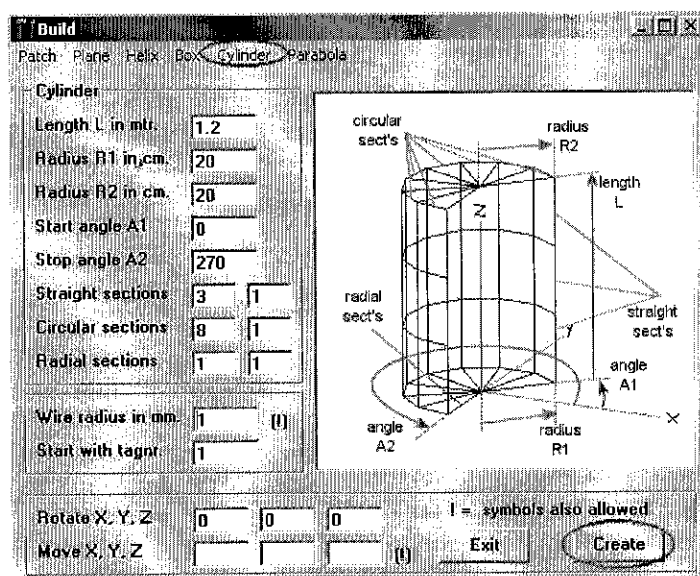
2.4.2 การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศ

คลิกที่ไอคอนดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หน้าจอการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศ

เลือกประเภทของสายอากาศที่ต้องการสร้าง ในที่นี้ใช้เป็นสายอากาศทรงกระบอก (Cylinder) ใส่ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หน้าจอแสดงค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศ

โดยในแต่ละส่วนมีความหมาย ดังนี้

Length L in mtr.: ใส่ค่าความยาวทั้งหมดของสายอากาศที่ต้องการสร้างในหน่วย
เมตร

Radius R1 in cm.: ใส่ค่ารัศมีตัวที่ 1 ในหน่วยเซนติเมตร

Radius R2 in cm.: ใส่ค่ารัศมีตัวที่ 2 ในหน่วยเซนติเมตร

Start angle A1: ค่ามุมเริ่มต้น

Stop angle A2: ค่ามุมสิ้นสุด

Straight sections: แบ่งจำนวนเซกเมนต์ในแนวรัศมี

Circular sections: แบ่งจำนวนเซกเมนต์ในแนวแกน

Radial sections: แบ่งจำนวนเซกเมนต์ในแนวเส้นกวางรัศมี (จากจุดศูนย์กลาง)

Wire radius in mm.: รัศมีของเส้นลวดที่ใช้ในการสร้าง ในหน่วยมิลลิเมตร

Start with tagnr.: ป้ายแสดงหมายเลข (tag) ที่จะกำหนดให้เส้นลวดมีหมายเลขประจำ
เส้น ลวดเป็นค่าเท่าใด

Rotate X, Y, Z: ค่าพิกัด X, Y, Z ที่ต้องการหมุนโครงสร้าง

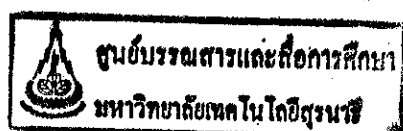
Move X, Y, Z: ค่าพิกัด X, Y, Z ที่ต้องการเลื่อนโครงสร้าง

2.4.3 Program Input

• Comment cards (CM, CE)

เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับเริ่มต้นโปรแกรม ซึ่งบอกรายละเอียดของโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์โดยสรุป เช่น

```
CM Length L in mtr. = 1.5
CM Radius R1 in cm. = 58.59
CM Radius R2 in cm. = 58.59
CM Start angle A1 = 0
CM Stop angle A2 = 60
CM Straight sections = 9
CM Circular sections = 16
CM Radial sections = 1
CM Rotate X, Y, Z = 0, 0, 0
CM Move X, Y, Z = 0, 0, 0
CE
```



• Structure geometry input cards

- Wire Specification (GW)

เป็นคำสั่งที่ใช้ระบุเส้นลวดขึ้นมาระหว่างจุดสองจุด

GW	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

เช่น

```
GW 1 5 .5859 .0 .0 .5859 .0 .166667 .001
GW 2 5 .5859 .0 .166667 .5859 .0 .333333 .001
GW 3 5 .5859 .0 .333333 .5859 .0 .5 .001
GW 4 5 .5859 .0 .5 .5859 .0 .666667 .001
GW 5 5 .5859 .0 .666667 .5859 .0 .833333 .001
GW 6 5 .5859 .0 .833333 .5859 .0 1.0 .001
GW 7 5 .5859 .0 1.0 .5859 .0 1.167 .001
```

โดยที่

- I1 : ป้ายแสดงหมายเลข (Tag) ที่จะกำหนดให้เส้นลวดมีหมายเลขประจำเส้นลวดเป็นค่าเท่าใด
- I2 : จำนวนเซกเมนต์ที่จะแบ่งให้กับเส้นลวด
- I3 : พิกัด x ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด
- I4 : พิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด
- I5 : พิกัด z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด
- I6 : พิกัด x ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด
- I7 : พิกัด y ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด
- I8 : พิกัด z ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด
- I9 : รัศมีของเส้นลวด

- End geometry input (GE)

เป็นคำสั่งสิ้นสุดโปรแกรมในส่วนของ Structure geometry input cards

GE 0

• Program control cards

- Excitation (Ex)

เป็นคำสั่งที่ใช้กระตุ้นแรงดันหรือกระแสในโครงสร้างของสายอากาศ

/2	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
EX	I1	I2	I3	I4	F1	F2	F3	F4	F5	F6

โดยที่ :

- I1 : ประเภทของการกระตุ้น
- I2 : ตำแหน่งเส้นลวดที่ต้องการกระตุ้น
- I3 : ตำแหน่งย่อยของเส้นลวดที่ต้องการกระตุ้น
- I4 : ตำแหน่งว่าง
- F1 : ค่าส่วนจริงของแรงดันที่ใช้กระตุ้น (Volts)
- F2 : ค่าส่วนจินตภาพของแรงดันที่ใช้กระตุ้น (Volts)
- F3 : ตำแหน่งว่าง เมื่อเป็นการทำให้เป็นบรรทัดฐานค่าสูงสุด
- F4 : ตำแหน่งว่าง
- F5 : ตำแหน่งว่าง
- F6 : ตำแหน่งว่าง

เช่น

EX019012010

- Frequency (FR)

เป็นคำสั่งที่ใช้ระบุค่าความถี่ใช้งานในหน่วย เมกะเฮิรตซ์ (MHz)

/2	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
FR	I1	I2	I3	I4	F1	F2	F3	F4	F5	F6
	I F R Q	N F R Q	B L A N K	B L A N K	FMHZ	DELFRQ	BLANK	BLANK	BLANK	BLANK

โดยที่ :

- I1 : ประเภทของความถี่
- I2 : จำนวนลำดับชั้นความถี่
- I3 : ตำแหน่งว่าง
- I4 : ตำแหน่งว่าง
- F1 : ค่าความถี่ใช้งานในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ (MHz)
- F2 : ค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละลำดับชั้น
- F3 : ตำแหน่งว่าง
- F4 : ตำแหน่งว่าง
- F5 : ตำแหน่งว่าง
- F6 : ตำแหน่งว่าง

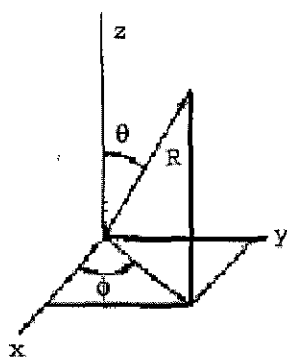
เช่น

FR010008003

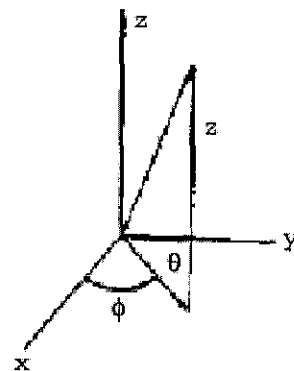
- Radiation Pattern (RP)

เป็นคำสั่งที่ใช้สร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน

2	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
RP	I1	I2	I3	I4	F1	F2	F3	F4	F5	F6



Spherical coordinates



Cylindrical coordinates

รูปที่ 2.4 พิกัดสนามการแผ่พลังงาน

โดยที่ :

- I1 : เป็นการเลือกโหมดการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน
- I2 : ค่ามุม theta (θ)
- I3 : ค่ามุม phi (ϕ)
- I4 : ตำแหน่งว่าง
- F1 : ค่ามุม θ เริ่มต้นในหน่วยองศา ($^{\circ}$)
- F2 : ค่ามุม ϕ เริ่มต้นในหน่วยองศา ($^{\circ}$)
- F3 : ค่ามุม θ ที่เพิ่มขึ้นในหน่วยองศา ($^{\circ}$)
- F4 : ค่ามุม ϕ ที่เพิ่มขึ้นในหน่วยองศา ($^{\circ}$)
- F5 : ตำแหน่งว่าง เมื่อสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมาเมื่อองค์ประกอบ $\exp(-jkR)/R$
- F6 : ตำแหน่งว่าง เมื่อคิดค่าอัตราขยายบรรทัดฐานสูงสุด (normalized maximum)

เช่น

RP 0 37 37 1000 -90 0 5 10

- End of Run (EN)

เป็นคำสั่งสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม

/2	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
EN					blank	blank	blank	blank	blank	blank
	b	b	b	b						
	l	l	l	l						
	a	a	a	a						
	n	n	n	n						
	k	k	k	k						

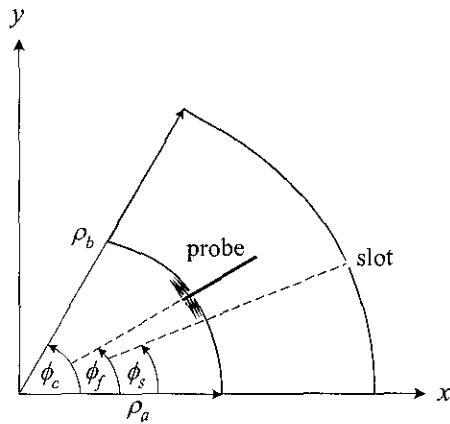
เช่น

RP 0 37 37 1000 -90 0 5 10
FR 0 10 0 0 800 3
EN

2.5 สรุป

ในบทนี้นั้น ได้กล่าวถึงวิธีการโมเมนต์ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศในโครงการเล่มนี้ โดยที่วิธีเชิงโมเมนต์จะเป็นวิธีการที่ NEC2 ใช้ในการคำนวณ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงวิธีการเขียนรหัสเพื่อสั่งให้ NEC2 คำนวณผลลัพธ์ที่ต้องการ ซึ่งก็คือ แบบรูปการแผ่พลังงาน และอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศไว้ในบทนี้ด้วย

เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศในโครงการเล่มนี้นั้น มีขนาดใหญ่ แต่ไม่ซับซ้อน จึงสามารถนำวิธีเชิงโมเมนต์มาใช้หากระแสเหนี่ยวนำบนโครงสร้างได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม รายละเอียดของวิธีเชิงโมเมนต์ที่ใช้ในโปรแกรมแต่ละโปรแกรมก็ยังคงมีความแตกต่างกัน ดังนั้น ในบทนี้ จึงได้กล่าวถึง รายละเอียดของวิธีเชิงโมเมนต์ที่ใช้ใน NEC2 ไว้ด้วย เพื่อจะได้สามารถทำความเข้าใจว่า NEC2 นั้น มีวิธีคำนวณผลลัพธ์ที่ต้องการออกมาได้อย่างไร



(ข) ภาพตัดขวางของสายอากาศ

รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วม ที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ

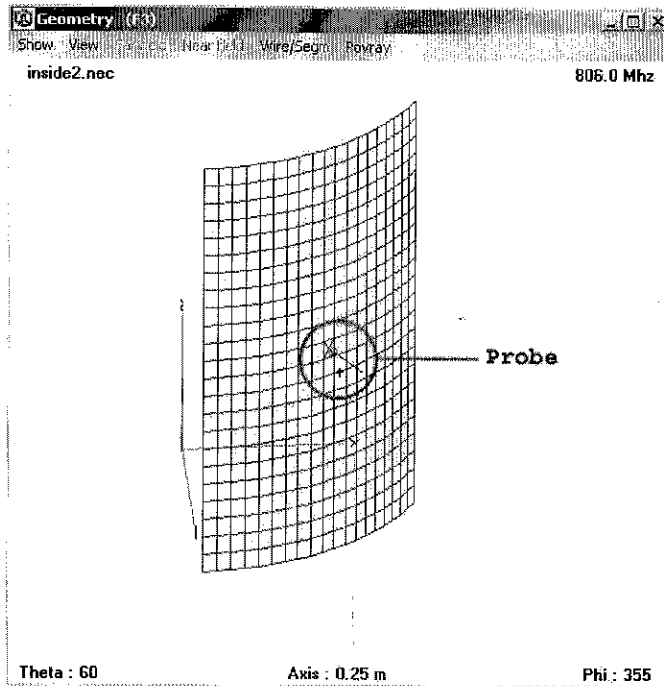
จะเห็นว่าสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วม ประกอบด้วยช่องเปิดแคบๆ ดังปรากฏในภาพ ที่มีขนาดกว้าง w_s และยาว l_s วางตัวในทิศทางแกน z ในขณะที่ศูนย์กลางของช่องอยู่ที่ตำแหน่ง (ρ_b, ϕ_s, z_s) โพรบดังกล่าวประกอบด้วยผนังทรงกระบอก 2 ชั้น ที่มีรัศมีต่างกัน โดยด้านบนและด้านล่างเป็นแผ่นตัวนำ ผนังทั้งหมดถือว่าเป็นตัวนำที่สมบูรณ์แบบ ไม่มีความหนา มีลักษณะเป็นเซกเตอร์ของทรงกระบอกที่มีแกน z เป็นแกนร่วม และยาว z_d โพรบมีพื้นที่หน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) ซึ่ง ρ_a และ ρ_b คือรัศมีภายในและรัศมีภายนอกตามลำดับ และ ϕ_c คือขนาดมุมของเซกเตอร์เมื่อวัดจากแกน x ส่วนการป้อนสัญญาณให้โพรบทำได้โดยโพรบที่มีจุดกระตุ้นอยู่ตำแหน่งศูนย์กลางของพื้นผิวตัวนำรัศมีชั้นใน ρ_a ที่ตำแหน่ง $(\rho_f = \rho_a, \phi_f = \phi_c/2, z_f = z_d/2)$ และความยาวของโพรบ คือ l_f ซึ่งถูกสมมติว่ามีความผอมมาก จึงไม่ต้องพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลาง

3.2 การจำลองโครงสร้างของสายอากาศ

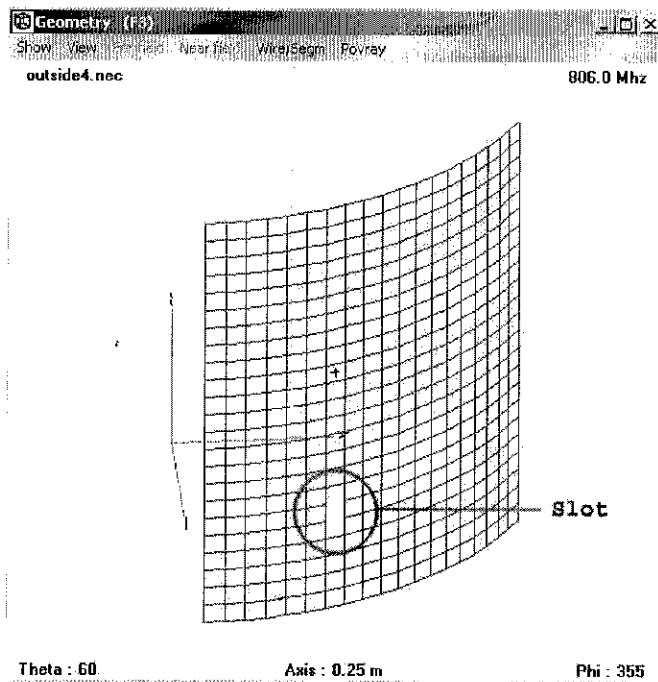
โครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วม มีลักษณะเป็นร่องเจาะบนผิวตัวนำของเซกเตอร์รูปทรงกระบอกที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบตัวนำทรงกระบอกสองชั้นซ้อนกันและปิดด้วยผิวตัวนำที่มุมของเซกเตอร์ที่กำหนดและที่ปลายทั้งสองของเซกเตอร์ ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองจึงต้องสร้างรัศมีชั้นมาสองชั้น โดยมีอัตราส่วน ρ_a/ρ_b เป็น 1.5 (ρ_a และ ρ_b คือรัศมีภายในและรัศมีภายนอกตามลำดับ) โดยที่ $\rho_a = 1.050\lambda$ และ $\rho_b = 1.575\lambda$ [2]

โครงการนี้สนใจออกแบบโครงสร้างของสายอากาศที่ความถี่ 806 MHz ความยาวคลื่น (λ) มีค่าเท่ากับ 37.2 เมตร ทำให้รัศมีภายในและรัศมีภายนอกที่ใช้ในการออกแบบมีค่าเป็น

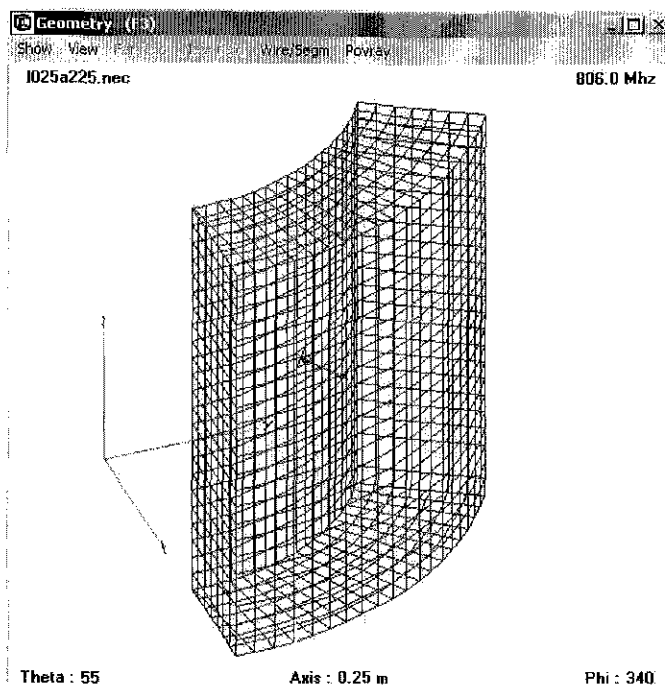
39.06 และ 58.59 เซนติเมตร ตามลำดับ มุมของเซกเตอร์เป็น 60° และโครงสร้างดังกล่าวจะถูกกระตุ้นด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(ก) โครงสร้างรัศมีด้านใน



(ข) โครงสร้างรัศมีด้านนอก



(ค) โครงสร้างสมบูรณ์

รูปที่ 3.2 โครงสร้างจำลองที่สร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 2

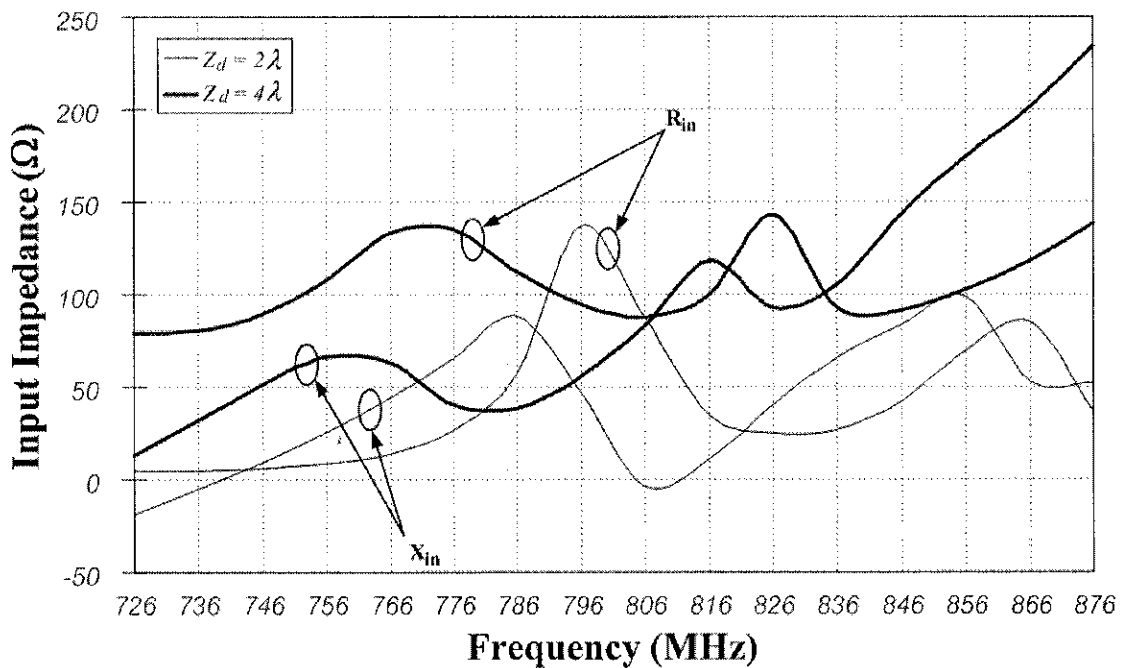
3.3 การวิเคราะห์ผลการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

ในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์ผลการคำนวณของคุณลักษณะของสายอากาศได้แก่แบบรูปการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เพื่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจในธรรมชาติของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบและสร้างสายอากาศตามที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศจะทำได้โดยการศึกษาผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่พลังงานอันเนื่องจากพารามิเตอร์ของสายอากาศเป็นลำดับแรก จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่ารัศมีทรงกระบอกภายนอกที่มีช่องเปิดเป็นส่วนประกอบย่อยต่างๆ รวมกันนั้น จะมีผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานให้เป็นแบบรอบตัวระนาบเดี่ยว (Omnidirectional) โดยรัศมีทรงกระบอกเป็น 1.575λ [3] มีเซกเตอร์ 6 ชั้น ดังนั้น มุมของแต่ละเซกเตอร์จึงเป็น 60° ก็จะได้แบบรูปที่นำเสนอในโครงการฉบับนี้ ตำแหน่งของการกระตุ้นโพรบอยู่ที่ $(\rho_f = \rho_a, \phi_f = \phi_c/2, z_f = z_d/2)$ ซึ่งเป็นศูนย์กลางของโพรงทรงกระบอกที่ถูกประกอบเข้าด้วยกันจนเกิดการเชื่อมต่อแบบสมมาตร ผลลัพธ์เชิงเลขเป็นค่า ณ ความถี่ 806 MHz ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง ความถี่ผันแปรจาก 726.0 ถึง 876.0 MHz เพื่อสังเกตความถี่ตอบสนองของ

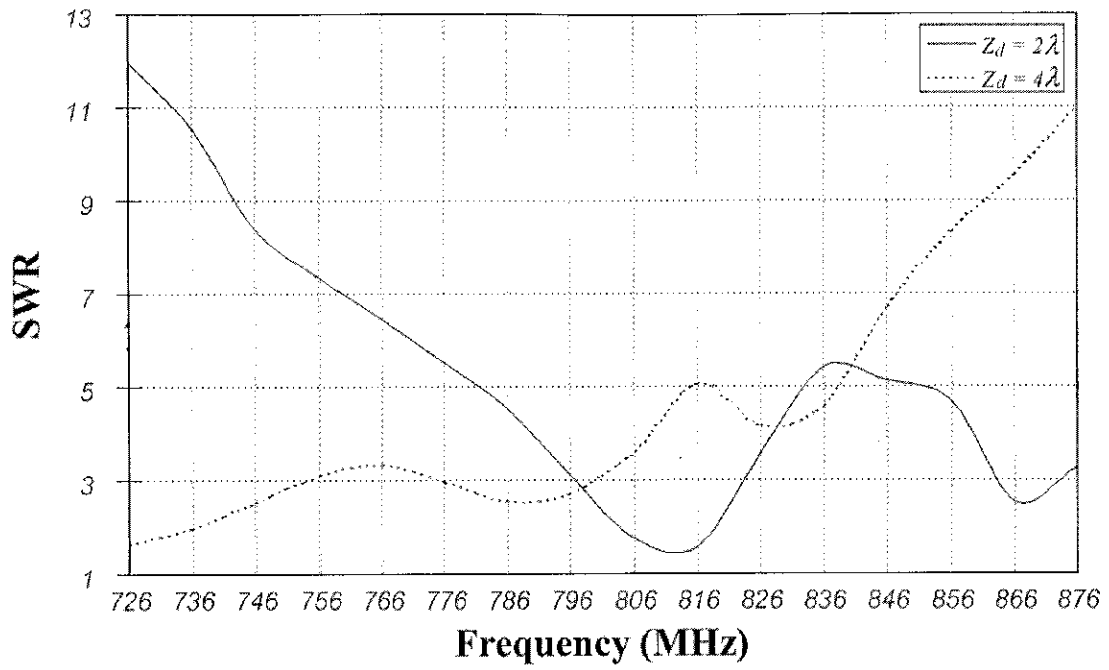
อิมพีแดนซ์คุณลักษณะด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน รวมถึงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

3.3.1 ความยาวโพรง (cavity length)

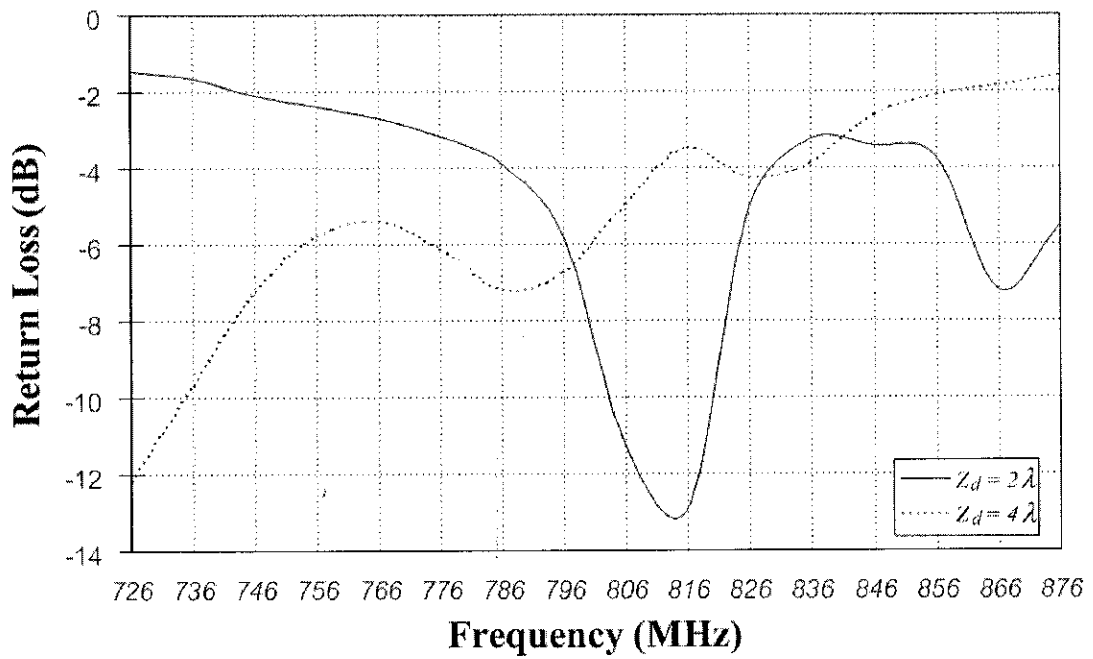
ความยาวของโพรงทรงกระบอกแต่ละชิ้น เป็นพารามิเตอร์แรกที่จะกำหนดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ความยาวของโพรงจะมีค่าอยู่ที่ 2λ และ 4λ ขณะที่พารามิเตอร์อื่นๆ จะถูกกำหนดให้คงที่ เช่น $\rho_a = 1.050\lambda$, $\rho_b = 1.575\lambda$, $\phi_c = 60^\circ$, $\phi_s = 22.5^\circ$, $\phi_f = 30^\circ$, $z_s = 0.50 z_d$, $z_f = 0.50 z_d$, $l_s = 0.5\lambda$, $w_s = 0.086\lambda$ และ $l_f = 0.25\lambda$ ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของอิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของความถี่ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ จากรูปที่ 3.3 (ก) ถ้าโพรงมีขนาดใหญ่ ค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะมีค่ามากตามไปด้วย ส่วนความถี่เรโซแนนซ์จะสังเกตได้ที่ค่ารีแอกแตนซ์เป็นศูนย์ ถ้าความยาวโพรงน้อยลง ความถี่เรโซแนนซ์จะสูงขึ้น และที่ 806 MHz เกิดการเรโซแนนซ์ เมื่อความยาวโพรงเป็น 2λ นอกจากนี้แล้วค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ความยาวโพรงต่างๆ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3 (ข) และ (ค) พบว่าความถี่เรโซแนนซ์จะสูงขึ้น เมื่อความยาวโพรงลดลง



(ก) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า



(ข) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน



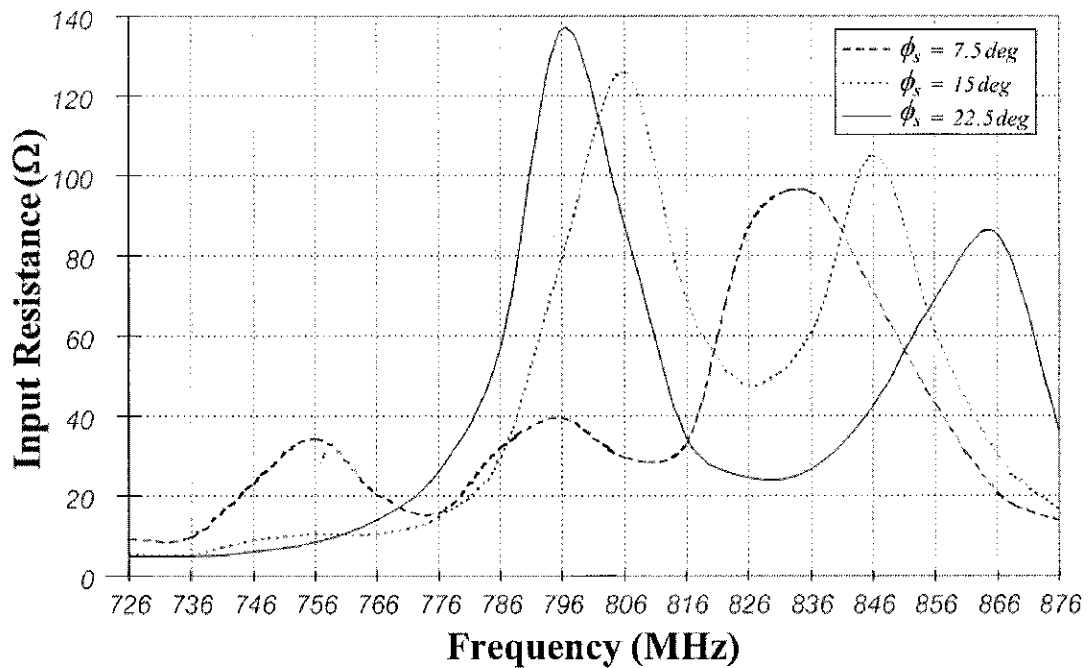
(ค) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

รูปที่ 3.3 แสดงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เมื่อ $z_d = 2\lambda$ และ 4λ

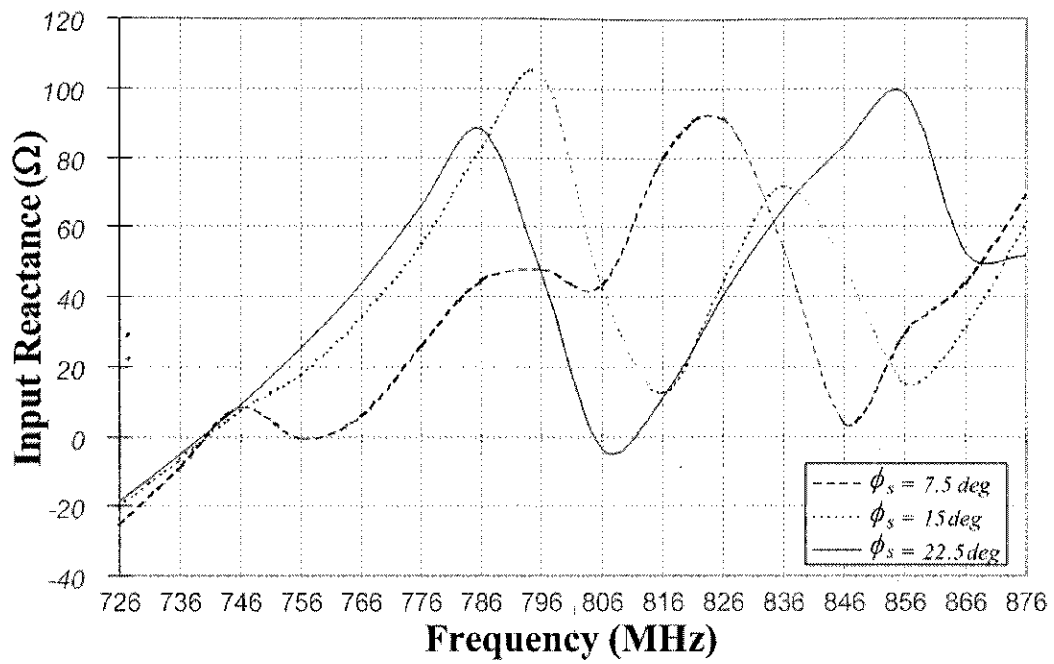
3.3.2 ตำแหน่งของช่องเปิดในทิศทางมุม ϕ

ตำแหน่งของช่องเปิดบนโพรงแต่ละชั้น เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ถูกพิจารณาในการออกแบบสายอากาศ ช่องเปิดถูกตัด ณ พื้นผิวภายนอกของโพรงทรงกระบอกแต่ละชั้น โดยศูนย์กลางของช่องเปิดจะอยู่ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละชั้นส่วนเพื่อให้ได้แบบรูปสมมาตรในแนวตั้ง

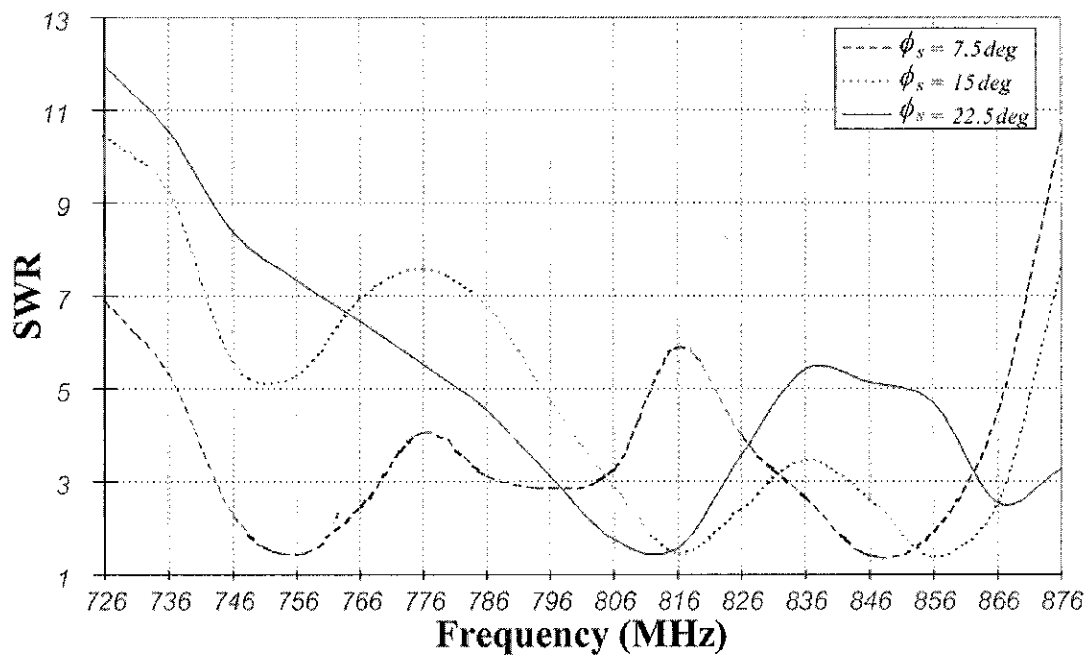
พารามิเตอร์ที่สามารถแปรค่าได้คือ มุมของช่องเปิดในแนวแอซิมัท (Azimuth) หรือในทิศทางมุม ϕ รูปที่ 3.4 (ก) จนถึงรูปที่ 3.4 (ง) แสดงอิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของความถี่ และมุมของช่องเปิดค่าต่างๆ ช่องเปิด ณ เส้นกลาง ($\phi = 30^\circ$) ของโพรงเป็นช่องเปิดที่ไม่แผ่พลังงาน กรณีของช่องเปิดที่มีการแผ่พลังงาน ตำแหน่งของแต่ละช่องควรมีความเฉ (offset) จากเส้นกลางนี้ ตำแหน่งของช่องเปิดในทิศทางมุม ϕ จะผันแปรจาก 7.5° , 15.0° และ 22.5° สำหรับช่องเปิดที่อยู่ระหว่าง 30° และ 60° จะสมมาตรกับช่องเปิดที่อยู่ระหว่าง 0° และ 30° ดังนั้น ค่าอิมพีแดนซ์จะถือว่ามีความโน้มเอียงเหมือนกัน จากรูปที่ 3.4 พบว่าเมื่อมุมเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นกลางความถี่เรโซแนนซ์จะสูงขึ้น ความถี่แมตซ์ซิ่ง ณ 806 MHz เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราการเกิดคลื่นนิ่งของแรงดัน และระดับของค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของแถบความถี่ พบว่าที่มุม $\phi = 22.5^\circ$ ค่าดังกล่าวดีที่สุด



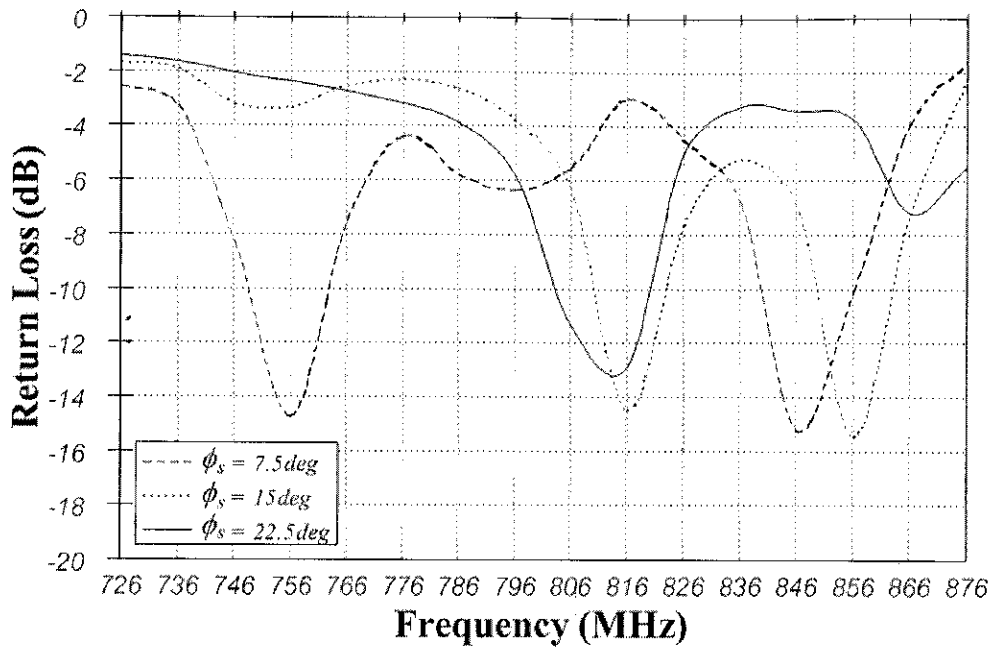
(ก) ค่าความต้านทานด้านเข้า



(ข) ค่ารีแอกแตนซ์ด้านเข้า



(ค) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

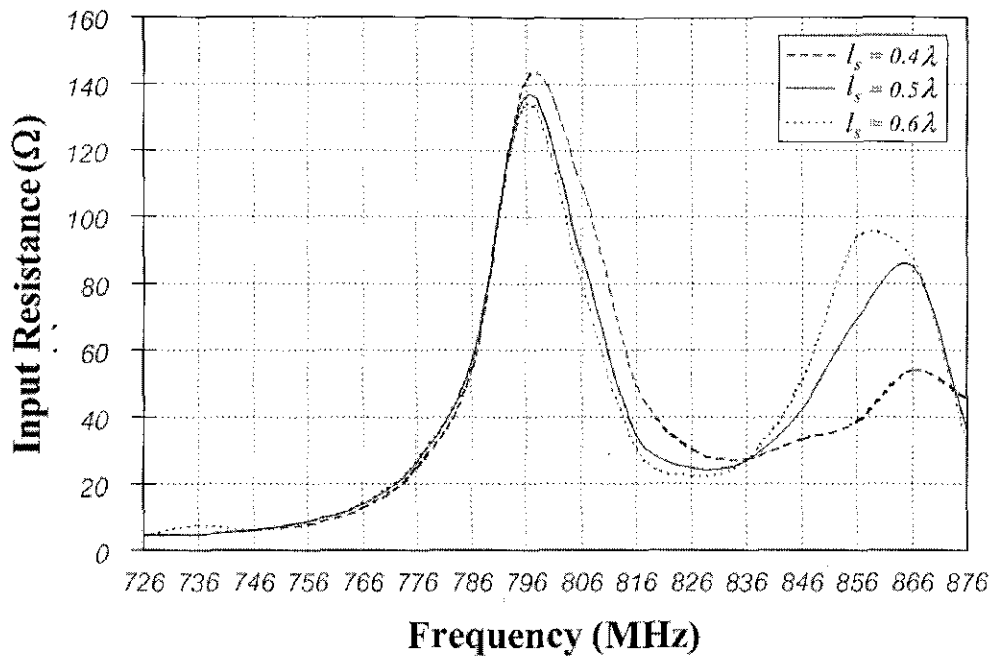


(ง) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

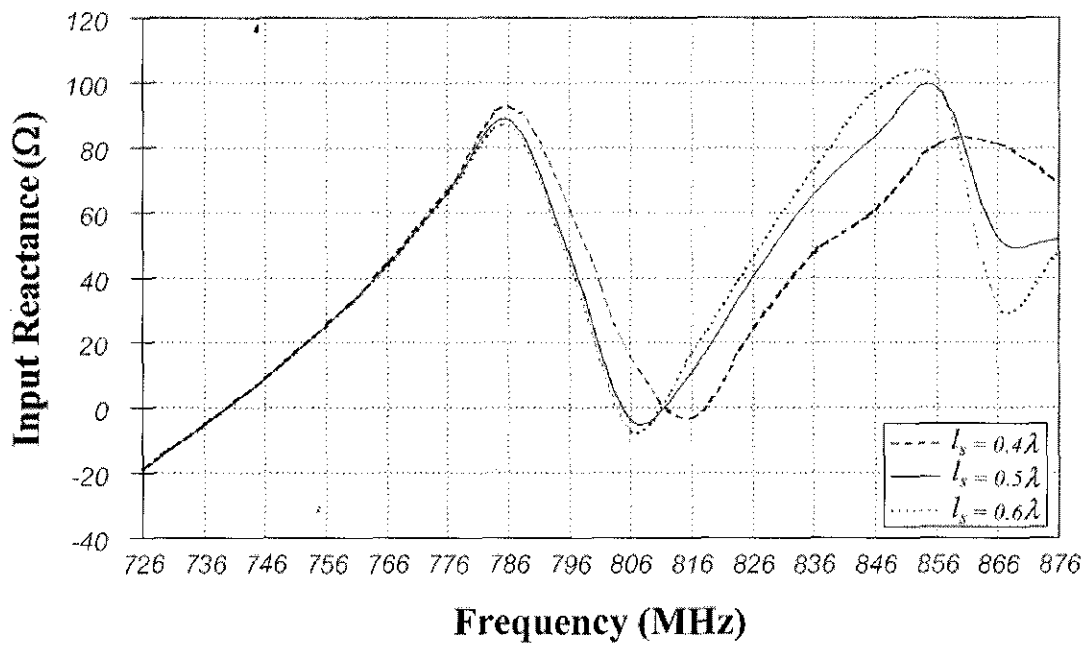
รูปที่ 3.4 แสดงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เมื่อ $\phi = 7.5^\circ, 15.0^\circ$ และ 22.5°

3.3.3 ความยาวของช่องเปิด

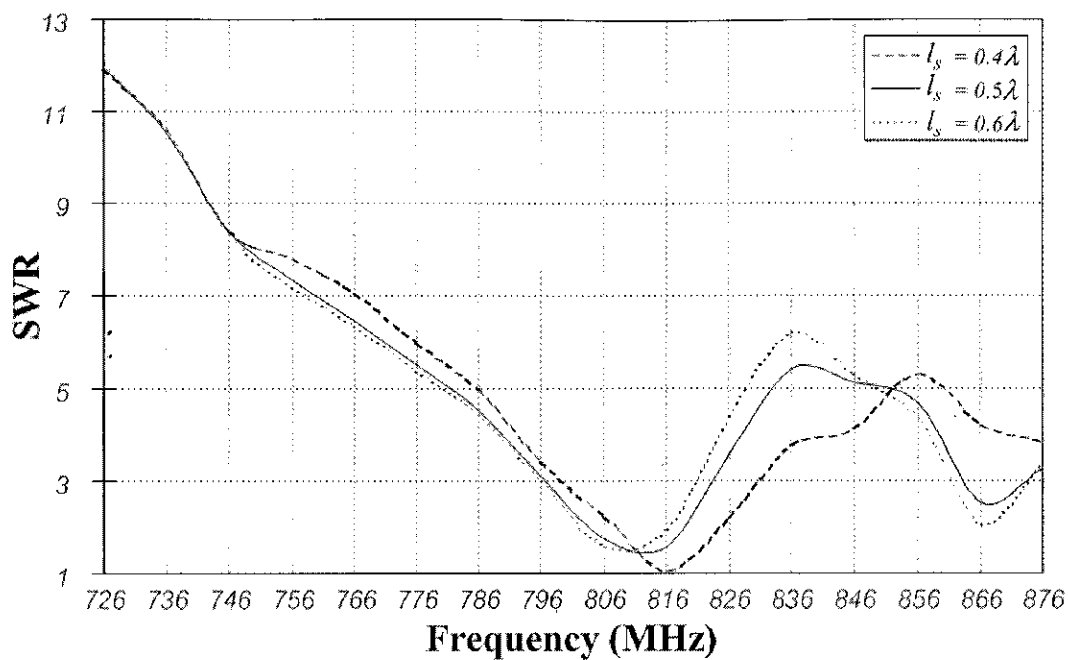
รูปที่ 3.5 (ก) จนถึง 3.5 (ง) แสดงถึงอิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ที่ความยาวของช่องเปิดต่างๆ พบว่า เมื่อความยาวของช่องเปิดเพิ่มขึ้น ผลของความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะน้อยลง ในแต่ละความยาวของช่องเปิด ความถี่เรโซแนนซ์จะปรากฏสามครั้ง และที่ความยาวของช่องเปิดเพิ่มขึ้น ความถี่ที่เกิดการเรโซแนนซ์จะต่ำลง อย่างไรก็ตาม ความถี่ของเงื่อนไขการแมตช์ เพิ่มขึ้นโดยลดความยาวของช่องเปิด ซึ่งเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ 0.50λ ค่าพารามิเตอร์นี้ถูกใช้เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบ



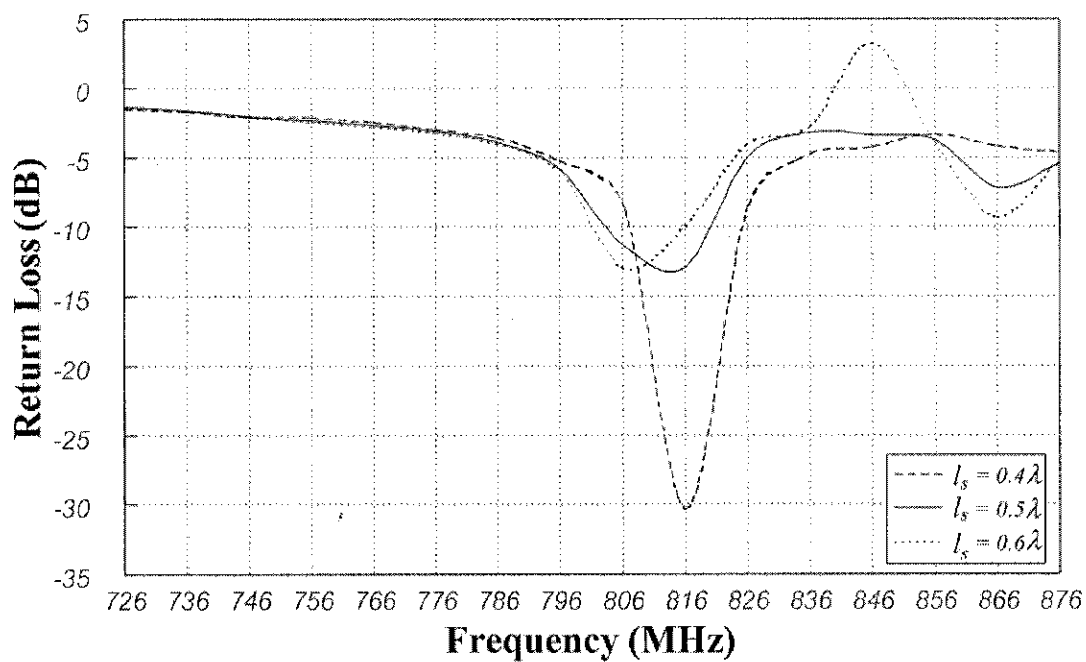
(ก) ค่าความต้านทานทานด้านเข้า



(ข) ค่ารีแอกแตนซ์ด้านเข้า



(ก) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

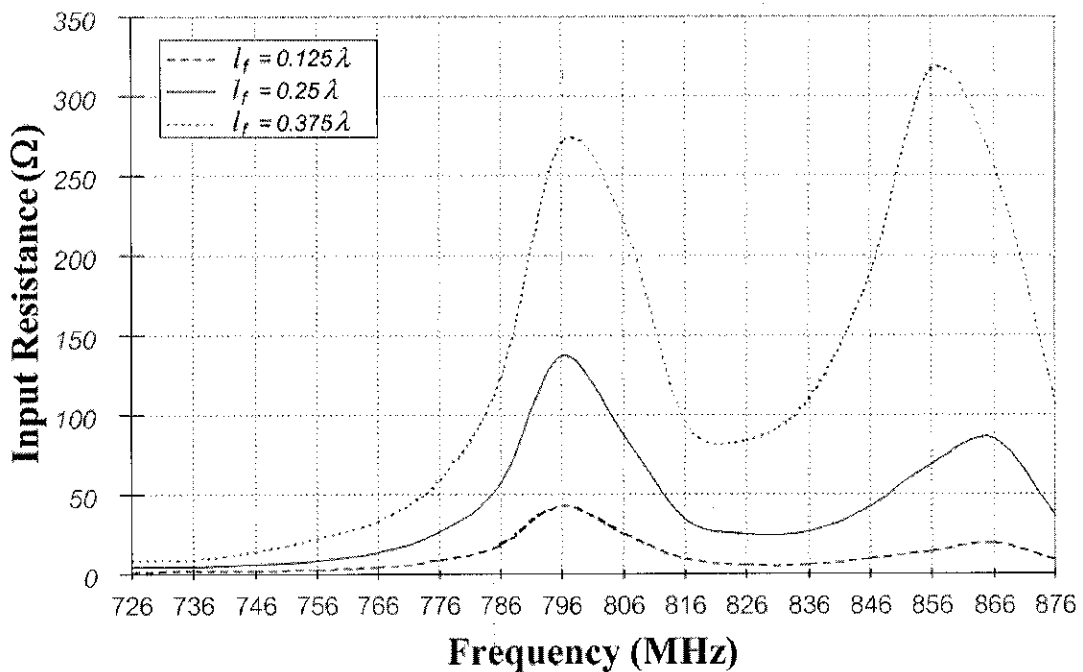


(ง) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

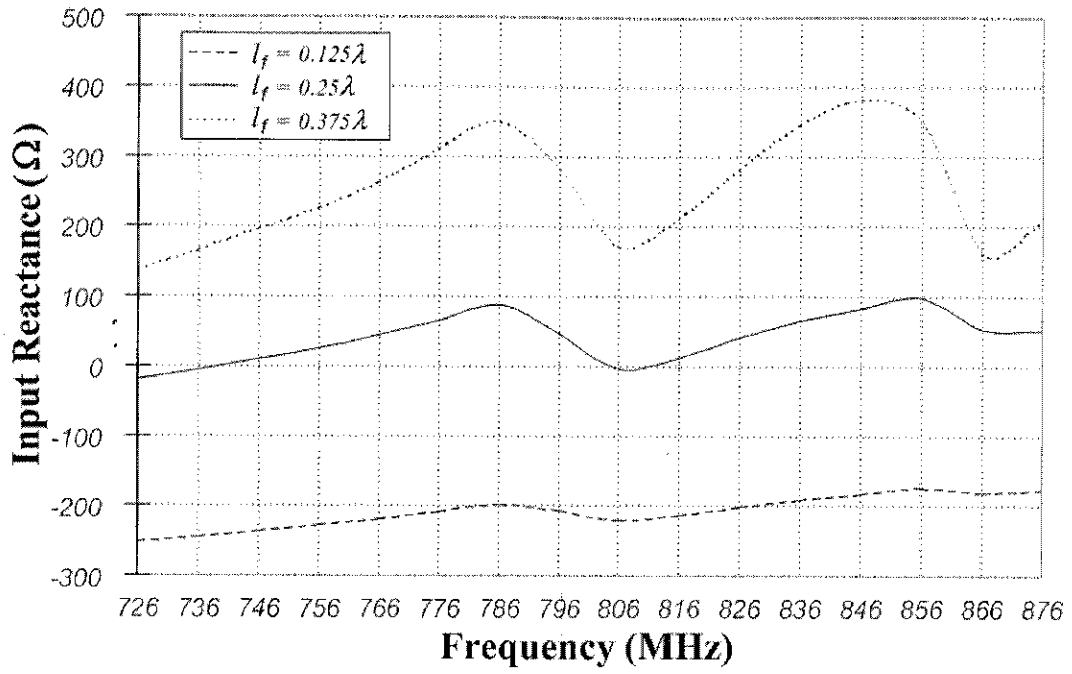
รูปที่ 3.5 แสดงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เมื่อ $l_s = 0.4\lambda$, 0.5λ และ 0.6λ

3.3.4 ความยาวโพรบ

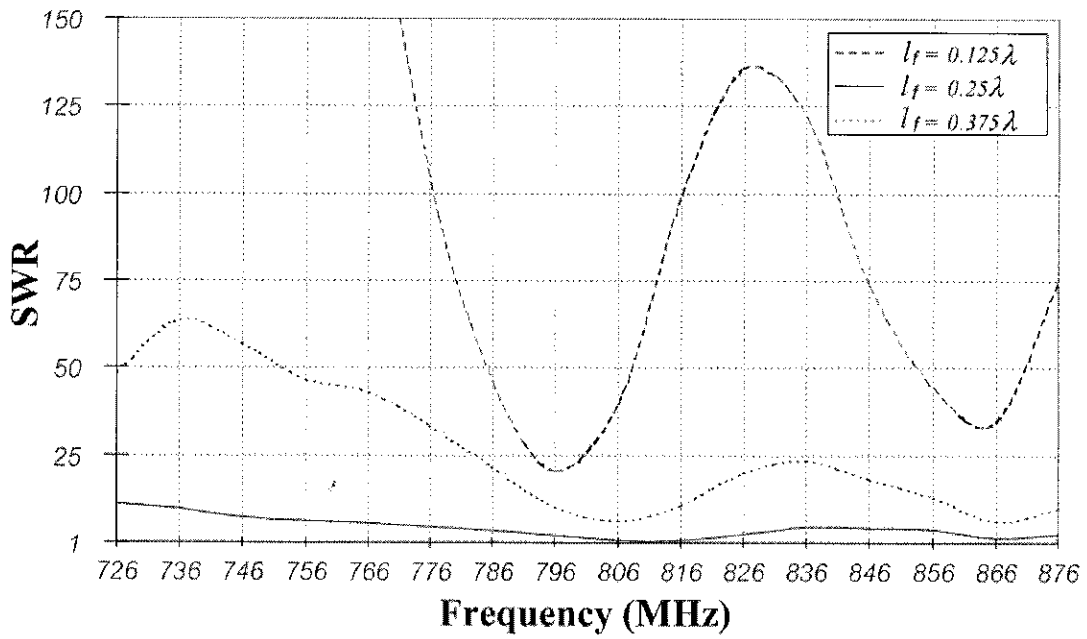
ความยาวของโพรบมีค่าอยู่ระหว่าง 0.125λ - 0.375λ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ได้แสดงในรูปที่ 3.6(ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ ถ้าโพรบมีความยาวมากขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ก็จะเพิ่มมากขึ้น ทั้งค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ รวมไปถึงค่าความถี่เรโซแนนซ์จะสูงขึ้นตามไปด้วย แถบความถี่ของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของโพรบที่ความยาวต่างกัน จะมีความแตกต่างกันมาก ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับและค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ดีที่สุด ปรากฏเมื่อความยาวโพรบเป็น 0.25λ ดังนั้น ความยาวโพรบดังกล่าวจึงเป็นพารามิเตอร์ที่จะใช้ในการออกแบบ



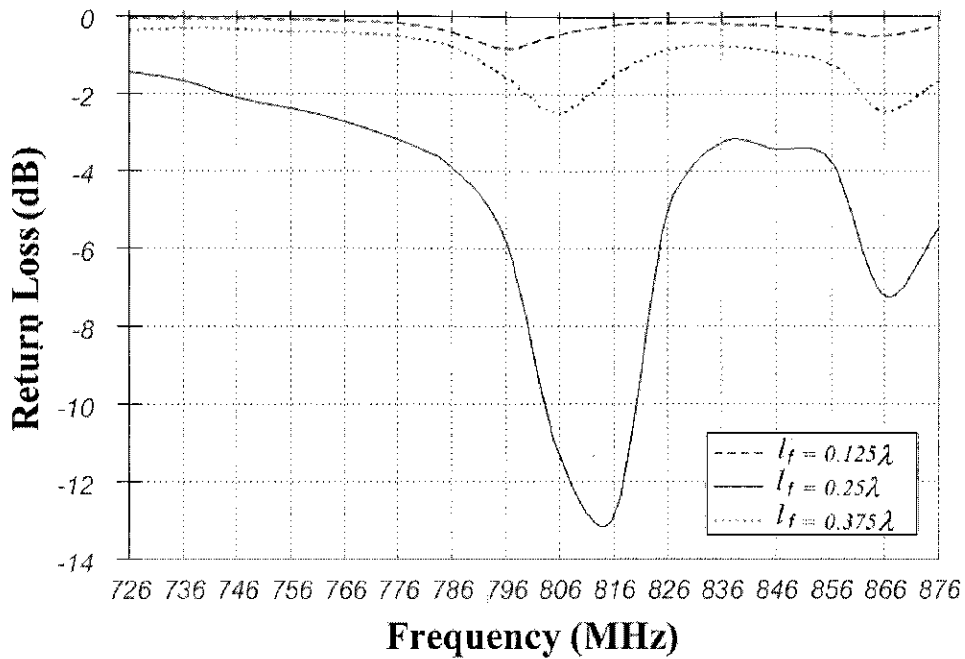
(ก) ค่าความต้านทานด้านเข้า



(ข) ค่ารีแอกแตนซ์ด้านเข้า



(ค) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน



(ง) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

รูปที่ 3.6 แสดงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เมื่อ $l_f = 0.125\lambda$, 0.25λ และ 0.375λ

3.4 สรุป

จากข้อมูลข้างต้นทำให้มีความรู้และความเข้าใจถึงอิทธิพลอันเนื่องมาจากพารามิเตอร์ต่างๆ ของโครงสร้างสายอากาศที่มีต่อคุณลักษณะของอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกมร่วมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ได้ดังรายละเอียดที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้านี้ทั้งหมด ซึ่งพารามิเตอร์ที่เราได้พิจารณามีดังนี้ คือ ความยาวโพรง ตำแหน่งของช่องเปิดในทิศทางมุม ϕ ความยาวของช่องเปิด และความยาวโพรบ จากการศึกษาที่ได้กล่าวไปแล้วทำให้เราได้รู้แนวทางในการออกแบบสายอากาศเพื่อให้มีคุณสมบัติอยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้งาน โดยการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

บทที่ 4

ผลจากการทดสอบสายอากาศ

ในบทนี้จะเป็นการพิสูจน์ว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คาดหวังว่าดีที่สุดในค่าคำนวณได้ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 (NEC2) ในบทที่ผ่านมา โดยนำมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ (Prototype Antenna) แล้วทำการวัดค่าคุณสมบัติของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในระนาบ xz (Elevation Plane) และระนาบ xy (Azimuthal Plane) อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เช่น อิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP 8722D

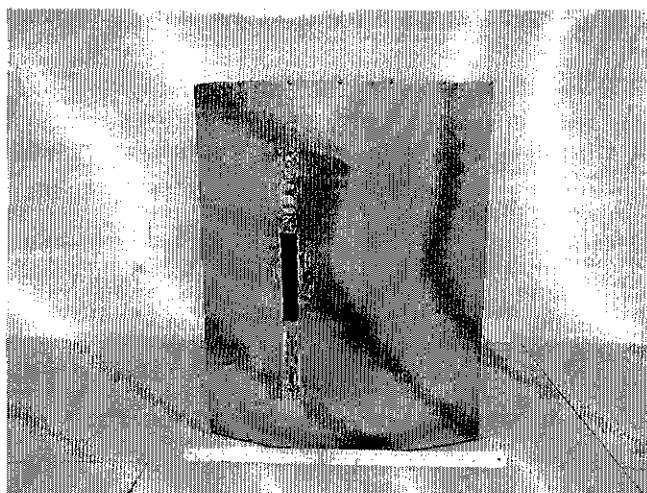
4.1 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ

จากการวิเคราะห์การคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 ของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วมที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ ณ ความถี่ 806 MHz การออกแบบพารามิเตอร์ของสายอากาศจะใช้จากเงื่อนไขที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1

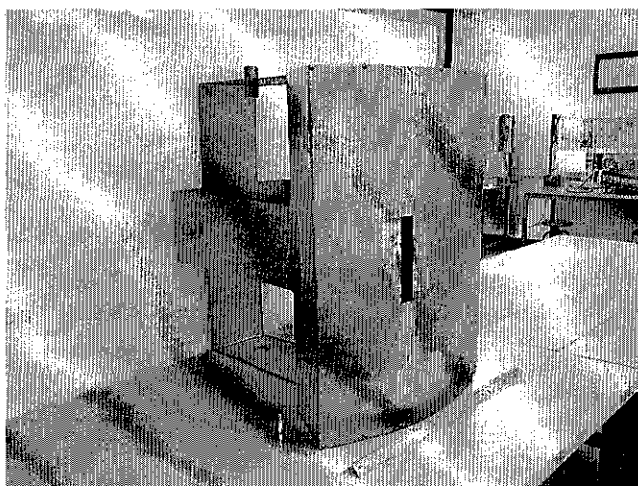
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของพารามิเตอร์ของสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพที่ ความถี่ 806 MHz
รัศมีภายในทรงกระบอก (ρ_a)	1.050λ	39.06 cm
รัศมีภายนอกทรงกระบอก (ρ_b)	1.575λ	58.59 cm
มุมเซกเตอร์ทรงกระบอกแกนร่วม (ϕ_c)	60°	60°
ความยาวโพรงทรงกระบอก (z_d)	2λ	74.4 cm
ตำแหน่งช่องเปิดในทิศทาง ϕ (ϕ_s)	22.5°	22.5°
ตำแหน่งช่องเปิดในทิศทาง z (z_s)	0.50λ	37.2 cm
ความยาวช่องเปิด (l_s)	0.50λ	18.6 cm
ความกว้างช่องเปิด (w_s)	0.086λ	3.2 cm
ตำแหน่งโพรบในทิศทาง ϕ (ϕ_f)	30°	30°
ตำแหน่งโพรบในทิศทาง z (z_f)	*	37.2 cm
ความยาวโพรบ (l_f)	0.25λ	9.3 cm

สายอากาศต้นแบบสร้างขึ้นจากสังกะสีขึ้นรูปให้มีรูปทรงเป็นท่อนำคลื่นแบบเซกเตอร์รูปทรงกระบอก ดังภาพถ่ายในรูปที่ 4.1



(ก) ภาพถ่ายด้านหน้า



(ข) ภาพถ่ายด้านข้าง

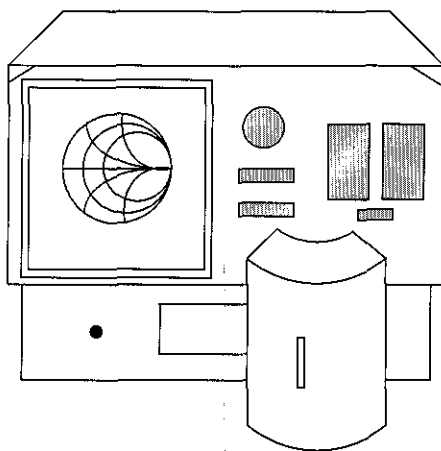
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายสายอากาศต้นแบบ

โครงสร้างดังกล่าวถูกเชื่อมต่อกันด้วยการบัดกรีด้วยตะกั่ว ช่องเปิดถูกตัด ณ พื้นผิวภายนอกของโพรงโดยใช้เลื่อยไฟฟ้าขนาดเล็ก และถูกกระตุ้นด้วยโพรบไฟฟ้าเส้นตรง ซึ่งทำมาจากทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร ผ่านทางขั้วต่อชนิด N (N-type connector) ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เช่น อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน และ แบบรูปการแผ่พลังงาน ถูกวัดโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP 8722D

4.2 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เช่น อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน ทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP 8722D การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศได้แสดงในรูปที่ 4.2

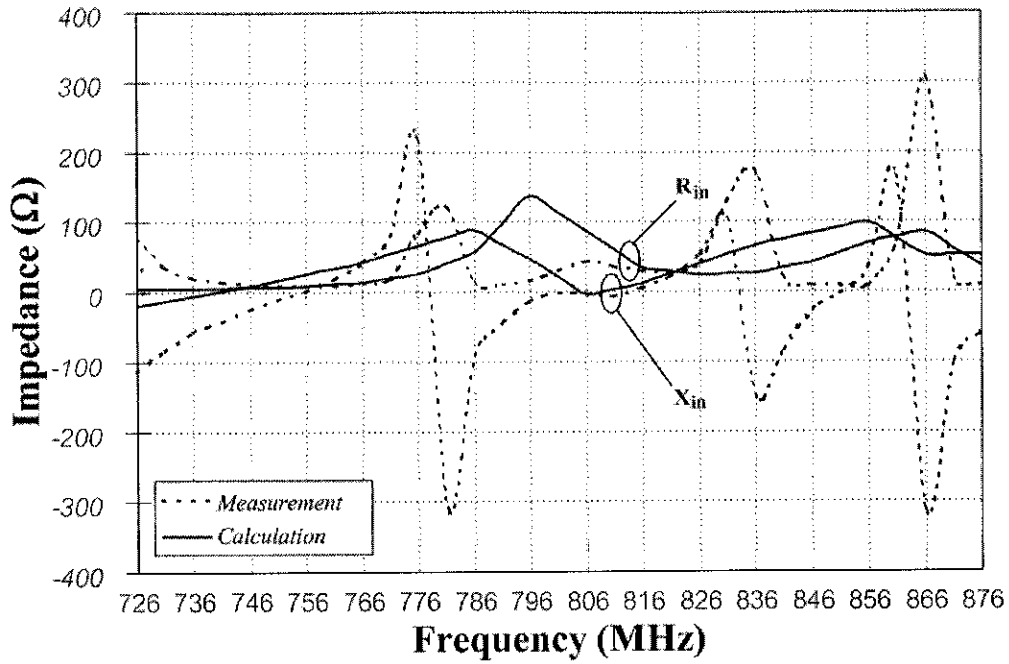
Network Analyzer



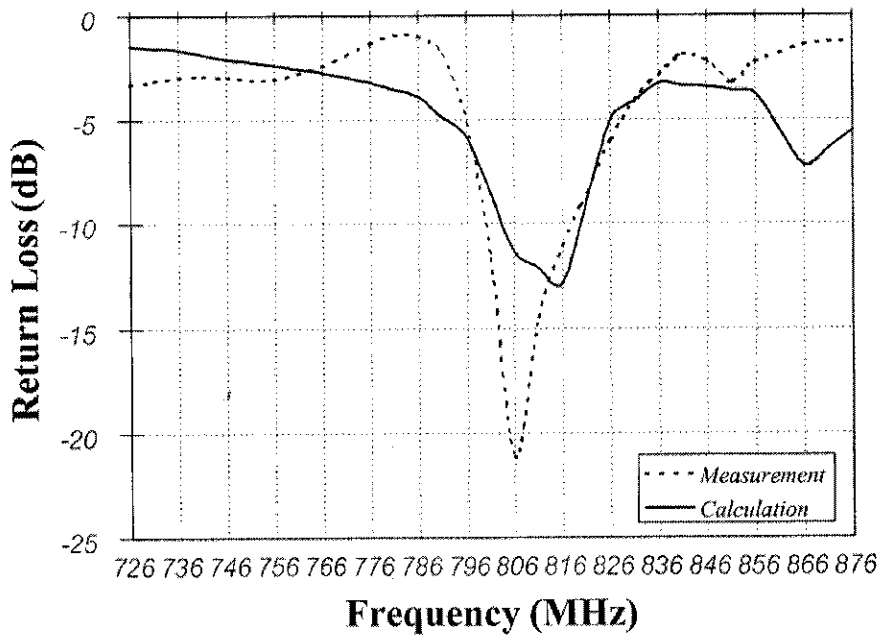
รูปที่ 4.2 แสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

รูปที่ 4.3 (ก), (ข) และ (ค) แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (NEC2) กับค่าที่ได้จากการวัดจริง เส้นทึบแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ ในขณะที่เส้นประแสดงผลที่ได้จากการวัด การแสดงพฤติกรรมของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน จะอยู่ในช่วง 20% ของความกว้างแถบ คือช่วงความถี่ 726 ถึง 876 MHz

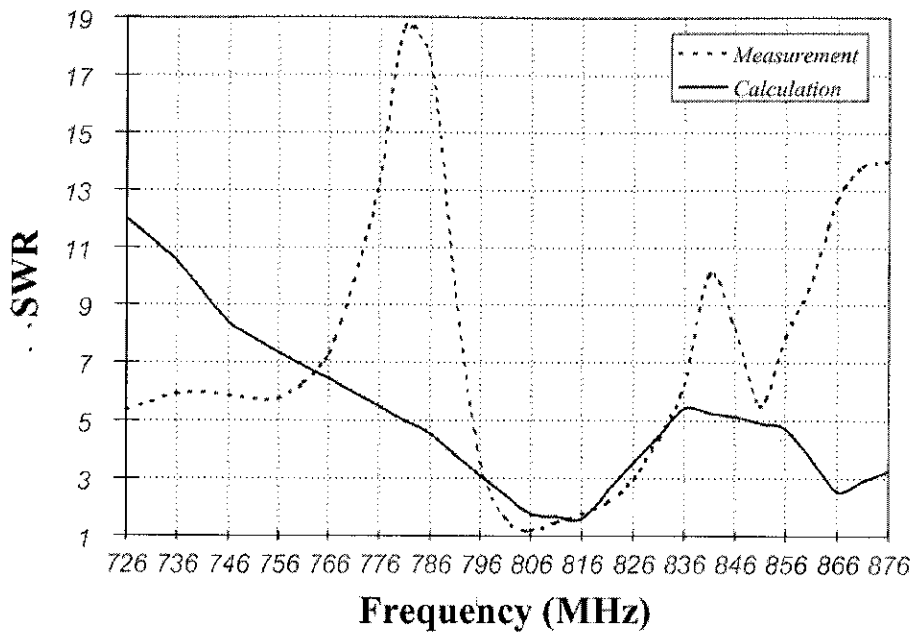
ในรูปที่ 4.3 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากับความถี่ พบว่า ณ ที่ความถี่เริ่มต้น คือ 726 MHz ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ามีค่าเท่ากับ $75.72-j112.57 \Omega$ จากนั้นจะลดลงช่วงระยะหนึ่ง แล้วขึ้นสู่ค่าที่สูงสุดค่าแรกที่ความถี่ 781 MHz การเปลี่ยนแปลงลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นอีก 3 ช่วง ค่าสูงสุดลำดับถัดมาคือ 806, 836 และ 866 MHz ตามลำดับ สำหรับค่ารีแอกแตนซ์จะเริ่มจากค่าลบมากๆ คือ -112.57Ω และจะมีค่าสูงสุดที่ความถี่ 776 MHz จากนั้นกลับมามีค่าเป็นลบและบวกสลับกันไป ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์จำนวนทั้งสิ้น 6 จุด ได้แก่ 753.5, 778.5, 813.5, 833.5, 853.5 และ 863.5 MHz ตามลำดับ ณ ที่ความถี่ใช้งาน 806 MHz ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ามีค่าเป็น $42.889-j3.0488 \Omega$ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน รูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) สังเกตได้ว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ณ ความถี่ใช้งาน 806 MHz ประมาณ -9.789 dB และ อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณอยู่ 0.5662



(ก) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า



(ข) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

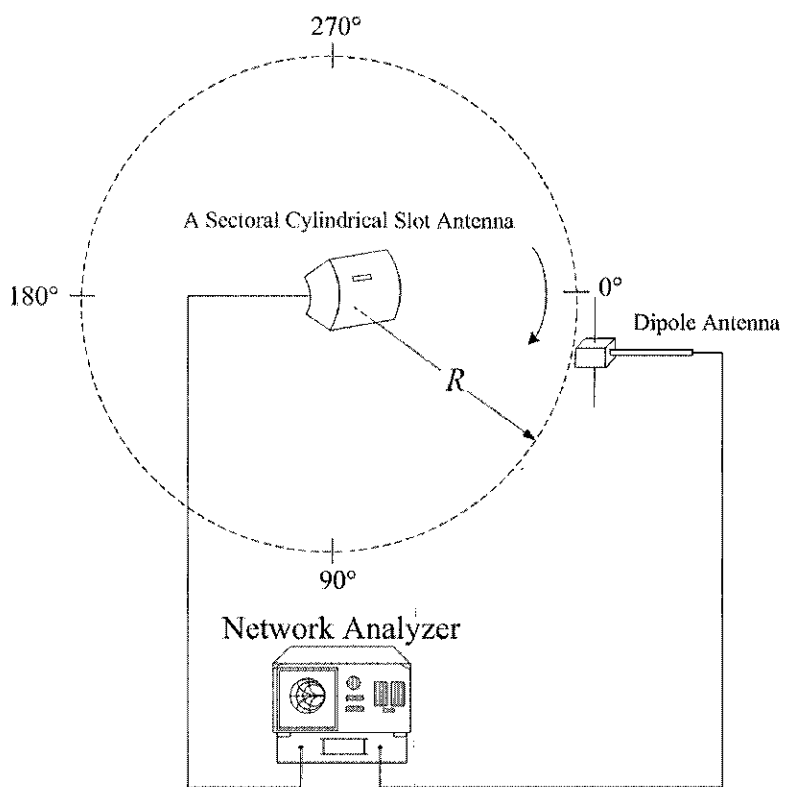


(ค) อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

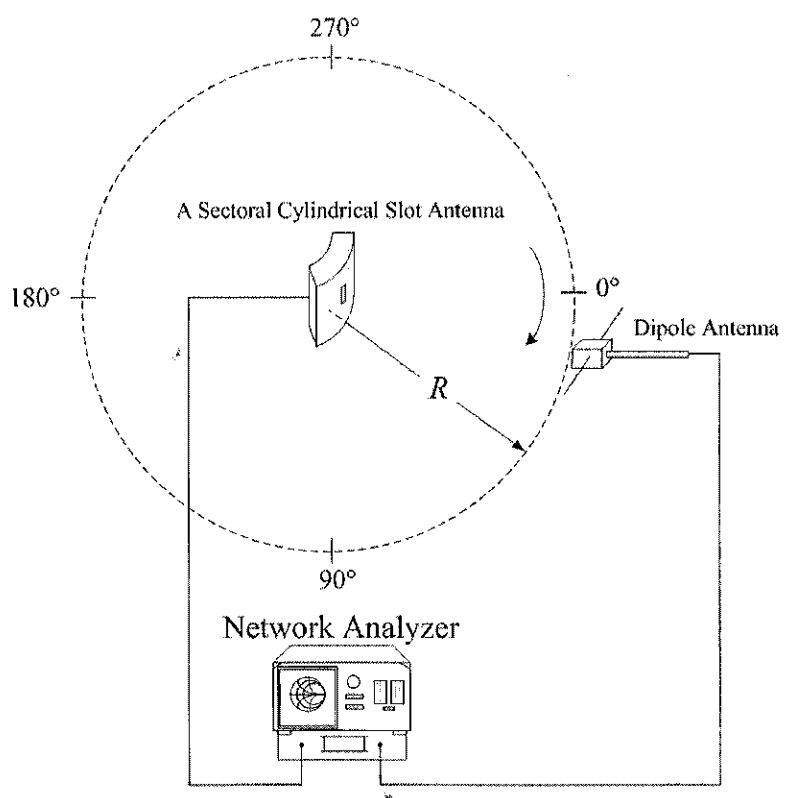
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลจากการคำนวณกับการวัด

4.3 แบบรูปการแผ่พลังงาน

การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานกระทำ ณ ห้องปฏิบัติการ ในช่วงสนามระยะไกลคือ 5 เมตร โดยให้สายอากาศทดสอบเป็นตัวส่งคลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้น เนื่องจากสายอากาศดังกล่าวมีขนาดใหญ่การเคลื่อนที่สามารถกระทำได้ยาก และใช้สายอากาศไดโพลที่มีอัตราขยาย 2 dB หมุนรับคลื่นที่ส่งออกมา โดยหมุนทีละ 5° จนกระทั่งหมุนครบรอบ 360° การวัดในลักษณะนี้ ทำให้สามารถค่าสูงสุดของลำคลื่นมุมยก (Elevational Beam Peak) ในระนาบ xz ได้ ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวตั้ง (Vertically Polarized Pattern) จะมีมุมในการวัดอยู่ระหว่าง 0° และ 360° ดังแสดงในรูปที่ 4.4 สำหรับการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xy ระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งกระทำที่สนามระยะไกลเช่นเดียวกันกับแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xz จากนั้นจะหมุนสายอากาศไดโพลทีละ 5° จาก 0° ถึง 360° ดังแสดงในรูปที่ 4.5

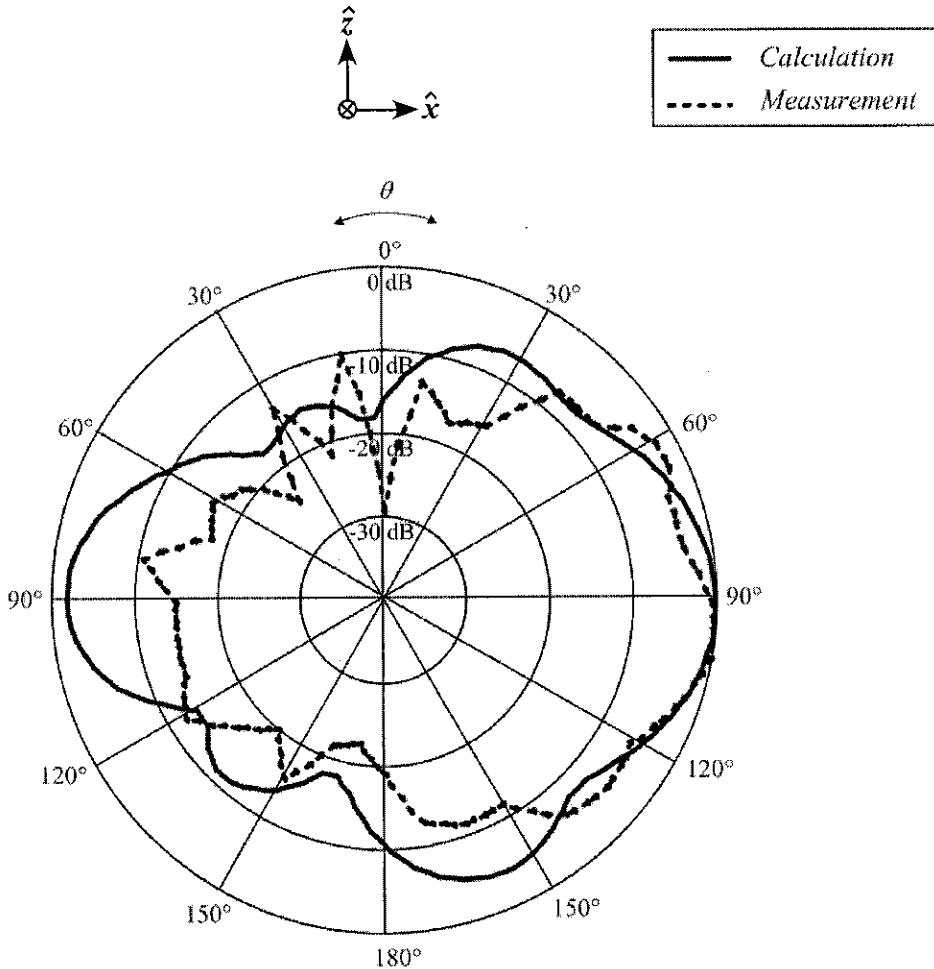


รูปที่ 4.4 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xz



รูปที่ 4.5 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xy

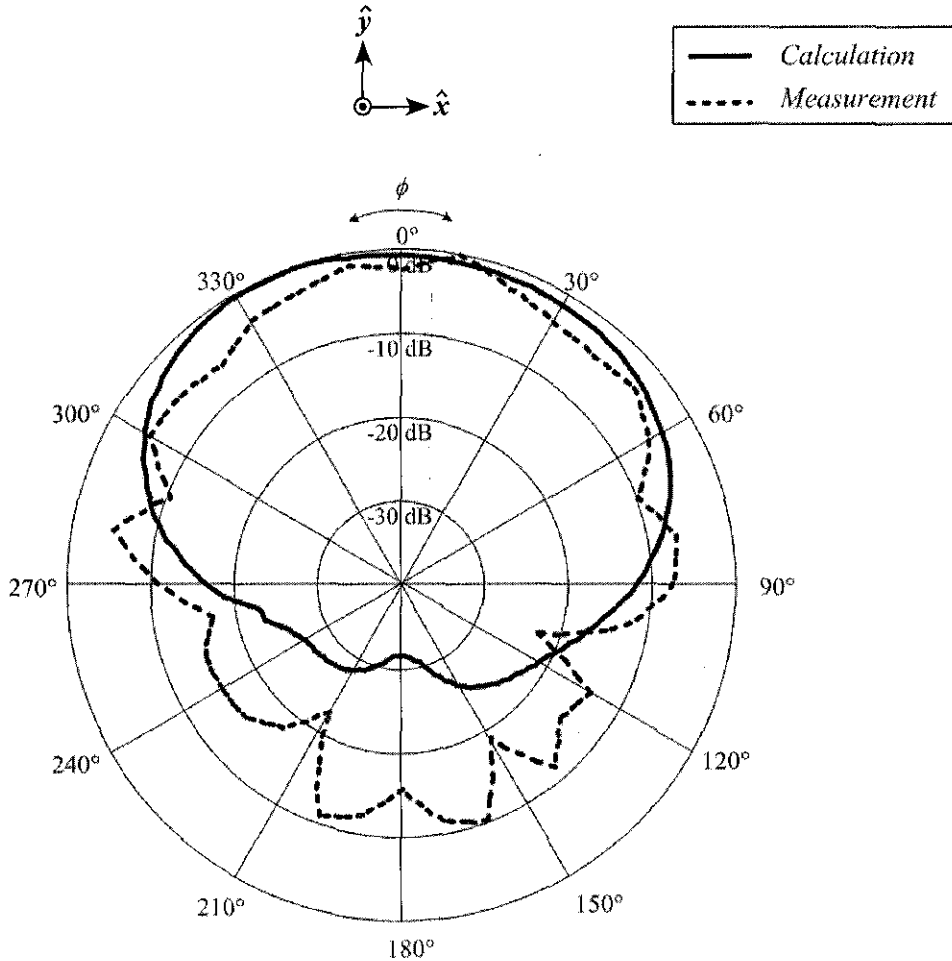
รูปที่ 4.6 แสดงผลแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xz ที่ได้จากการทดลอง และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xz ระหว่างผลที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณ

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณ จากรูปที่ 4.6 สังเกตได้ว่าค่าสูงสุดของลำคลื่นจะอยู่ที่บริเวณใกล้ๆ 90° ผลที่ได้จากการวัดเกิดพูข้าง (Side Lobe) มากกว่าการคำนวณ เมื่อพิจารณาที่ความกว้างลำครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth) คือ ในระนาบหนึ่งๆ ที่ประกอบด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุดและที่มุมซึ่งอยู่ระหว่างสองทิศทาง ค่าความเข้มของการแผ่พลังงานมีค่ากำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุดของมัน โดยพิจารณาจากความกว้างของลำคลื่นที่มีค่า 3 dB พบว่าแคบกว่าแบบรูปที่ได้จากการคำนวณ โดยผลที่ได้จากการคำนวณมีความกว้างลำครึ่งกำลังอยู่ที่ 61° ซึ่งอ้างอิงจากตำแหน่ง 116° และ 55° ในขณะที่ผลจากการวัดมีค่ามีความกว้างลำครึ่งกำลังอยู่ที่ 45° ซึ่งอ้างอิงจากตำแหน่ง 115° และ 70°

รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xy ระหว่างผลที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณ ค่าสูงสุดของลำคลื่นอยู่ที่ 0° เมื่อพิจารณาที่ความกว้างลำคลื่นกำลัง ผลที่ได้จากการคำนวณจะอยู่ที่ 155° โดยอ้างอิงจากตำแหน่ง 220° และ 15° ส่วนผลจากการวัดมีค่ามีความกว้างลำคลื่นกำลังอยู่ที่ 130° โดยอ้างอิงจากตำแหน่ง 280° และ 50° และผลที่เกิดจากการวัดมีพู่หลัง (Back Lobe) จำนวนมากกว่าการคำนวณ



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบ xy ระหว่างผลที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณ

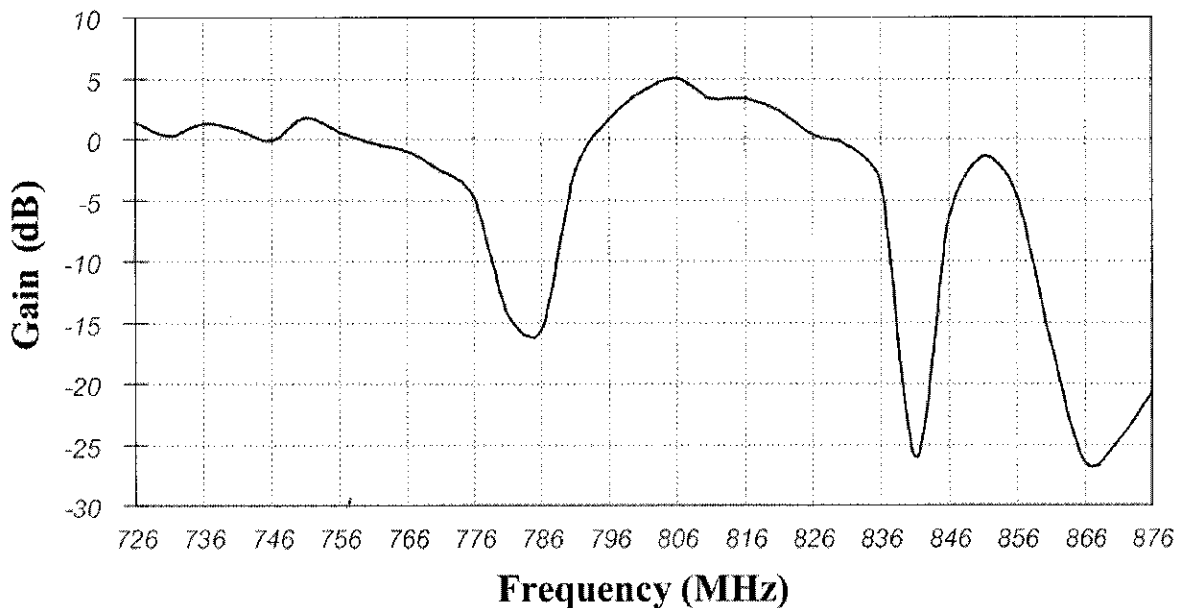
4.4 ความกว้างแถบของสายอากาศ

ความกว้างแถบของสายอากาศหมายถึง ย่านของความถี่ที่ยังอยู่ภายในสภาวะที่สายอากาศสามารถทำงานได้ สภาวะดังกล่าวจะพิจารณาจากคุณลักษณะบางพารามิเตอร์ของสายอากาศและให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ในกรณีของสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกแกนร่วม คุณลักษณะที่จำเป็นต้องพิจารณาประกอบด้วยแบบรูปการแผ่พลังงาน และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ โดยที่อิมพีแดนซ์จะต้องแมตช์อย่างดี ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันต้องไม่เกิน 2.0 หรือค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต้องไม่

มากกว่า -10 dB เมื่อแถบความถี่มีความสอดคล้องกับทุกข้อกำหนดดังกล่าวจึงจะถือได้ว่าเป็นความกว้างแถบของสายอากาศ จากรายละเอียดข้างต้น พบว่าความกว้างแถบของสายอากาศทดสอบถูกจำกัดโดยความกว้างของอิมพีแดนซ์ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 2.25% ของความถี่ใช้งาน หรือเท่ากับ 18.135 MHz ณ ความถี่ผันแปรตั้งแต่ 726 ถึง 876 MHz

4.5 อัตราขยาย

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของสายอากาศอีกตัวหนึ่งก็คือ “อัตราขยาย” ทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP 8722D ค่าอัตราขยายคำนวณจากอัตราขยายสัมบูรณ์ของสายอากาศ (Absolute gain) ตามทฤษฎี Three-antenna method [4] โดยใช้สายอากาศไดโพล และสายอากาศไดโพลแบบพับ (Folded dipole) เป็นสายอากาศอ้างอิง ที่ความถี่ผันแปรตั้งแต่ 726 ถึง 876 MHz จากการวัดสายอากาศทดสอบ ณ ความถี่ใช้งานพบว่ามีค่าอัตราขยายอยู่ที่ 5.03 dB และที่ในช่วงความถี่ 761-791 MHz และ 831-876 MHz จะมีค่าอัตราขยายของสายอากาศทดสอบต่ำกว่าค่าอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อัตราขยายสายอากาศทดสอบ

4.6 สรุป

การทดสอบเกี่ยวกับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และแบบรูปการแผ่พลังงาน จัดทำขึ้นมา เพื่อพิสูจน์คุณลักษณะในเชิงทฤษฎีซึ่งมาจากการคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 ปรากฏว่ามีความสอดคล้องกัน จากผลที่แสดงไว้ข้างต้นทำให้สายอากาศทดสอบสามารถนำไปใช้งานจริงได้ ณ ความถี่ใช้งานคือที่ 806 MHz (UHF TV) หรือความถี่โทรทัศน์ช่อง 69 เนื่องจากมีความกว้างแถบของสายอากาศเกินกว่าข้อกำหนดแถบความกว้างมาตรฐานของการส่งโทรทัศน์อยู่ 12.135 MHz โดยมาตรฐานการบีบอัดสัญญาณภาพและเสียงเป็นดิจิทัลก่อนส่งออกอากาศอยู่ภายใต้ขอบเขต 6 MHz ของความถี่วิทยุเท่านั้น [5]

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

โครงการฉบับนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบ สายอากาศแบบนี้มีลักษณะเด่นด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน มีความแข็งแรง รองรับกำลังงานสูงได้ และสามารถที่จะนำเซกเตอร์ของทรงกระบอกมาประกอบเป็นทรงกระบอกเต็มใบ โดยใช้ตัวแบ่งกำลังงานส่งผ่านสัญญาณด้านเข้าให้โพรบในแต่ละจุดป้อนสัญญาณซึ่งสามารถทำได้อย่างสะดวกและง่าย สายอากาศที่นำเสนอจะสร้างด้วยเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกซึ่งจะถูกเจาะเป็นร่องแคบๆ ในแนวแกนบนผิวตัวนำชั้นนอกที่ทำหน้าที่เป็นช่องเปิดเชื่อมต่อสัญญาณภายในและภายนอกโพรง ส่วนการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างโพรงและเครื่องรับส่งจะส่งผ่านโพรบเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็ก ที่อยู่ในแนวรัศมีนับจากตัวนำชั้นใน

ในเชิงทฤษฎีได้นำโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (NEC2) เข้ามาวิเคราะห์ โดยโครงสร้างของสายอากาศได้ถูกแทนด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า ในการหากระแสเหนี่ยวนำบนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด หรือสนามที่ตกกระทบ ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ้นเกิดจากแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และไกล ภาคตัดขวางเป้าเรดาร์ อิมพีแดนซ์ แอดมิตแตนซ์ อัตราขยาย และสภาพเจาะจงทิศทาง การใช้กำลังงาน และการต่อเชื่อมร่วมระหว่างสายอากาศได้

การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศในโครงการฉบับนี้จะเริ่มจากอิมพีแดนซ์ด้านเข้าและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบช่องเปิดบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบซึ่งทำให้เรามีความรู้และเข้าใจในพื้นฐานของอิทธิพลจากขนาดพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่มีต่อแบบรูปการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าในส่วนของ การออกแบบเพื่อจะนำสายอากาศไปใช้งานสิ่งสำคัญนั้นคือจะต้องทำให้สายอากาศมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบนั้นๆ และเงื่อนไขที่ได้นำมาพิจารณาในการออกแบบสายอากาศนั้นก็คือแบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีทั้งหมดทำโดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

จากบทที่ 4 ได้แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง และความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้าง จะพบว่าผลการทดสอบค่อนข้างจะใกล้เคียงกับผลการคำนวณไม่ว่าจะเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานและความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ อย่างไรก็ตามยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง อันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางการคำนวณด้วยโปรแกรม และความไม่พร้อมของเครื่องมือที่ใช้การสร้างและการทดสอบ เพื่อ

ลดความยุ่งยากและซับซ้อนวัสดุที่ใช้สร้างสายอากาศต้นแบบจึงไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม แต่ยังคงให้ผลการทดสอบที่ยอมรับได้ ในส่วนของการทดลองเนื่องจากสายอากาศทดสอบมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ดังนั้นจึงเกิดความไม่สะดวกอย่างมากในการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานเนื่องจากความสูญเสียในสายส่งสัญญาณและความไม่สมบูรณ์ของห้องทดสอบ

การนำไปใช้งานในระบบแพร่สัญญาณภาพและเสียงสำหรับสถานีส่งโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF สายอากาศแบบช่องเปิดในแนวแกนบนเซกเตอร์ของโพรงรูปทรงกระบอกที่ป้อนสัญญาณด้วยโพรบควรวจะถูกพัฒนาต่อไปในด้านจำนวนและตำแหน่งของช่องเปิดแถวลำดับที่อยู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก เพื่อให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่มีการชี้ทิศทางและความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ดีที่สุดต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] โมไนย์ ไกรฤกษ์, วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ, หน้า 270-272 , 2544.
- [2] R.Wongsan, C.Phongcharoenpanich, M.Krairiksh and J.Takada, "Impedance Characteristic Analysis of an Axial Slot Antenna on a Sectoral Cylindrical Cavity Excited by a Probe using Method of Moments," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E85-A, No.6, June 2003.
- [3] C.Phongcharoenpanich, P.Wouchoum, S.Kosulvit and M.Krairiksh, "A Horizontally Polarized Omnidirectional Beam Antenna using Array of Axial Slot on Cylindrical Surface, " Proceedings of the 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Beijing, pp.576-579, Aug. 2002.
- [4] C.A.Balanis, *Antenna Theory*, John Wiley & Sons Inc., Toronto, 1982.
- [5] International, Transmitting antenna characteristics at VHF and UHF, Recommendation ITU-R BS.1195, Telecommunication Union, 1995.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจิตตนันท์ กุลศิริ เกิดเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2523 มีภูมิลำเนาอยู่ จ. อุตรดิตถ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนอุตรดิตถ์ตรุณี จ. อุตรดิตถ์ เมื่อปี พ.ศ. 2541 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นางสาวพรรณนิภา จันโทศรี เกิดเมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2523 มีภูมิลำเนาอยู่ จ. ขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนมัธยมศึกษา จ. ขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2541 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

