ตัวแบ่งกำลังงานและตัวแปลงอิมพีแดนซ์
ชนิดสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งสำหรับอาร์เรย์อากาศแถวลำดับ

(Power Divider and Impedance Transformer Using Rigid Coaxial Line for Antenna Array)

โดย

นายนนทศรี รัตน์นิยมชัย รหัสประจำตัว B4511366

นางสาวณัฐกานต์ หารหา รหัสประจำตัว B4510178

นางสาวสุภาพร หล่อเหลี่ยม รหัสประจำตัว B4511342

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427494 โครงงานศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม

และ 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม

ประจำภาคปีการศึกษาที่ 1 และ 2 ปีการศึกษา 2548

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ.2541

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

CONTRIBUTION

ตัวแบ่งกำลังงานและตัวแปลงอิมพีแดนซ์ชนิดสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งสำหรับสายอากาศแถวลำดับ

(Power Divider and Impedance Transformer Using Rigid Coaxial Line for Antenna Array)

โดย

นายมนตรี รัตน์นิยมชัย	รหัสประจำตัว B4511366
นางสาวณัฐกานต์ หารทา	รหัสประจำตัว B4510178
นางสาวสุภาพร หล่อเหลี่ยม	รหัสประจำตัว B4511342

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427494 โครงงานศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม
และ 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม
ประจำภาคปีการศึกษาที่ 1 และ 2 ปีการศึกษา 2548
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ.2541
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Special Project in Telecommunication Report Certification
School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology

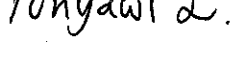
Project Title: Power Divider and Impedance Transformer using Rigid Coaxial Line for Antenna Array

Student: Mr.Montri Ratniyomchai B4511366
Miss Nattakarn Harata B4510178
Miss Supaporn Lorliam B4511342

Degree: Bachelor of Engineering

Program: Telecommunication Engineering

Project Advisor: Asst.Prof.Dr.Rangsan Wongsan

Examiners	Signatures
Asst. Prof.Dr.Rangsan Wongsan	
Asst. Prof. Punyawi Jamjareekul	
Ms. Piyapon Krachodnok	

Date: 29 March 2006 **Time:** 10.00-11.00 a.m.

Place: Telecommunication Laboratory

หัวข้อโครงงาน	Power Divider and Impedance Transformer Using Rigid Coaxial Line for Antenna Array	
(ภาษาไทย)	ตัวแบ่งกำลังงานและตัวแปลงอิมพีแดนซ์ชนิดสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งสำหรับสายอากาศแถวลำดับ	
นักศึกษา	นายมนตรี รัตน์นิยมชัย	B4511366
	นางสาวณัฐกานต์ หารทา	B4510178
	นางสาวสุภาพร หล่อเหลี่ยม	B4511342
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต	
พ.ศ.	2548	
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์	

บทคัดย่อ

โครงงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์การออกแบบ ทดสอบและประเมินคุณสมบัติของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง สำหรับเครื่องส่งวิทยุระบบวิทยุ FM ย่านความถี่ 88-108 MHz สมการที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการออกแบบสายส่งสัญญาณจะใช้สมการหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมทั่ว ๆ ไป การสร้างสายส่งสัญญาญแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งขึ้นมา เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงการสื่อสารภายใต้สภาพแวดล้อมการใช้งานจริงในระบบการสื่อสาร ณ ความถี่ปฏิบัติการ 98 MHz และทำการทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายส่งสัญญาณ เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลการคำนวณ จึงนำสายส่งสัญญาณที่ได้มาสร้างเป็นสายเฟสสำหรับสายอากาศแถวลำดับและตัวแปลงอิมพีแดนซ์ขึ้นมาใช้งาน จากผลการคำนวณและผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็น จึงนำสายส่งสัญญาณที่ได้นี้มาสร้างเป็นสายเฟสสำหรับสายอากาศแถวลำดับและตัวแปลงอิมพีแดนซ์มีคุณสมบัติเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานจริง

กิตติกรรมประกาศ

คุณความดีอันใดที่เกิดจากโครงงานฉบับนี้ ขอมอบแด่ครอบครัวของข้าพเจ้า ผู้คอยห่วงใย ให้โอกาส ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด

โครงงานเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิดเริ่มแรกของสายส่งสัญญาณแบบท่อแข็ง เพื่อใช้สำหรับภาคส่งสถานีวิทยุระบบ FM ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้แนวคิด การดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ชี้แนะข้อพกพร่องที่ข้าพเจ้าทำมองข้าม ตลอดจนฝึกฝนและสนับสนุนข้าพเจ้าให้มีความสามารถในการทำโครงงานจนสามารถนำเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องอื่นๆดังนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่สั่งสอนให้ความรู้ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณมณีรัตน์ ทุมพงษ์ เลขานุการการประจำสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้ความสะดวกในการติดต่อกับอาจารย์

ขอขอบคุณคุณประพล จาระตะคุ วิศวกรประจำอาคารเครื่องมือ 3 ที่ช่วยเป็นธุระติดต่อการเบิกจ่ายค่าอุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงการประสานงานการขอใช้เครื่องมือที่อาคารเครื่องมือ 1 ด้วย

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ เขียวสูงเนิน คุณมานพ จันทร์สนิทศรี คุณจีรวัฒน์ ด่านทองหลาง คุณวาที ทิพย์เลิศ คุณคมสัน ภายเดช และพี่ๆ ทุกคนที่ประจำอาคารเครื่องมือ 1 ที่คอยสอนการใช้เครื่องมือแต่ละประเภท รวมไปถึงการช่วยทำในบางครั้ง

พี่ๆ นักศึกษาปริญญาโท วิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่ให้การสนับสนุน และท้ายที่สุดเพื่อนนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่เป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

นายมนตรี รัตน์นิยมชัย
นางสาวณัฐกานต์ หารหา
นางสาวสุภาพร หล่อเหลี่ยม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 สรุป	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานสำหรับสายส่งสัญญาณ	4
2.3 สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม (Coaxial Line)	10
2.4 พารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม	11
2.5 การลดทอนกำลังสัญญาณในสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม	13
2.6 เรโซแนนซ์ในวงจรลิเนียร์	15
2.7 การแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในลวดตัวนำที่นำมาใช้สร้างสายส่งสัญญาณ	16
2.8 การเลือกจุดป้อนสัญญาณอินพุทให้กับวงจรเพื่อใช้งานในช่วงฮาร์โมนิก	17
2.9 สายส่งสัญญาณที่ทำหน้าที่เป็นตัวแปลงอิมพีแดนซ์	18
2.10 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์ (Transformer)	19
2.11 การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ไม่ทราบค่า	27
2.12 สรุป	29
บทที่ 3 การออกแบบและทดสอบผล	30
3.1 กล่าวนำ	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง (Rigid Coaxial)	30
3.3 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะชนิดสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิท่อแข็ง	53
3.4 สรุป	62
บทที่ 4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	63
4.1 บทสรุป	63
4.2 ข้อเสนอแนะ	64
บรรณานุกรม	65
ประวัติผู้เขียน	66

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 วงจรแสดงค่าของกระแสและแรงดันของสายส่งสัญญาณ 4

รูปที่ 2.2 ทิศทางของกำลังงานไฟฟ้า กระแส และแรงดัน 5

รูปที่ 2.3 วงจรของสายส่งสัญญาณความยาว l ถูกต่ออยู่กับโหลด Z_L 6

รูปที่ 2.4 (ก) วงจรของสายส่งสัญญาณที่ตำแหน่งตอนต้นของสาย (z=0)
(ข) วงจรสมมูล 6

รูปที่ 2.5 วงจรของสายส่งสัญญาณที่ตำแหน่งตอนต้นของสาย (z = l) 7

รูปที่ 2.6 กรณีโหลด $Z_L = 0$ 8

รูปที่ 2.7 กรณีโหลด $Z_L = \infty$ 8

รูปที่ 2.8 กรณีโหลด $Z_L' = Z_0$ 9

รูปที่ 2.9 ภาพของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม 10

รูปที่ 2.10 รูปของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม 11

รูปที่ 2.11 การเลือกจุดป้อนสัญญาณอินพุทให้กับวงจร 17

รูปที่ 2.12 ระบบการแมตช์โดยใช้สายตัวแปลง $\lambda/4$ 18

รูปที่ 2.13 การแมตช์สายส่งเข้าด้วยกัน 19

รูปที่ 2.14 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบหลายพื้นที่หน้าตัด 20

รูปที่ 2.15 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น $\lambda/4$ 22

รูปที่ 2.16 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบสองส่วนต่ออนุกรม 23

รูปที่ 3.1 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Outer 35

รูปที่ 3.2 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Inner 36

รูปที่ 3.3 ภาพวาดแสดงการออกแบบแกนของ Inner (1) 36

รูปที่ 3.4 ภาพวาดแสดงการออกแบบแกนของ Inner (2) 37

รูปที่ 3.5 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Fixed Flange 37

รูปที่ 3.6 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Insulator 38

รูปที่ 3.7 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Insulator สำหรับยึด Inner 38

รูปที่ 3.8 ภาพวาดแสดงการประกอบสายส่งสัญญาณต้นแบบความยาว $\lambda/2$ 39

รูปที่ 3.9 ภาพสายส่งสัญญาณต้นแบบความยาว $\lambda/2$ 39

รูปที่ 3.10 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Probe (Outer) 40

รูปที่ 3.11 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Probe (Inner) 40

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.12 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Insulator สำหรับยึด Inner ของ Probe 41

รูปที่ 3.13 ภาพวาดแสดงการออกแบบ A Lid Copper 41

รูปที่ 3.14 ภาพวาดแสดงการประกอบขั้วต่อสำหรับวัดทดสอบ 42

รูปที่ 3.15 ภาพขั้วต่อสำหรับวัดทดสอบ 42

รูปที่ 3.16 ภาพแสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณต้นแบบ 43

รูปที่ 3.17 ภาพผลการวัดแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดสายส่งสัญญาณต้นแบบ 43

รูปที่ 3.18 ภาพผลการวัดแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ ย่านความถี่ต่างๆ 44

รูปที่ 3.19 ภาพผลการวัดแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดสายส่งสัญญาณต้นแบบ 44

รูปที่ 3.20 ภาพผลการวัดแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ ย่านความถี่ต่างๆ 45

รูปที่ 3.21 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Inner ของตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นรูปตัว T 46

รูปที่ 3.22 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Outer ของตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นรูปตัว T 47

รูปที่ 3.23ก ภาพวาดแสดงการออกแบบ Swivel Flange (Flange) 47

รูปที่ 3.23ข ภาพวาดแสดงการออกแบบ Swivel Flange (Ring) 48

รูปที่ 3.24 ภาพวาดแสดงการประกอบตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นรูปตัว T 48

รูปที่ 3.25 ภาพตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นรูปตัว T 49

รูปที่ 3.26 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Outer ของข้อต่อชนิดงอ 90° 49

รูปที่ 3.27 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Inner ของข้อต่อชนิดงอ 90° 50

รูปที่ 3.28 ภาพวาดแสดงการประกอบของข้อต่อชนิดงอ 90° 50

รูปที่ 3.29 ภาพข้อต่อชนิดงอ 90° 51

รูปที่ 3.30 ภาพแสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ
เมื่อต่อโหลดสองตัว 51

รูปที่ 3.31 ภาพผลการวัดแสดงค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ได้จากการวัด
สายส่งสัญญาณต้นแบบ 52

รูปที่ 3.32 ภาพผลการวัดแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ ย่านความถี่ต่างๆ 52

รูปที่ 3.33 ภาพวาดแสดงตัวแปลงอิมพีแดนซ์ (Inner) 55

รูปที่ 3.34 ภาพวาดแสดงตัวแปลงอิมพีแดนซ์ (Outer) 56

รูปที่ 3.35 ภาพวาดแสดงส่วนประกอบของตัวแปลงอิมพีแดนซ์ 56

รูปที่ 3.36 ภาพตัวแปลงอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการออกแบบ 57

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.37 ภาพแสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ
เมื่อต่อโหลดสองตัวและตัวแปลงอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการออกแบบ 57
รูปที่ 3.38 ภาพผลการวัดแสดงค่าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ได้ 58
รูปที่ 3.39 ภาพผลการวัดแสดงค่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ ย่านความถี่การใช้งาน 58
รูปที่ 3.40 ภาพผลการวัดแสดงค่าการลดทอน ณ ย่านความถี่การใช้งานของ
สายส่งสัญญาณความยาว λ/2 59
รูปที่ 3.41 ภาพแสดงจุดที่ใช้สำหรับการวัดทดสอบค่ากำลังงาน 60
รูปที่ 3.42 ภาพผลการวัดแสดงค่ากำลังงาน ณ จุดที่ 3 60
รูปที่ 3.43 ภาพผลการวัดแสดงค่ากำลังงาน ณ จุดที่ 2 61
รูปที่ 3.44 ภาพผลการวัดแสดงเฟส ณ จุดที่ 2 61
รูปที่ 3.45 ภาพผลการวัดแสดงเฟส ณ จุดที่ 3 62

บทที่ 1
บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันนี้การสื่อสารและระบบข้อมูลข่าวสารนับเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง การสื่อสารที่ได้รับความนิยมสูงแบบหนึ่ง ก็คือ การสื่อสารด้วยระบบวิทยุ FM ซึ่งอยู่ในย่านความถี่ 88-108 MHz (FM Broadcasting Band) ถึงแม้ว่าการสื่อสารด้วยระบบวิทยุ FM ได้เกิดขึ้นในประเทศไทยมานาน แต่ก็ยังมีความสำคัญและเป็นที่นิยมอยู่มาก ยิ่งในปัจจุบันมีการสนับสนุนโครงการวิทยุชุมชนขึ้น ทำให้สถานีส่งวิทยุระบบ FM เกิดขึ้นอย่างมากมาย สำหรับสถานีส่งที่มีประสิทธิภาพดี ย่อมต้องสามารถส่งกระจายคลื่นออกไปให้ได้ไกลที่สุดเท่าที่จะทำได้ และสามารถให้ผู้รับรับฟังได้อย่างชัดเจน การที่จะพัฒนาอุปกรณ์เพื่อส่งคลื่นวิทยุระบบ FM ให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น อุปกรณ์ส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญมากอีก ก็คือ สายส่งสัญญาณ (Transmission Line) นั่นเอง

สายส่งสัญญาณที่ใช้งานทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สายคู่บิดเกลียว (Twisted Pair) และ สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม (Coaxial Line) ซึ่งโดยปกติสายส่งสัญญาณที่ใช้กับเครื่องส่งระบบ FM กำลังส่งต่ำที่ใช้ส่งสัญญาณในรัศมีที่ไม่ไกลนั้นจะใช้สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมธรรมดาทั่วไป ถ้าต้องการให้เครื่องส่งระบบ FM ส่งกระจายคลื่นออกไปให้มีรัศมีได้ไกลๆ และรับฟังอย่างชัดเจนจะต้องใช้เครื่องส่งที่มีกำลังสูง ทำให้ไม่สามารถใช้สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมได้เพราะเมื่อเครื่องส่งกำลังสูงส่งสัญญาณผ่านสายส่งจะทำให้เกิดความร้อนที่สายมากขึ้น ทำให้สายส่งมีคุณภาพและอายุการใช้งานลดลง ดังนั้นการส่งสัญญาณจึงต้องการสายส่งสัญญาณที่มีคุณสมบัติทางโครงสร้างที่แข็งแรงทนทานต่อเครื่องส่งระบบ FM ที่มีกำลังส่งสูง จึงทำการศึกษาและออกแบบสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง (Rigid Coaxial) มาใช้งาน และสถานีส่งระบบ FM นั้นยังต้องการสายอากาศที่มีอัตราการขยายสูงเพื่อประสิทธิภาพของสัญญาณ แต่สายอากาศแต่ละตัวมีอัตราการขยายต่ำ ซึ่งการที่เราจะทำให้สายอากาศมีอัตราการขยายสูงได้นั้นเราจะสามารถทำได้โดยวิธีการนำสายอากาศแต่ละตัวมาทำสายอากาศแถวลำดับ (Array Antenna) การที่จะทำสายอากาศแถวลำดับจะต้องสร้างสายเฟสสำหรับสายอากาศแถวลำดับโดยใช้หลักการของตัวแบ่งกำลังงาน (Power Divider) ที่มีการควบคุมเฟสของสัญญาณให้เสริมกัน มาเชื่อมต่อสายอากาศแต่ละตัว ซึ่งสายเฟสที่สร้างนั้นก็ต้องทนต่อกำลังงานของเครื่องส่งระบบ FM ที่มีกำลังส่งสูงได้ จึงสร้างสายเฟสด้วยสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งขึ้นมา

การทำสายอากาศแถวลำดับแบบเอาสายอากาศมาต่อแบบขนานกันจะส่งผลทำให้สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ลดลง นั่นก็คือส่วนของสายเฟสสำหรับสายอากาศแถวลำดับจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งจะทำให้ไม่แมตซ์กับค่าอิมพีแดนซ์สายส่ง

สัญญาณที่ต่อกับเครื่องส่ง ดังนั้นจะต้องทำการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ให้มีเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์สายส่งสัญญาณ โดยการสร้างตัวแปลงอิมพีแดนซ์ (Impedance Transformer) แบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งขึ้นมาเพิ่มเติมอีกชุดหนึ่ง

ดังนั้นเพื่อให้สายส่งสัญญาณที่ใช้ในสถานีส่งระบบ FM มีคุณสมบัติทางโครงสร้างที่แข็งแรง และทนกำลังส่งได้สูง โครงงานฉบับนี้จึงได้เน้นการออกแบบสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งเพื่อใช้สร้างสายเฟสสำหรับสายอากาศแถวลำดับและตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งขึ้นมาใช้งานแทนสายส่งสัญญาณแบบเก่าเพื่อประสิทธิภาพการทำงานที่ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาจากภาคทฤษฎีไปปฏิบัติจริง และเป็นการประยุกต์เพื่อสร้างชิ้นงานขึ้นมาและสามารถนำไปใช้กับงานจริงได้

1.2.2 เพื่อศึกษาหาความรู้และประสบการณ์เพิ่มเติมในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการทำโครงงาน

1.2.3 เพื่อพัฒนาโปรแกรมอย่างง่ายคำนวณหาขนาดสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง เพื่อสร้างสายส่งแบบแกนร่วมชนิดท่อโดยใช้ท่อทองแดงมาใช้งานจริง

1.2.4 เพื่อศึกษา ออกแบบและสร้างสายเฟส โดยใช้สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง

1.2.5 สามารถสร้างตัวแปลงอิมพีแดนซ์ชนิดสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งได้

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

ขอบเขตของโครงงาน มีดังต่อไปนี้

1.3.1 เขียนโปรแกรมคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ ของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง

1.3.2 ออกแบบสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งโดยใช้ท่อทองแดง ให้มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) เท่ากับโหลดที่เราต้องการ (50 โอห์ม)

1.3.3 คำนวณหาความยาวของสายส่งสัญญาณต้นแบบ เพื่อใช้วัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเพื่อยืนยันผลจากการออกแบบ โดยเลือกความถี่ 98 MHz เป็นความถี่กลาง

1.3.4 ทำสายเฟสสำหรับใช้กับสายอากาศแถวลำดับ โดยใช้สายส่งแบบท่อแข็ง

1.3.5 ออกแบบข้อต่อตัวที (T-connector) และข้องอฉาก 90°โดยใช้ท่อทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเดียวกัน เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของสายเฟส

1.3.6 ออกแบบและสร้างตัวแปลงอิมพีแดนซ์ชนิดสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม

1.3.7 เขียนโปรแกรม MATLAB คำนวณหาขนาดอิมพีแดนซ์และความยาวของตัวแปลงอิมพีแดนซ์

1.3.8 วัดทดสอบคุณลักษณะของอุปกรณ์ทั้งหมด เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการออกแบบ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ ที่ใช้กับสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง

1.4.2 ออกแบบสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกพิจารณา แล้วทำการสร้างสายส่งสัญญาณต้นแบบที่ความยาว $\lambda/2$ จากนั้นทำการวัดทดสอบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการศึกษาและออกแบบ

1.4.3 สร้างสายเฟสเพื่อใช้กับสายอากาศแถวลำดับ

1.4.4 ศึกษาและออกแบบเพื่อสร้างตัวแปลงอิมพีแดนซ์สำหรับใช้งานกับสายเฟสเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องส่งและสายอากาศที่

1.4.5 ทำการวัดทดสอบอุปกรณ์ทั้งหมด เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการศึกษาและออกแบบ

1.4.6 สรุปผลอุปกรณ์

1.5 สรุป

โครงงานนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง และตัวแปลงอิมพีแดนซ์เพื่อใช้กับสายเฟสของสายอากาศแถวลำดับ ที่จะนำไปใช้กับเครื่องส่งวิทยุในระบบ FM ย่านความถี่ 88-108 MHz ที่มีกำลังส่งสูงและสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

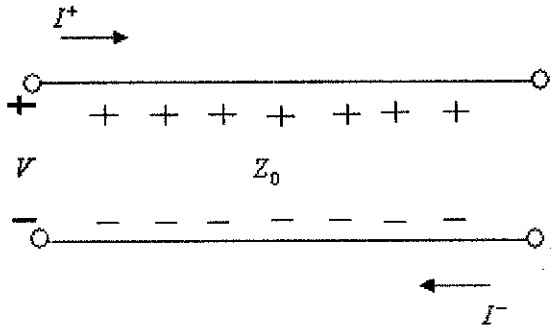
บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 กล่าวนำ

สายส่งสัญญาณ เป็นอุปกรณ์ประเภทที่เป็นตัวนำและถ่ายทอดสัญญาณไปสู่อุปกรณ์ปลายทางจะใช้สายส่งสัญญาณเป็นตัวกลางในการนำสัญญาณความถี่วิทยุจากเครื่องส่ง ไปสู่สายอากาศและนำสัญญาณจากสายอากาศมาสู่เครื่องรับ คุณสมบัติที่สำคัญของสายส่งประการหนึ่งก็คือจะต้องมีการสูญเสียกำลังงานในตัวสายส่งให้น้อยที่สุด จึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม วิธีการทำแมตซ์ชิ่งของสายส่งสัญญาณ การแปลงอิมพีแดนซ์และอื่นๆ เพื่อสามารถนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งเพื่อให้สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานสำหรับสายส่งสัญญาณ [1]

สมการที่ใช้ในการหาผลเฉลยหรือใช้แก้ปัญหาของสายส่งสัญญาณนั้นจะพิจารณาให้สายส่งสัญญาณเป็นสายส่งสัญญาณที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Line) ซึ่งผลเฉลยทั่วไปจะถูกแทนด้วยผลรวม (Superposition) ของ (+) และ (-) ทั้งค่าของกระแสและแรงดัน



รูปที่ 2.1 วงจรแสดงค่าของกระแสและแรงดันของสายส่งสัญญาณ

จากรูปที่ 2.1 จะได้

$$V = V^+ + V^- \tag{2.1}$$

$$I = \frac{1}{Z_0}\left(V^+ - V^-\right) \tag{2.2}$$

เมื่อ $I = I^+ + I^-$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.2) เขียนสมการของ I ใหม่ได้ดังนี้

$$I^+ = \frac{V^+}{Z_0} \tag{2.2ก}$$

$$I^- = -\frac{V^-}{Z_0} \tag{2.2ข}$$

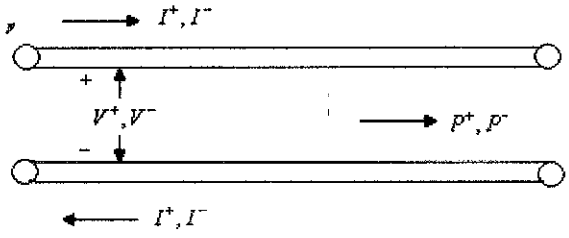
โดยที่ V^+ = แรงดันไฟฟ้าขั้วบวกที่ผิวของตัวนำด้านบน

V^- = แรงดันไฟฟ้าขั้วลบที่ผิวของตัวนำด้านล่าง

I^+ = กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางในการไหลในทิศทาง +Z ตามผิวของตัวนำด้านบน

I^- = กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางในการไหลในทิศทาง -Z ตามผิวของตัวนำด้านล่าง

เราสามารถเขียนแทนรูปวงจรอย่างง่ายได้ให่มดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงทิศทางของกำลังงานไฟฟ้า กระแส และแรงดัน

กำลังงานไฟฟ้าที่ไหลไปตามสายส่งสัญญาณก็มีความสัมพันธ์กันระหว่างของแต่ละคลื่น ซึ่งสามารถหาได้จากผลคูณของค่าแรงดันและค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรงกัน นั่นคือค่ากำลังงานที่ไหลในทิศทาง +Z และทิศทาง –Z จะสามารถคำนวณได้จาก

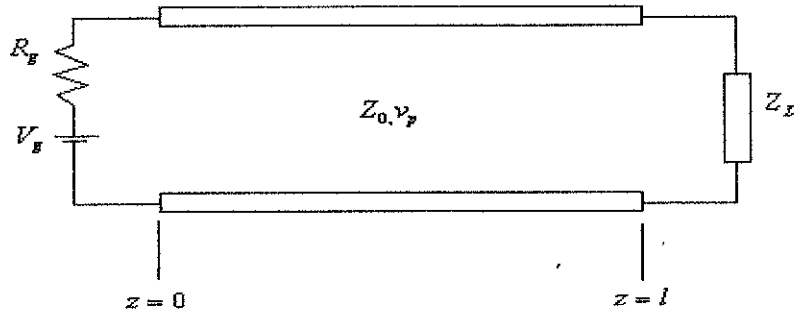
$$P^+ = V^+ I^+ = V^+ \left(\frac{V^+}{Z_0} \right) = \frac{\left(V^+\right)^2}{Z_0} \tag{2.3}$$

$$P^- = V^- I^- = V^- \left(-\frac{V^-}{Z_0} \right) = -\frac{\left(V^-\right)^2}{Z_0} \tag{2.4}$$

จากสมการที่ (2.3), (2.4) จะเห็นได้ว่า ค่าของกำลังงานไฟฟ้าที่ไหลไปในทิศทาง +Z $\left(P^+\right)$ จะมีค่าเป็นบวกเสมอและค่าของกำลังงานไฟฟ้าที่ไหลไปในทิศทาง –Z $\left(P^-\right)$ จะมีค่าเป็นลบเสมอ

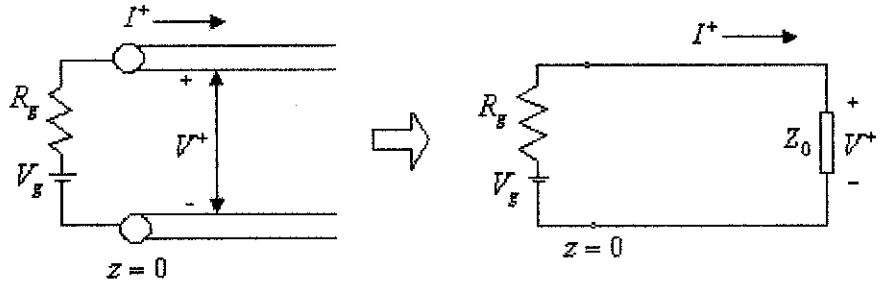
เมื่อทำการพิจารณากรณีที่สายส่งสัญญาณความยาว l ถูกต่ออยู่กับโหลด Z_L ที่ด้านปลายของสาย และมีการป้อนแรงดันด้วยแหล่งจ่ายที่มีค่าแรงดันเท่ากับ V_g ซึ่งถูกต่อแบบอนุกรมกับความต้านทานภายใน R_g และกำหนดให้สายส่งสัญญาณมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

(Characteristic Impedance) และค่าความเร็วในการแพร่กระจายคลื่น (Velocity of Propagation) เท่ากับ Z_0 และ v_p ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรของสายส่งสัญญาณความยาว l ถูกต่ออยู่กับโหลด Z_L

คลื่น (+) ที่อยู่ที่ตอนต้นของสายส่งสัญญาณ (Z=0) จะเดินทางไปยังโหลดที่อยู่ด้านปลายของสาย $(z = l)$ ซึ่งคลื่น (+) ก็จะประกอบไปด้วยแรงดัน (V^+) และกระแส (I^+) เมื่อเราพิจารณาเฉพาะในบริเวณตำแหน่งตอนต้นของสาย (z=0) เพื่อหาผลกระทบหรือผลตอบสนองชั่วครู่ (Effect of Transient) ก็จะได้วงจรดังรูปที่ 2.4



(ก) (ข)

รูปที่ 2.4 (ก) วงจรของสายส่งสัญญาณที่ตำแหน่งตอนต้นของสาย (z=0)
(ข) วงจรสมมูล

ใช้กฎของ Kirchhoff's Voltage Law รอบวงจรจะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$V_g - I^+ R_g - V^+ = 0 \tag{2.5}$$

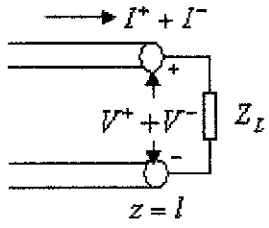
จากสมการที่ (2.2ก) แทนค่าในสมการที่ (2.5) จะได้

$$V_g - \frac{V^+}{Z_0} R_g - V^+ = 0$$

$$V^+ = V_g \frac{Z_0}{R_g + Z_0}$$
$$I^+ = \frac{V^+}{Z_0} = \frac{V_g}{R_g + Z_0} \qquad (2.6)$$

ซึ่งจากสมการที่ (2.6) สามารถเขียนวงจรสมมูลขึ้นใหม่ได้ดังรูปที่ 2.4(ข) โดยแหล่งจ่ายจะมองเห็นค่าโหลดอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ Z_0 ที่ตำแหน่ง z = 0 นี้ถือว่ามีเฉพาะคลื่น (+) เท่านั้นและ ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อกระแสในทิศทางคลื่น (+) ก็มีค่าเท่ากับ Z_0 เช่นกัน

ต่อไปเป็นการพิจารณา กรณีที่คลื่น (+) เดินทางไปยังโหลดและใช้เวลาในการเดินทางไปยังปลายของสายส่งเท่ากับ $t = l/v_p$ เราต้องการหาค่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลด Z_L ซึ่งหาได้จากกระแสที่ไหลผ่านโหลดในขณะนั้น แต่ตอนที่คลื่น (+) เดินทางมาถึงโหลด ถ้าหากว่าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าไม่เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งแล้ว ก็จะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนหรือว่าคลื่น (-) เป็นผลให้เกิดแรงดันสะท้อนกลับ $\left(V^-\right)$ และกระแสสะท้อนกลับ $\left(I^-\right)$ เดินทางกลับเข้าไปในสายส่งอีกครั้ง ดังนั้นตอนนี้แรงดันทั้งหมดที่ตกคร่อมโหลด Z_L จะมีค่าเท่ากับ $V^+ + V^-$ และกระแสทั้งหมดที่ไหลผ่านโหลด Z_L จะมีค่าเท่ากับ $I^+ + I^-$ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรของสายส่งสัญญาณที่ตำแหน่งตอนต้นของสาย ($z = l$)

จะทำให้ได้เงื่อนไขว่า

$$V^+ + V^- = Z_L\left(I^+ + I^-\right) \qquad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.2ก) และ (2.2ข) แทนลงในสมการที่ (2.7) จะได้

$$V^+ + V^- = Z_L\left(\frac{V^+}{Z_0} - \frac{V^-}{Z_0}\right)$$
$$V^- = V^+\left(\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}\right) \qquad (2.8)$$

ค่าสัมประสิทธิการสะท้อนของแรงดัน (Voltage of Reflection Coefficient) โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ Γ เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันที่สะท้อนกลับต่อแรงดันที่ตกกระทบ ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ดังนั้น

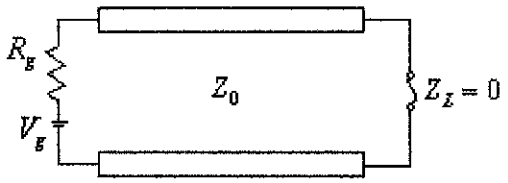
$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{2.9}$$

และค่าสัมประสิทธิการสะท้อนของกระแส คือ

$$\frac{I^-}{I^+} = \frac{-V^- / Z_0}{V^+ / Z_0} = -\Gamma \tag{2.10}$$

สังเกตได้ว่า ค่าสัมประสิทธิการสะท้อนจะมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อนเมื่อโหลดมีค่าอิมพีแดนซ์เป็นจำนวนเชิงซ้อน และค่าสัมประสิทธิการสะท้อนระหว่างแรงดันกับกระแส จะมีขนาดเท่ากัน ซึ่งมีข้อสรุปสำหรับค่าของสัมประสิทธิการสะท้อน Γ ไว้ 3 กรณีที่สำคัญ ๆ ดังนี้คือ

กรณีที่ 1 เมื่อโหลด $Z_L = 0$ หรือว่ามีการ Short-circuit ที่ด้านปลายสายส่ง

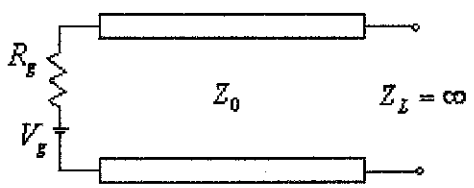


รูปที่ 2.6 กรณีโหลด $Z_L = 0$

จากสมการที่ (2.9) จะได้ว่า $$\Gamma = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1$$

แรงดันสะท้อนกลับจะมีขนาดเท่ากับแรงดันที่ตกกระทบเข้ามา แต่จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมโหลด Z_L จะมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ

กรณีที่ 2 เมื่อโหลด $Z_L = \infty$ หรือว่ามีการ Open-circuit ที่ด้านปลายสายส่ง

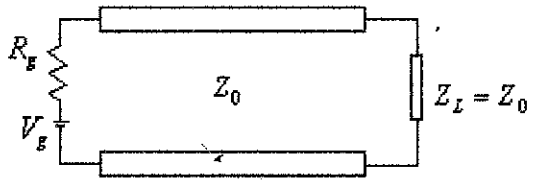


รูปที่ 2.7 กรณีโหลด $Z_L = \infty$

จากสมการที่ (2.9) จะได้ว่า $$\Gamma = \frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} = 1$$

แรงดันสะท้อนกลับมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกกระทบ และแรงดันที่ตกคร่อมโหลด Z_L จะมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วยเช่นกัน เนื่องจากไม่มีกระแสไหลผ่านโหลด Z_L

กรณีที่ 3 เมื่อโหลด $Z_L = Z_0$ หรือว่าโหลดมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง



รูปที่ 2.8 กรณีโหลด $Z_L = Z_0$

จากสมการ (2.9) จะได้ว่า $$\Gamma = \frac{Z_0 - Z_0}{Z_0 + Z_0} = 0$$

กรณีนี้ เป็นกรณีที่ไม่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณเข้ามายังสายส่งและเครื่องส่ง ทำให้ค่าอัตราส่วนของ $\frac{V^+}{I^+}$ มีค่าสม่ำเสมอคงที่ตลอดสายเท่ากับ Z_0

อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio หรือ VSWR) เรานิยามอัตราส่วนของขนาดแรงดันสูงสุดต่อขนาดแรงดันต่ำสุดเป็นอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) โดยเมื่อเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์

$$VSWR = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} \tag{2.11}$$

อย่างไรก็ดีเราสามารถให้คำจำกัดความ VSWR ให้เป็นค่าที่จุดๆ หนึ่งโดยใช้ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนดังนี้

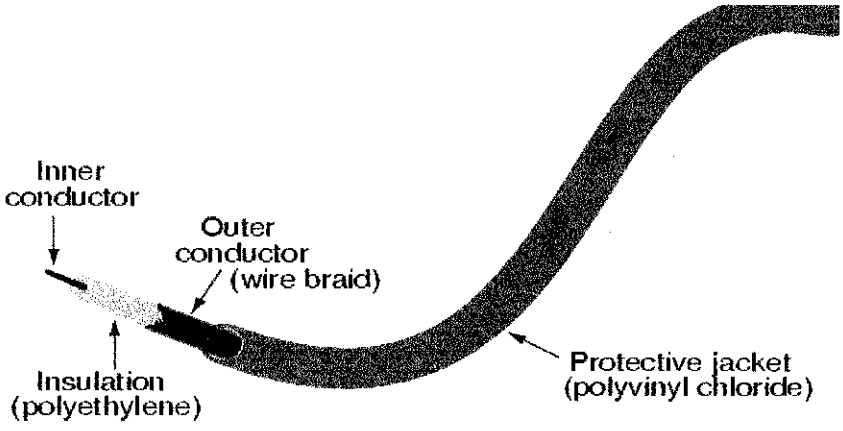
$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \tag{2.12}$$

จะเห็นได้ว่าถ้าคลื่นไม่มีการสะท้อนดังรูปที่ 2.8 ค่าของ $|\Gamma| = 0$, $Z_L = Z_0$ จะได้ $VSWR = 1$
ถ้าคลื่นมีการสะท้อนกลับหมดดังรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 ค่าของ $|\Gamma| = 1$ จะได้ $VSWR = \infty$

หลักการของสายส่งสัญญาณทั้งหมด อาศัยทฤษฎีที่ว่าด้วย ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ จะต้องมีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด $Z_g = Z_L$ จึงจะทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และทำให้เกิดการสะท้อนกลับมาของสัญญาณที่ด้านปลายสายน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วเครื่องกำเนิดสัญญาณมักจะไม่ได้ต่อกับโหลดโดยตรง หรือพูดอีกนัยหนึ่งก็คือเครื่องรับหรือเครื่องส่งติดตั้งอยู่กันคนละที่กับสายอากาศนั่นเอง ซึ่งเราจะสามารถทำการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องรับหรือเครื่องส่งกับสายอากาศได้ด้วยการใช้สายส่งสัญญาณ นั่นก็เท่ากับว่าสายสายส่งสัญญาณที่ทำนำมาต่อเข้าไปนั้นก็จะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องรับส่งและสายอากาศด้วยเช่นกัน จึงจะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ โดยที่สายส่งสัญญาณนั้นสามารถแบ่งออกได้อีกหลายประเภทด้วยกัน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม

2.3 สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม (Coaxial Line) [2]

สายส่งสัญญาณที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณวิทยุเอฟเอ็ม เป็นสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม คือสายส่งสัญญาณที่เป็นตัวนำอยู่ตรงกลาง และมีส่วนของชีลด์เป็นตัวนำห่อหุ้มอยู่ในลักษณะทรงกระบอก โดยมีฉนวนหรือไดอิเล็กตริก (Dielectric) อยู่ระหว่างตัวนำทั้งสอง คุณสมบัติของสายส่งสัญญาณประเภทนี้ คือ ในส่วนของชีลด์สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนที่จะเข้ามารบกวนในส่วนของสัญญาณ และป้องกันการแพร่กระจายคลื่นที่เล็ดลอดออกมาจากสายส่งสัญญาณได้ ลักษณะทางกายภาพของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมส่วนใหญ่มีลักษณะดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้



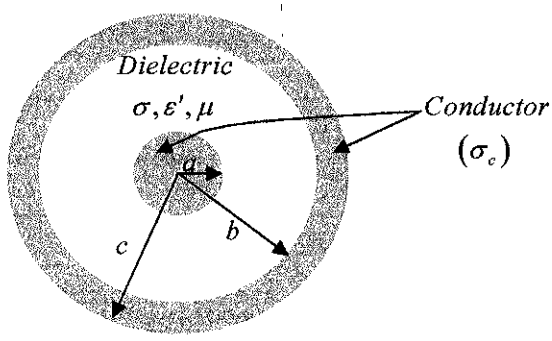
รูปที่ 2.9 ภาพของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม

1. ส่วนฉนวนชั้นนอกสุด เป็นส่วนที่ใช้ห่อหุ้มสาย เพื่อป้องกันการถูกกระแทก ฉีกขาดของสายภายใน

2. ส่วนชีลด์ เป็นโลหะ อาจเป็นแผ่นหรือใช้การถักให้เป็นแผง ห่อหุ้มอยู่ชั้นนอก ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวน และป้องกันการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณออกมาภายนอก
3. ส่วนไดอิเล็กตริก เป็นตัวคั่นกลางระหว่างส่วนของ อินเนอร์และชีลด์ ส่วนนี้จะมีความสำคัญในเรื่องของการลดทอนสัญญาณด้วย ซึ่งมักจะเป็น โพลิเอทิลีน (PE) หรือโฟม
4. ส่วนส่งสัญญาณ หรืออินเนอร์ เป็นตัวนำอยู่ในส่วนด้านในสุด ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจาก อุปกรณ์ต้นทางไปยังปลายทาง

2.4 พารามิเตอร์ของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม [3]

สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมเมื่อตัดตามขวางจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีแกนร่วมกันเป็นสายเคเบิล (Cable) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม

จากรูปที่ 2.10 กำหนดให้ a เป็นรัศมีของทรงกระบอกใน
b เป็นรัศมีภายในของทรงกระบอกนอก
c เป็นรัศมีภายนอกของทรงกระบอกนอก

ค่าความจุต่อหนึ่งหน่วยความยาวของทรงกระบอกที่มีแกนร่วมมีค่าดังนี้

$$C = \frac{2\pi\varepsilon'}{\ln(b/a)} \tag{2.13}$$

ค่าสภาพยอมของ ε' ที่ใช้ควรเหมาะกับช่วงของความถี่ที่ใช้งาน

ค่าความนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่าดังนี้

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln(b/a)} \tag{2.14}$$

เมื่อ σ เป็นสภาพนำของไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างตัวนำที่ความถี่ที่กำลังใช้งาน ค่าความเหนี่ยวนำต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายเคเบิลที่มีแกนร่วมมีค่าดังนี้

$$L_{ext} = \frac{\mu}{2\pi}\ln\left(\frac{b}{a}\right) \tag{2.15}$$

เมื่อ μ เป็นสภาพให้ซึมได้ของไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างตัวนำ โดยทั่วๆ ไป μ มีค่าเท่ากับ μ_0

L_{ext} เป็นความเหนี่ยวนำภายนอก ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับฟลักซ์ภายในตัวนำทั้งสอง

พารามิเตอร์ตัวสุดท้ายที่ต้องการคือ ความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาว R ถ้าความถี่มีค่าสูงมากและความลึกจากผิวมีค่าน้อยมาก จะได้นิพจน์โดยประมาณสำหรับ R โดยการแจกแจงกระแสที่มีค่าสม่ำเสมอทั้งหมดโดยทั่วไปความลึก δ สำหรับตัวนำที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นวงกลมรัศมี a และสภาพนำ σ_c จะได้

$$R_{inner} = \frac{1}{2\pi a\delta\sigma_c} \tag{2.16}$$

เมื่อ R_{inner} เป็นความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวของตัวนำอันในซึ่งมีรัศมี a ส่วนตัวนำอันนอกซึ่งมีรัศมีภายใน b สภาพนำ σ_c และความลึกจากผิว δ จะมีความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความยาวดังนี้

$$R_{outer} = \frac{1}{2\pi b\delta\sigma_c} \tag{2.17}$$

เนื่องจากเส้นทางการไหลของกระแสผ่านความต้านทานที่ต่ออนุกรม ความต้านทานทั้งหมดจึงมีค่า

$$R = R_{inner} + R_{outer}$$
$$R = \frac{1}{2\pi\delta\sigma_c}\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{b}\right) \tag{2.18}$$

กรณีที่ $R<<\omega L$ และ $G<<\omega C$ จะได้ความต้านทานเชิงซ้อนสำหรับทรงกระบอกที่มีแกนร่วมดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L_{ext}}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L_{ext}}{C}} \tag{2.19}$$

แทนค่า L_{ext} ในสมการที่ (2.19) และจัดสมการจะได้

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\ln\left(\frac{b}{a}\right) \tag{2.20}$$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ (2.20) จะได้

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{4\pi\times10^{-7}}{8.854187817\times10^{-12}}}\times\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}(2.302585093)\log\left(\frac{b}{a}\right)$$
$$= \frac{138.059529}{\sqrt{\varepsilon_r}}\log\left(\frac{b}{a}\right)$$

ดังนั้น สมการที่ใช้สำหรับหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม คือ

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon_r}}\log\left(\frac{b}{a}\right) \qquad (\Omega) \tag{2.21}$$

2.5 การลดทอนกำลังสัญญาณในสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม

ตามโครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วม ถ้าโลหะของสายเป็นท่อโลหะทึบ เช่น ทองแดง เป็นต้น การลดทอนสัญญาณก็จะเกิดจากสารไดอิเล็กตริกที่คั่นอยู่ และเกิดจากกระแสไหลในเนื้อโลหะเท่านั้น แต่ถ้าโลหะนอกของสายเป็นแบบเส้นลวดสานโดยเฉพาะความหนาแน่นของการสานต่ำ จะทำให้มีการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการรั่วของคลื่นออกสู่ภายนอก ซึ่งเรามักเรียกว่า การสูญเสียเนื่องจากการกระจายคลื่น (Radiation Loss) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากสารไดอิเล็กตริกและเนื่องจากกระแสไหลในเนื้อโลหะเท่านั้น

2.5.1 การลดทอนสัญญาณเนื่องจากสารไดอิเล็กตริก

สารไดอิเล็กตริกโดยทั่วไปนั้นมักจะเป็นฉนวนที่ไม่สมบูรณ์แบบ คือจะมีค่าการนำไฟฟ้าค่าต่ำ ๆ อยู่ ซึ่งหมายถึงจะทำให้เกิดกระแสการนำไหลในเนื้อสารด้วย และเป็นต้นเหตุของการสูญเสีย

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กำลังสัญญาณโดยเปลี่ยนไปเป็นรูปพลังงานความร้อน ในกรณีเช่นนี้ถ้าโลหะที่ใช้ทำสายเป็นโลหะสมบูรณ์แบบ สารไดอิเล็กตริกที่ไม่สมบูรณ์แบบนี้จะไม่ส่งผลกระทบทำให้ผลเฉลยของ V เปลี่ยนไป ดังนั้นผลเฉลยต่าง ๆ ที่ได้ในหัวข้อก่อนนี้ก็ยังเหมือนเดิม โดยที่ค่าคงที่ของการส่งผ่าน γ จะถูกกำหนดจากค่าคงที่ของตัวกลางดังต่อไปนี้ ในกรณีของสารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียนี้ เรามักแสดงค่าเพอร์มิตติวิตีของสารในรูปของค่าเชิงซ้อน คือ $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon' - j\sigma/\omega$ ดังนั้นค่าคงที่ของการส่งผ่านก็จะสามารถใช้ความรู้ในเรื่องของคลื่นระนาบ ซึ่งจะได้ผลดังนี้

$$\gamma = \alpha_d + j\beta = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}} + j\omega\sqrt{\mu\varepsilon'}\left\{1+\frac{1}{8}\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon'}\right)^2\right\} \tag{2.22}$$

ค่า α_d ที่ได้นี้ก็จะเป็นค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากสารไดอิเล็กตริก ในทำนองเดียวกันค่าอิมพีแดนซ์คลื่นก็จะถูกกำหนดจากค่าเพอร์มิตติวิตีในรูปต่อไปนี้

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon' - j\varepsilon''}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon'}}\left(1 - j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^{-1/2} \tag{2.23}$$

2.5.2 การลดทอนสัญญาณเนื่องจากกระแสไหลในเนื้อตัวนำ

การบั่นทอนสัญญาณเนื่องจากกระแสไหลในเนื้อตัวนำนี้เราจะคำนวณได้โดยใช้หลักการเดียวกันกับกรณีของท่อนำคลื่น กล่าวคือ ทำการหากระแสที่ไหลบนผิวโลหะ และหาค่าลดทอนกำลังสัญญาณโดยใช้ค่าความต้านทานผิวของโลหะดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} P_l &= R_s\left[\int_0^{2\pi}\left|H_\phi\right|^2_{r=a} a\,d\phi + \int_0^{2\pi}\left|H_\phi\right|^2_{r=b} b\,d\phi\right] \\ &= \frac{2\pi R_s V_o^{\,2}}{\left[\ln(a/b)\right]^2}\left[\frac{1}{a}+\frac{1}{b}\right] \end{aligned} \tag{2.24}$$

และจากค่าการลดทอนสัญญาณต่อหนึ่งหน่วยความยาวนี้จะสามารถหาค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณในกรณีนี้ได้ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha_m = \frac{P_l}{2P} = \frac{\eta R_s}{2\ln(b/a)}\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{b}\right) \tag{2.25}$$

จากสมการที่ (2.22) และ (2.25) จะสามารถหาค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณรวมได้ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha_t = \alpha_d + \alpha_m = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'}} + \frac{\eta R_s}{2\ln(b/a)}\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{b}\right) \tag{2.26}$$

2.6 เรโซแนนซ์ในวงจรลิเนียร์ [4]

ขนาดสั้นที่สุดของลวดตัวนำที่จะก่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใช้งาน มีค่าเท่ากับค่าความยาวที่เพียงพอให้สนามไฟฟ้าเดินทางจากปลายหนึ่งไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง และกลับมาที่จุดเดิมภายในเวลาหนึ่งไซเคิล (เท่ากับ 1 ความยาวคลื่น) ถ้าเราพิจารณาที่ค่าความเร็วที่เดินทางมีค่าเท่ากับความเร็วแสง คือ 299,793,077 เมตรต่อวินาที (หรือ 983,573,087 ฟุตต่อวินาที) จะได้ว่าระยะทางเดินทางไปภายในหนึ่งไซเคิลเท่ากับค่าความเร็วแสงหารด้วยความถี่ ดังสมการคำนวณอย่างประมาณดังนี้

$$\lambda = \frac{299,800,000}{f_{(Hz)}} \qquad (m) \tag{2.27}$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น

เนื่องจากคลื่นเดินทางในลวดตัวนำสองครั้ง (ไป-กลับ) ดังนั้นขนาดความยาว (l) ที่สั้นที่สุดของลวดตัวนำ ที่คลื่นจะสามารถเดินทางได้ระยะทางเท่ากับ λ ในหนึ่งไซเคิล มีค่าเท่ากับ

$$l = \frac{149.9}{f_{(MHz)}} = \frac{\lambda}{2} \tag{2.28}$$

กล่าวได้ว่า ลวดตัวนำที่จะเกิดการเรโซแนนซ์ขนาดสั้นที่สุด มีค่าความยาวเท่ากับ $\lambda/2$ ในกรณีของสายส่งสัญญาณ เมื่อพิจารณาอย่างถี่ถ้วนจะพบว่าความเร็วแสงเป็นค่าคงที่แน่นอน การหากรณีที่จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ขึ้นนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. ปรับค่าความถี่ให้เข้ากับความยาวของลวดตัวนำที่กำหนดมาแล้ว
2. ปรับความยาวของลวดตัวนำให้เข้ากับความถี่ที่ต้องการใช้งานในทางปฏิบัติจริง ซึ่งการปรับความยาวลวดตัวนำนิยมใช้กันมากกว่า

ดังนั้นสูตรในการคำนวณหาขนาดความยาวของลวดตัวนำ ที่จะนำมาใช้เป็นสายส่งสัญญาณเพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่เดียวกันกับความถี่ใช้งานจริงของสายอากาศ สามารถคิดคำนวณจากสมการดังนี้

$$l = \frac{491.8}{f_{(MHz)}} \qquad (ft) \tag{2.29}$$

หรือ $$l = \frac{149.9}{f_{(MHz)}} \qquad (m) \tag{2.30}$$

สมการเหล่านี้นับเป็นสมการพื้นฐานสำคัญในการหาขนาดความยาวต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งมันแทนครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

2.7 การแพร่กระจายของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในลวดตัวนำที่นำมาใช้สร้างสายส่งสัญญาณ

ถ้าสมมุติให้ขนาดความยาวของลวดตัวนำในสายอากาศมีค่าอนันต์ พบว่าขนาดของแรงดันไฟฟ้า และกระแสมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการถูกลดทอนของพลังงาน รวมทั้งเปลี่ยนเป็นความร้อนภายในลวดตัวนำ เพราะเกิดจากความต้านทานภายในของตัวนำ แต่ถ้าลวดตัวนำที่นำมาใช้เป็นสายส่งสัญญาณมีขนาดสั้น ก็จะพบว่าคลื่นมีการสะท้อนกลับที่ปลายแต่ละด้าน เหมือนกับกรณีลูกบอลกระทบกำแพงแล้วกระดอนกลับมา

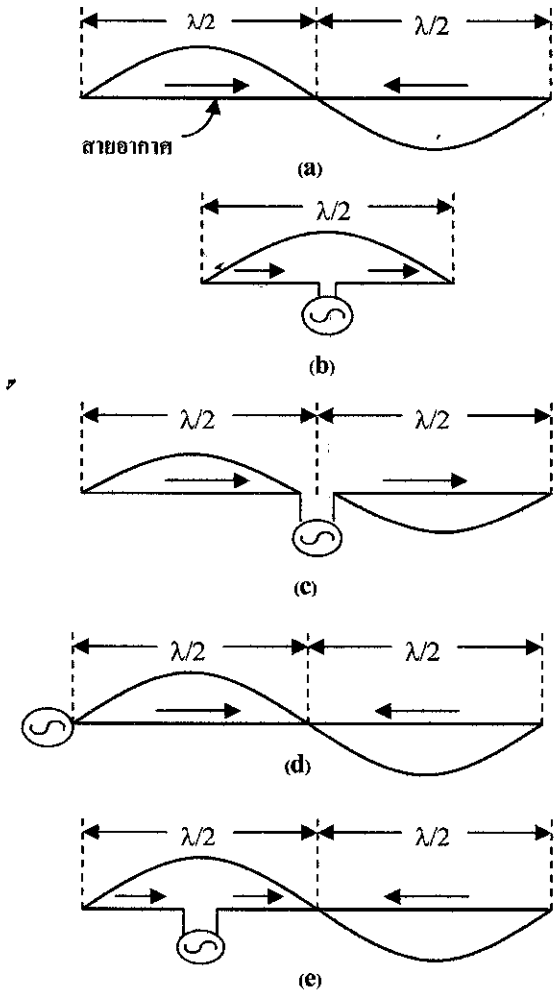
เมื่อผ่านคลื่นวิทยุเข้าไปในสายส่งสัญญาณขนาดความยาว $\lambda/2$ และจ่ายพลังงานคลื่นรูปแบบไซน์ จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อคลื่นลูกแรกเดินทางมาถึงปลายด้านหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับ ทำให้ทิศทางการไหลของกระแสเปลี่ยนไปในทิศตรงกันข้าม ขณะเดียวกับที่คลื่นลูกถัดมาเดินทางมาถึงที่ปลายลวดตัวนำพอดี ดังนั้นจะพบว่ามีเหตุการณ์ที่น่าสนใจเกิดขึ้นคือ กระแสของคลื่นทั้งสองมีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกันที่จุดปลายของลวดตัวนำ ดังนั้นผลลัพธ์ของกระแสที่จุดปลายลวดตัวนำเท่ากับศูนย์ ถ้าพิจารณาจุดถัดมาจากปลายลวดตัวนำ พบว่าขนาดของคลื่นที่เดินทางไปกับสะท้อนกลับมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการเสริมและหักล้างของกระแสขึ้น จนพิจารณาผลลัพธ์ของกระแสได้ว่าที่ระยะ $\lambda/4$ จากปลายลวดตัวนำจะมีค่าขนาดกระแสมากที่สุด

สรุปได้ว่า ในสายส่งสัญญาณแบบ $\lambda/2$ ขนาดของกระแสเท่ากับศูนย์ที่จุดปลายของลวดตัวนำ และมีค่ามากที่สุดที่จุดกึ่งกลางของลวดตัวนำ สำหรับแรงดันไฟฟ้าจะมีพฤติกรรมต่างจากกระแสไปคือ ที่ปลายทั้งสองของลวดตัวนำจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่มากที่สุด แต่คนละขั้วและถัดมาอีก $\lambda/4$ จากปลายแต่ละด้าน พบว่ามีขนาดของแรงดันไฟฟ้าเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้าม ทำให้ผลลัพธ์ที่จุดนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ทำให้สรุปโดยรวมได้ว่า

- ณ จุดที่แรงดันไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด จะเป็นจุดที่กระแสมีค่าน้อยที่สุด
- ขั้วของกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนทุก ๆ ความยาว $\lambda/2$ ของสายส่งสัญญาณ ส่วนจุดที่คลื่นนิ่งมีค่ามากที่สุด เรียกว่า ลูป (Loop) หรือแอนตี้โนด (Antinodes) และจุดที่มีค่าน้อยที่สุดเรียกว่า โนด (Node)

2.8 การเลือกจุดป้อนสัญญาณอินพุทให้กับวงจรเพื่อใช้งานในช่วงฮาร์โมนิก

สายส่งสัญญาณที่ถูกใช้งานในช่วงฮาร์โมนิกของความถี่พื้นฐาน มีประเด็นที่น่าสนใจในการใช้งานช่วงฮาร์โมนิก คือ มีการกลับทิศทางไหลของกระแสในเส้นทางเดินระยะความยาวทุก ๆ $\lambda/2$ ของสายนำสัญญาณ สามารถอธิบายได้ตามรูปดังนี้



รูปที่ 2.11 การเลือกจุดป้อนสัญญาณอินพุทให้กับวงจร

เส้นโค้งแสดงคลื่นนิ่งที่เกิดจากกระแสในลวดตัวนำ โดยเส้นโค้งบนเส้นทึบ คือ กระแสที่ไหลในทิศทางหนึ่ง ส่วนเส้นโค้งใต้เส้นทึบแสดงกระแสที่ไหลในทิศตรงข้าม สรุปว่าทิศทางการไหลของกระแสบนลวดตัวนำยาว $\lambda/2$ จะกลับทิศกันในช่วง $\lambda/2$ ต่อไป

ดังนั้นพอมีแนวคิดว่าการใช้งานช่วงฮาร์โมนิกให้ดีนั้น จำเป็นต้องมีจุดฟีดสัญญาณที่เหมาะสมบนลวดตัวนำ ซึ่งสรุปได้ว่าการใช้งานช่วงฮาร์โมนิก เราควรจะจ่ายสัญญาณเข้าที่จุดปลายด้านใดด้านหนึ่ง หรือจุดที่เป็นกระแสลูป (มีขนาดมากที่สุด) การติดตั้งแบบแนวตั้งในลักษณะเป็นแผงหรืออาร์เรย์ โดยถ้าเฟสภายในลูปถูกต้อง เราจะได้รูปแบบการแพร่คลื่นที่ต้องการ

2.9 สายส่งสัญญาณที่ทำหน้าที่เป็นตัวแปลงอิมพีแดนซ์

เราสามารถแปลงโหลดอิมพีแดนซ์ใดๆ ของสายที่มีการสูญเสียน้อยให้มีอิมพีแดนซ์ใหม่ที่ต้นสาย โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$Z_s = Z_0\left(\frac{Z_T + jZ_0 \tan \beta d}{Z_0 + jZ_T \tan \beta d}\right) \tag{2.31}$$

เมื่อ d คือ ความยาวของสาย

เราจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Z_s กับ Z_T สำหรับกรณีพิเศษบางกรณีดังนี้

1) สำหรับสายที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($d = \lambda/2$) ที่ความยาวนี้จะได้ $\beta d = \lambda$ และ $\tan \beta d = 0$ จะได้

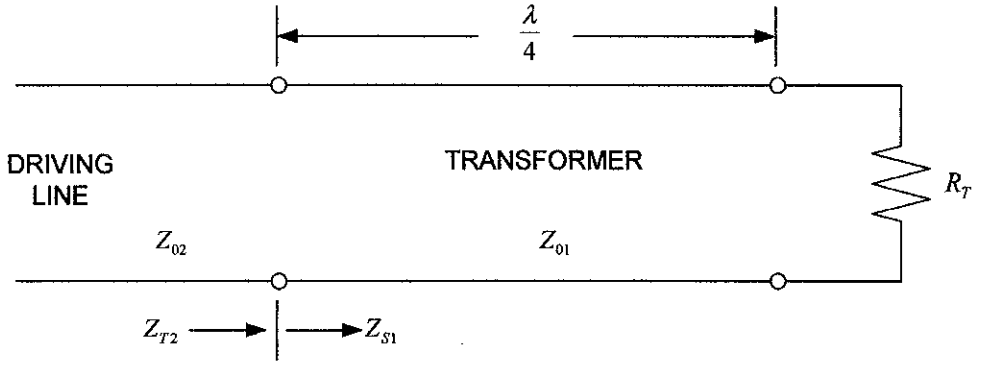
$$Z_s = Z_T \tag{2.32}$$

จะเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ที่ต้นสาย และเปรียบเสมือนว่าสายที่ต่อระหว่างโหลดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความยาวนี้ไม่มีความต้านทานเลย

2) สำหรับสายที่มีความยาวเป็นเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น (d = λ/4) ในกรณีนี้ $\beta d = \lambda/2$ และ $\tan \beta d = \infty$ จะได้

$$Z_s = \frac{Z_0^2}{Z_T} \tag{2.33}$$

สายที่มีความยาว λ/4 นี้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการแมตช์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) ดังนั้น ถ้าต้องการจะแมตช์โหลดที่มีความต้านทานเข้ากับสายส่งเส้นหนึ่งเราจะใช้ตัวแปลงซึ่งเป็นสายที่มีความยาว $\lambda/4$ ต่อเข้าระหว่างโหลดกับสายส่งเพื่อทำให้เกิดการแมตช์ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ระบบการแมตช์โดยใช้สายตัวแปลง $\lambda/4$

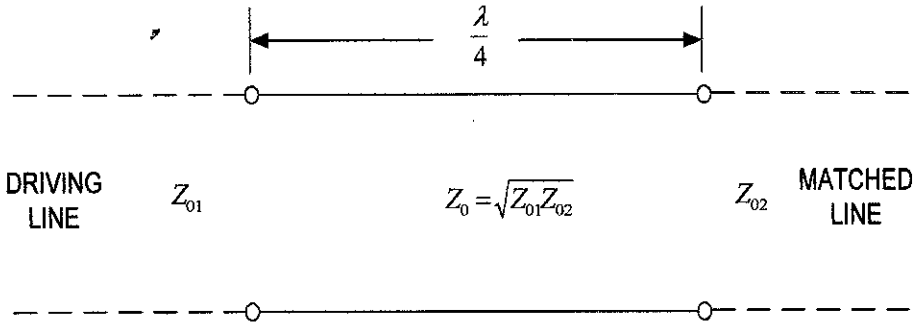
จากสมการที่ (2.33) เราจะได้

$$Z_{s1} = \frac{Z_{01}^2}{R_T} \tag{2.34}$$

และสายตัวแปลงจะต้องมีอิมพีแดนซ์ลักษณะเป็น

$$Z_{01} = \sqrt{Z_{02} R_T} \tag{2.35}$$

ในทางปฏิบัติส่วนมาก R_T ก็คืออิมพีแดนซ์ที่ต้นสายของสายที่แมตซ์แล้วอีกเส้นหนึ่ง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การแมตซ์สายส่งเข้าด้วยกัน

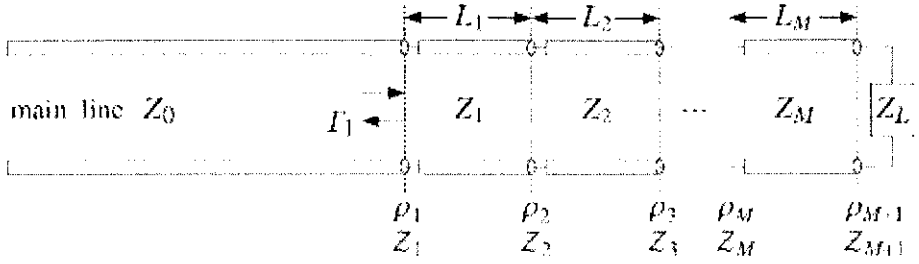
ในกรณีที่โหลดอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อน เราจะต้องเลือกตำแหน่งที่ต่อสายตัวแปลงแทรกลงไปในลักษณะอิมพีแดนซ์ที่แปลงมาจากโหลดเป็นค่าจริง คือ มีแต่ความต้านทานอย่างเดียว

2.10 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์ (Transformer) [5]

ตัวแปลงอิมพีแดนซ์มีหน้าที่หลัก คือ การแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดให้มีค่าเท่ากันกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณที่โหลดนั้นถูกต่ออยู่ด้วย เรียกวิธีการทำอย่างนี้ว่า การทำแมตซ์ซึ่งตัวแปลงอิมพีแดนซ์ก็มีวิธีในการออกแบบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ในที่นี้ขอยกตัวอย่างมาเพียงไม่กี่ชนิดดังที่จะได้กล่าวต่อไปนี้

2.10.1 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบหลายพื้นที่หน้าตัด (Multisection Transformer Lines)

ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบหลายพื้นที่หน้าตัด ได้ถูกใช้เป็นอุปกรณ์พื้นฐานในการสร้างการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ที่มีการทำแมตซ์ซึ่งในย่านความถี่ที่กว้าง ลักษณะโดยทั่วไปของตัวแปลงชนิดนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบหลายพื้นที่หน้าตัด

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าสายส่งสัญญาณแบบหลายพื้นที่หน้าตัดนี้ ประกอบไปด้วยพื้นที่หน้าตัดจำนวน M รอยต่อระหว่างสายส่งสัญญาณหลักกับโหลด ในรอยต่อที่ i_{th} จะมีคุณสมบัติเฉพาะในตัวเอง คือจะมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเฉพาะ Z_i , ความยาว l_i และค่าตัวประกอบของความเร็วซึ่งมีความหมายคล้ายกัน กับดัชนีการสะท้อนเป็น n_i ความเร็วในรอยต่อที่ i_{th} คือ $c_i = c_0/n_i$ นอกจากนี้ยังมีค่าความหนาเฟส (Phase Thickness) ซึ่งนิยามโดย $\Gamma_1(f)$ ดังสมการ

$$\delta_i = \beta_i l_i = \frac{\omega}{c_i} l_i = \frac{\omega}{c_0} n_i l_i \qquad ;i = 1,2,...,M \tag{2.36}$$

ในการกำหนดค่าความยาวทางไฟฟ้า (Electrical Lengths) จะถูกวัดให้อยู่ในหน่วยของความยาวคลื่นอากาศว่าง λ_0 หรือในหน่วยของความถี่ f_0 ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับ λ_0 คือ $f_0 = \frac{c_0}{\lambda_0}$ โดยที่ค่าความยาวทางไฟฟ้า (Electrical Lengths : L_i) สามารถหาได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$L_i = \frac{n_i l_i}{\lambda_0} = \frac{l_i}{\lambda_i} \qquad ;i = 1,2,...,M \tag{2.37}$$

โดยที่ $\lambda_i = \lambda_0/n_i$ คือค่าความยาวคลื่นภายในพื้นที่หน้าตัดตัวที่ i โดยทั่วไปแล้วค่าความยาวทางไฟฟ้าจะมีค่าเป็น 1/4 ของความยาวคลื่น $(Li = 1/4\,\lambda)$ ดังนั้นค่าของความหนาเฟส สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของ L_i โดยที่ค่าของ δ_i ในสมการที่ (2.36) จะได้ว่า

$$\delta_i = \beta_i l_i = 2\pi L_i \frac{f}{f_0} = 2\pi L_i \frac{\lambda_0}{\lambda} \tag{2.38}$$

โดยที่ค่า f เป็นค่าความถี่ปฏิบัติการและ $\lambda = c_0/f$ ก็จะเป็นค่าความยาวคลื่นของอากาศว่าง ในการหาค่าอิมพีแดนซ์คลื่น Z_i จะมีค่าต่อเนื่องตามรอยต่อ M+1 และมีความสัมพันธ์กับสมการดังกล่าวต่อไปนี้

$$Z_i = Z_i \frac{Z_{i+1} + jZ_i \tan\delta_i}{Z_i + jZ_{i+1} \tan\delta_i} \qquad ;i = M,...,1 \tag{2.39}$$

และเมื่อแทนค่าเริ่มต้นด้วยค่า $Z_{M+1} = Z_L$ ลงในสมการที่ (2.39) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ฝั่งซ้ายของแต่ละพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ $\Gamma_i = (Z_i - Z_{i-1})/(Z_i + Z_{i-1})$ ซึ่งมีรูปแบบของสมการทั่วไปคือ

$$\Gamma_i = \frac{\rho_i + \Gamma_i + 1e^{-2j\delta 1}}{1 + \rho_i \Gamma_i + 1e^{-2j\delta 1}} \qquad ;i = M,...,1 \tag{2.40}$$

และเมื่อเราแทนค่า $\Gamma_{M+1} = \Gamma_1 = (Z_L - Z_M)/(Z_L + Z_M)$ โดยที่ ρ_i คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมูลฐานที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งหาได้จาก

$$\rho_i = \frac{Z_i - Z_{i-1}}{Z_i + Z_{i-1}} \qquad ;i = 1,2,...,M+1 \tag{2.41}$$

โดยที่ $Z_{M+1} = Z_L$ และเราสามารถใช้คำสั่งใน MATLAB ที่ชื่อ multiline ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $\Gamma_1(f)$ ที่บริเวณรอยต่อซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ โดยคำสั่งในการใช้งานคือ

Gamma1=multiline(Z, L, ZL, f);

โดยที่ Z= [Z0, Z1,..., ZM] และ L= [L1, L2,..., LM); เป็นเส้นหลักและอิมพีแดนซ์ของพื้นที่หน้าตัดและความยาวทางไฟฟ้าของพื้นที่หน้าตัด

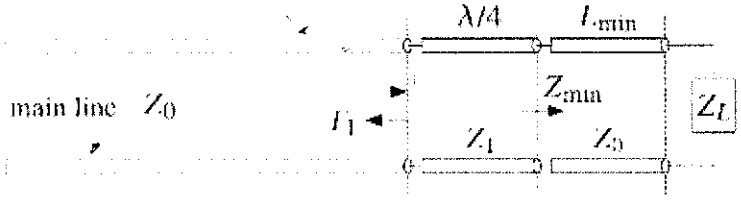
ในการใช้คำสั่ง multiline จะมีความหมายเหมือนกับสมการที่ (2.41) และคล้ายกับคำสั่ง multidiel แต่จะแยกตัวแปรอิมพีแดนซ์โหลด Z_L แยกกันกับ Input เพื่อที่จะให้มีความสัมพันธ์กับค่าความถี่

2.10.2 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น λ/4 ชนิดเอามาต่ออนุกรม

ข้อจำกัดข้อหนึ่งของตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบ $\lambda/4$ ชนิดเชฟบีเชฟ คือต้องการโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์เป็นค่าจริง มีวิธีที่สามารถแปลงโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์เป็นจำนวนเชิงซ้อนได้แต่ก็จะทำ

ให้คุณสมบัติของความกว้างแถบนั้นสูญเสียไป แก้ไขโดยการใส่ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบ $\lambda/4$ ไม่ใช่ต่อตรงโหลดเลย แต่จะเว้นระยะห่างจากโหลดในแนวเดียวกันเพื่อให้เกิดค่าแรงดัน ไฟฟ้าสูงสุดหรือต่ำสุด

สำหรับตัวอย่างในรูปที่ 2.15 เป็นกรณีของการต่อตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบ $\lambda/4$ ชนิดหนึ่งส่วนโดยต่อห่างจากโหลดมาเป็นระยะ $L_{\min}$ ณ ที่จุดนี้ค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นจะมองดูเหมือนกับเป็นตัวแปลงอิมพีแดนซ์จะต้องเป็นค่าจำนวนจริงและมีค่าเป็น $Z_{\min} = Z_0/S_L$ เมื่อ S_L เป็นค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่เกิดจากการไม่แมตซ์กันของโหลด ทางเลือกอีกทางหนึ่งก็คือเลือกจุดที่มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด $L_{\max}$ ซึ่งจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นมีค่าเป็น $Z_{\max} = Z_0 S_L$



รูปที่ 2.15 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น $\lambda/4$

ความยาวทางไฟฟ้า $L_{\min}$ หรือ $L_{\max}$ นั้นมีความสัมพันธ์กับมุมเฟส θ_L ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของโหลด Γ_L ตามสมการ

$$\Gamma_L = |\Gamma_L| e^{j\theta_L} = |\Gamma_L| e^{2\beta j l_{\max}} = -|\Gamma_L| e^{2\beta j l_{\min}} \Rightarrow Z_L = Z_0 \frac{1+\Gamma_L}{1-\Gamma_L} \qquad (2.42)$$

ซึ่งสามารถคำนวณหาความยาวทางไฟฟ้า $L_{\min}$ หรือ $L_{\max}$ ได้ตามสมการ

$$l_{\max} = \frac{\theta_L}{4\pi}\lambda \qquad ;0 \le \theta_L \le \pi \qquad (2.43ก)$$

$$l_{\min} = \frac{\theta_L + \pi}{4\pi}\lambda \qquad ;0 \le \theta_L \le \pi \qquad (2.43ข)$$

ในโปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชัน $L_{\min}$ ที่สามารถช่วยในการคำนวณหาระยะต่าง ๆ ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นต่าง ๆ กันด้วย การคำนวณหาความยาว $L_{\min}$ หรือ $L_{\max}$ ขึ้นอยู่กับความต้องการแมตซ์ความถี่ f_0 เพราะว่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนสามารถแปรเปลี่ยนค่าตามความถี่ได้ค่อนข้างรวดเร็ว ความยาวในแต่ละส่วนที่ได้ ณ ความถี่หนึ่ง ค่าอาจจะไม่ถูกต้อง ณ อีกความถี่หนึ่ง ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณอย่างง่ายได้จากสมการ

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_{\min}} = \frac{1}{\sqrt{S_L}} Z_0 \qquad (2.44ก)$$

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 Z_{\max}} = \sqrt{S_L} Z_0 \qquad (2.44ข)$$

จากการออกแบบค่าอิมพีแดนซ์ Z_1 ที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ ที่จะนำมาต่อกับส่วนอิมพีแดนซ์ส่วนสุดท้าย Z_0 ที่มีความยาวเท่ากับ $L_{\min}$ หรือ $L_{\max}$ ให้ผลตอบสนองต่อความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.15

โปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชัน qwt1 ช่วยในการคำนวณการทำแมตซ์ โดยจะให้ป้อนค่าโหลดเชิงซ้อน Z_L และค่าอิมพีแดนซ์ของสาย Z_0 แล้วจะให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ ขนาดเท่ากับ Z_1 และความยาวทางไฟฟ้า Lm ของส่วนที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_0

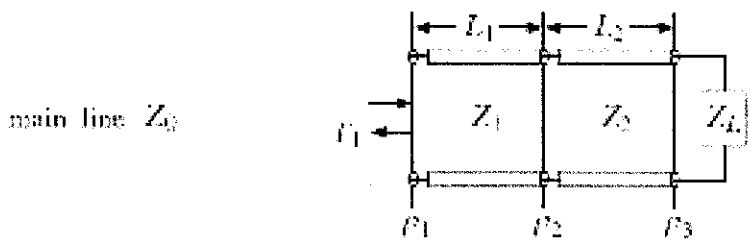
```
[Z1, Lm] = qwt(ZL, Z0,type);      % λ/4 -transformer with series section
```

โดยตรงคำว่า type ให้ใส่ตัวอักษร 'min' หรือ 'max' ขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดหรือต่ำสุด

2.10.3 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบสองส่วนต่ออนุกรม

ข้อเสียอย่างหนึ่งของตัวแปลงอิมพีแดนซ์ $\lambda/4$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการในการออกแบบนั้นไม่คงที่ ในการประยุกต์ใช้กับงานด้านไมโครเวฟโดยใช้สายส่งไมโครสสตริป จะเห็นว่าการปรับค่าอิมพีแดนซ์ทำได้โดยง่ายโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของไมโครสสตริป อย่างไรก็ตาม การแมตซ์ชิ่งสายอากาศกับเครื่องส่งนั้น โดยทั่วไปใช้สายส่งแบบแกนร่วมค่าอิมพีแดนซ์ 50 Ω, 75 Ω และไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ได้อีก

ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบสองส่วนต่ออนุกรม แสดงในรูปที่ 2.16 ใช้อิมพีแดนซ์ที่ทราบค่า 2 ตัวคือ Z_1 และ Z_2 แล้วสามารถปรับค่าความยาวทางไฟฟ้า L_1 และ L_2 เพื่อให้แมตซ์กับโหลดเชิงซ้อน Z_L ของสายนำสัญญาณหลักที่มีค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 โดยสมมุติให้ Z_0, Z_1 และ Z_2 เป็นค่าจำนวนจริง ส่วน Z_L เป็นโหลดเชิงซ้อนมีค่าเท่ากับ $Z_L = R_L + jX_L$



รูปที่ 2.16 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบสองส่วนต่ออนุกรม

การกำหนดค่าความหนาเฟส (Phase Thicknesses) ของสองส่วนโดย

$$\delta_1 = 2\pi n_1 l_1/\lambda_0 = 2\pi L_1 \tag{2.45ก}$$

$$\delta_2 = 2\pi n_2 l_2/\lambda_0 = 2\pi L_2 \tag{2.45ข}$$

และค่าผลตอบสนองทางการสะท้อน Γ_1 และ Γ_2 ที่การเชื่อมต่อใน 1 และ 2 คือ

$$\Gamma_1 = \frac{\rho_1 + \Gamma_2 e^{-2j\delta_1}}{1+\rho_1\Gamma_2 e^{-2j\delta_1}} \tag{2.46ก}$$

$$\Gamma_2 = \frac{\rho_2 + \Gamma_3 e^{-2j\delta_2}}{1+\rho_2\Gamma_3 e^{-2j\delta_2}} \tag{2.46ข}$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมูลฐาน คือ (Elementary Reflection Coefficients)

$$\rho_1 + \Gamma_2 e^{-2j\delta_1} = 0 \tag{2.47ก}$$

$$\rho_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, \quad \rho_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad \rho_3 = \frac{Z_L - Z_2}{Z_L + Z_2} \tag{2.47ข}$$

สัมประสิทธิ์ ρ_1, ρ_2 คือ จำนวนจริง ρ_3 คือ จำนวนเชิงซ้อน ซึ่งนิยามไว้ในรูปแบบเชิงขั้ว $\rho_3 = |\rho_3|e^{j\theta_3}$ เงื่อนไขของการแมตช์โดยไม่เกิดการสะท้อนคือ $\Gamma_1 = 0$ และ $\rho_1 + \Gamma_2 e^{-2j\delta_1} = 0$ หรือ

$$e^{2j\delta_1} = -\frac{\Gamma_2}{\rho_1} \tag{2.48}$$

เพราะว่าทางด้านซ้ายมีหน่วยเป็นขนาด จึงต้องมีเงื่อนไขว่า $|\Gamma_2| = |\rho_1|, or, |\Gamma_2|^2 = \rho_1^2$ ซึ่งจะสามารถเขียนได้ว่า

$$\left|\frac{\rho_2 + |\rho_3|e^{j\theta_3}e^{-2j\delta_2}}{1+\rho_2|\rho_3|e^{j\theta_3}e^{-2j\delta_2}}\right|^2 = \frac{\rho_2^2 + |\rho_3|^2 + 2\rho_2|\rho_3|\cos(2\delta_2 - \theta_3)}{1+\rho_2^2 + |\rho_3|^2 + 2\rho_2|\rho_3|\cos(2\delta_2 - \theta_3)} = \rho_1^2$$

ใช้การจัดรูป $\cos(2\delta_2 - \theta_3) = 2\cos^2(\delta_2 - \theta_3/2) - 1$ จะได้สมการ

$$\cos^2(\delta_2-\frac{\theta_3}{2})=\frac{\rho_1^2(1-\rho_2|\rho_3|)^2-(\rho_2-|\rho_3|)^2}{4\rho_2|\rho_3|(1-\rho_1^2)} \tag{2.49ก}$$

และ $$\sin^2(\delta_2-\frac{\theta_3}{2})=\frac{(\rho_2+|\rho_3|)^2-\rho_1^2(1+\rho|\rho_3|)^2}{4\rho_2|\rho_3|(1-\rho_1^2)} \tag{2.49ข}$$

การไม่รวมค่าของ ρ_1,ρ_2,ρ_3 จะเป็นผลในการแก้สมการสำหรับค่า δ_2 เพราะว่าทางด้านซ้ายมือจะต้องเป็นค่าบวก ถ้าการแก้สมการค่าของ δ_2 คงอยู่ค่าของ δ_1 จะเป็นการกำหนดจากสมการที่ (2.48) ซึ่งในเวลานี้จะได้สมการสำหรับค่าของ δ_2 มี 2 สมการตรงกับค่า ± ของ Square Root ของสมการที่ (2.49ก-ข) จะได้สมการ

$$\delta_2=\frac{1}{2}\theta_3+a\cos\left[\pm\left(\frac{\rho_1^2\left(1-\rho_2|\rho_3|\right)^2-\left(\rho_2-|\rho_3|\right)^2}{4\rho_2|\rho_3|\left(1-\rho_1^2\right)}\right)^{1/2}\right] \tag{2.50}$$

ถ้าผลของค่า δ_2 เป็นลบจะต้องมีการเลื่อนค่าทีละ π หรือ 2π เป็นการทำให้ค่าของมันเป็นค่าบวก และค่าความยาวไฟฟ้า $L_2=\delta_2/2\pi$ ทางอีกทางในการเขียนสมการที่ (2.49ก-ข) เป็นส่วนของค่าอิมพีแดนซ์จะได้สมการ

$$\cos^2\left(\delta_2-\frac{\theta_3}{2}\right)=\frac{\left(Z_2^2-Z_3Z_0\right)\left(Z_3Z_1^2-Z_0Z_2^2\right)}{Z_0\left(Z_2^2-Z_3^2\right)\left(Z_1^2-Z_2^2\right)} \tag{2.51ก}$$

$$\sin^2\left(\delta_2-\frac{\theta_3}{2}\right)=\frac{Z_2^2\left(Z_0-Z_3\right)\left(Z_1^2-Z_0Z_3\right)}{Z_0\left(Z_2^2-Z_3^2\right)\left(Z_1^2-Z_2^2\right)} \tag{2.51ข}$$

เมื่อ Z_3 เป็นเหมือนกับค่า Resistive การกำหนดเทอมของโหลดอิมพีแดนซ์มีความสัมพันธ์ คือ

$$\frac{Z_3-Z_2}{Z_3+Z_2}=|\rho_3|=\left|\frac{Z_L-Z_2}{Z_L+Z_2}\right| \tag{2.52}$$

ถ้า Z_L เป็นจำนวนจริงและมีค่าใหญ่กว่า Z_2 ดังนั้น $Z_3=Z_L$ และถ้า Z_L มีค่าเล็กกว่า Z_2 จะได้ว่า $Z_3=Z_2^2/Z_L$ จากสมการที่ (2.51) สามารถแสดงให้ชัดเจนขึ้นได้ดังสมการ

$$\cos^2\left(\delta_2-\frac{\theta_3}{2}\right)=\frac{Z_3Z_1^2-Z_0^3}{\left(Z_3+Z_0\right)\left(Z_1^2-Z_0^2\right)} \tag{2.53ก}$$

$$\sin^2\left(\delta_2 - \frac{\theta_3}{2}\right) = \frac{Z_0\left(Z_1^2 - Z_0 Z_3\right)}{\left(Z_3 + Z_0\right)\left(Z_1^2 - Z_0^2\right)} \qquad (2.53ข)$$

การพิสูจน์จะง่ายเมื่อแสดงเงื่อนไขของสมการเป็นค่าโหลดอิมพีแดนซ์กับ Z_3 มีค่าเท่ากัน

$$\frac{Z_0^3}{Z_1^2} \le Z_3 \le \frac{Z_1^2}{Z_0}, \qquad \text{ถ้า} \qquad Z_1 > Z_0 \qquad (2.54ก)$$

$$\frac{Z_1^2}{Z_0} \le Z_3 \le \frac{Z_0^3}{Z_1^2}, \qquad \text{ถ้า} \qquad Z_1 < Z_0 \qquad (2.54ข)$$

ทั้งหมดจะต้องรวมเป็นเงื่อนไขเดียว

$$\frac{Z_0}{S^2} \le Z_3' \le Z_0 S^2, \qquad S = \frac{\max\left(Z_1, Z_0\right)}{\min\left(Z_1, Z_0\right)} = swr\left(Z_1, Z_0\right) \qquad (2.55)$$

โปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชัน twosect ช่วยในการออกแบบมีค่าอินพุทเป็นค่าอิมพีแดนซ์ Z_0, Z_1, Z_2 และจำนวนเชิงซ้อน Z_L และค่าเอาท์พุทเป็นคำตอบ 2 คำตอบสำหรับค่า L_1 และ L_2 โดยจะแสดงผลออกมาในรูปของเมตริกซ์ขนาด 2x2 ซึ่งแต่ละแถวเป็นชุดคำตอบของค่า L_1 และ L_2 ที่จับคู่กันไว้

```
L12 = twosect (Z0, Z1, Z2, ZL);     % two-section series impedance transformer
```

ตัวอย่างของโค้ดที่ได้กล่าวถึงการใช้ฟังก์ชัน คือ

```
r1 = (Z1-Z0)/ (Z1+Z0);
r2 = (Z2-Z1)/ (Z2+Z1);
r3 = abs ((ZL-Z2)/ (ZL+Z2));
th3 = angle ((ZL-Z2)/ (ZL+Z2));
s = ((r2+r3) ^2 - r1^2*(1+r2*r3) ^2) / (4*r2*r3*(1-r1^2));
if (s<0)|(s>1), fprintf('no solution exists'); return; end
de2 = th3/2 + asin(sqrt(s)) * [1;-1]; % construct two solutions
G2 = (r2 + r3*exp (j*th3-2*j*de2)). / (1 + r2*r3*exp (j*th3-2*j*de2));
de1 = angle (-G2/r1)/2;
L1 = de1/2/pi; L2 = de2/2/pi;
L12 = mod ([L1, L2], 0.5); % reduce modulo λ/2
```

2.11 การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ไม่ทราบค่า

โดยปกติสายส่งสัญญาณมักจะถูกต่ออยู่กับโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่ทราบค่าอยู่ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดดังกล่าวมักจะต้องทำการหาค่าเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในการหาค่าอิมพีแดนซ์นั้นสามารถทำได้โดยการวัดค่าของแรงดันตามสายส่งสัญญาณ

ในการหาค่า SWR สามารถทำได้โดยการวัดค่าขนาดของ $|V_l|$ ซึ่งเป็นค่าขนาดของแรงดันที่ความยาว l ต่างๆ พร้อมทั้งทำการหาค่าขนาดของแรงดันที่สูงที่สุด $V_{\max}$ และต่ำที่สุด $V_{\min}$ จากนั้นเมื่อได้ค่าของ SWR มาแล้วก็สามารถหาค่าขนาดของสัมประสิทธิ์การสะท้อน $|\Gamma_L|$ ได้

สำหรับค่ามุมเฟสของ Γ_L สามารถหาได้จากตำแหน่งความยาวของสายนำสัญญาณที่มีค่าแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุด และเมื่อกำหนดให้ θ_L เป็นค่ามุมเฟสแล้ว ดังนั้นค่าของ Γ_L คือ $\Gamma_L = |\Gamma_L| e^{j\theta_L}$ จากนั้นจะได้ว่า

$$|V_l| = |V_{L+}^{*}||1+\Gamma_l| = |V_{L+}||1+\Gamma_L e^{-2j\beta l}| = |V_{L+}||1+|\Gamma_L| e^{j(\theta_L - 2\beta l)}| \tag{2.56}$$

ณ ทุกๆ ตำแหน่งของ l ที่ทำให้ $\theta_L - 2\beta l = \pm 2\pi n$ โดยที่ n เป็นจำนวนจริง จะทำให้ได้ $\Gamma_l = |\Gamma_L|$ และ $|V_l|$ จะมีค่าเท่ากับ $V_{\max}$ และในทำนองเดียวกันที่ ณ ตำแหน่งใดๆ ของค่า l ที่ทำให้ได้ $\theta_L - 2\beta l = \pm(2n+1)$ จะทำให้ได้ $\Gamma_l = -|\Gamma_L|$ และ $|V_l|$ จะมีค่าเท่ากับ $V_{\min}$

สำหรับค่าสูงสุดของแรงดันที่ตำแหน่งถัดไปและค่าต่ำสุดของแรงดันที่ตำแหน่งถัดไปจะเกิดขึ้นที่ ณ ตำแหน่งทุกๆ $\lambda/2$ ถัดไป และจากตำแหน่งที่มีค่าแรงดันสูงสุดไปจนถึงตำแหน่งที่เกิดค่าแรงดันต่ำสุดจะห่างกันอยู่ $\lambda/4$ ดังนั้นจะได้ว่า $|l_{\max} - l_{\min}| = \lambda/4$

เมื่อสามารถหาค่าตำแหน่งหรือระยะทางของ $l_{\max}$ และ $l_{\min}$ ได้ จะทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่มีความสัมพันธ์กับค่าตำแหน่งได้จาก $\Gamma_L = \Gamma_l e^{2j\beta l}$ โดยที่ $\Gamma_l = \pm|\Gamma_L|$ ซึ่งการจะใช้เครื่องหมายบวกหรือลบขึ้นอยู่กับระยะทางของ l ว่าเป็นระยะทางที่ทำให้เกิดแรงดันสูงสุดหรือแรงดันต่ำสุด และจากค่า Γ_L ที่ได้รวมกับความรู้ทางด้านค่าอิมพีแดนซ์ของสาย Z_0 จะทำให้สามารถหาค่าของอิมพีแดนซ์ของโหลด Z_L ได้ ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\Gamma_L = |\Gamma_L| e^{j\theta_L} = |\Gamma_L| e^{2j\beta l_{\max}} = -|\Gamma_L| e^{2j\beta l_{\min}} \Rightarrow Z_L = Z_0 \frac{1+\Gamma_L}{1-\Gamma_L} \tag{2.57}$$

ถ้า $0 \le \theta_L \le \pi$ การหาค่าตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุดที่อยู่ใกล้เคียงกับโหลดมากที่สุดสามารถหาได้จากเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\theta_L - 2\beta l_{\max} = 0 \quad \text{และ} \quad \theta_L - 2\beta l_{\min} = -\pi \tag{2.58}$$

ดังนั้นจะสามารถหาตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดได้ดังนี้

$$l_{\max} = \frac{\theta_L}{4\pi}\lambda \text{ และ } l_{\min} = \frac{\theta_L + \pi}{4\pi}\lambda \text{ โดยที่ } 0 \le \theta_L \le \pi \tag{2.59}$$

ในทำนองเดียวกันถ้า $-\pi \le \theta_L \le 0$ แล้วจำเป็นต้องแก้สมการที่เป็นเงื่อนไขดังนี้

$$\theta_L - 2\beta l_{\max} = -2\pi \text{ และ } \theta_L - 2\beta l_{\min} = -\pi \tag{2.60}$$

ดังนั้นตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดคือ

$$l_{\max} = \frac{\theta_L + 2\pi}{4\pi}\lambda \text{ และ } l_{\min} = \frac{\theta_L + \pi}{4\pi}\lambda \text{ โดยที่ } -\pi \le \theta_L \le 0 \tag{2.61}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่าของ $l_{\max}$ หรือ $l_{\min}$ ที่วัดได้ทั้งคู่จะมีตัวแปร θ_L ที่จำเป็นต้องทำการแก้สมการเพื่อให้ได้ค่าของ θ_L ออกมา แต่ในการเลือกใช้สมการที่จะหาค่า θ_L ควรเลือกใช้สมการของ $l_{\min}$ จะสะดวกกว่า เนื่องจากตัวแปร θ_L ถูกแสดงอยู่ในเทอมของทั้ง $l_{\max}$ และ $l_{\min}$ ในส่วนของค่าความยาวของ $l_{\max}$ และ $l_{\min}$ สามารถสมมติให้มีค่าน้อยกว่า $\lambda/2$ ได้ และตัวแปร θ_L สามารถแสดงให้อยู่ในเทอมของค่า $l_{\min}$ ที่วัดได้ดังนี้

$$\theta_L = \frac{4\pi l_{\min}}{\lambda} - \pi = 2\beta l_{\min} - \pi \tag{2.62}$$

นอกจากนี้ยังสามารถแสดงให้อยู่ในเทอมของค่า $l_{\max}$ ที่วัดได้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1: ถ้า $0 \le l_{\max} \le \frac{\lambda}{4}$ จะได้ว่า

$$\theta_L = \frac{4\pi l_{\max}}{\lambda} = 2\beta l_{\max} \tag{2.63}$$

กรณีที่ 2: ถ้า $\frac{\lambda}{4} \le l_{\max} \le \frac{\lambda}{2}$ จะได้ว่า

$$\theta_L = \frac{4\pi l_{\max}}{\lambda} - 2\pi = 2\beta l_{\max} - 2\pi \tag{2.64}$$

นอกจากนี้สิ่งสำคัญอีกอย่างคือ การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นที่ทุกๆ ตำแหน่งตามความยาวของสายที่จะทำให้เกิดค่าแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุด ซึ่งก็คือที่ตำแหน่ง $l = l_{\max}$ และ $l = l_{\min}$ ในการหาค่าของอิมพีแดนซ์ของคลื่นสามารถถูกแสดงให้อยู่ในเทอมของค่า SWR ได้ดังนี้

ที่ตำแหน่ง $l = l_{\max}$ จะได้ว่า $\Gamma_l = |\Gamma_L|$ ดังนั้นจะได้

$$Z_{\max} = Z_0 \frac{1+\Gamma_l}{1-\Gamma_l} = Z_0 \frac{1+|\Gamma_l|}{1-|\Gamma_l|} = SZ_0 \tag{2.65}$$

ในทำนองเดียวกันที่ตำแหน่ง $l = l_{\min}$ จะได้ว่า $\Gamma_l = -|\Gamma_L|$ ดังนั้นจะได้

$$Z_{\min} = Z_0 \frac{1+\Gamma_l}{1-\Gamma_l} = Z_0 \frac{1-|\Gamma_l|}{1+|\Gamma_l|} = \frac{1}{S} Z_0 \tag{2.66}$$

จากสมการของ $Z_{\max}$ และ $Z_{\min}$ ที่ได้จะได้ว่า $Z_{\max} Z_{\min} = Z_0^2$ เนื่องจากที่ตำแหน่ง $l_{\max}$ และ $l_{\min}$ ถูกแยกกันอยู่ โดยห่างกันเป็นระยะทางเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นหรือ $\lambda/4$

เนื่องจาก ณ ตำแหน่ง $l_{\max}$ และ $l_{\min}$ ค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นจะเป็นค่าที่เป็นจำนวนจริง ดังนั้น ณ ที่จุดเหล่านี้สามารถใช้เป็นตำแหน่งที่จะนำตัวแปลงอิมพีแดนซ์มาวางแทรกเข้าไปเพื่อให้เกิดการทำแมตซ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ Z_0 กับค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด ซึ่งเมื่อทำการหาค่า θ_L ได้ การหาค่าตำแหน่งที่จะทำให้เกิดค่าแรงดันสูงสุดและต่ำสุดหรือ $l_{\max}$ และ $l_{\min}$ จะสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (2.59) และ (2.61)

นอกจากนี้ในการคำนวณหาค่า $l_{\max}$ และ $l_{\min}$ จากสมการที่ (2.59) และ (2.61) สามารถหาค่าได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยใช้คำสั่ง lmin ในการหาค่า $l_{\max}$ และ $l_{\min}$ จะมีความสอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{\max}$ และ $Z_{\min}$ ตามลำดับ ซึ่งมีวิธีการใช้ดังนี้

```
[lm, Zm] = lmin (ZL, Z0,'max');        % ตำแหน่งที่ทำให้เกิดแรงดันสูงสุด
[lm, Zm] = lmin (ZL, Z0,'min');        % ตำแหน่งที่ทำให้เกิดแรงดันต่ำสุด
```

2.12 สรุป

หลักการของสายส่งสัญญาณที่ดีจะต้องพิจารณาถึงค่าอิมพีแดนซ์ นั้นคือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณและโหลดจะต้องมีค่าเท่ากัน เพื่อก่อให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และเมื่อต้องการนำไปใช้งานร่วมกับโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่างๆ กัน จึงจำเป็นต้องใช้ตัวแปลงอิมพีแดนซ์เพื่อทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ ซึ่งในการใช้ตัวแปลงอิมพีแดนซ์นั้นสามารถเลือกใช้ได้หลายแบบ โดยในการเลือกใช้นั้นจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของรูปแบบการใช้งานด้วย

บทที่ 3

การออกแบบและทดสอบผล

3.1 กล่าวนำ

การออกแบบสายส่งสัญญาณและตัวแปลงอิมพีแดนซ์โดยใช้สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งนั้น จะเริ่มต้นโดยการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จะใช้หลักการที่ได้กล่าวมาแล้วใน บทที่ 2 โดยใช้โปรแกรม MATLAB และ Solid Work ช่วยในการคำนวณและออกแบบ

3.2 สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง (Rigid Coaxial Line)

การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งนั้น จะเริ่มจากการกำหนดว่าต้องการออกแบบสายส่งสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) เท่าไร จากนั้นทำการคำนวณหาขนาดของท่อทองแดงที่ใช้ทำสายส่งสัญญาณ เมื่อคำนวณหาขนาดของท่อทองแดงได้แล้วและต้องการใช้ขนาดท่อทองแดงตามที่ได้ทำการคำนวณไว้จะทำได้ยาก เนื่องจากขนาดของท่อทองแดงตามท้องตลาดไม่มีจำหน่ายตรงกับขนาดของท่อทองแดงที่คำนวณไว้พอดี เพื่อความสะดวกในการเลือกใช้ขนาดของท่อทองแดงในการออกแบบสายส่งสัญญาณ จึงได้ทำการสำรวจตลาดหาขนาดของท่อทองแดงที่มีจำหน่ายทั่วไป ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 แล้วทำการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ซึ่งการออกแบบในที่นี้เป็นการออกแบบสายส่งสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50โอห์มแล้วทำการเลือกใช้ขนาดของท่อทองแดงที่ทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม มากที่สุด

ตารางที่ 1 แสดงขนาดของท่อทองแดงที่มีจำหน่ายทั่วไปในตลาด

เส้นผ่าศูนย์กลางขอบนอก (นิ้ว)	ความหนา (mm.)	เส้นผ่าศูนย์กลางขอบนอก (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางขอบใน (mm)
3/16	0.7	4.75625	3.35625
¼	0.7	6.35	4.95
¼	1.2	6.35	3.95
5/16	0.7	7.9375	6.375
5/16	1.2	7.9375	5.5375
3/8	0.9	9.525	7.725
3/8	1.2	9.525	7.125
½	0.9	12.7	10.9

ตารางที่ 1 (ต่อ) แสดงขนาดของท่อทองแดงที่มีจำหน่ายทั่วไปในตลาด

เส้นผ่าศูนย์กลางขอบนอก (นิ้ว)	ความหนา (mm.)	เส้นผ่าศูนย์กลางขอบนอก (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลางขอบใน (mm)
½	2.0	12.7	8.7
½	1.2	12.7	10.3
5/8	0.9	15.875	14.075
5/8	1.2	15.875	13.475
5/8	1.5	15.875	12.875
5/8	2.0	15.875	11.875
¾	0.9	19.05	17.25
¾	1.5	19.05	16.05
¾	2.0	19.05	15.05
7/8	1.5	22.225	19.225
7/8	3.0	22.225	16.225
1	1.5	25.4	22.4
1	2.0	25.4	21.4
1	3.0	25.4	19.4
1 1/8	1.2	28.575	26.175
1 1/8	3.0	28.575	22.575
1 ¼	1.2	31.75	29.35
1 ¼	3.0	31.75	25.75
1 ½	1.2	38.1	35.7
1 ½	3.0	38.1	32.1

***หมายเหตุ** ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะจะใช้ขนาดของรัศมีของท่อทองแดงมาคำนวณในสมการ*

การคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสามารถทำการคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.21)

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon_r}} \log\left(\frac{b}{a}\right) \qquad (\Omega)$$

เมื่อ b = รัศมีด้านในของตัวนำด้านนอก

a = รัศมีด้านนอกของตัวนำด้านใน

ε_r = ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า

การคำนวณสามารถทำได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ถ้า ตัวนำด้านนอกใช้ท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 นิ้ว (หนา 1.5 มม.) และตัวนำด้านในใช้ท่อทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/8 นิ้ว (หนา 0.9 มม.)

ท่อทองแดงขนาด 1 นิ้ว = 25.4 มิลลิเมตร, หนา 1.5 มิลลิเมตร

$$\therefore \quad b = \frac{25.4 - (1.5 \times 2)}{2} = 22.4 \quad mm.$$

ท่อทองแดงขนาด 3/8 นิ้ว = 9.525 มิลลิเมตร, หนา 0.9 มิลลิเมตร

$$\therefore \quad a = \frac{9.525}{2} = \quad 4.763 \quad mm.$$

แทนค่า a และ b ลงในสมการที่ (2.21) จะได้

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{1}} \log\left(\frac{11.2}{4.763}\right) \quad = \quad 51.25 \quad \Omega$$

จากกรณีดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ Z_0 ซึ่งใช้คำสั่งดังต่อไปนี้

```
%Parameter
    d=9.525;  % เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกของตัวนำด้านใน
    D=25.4;   % เส้นผ่านศูนย์กลางขอบในของตัวนำด้านนอก
    x=1.5;    % เความหนาของตัวนำด้านนอก
    a=d/2
    b=(D-(2*x))/2
    y=b/a
    Z0=(138)*(log10(y))
%Answer
    Z0=51.25
```

จะเห็นได้ว่าผลจากการคำนวณทั้งสองแบบนี้ให้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณเท่ากัน และในกรณีของท่อทองแดงขนาดอื่นๆ ก็สามารถทำการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณได้เช่นเดียวกันกับตัวอย่างข้างต้น ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะนั้นได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่คำนวณได้จากท่อทองแดงขนาดต่าง ๆ

Outer(หนา) \ Inner	3/16"	1/4"	5/16"	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"	1 1/4"
1/4" (0.7 mm.)	2.31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/4" (1.2 mm.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5/16" (0.7 mm.)	18.99	1.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5/16" (1.2 mm.)	9.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3/8" (0.9 mm.)	28.99	11.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3/8" (1.2 mm.)	24.14	6.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/2" (0.9 mm.)	49.62	32.38	19.01	8.08	-	-	-	-	-	-	-
1/2" (1.2 mm.)	46.23	28.99	15.62	4.69	-	-	-	-	-	-	-
1/2" (2.0 mm.)	36.11	18.87	5.49	-	-	-	-	-	-	-	-
5/8" (0.9 mm.)	64.94	47.70	34.33	23.40	6.16	-	-	-	-	-	-
5/8" (1.2 mm.)	62.33	45.09	31.72	20.79	3.55	-	-	-	-	-	-
5/8" (1.5 mm.)	59.60	42.36	28.99	18.06	0.82	-	-	-	-	-	-
5/8" (2.0 mm.)	54.76	37.52	24.14	13.22	-	-	-	-	-	-	-
3/4" (0.9 mm.)	77.14	59.89	46.52	35.59	18.35	4.98	-	-	-	-	-
3/4" (1.5 mm.)	72.81	55.57	42.20	31.27	14.03	0.66	-	-	-	-	-
3/4" (2.0 mm.)	68.96	51.72	38.34	27.42	10.18	-	-	-	-	-	-
7/8" (1.5 mm.)	83.63	66.39	53.02	42.09	24.85	11.48	0.55	-	-	-	-
7/8" (3.0 mm.)	73.46	56.22	42.85	31.92	14.68	1.30	-	-	-	-	-
1" (1.5 mm.)	92.79	75.55	62.17	**51.25**	34.01	20.64	9.71	0.47	-	-	-
1" (2.0 mm.)	90.06	72.81	59.44	48.51	31.27	17.90	6.97	-	-	-	-
1" (3.0 mm.)	84.18	66.93	53.56	42.63	25.39	12.02	1.09	-	-	-	-
1 1/8" (1.2 mm.)	102.13	84.89	71.51	60.58	43.34	29.97	19.04	9.80	1.80	-	-
1 1/8" (3.0 mm.)	93.26	76.02	62.64	**51.72**	34.48	21.10	10.18	-	-	-	-
1 1/4" (1.2 mm.)	108.99	91.75	78.37	67.45	50.20	36.83	25.90	16.67	8.66	1.59	-

ตารางที่ 2 (ต่อ) แสดงค่าความต้านทานที่คำนวณได้จากท่อทองแดงขนาดต่าง ๆ

Inner / Outer(หนา)	3/16"	1/4"	5/16"	3/8"	1/2"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"	1 1/4"
1 1/4" (3.0 mm.)	101.14	83.90	70.53	59.63	42.36	28.99	18.06	8.82	0.82	-	-
1 1/2" (1.2 mm.)	120.73	103.49	90.11	79.18	61.94	48.57	37.64	28.40	20.40	13.34	7.03
1 1/2" (3.0 mm.)	114.36	97.11	83.74	72.81	55.72	42.20	31.27	22.03	14.03	6.97	0.66

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ใกล้เคียงที่สุดที่ใช้ทำเป็นสายส่งสัญญาณคือ การใช้ท่อทองแดงขนาด 1 นิ้ว (หนา 1.5 มม.) และ 3/8 นิ้ว (หนา 0.9 มม.) ซึ่งจะทำให้ได้สายส่งสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะประมาณ 51.25 โอห์ม ในการออกแบบความยาวของสายส่งสัญญาณนั้นได้ทำการออกแบบสายส่งสัญญาณที่ความถี่กลางของย่านความถี่ระบบ FM คือมีความถี่เท่ากับ 98 MHz โดยหาความยาวคลื่น (λ) ณ ความถี่ (f) นี้จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (m) \quad ; \; c = 3\times10^{8} \; m/s$$

ดังนั้นเราจะได้ $$\lambda = \frac{3\times10^{8}(m/s)}{98\times10^{6}(Hz)} = 3.061 \; m$$

จากการออกแบบสายส่งสัญญาณนั้นจะเห็นได้ค่าความยาวคลื่นมีความยาวเท่ากับ 3.061เมตร นั้นยาวเกินไปสำหรับทำสายส่งสัญญาณต้นแบบที่จะใช้เป็นตัวทดสอบค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะว่าเป็นไปตามสมการที่คำนวณไว้ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณจะไม่ขึ้นอยู่กับความของสายส่งสัญญาณ จึงทำการออกแบบให้สายส่งญญาณมีความยาวเท่ากับ $\lambda/2$ ซึ่งนั้นก็คือ

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{3.061}{2} = 1.5305 \; m$$

3.2.1 การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง

การออกแบบสายส่งสัญญาณต้นแบบของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็งจะมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนได้แก่ ส่วนของสายส่งสัญญาณ และส่วนการเชื่อมต่อโหลดและสัญญาณ (ขั้วต่อสำหรับวัดทดสอบ) โดยการออกแบบส่วนประกอบนี้จะใช้โปรแกรม Solid Work

ส่วนของสายส่งสัญญาณ จะประกอบด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. Outer เป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว (25.4 มม.) หนา 1.5 มม. ยาว 1.5305 เมตร มีลักษณะดังรูปที่ 3.1

2. Inner เป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{3}{8}$ นิ้ว (9.525 มม.) หนา 0.9 มม. ยาว 1.5305 เมตร มีลักษณะดังรูปที่ 3.2

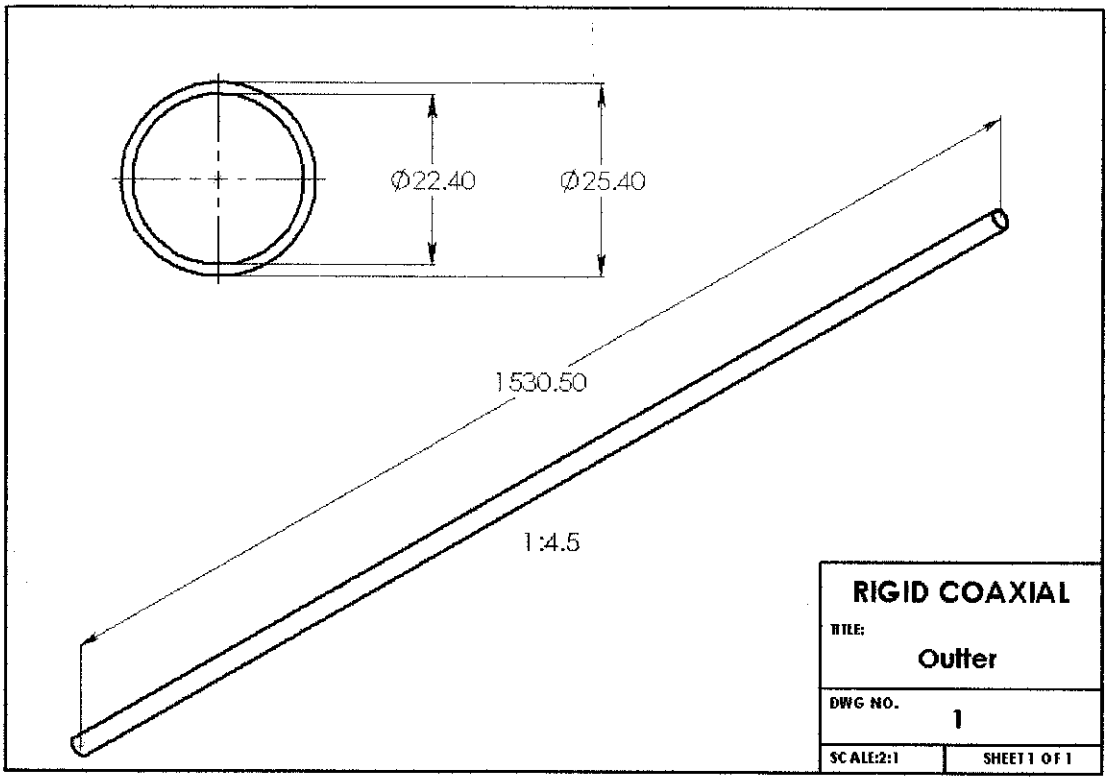
3. Inner Conductor Connector1 (แกนของ Inner1) ทำจากเพลาทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{3}{8}$ นิ้ว ซึ่งทำการออกแบบดังรูปที่ 3.3

4. Inner Conductor Connector2 ทำจากเพลาทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{3}{8}$ นิ้ว ซึ่งทำการออกแบบดังรูปที่ 3.4

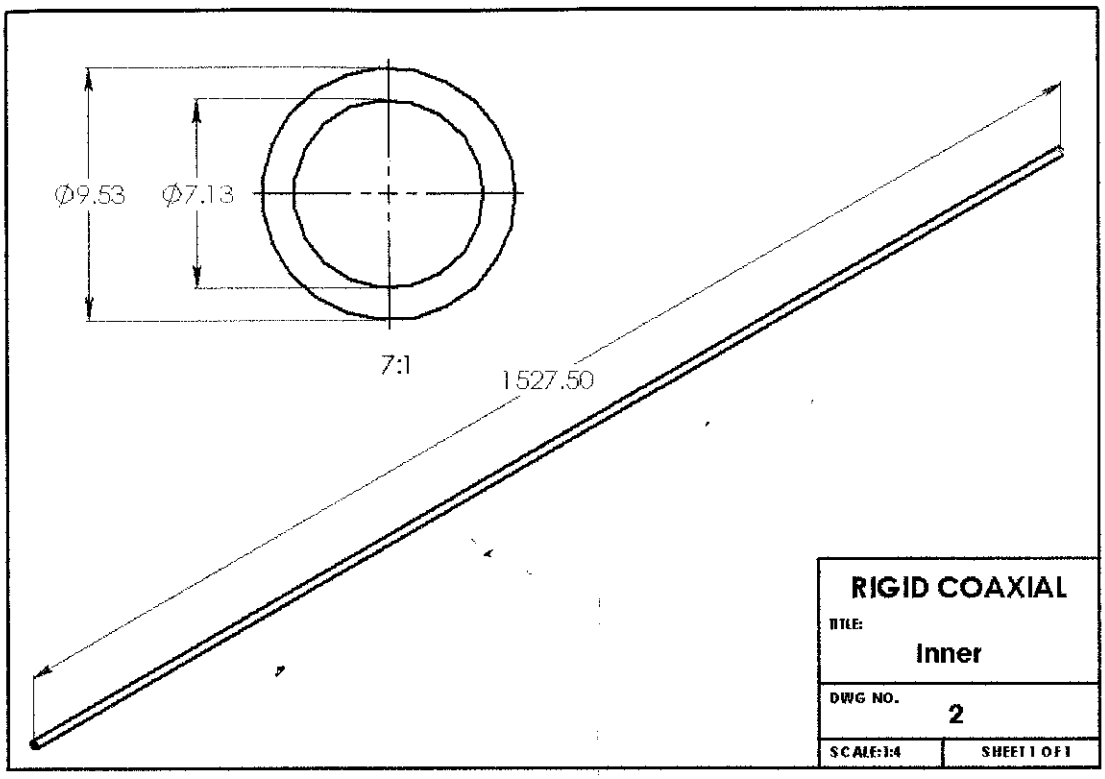
5. Fixed Flange ทำจากเพลาทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 มิลลิเมตร ซึ่งทำการออกแบบดังรูปที่ 3.5

6. Insulator (PTFE or Superlean) ทำการออกแบบดังรูปที่ 3.6

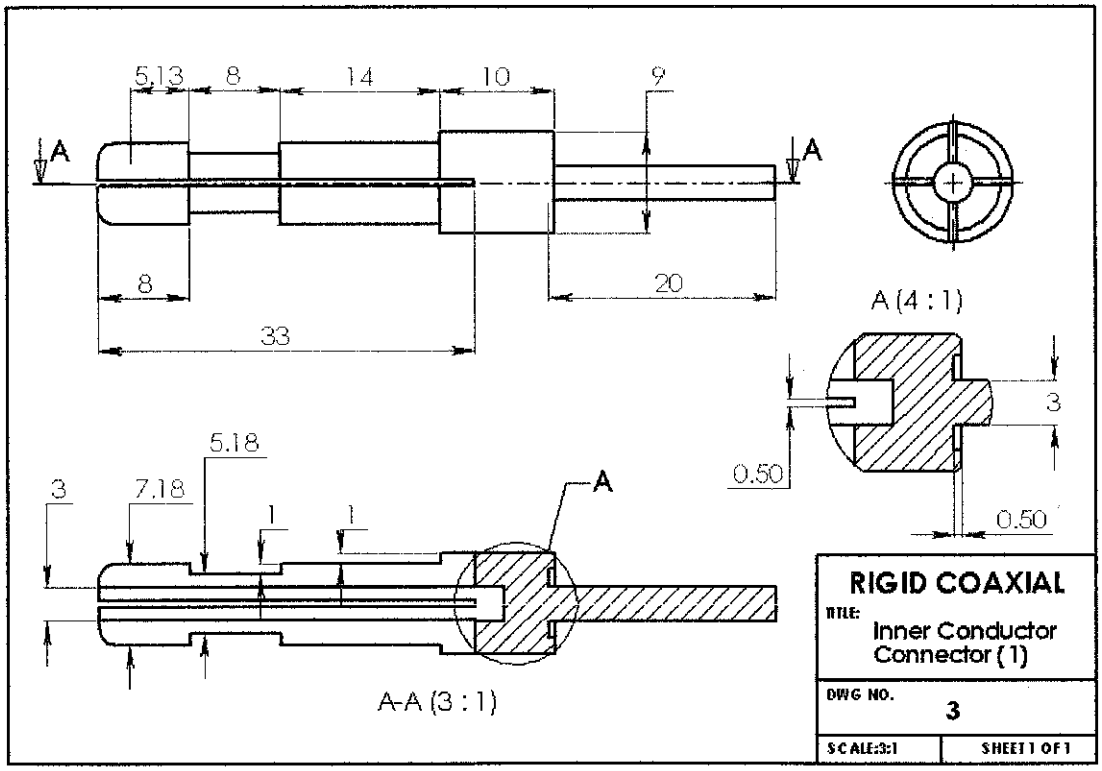
7. Insulator สำหรับยึด Inner ทำการออกแบบดังรูปที่ 3.7



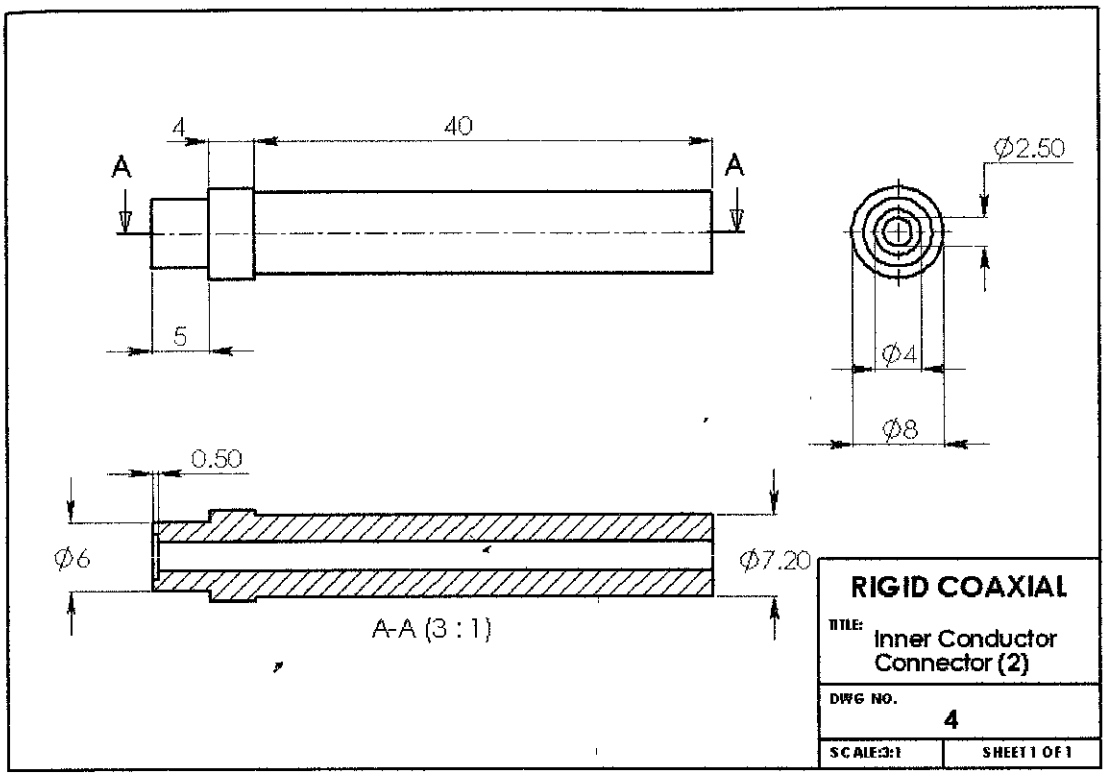
รูปที่ 3.1 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Outer



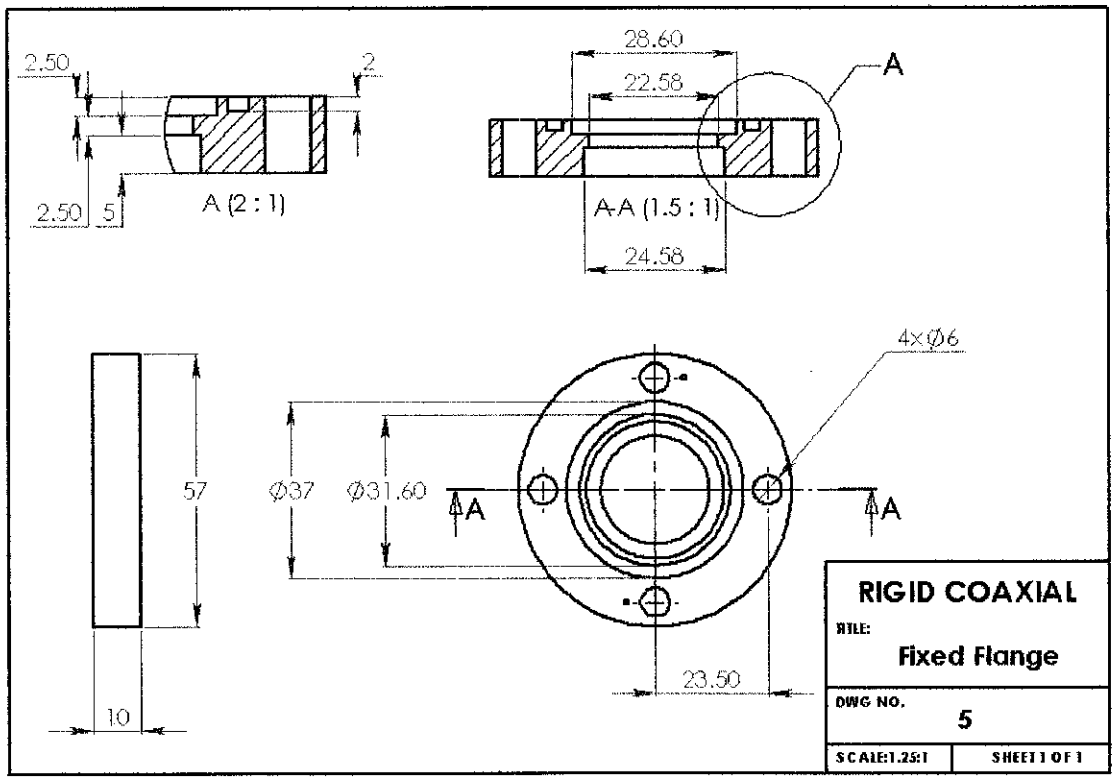
รูปที่ 3.2 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Inner



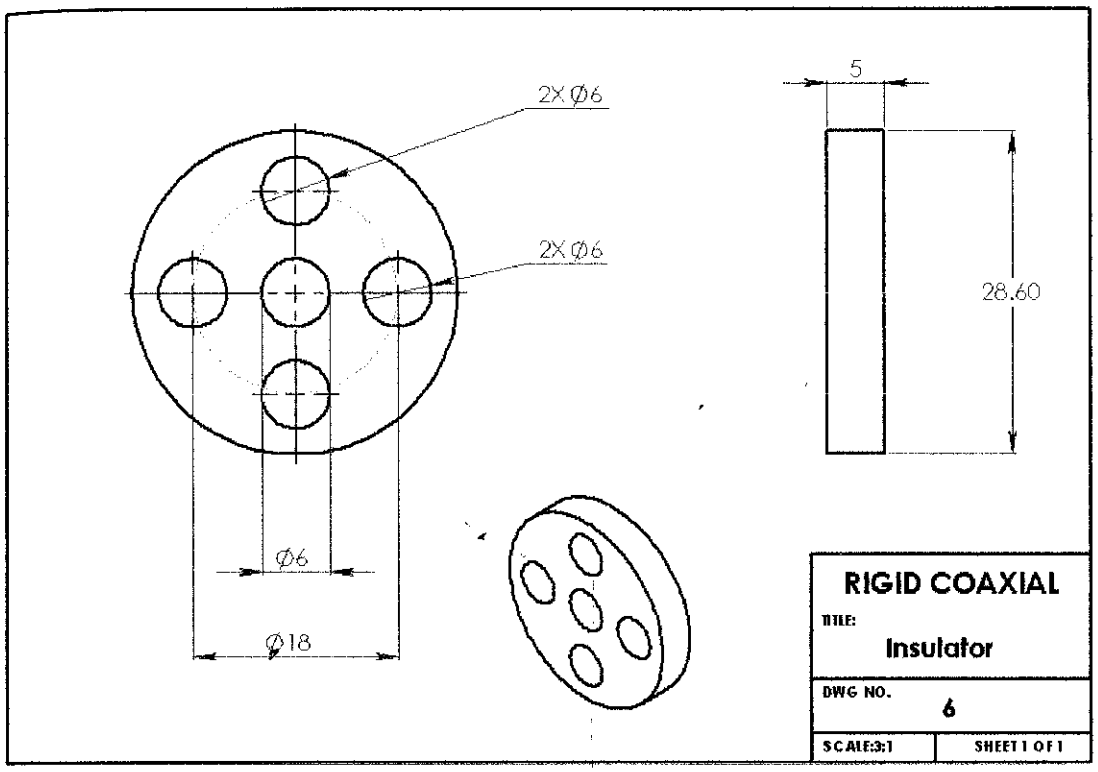
รูปที่ 3.3 ภาพวาดแสดงการออกแบบแกนของ Inner (1)



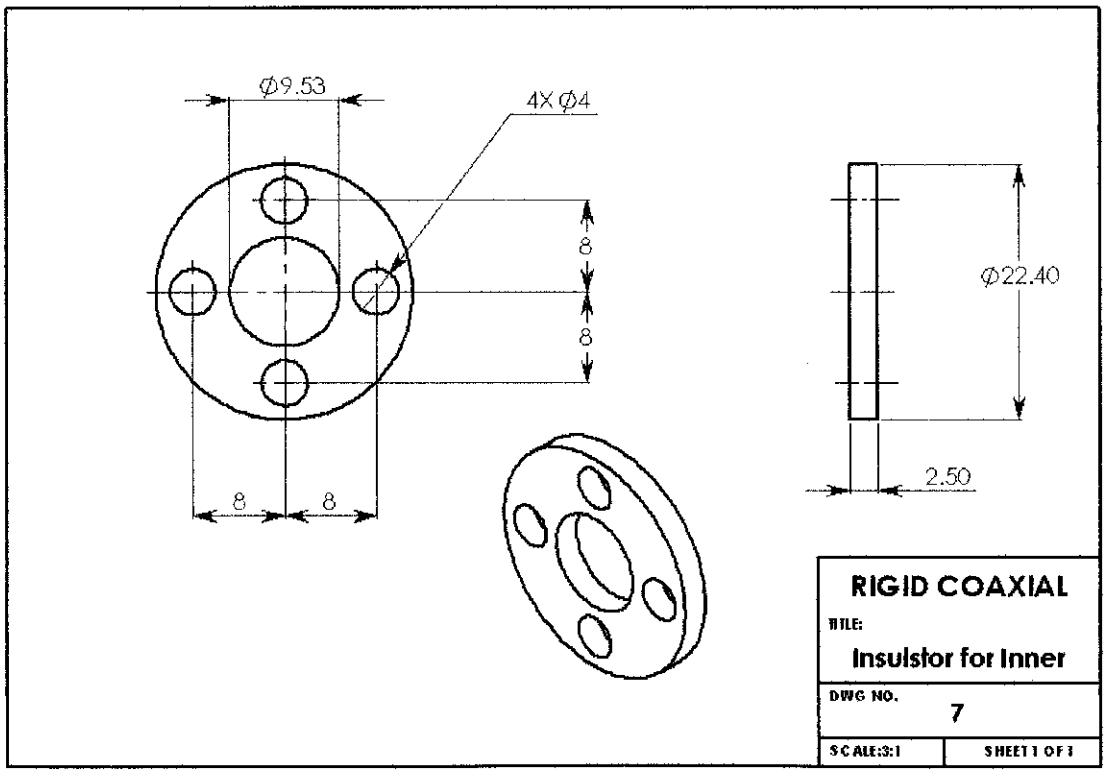
รูปที่ 3.4 ภาพวาดแสดงการออกแบบแกนของ Inner (2)



รูปที่ 3.5 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Fixed Flange

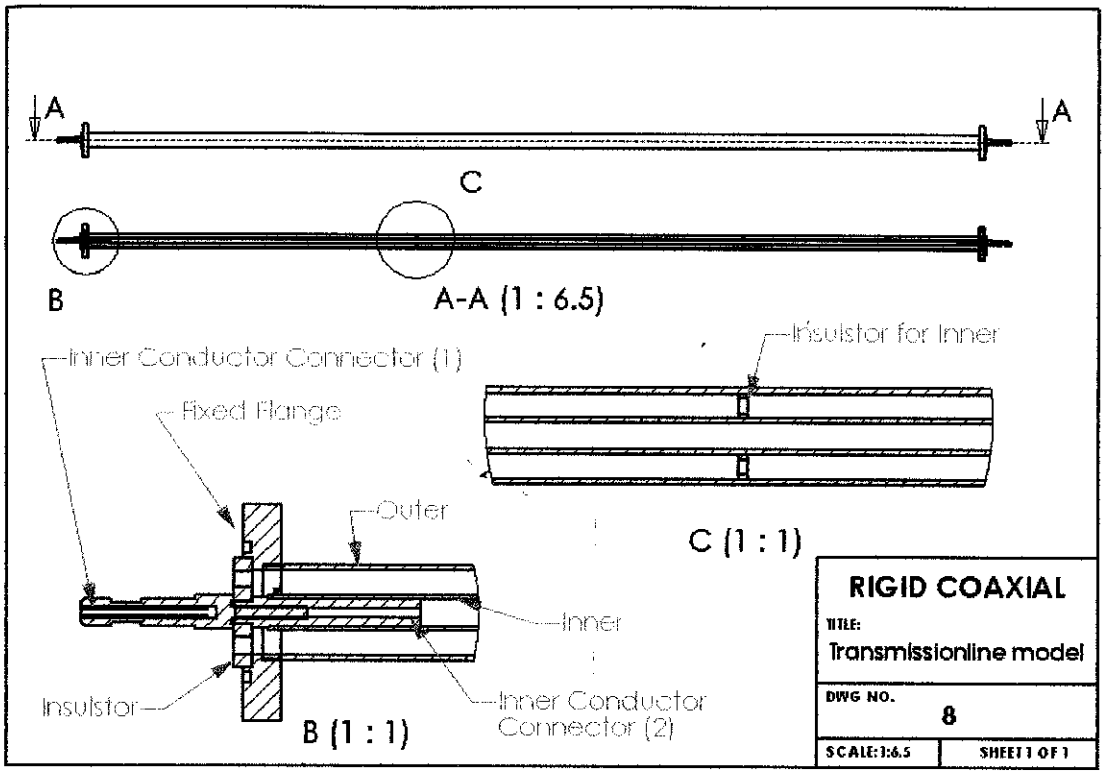


รูปที่ 3.6 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Insulator

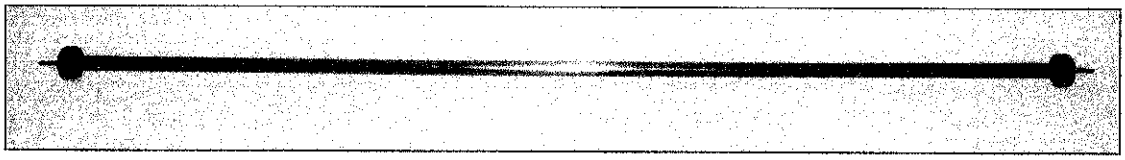


รูปที่ 3.7 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Insulator สำหรับยึด Inner

ซึ่งเมื่อนำชิ้นส่วนต่างๆ มาประกอบกันแล้วจะได้ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9



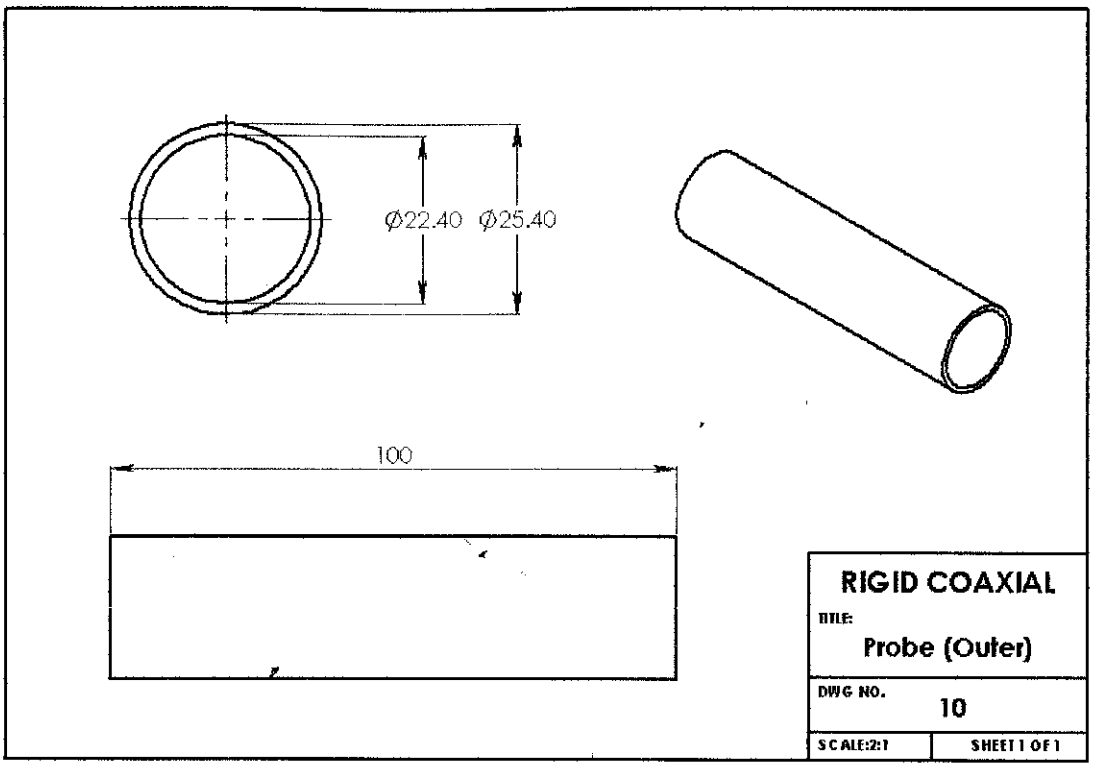
รูปที่ 3.8 ภาพวาดแสดงการประกอบสายส่งสัญญาณต้นแบบความยาว $\lambda/2$



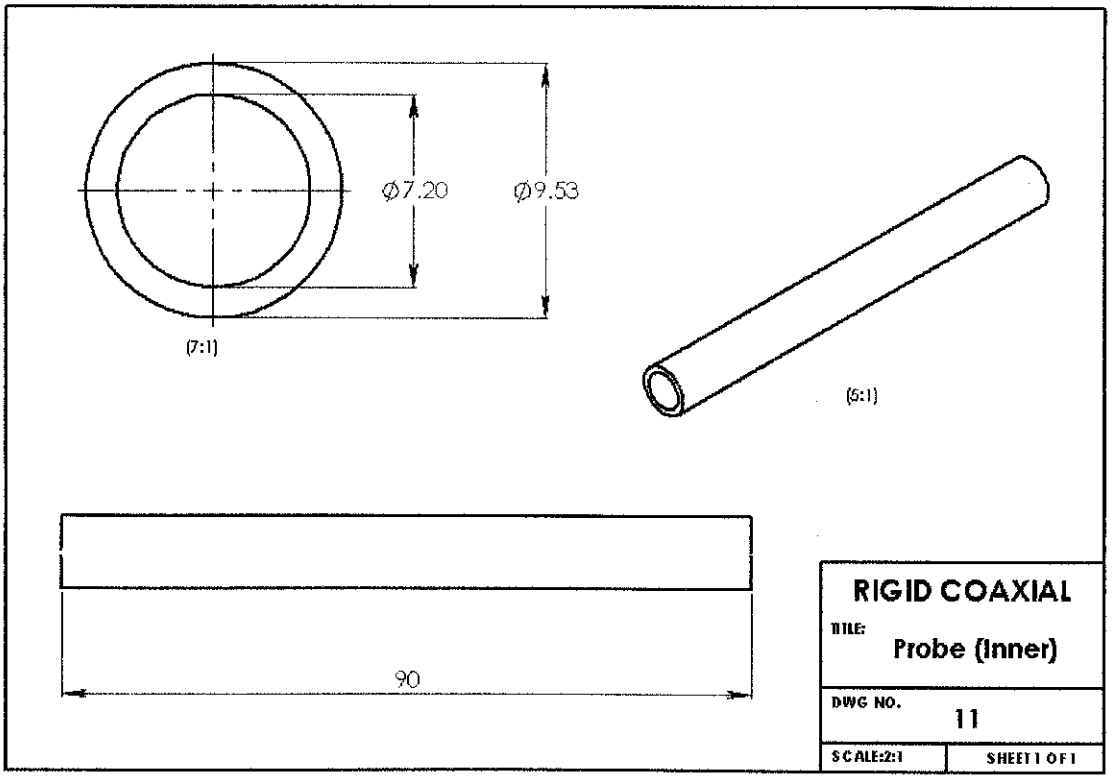
รูปที่ 3.9 ภาพสายส่งสัญญาณต้นแบบความยาว $\lambda/2$

ส่วนของการเชื่อมต่อโหลดและสัญญาณ จะประกอบด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

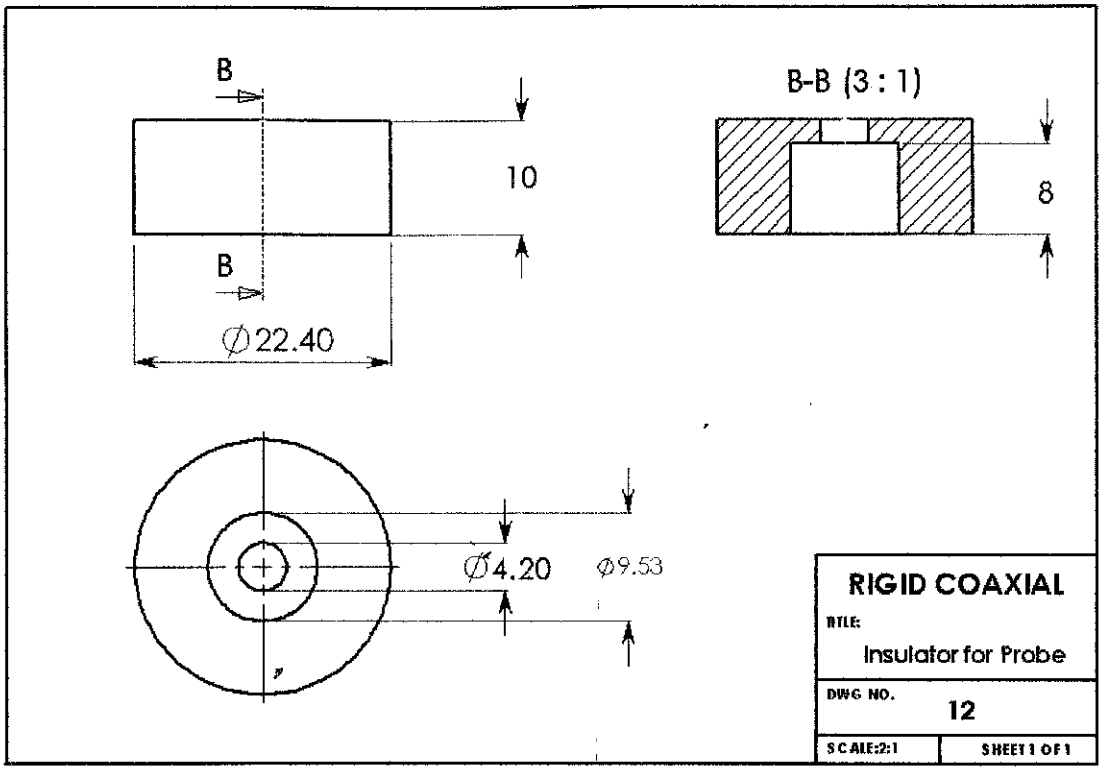
1. Outer เป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว (25.4 มม.) หนา 1.5 มม. ยาว 0.1 เมตร มีลักษณะดังรูปที่ 3.10
2. Inner เป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\frac{3}{8}$ นิ้ว (9.525 มม.) หนา 0.9 มม. ยาว 0.09 เมตร มีลักษณะดังรูปที่ 3.11
3. Insulator for Probe มีลักษณะดังรูปที่ 3.12
4. A Lid Copper ทำจากเพลาทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1\frac{1}{8}$ นิ้ว ซึ่งทำการออกแบบดังรูปที่ 3.13
5. Fixed Flange
6. SMA ขนาด 3.5 มิลลิเมตร



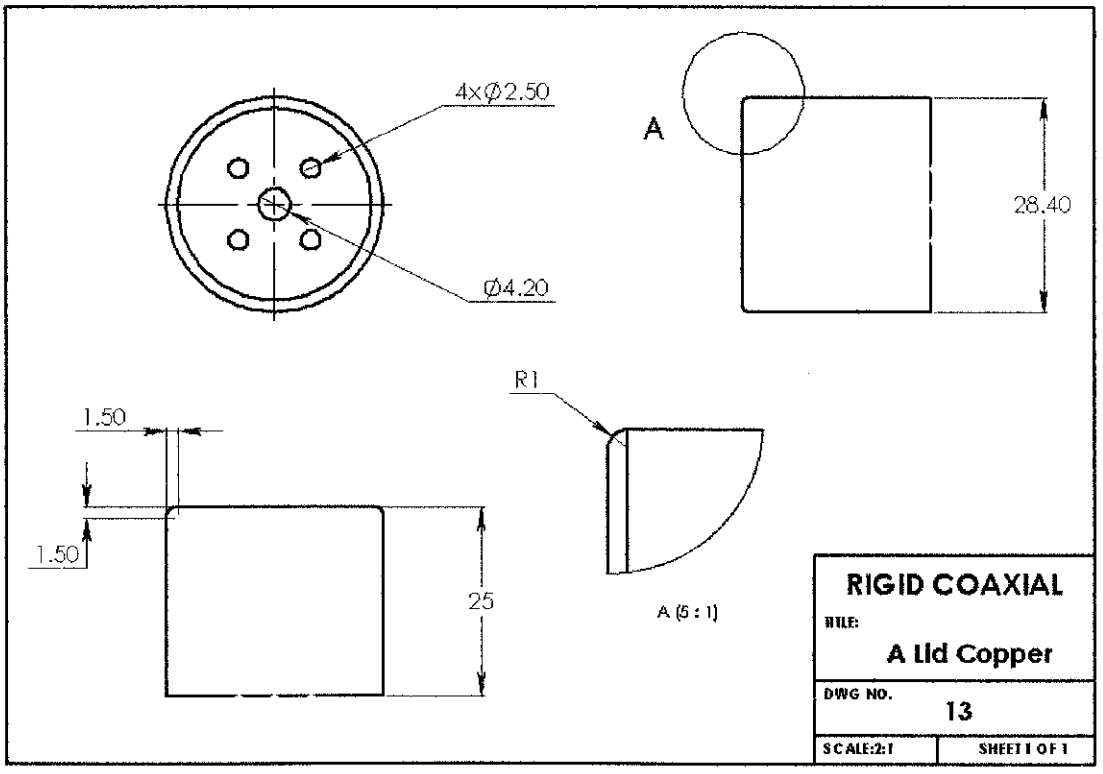
รูปที่ 3.10 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Probe (Outer)



รูปที่ 3.11 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Probe (Inner)

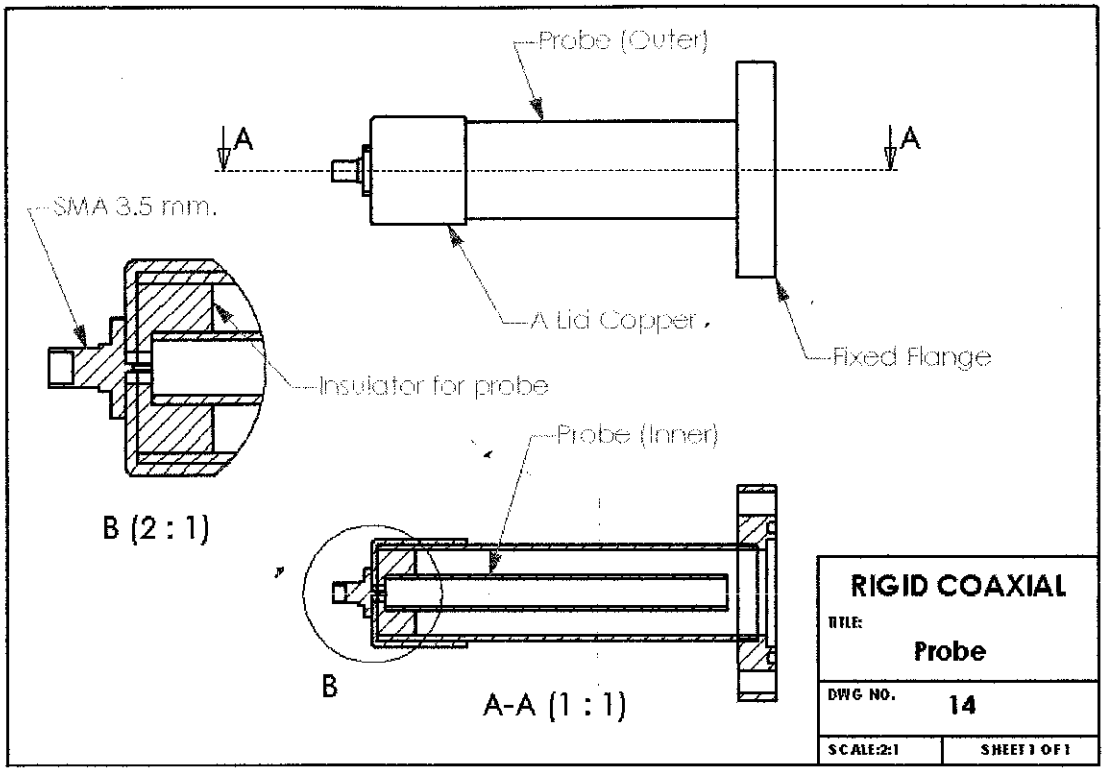


รูปที่ 3.12 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Insulator สำหรับยึด Inner ของ Probe

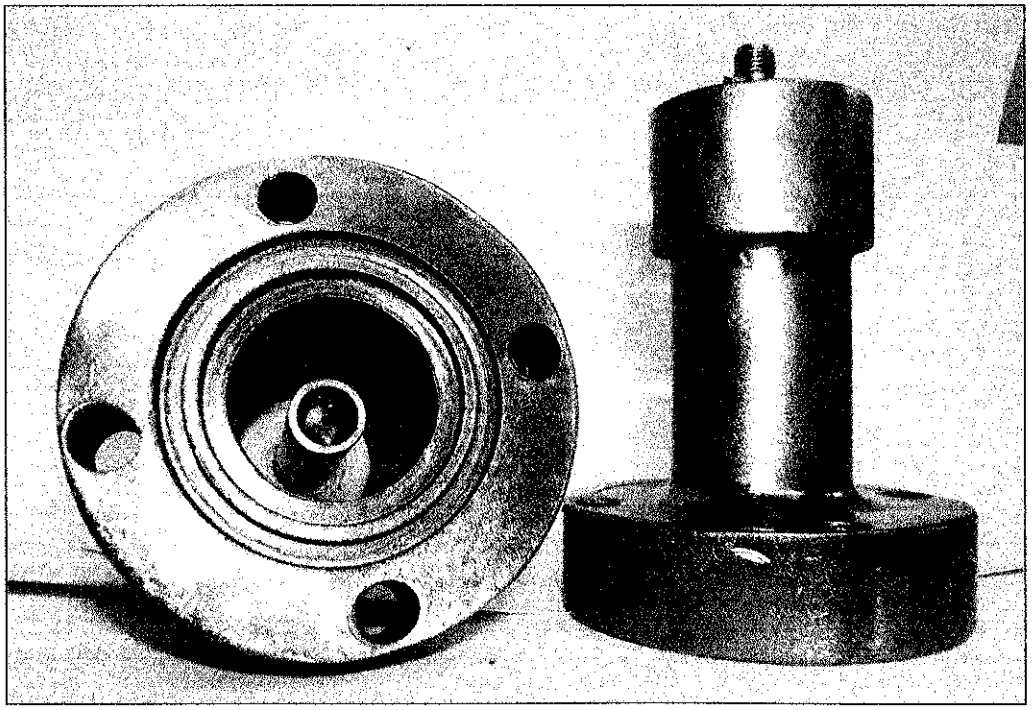


รูปที่ 3.13 ภาพวาดแสดงการออกแบบ A Lid Copper

และเมื่อทำการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันก็จะได้ดังรูปที่ 3.14 และรูปที่ 3.15

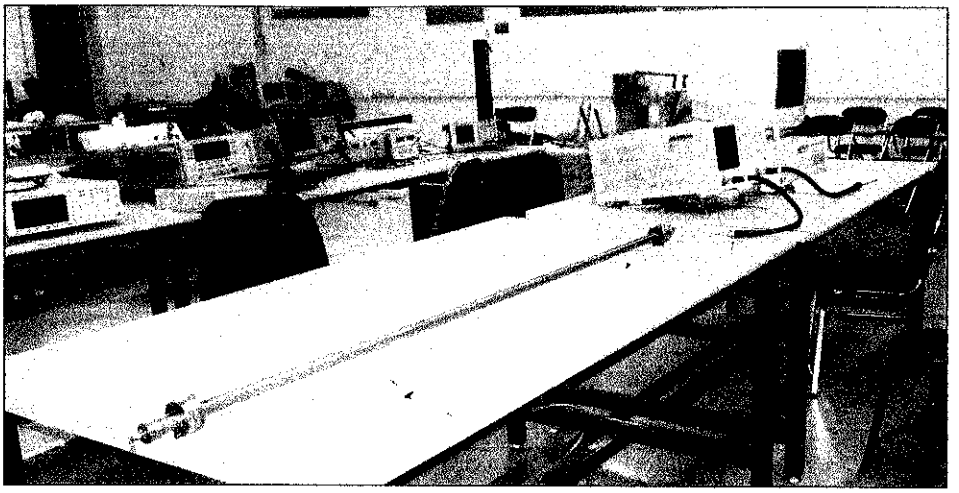


รูปที่ 3.14 ภาพวาดแสดงการประกอบขั้วต่อสำหรับวัดทดสอบ



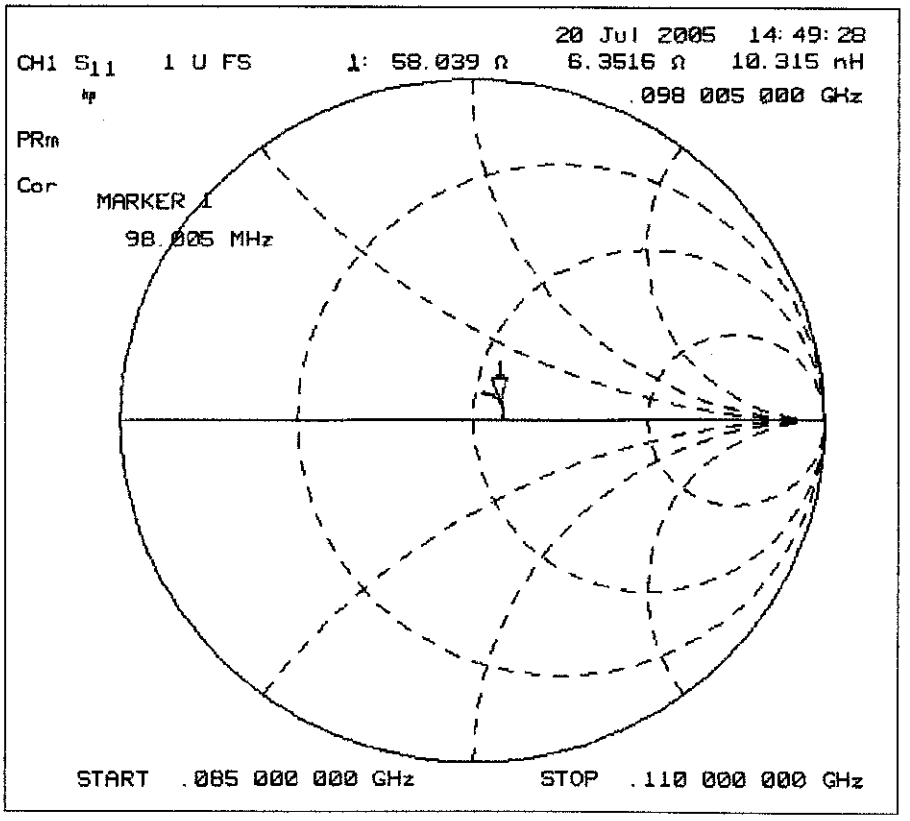
รูปที่ 3.15 ภาพขั้วต่อสำหรับวัดทดสอบ

จากสายส่งสัญญาณต้นแบบที่สร้างเมื่อนำไปวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะด้วยเครื่อง Network Analyzer โดยทำการต่อโหลด 50 โอห์ม ที่ปลายอีกด้านดังรูปที่ 3.16

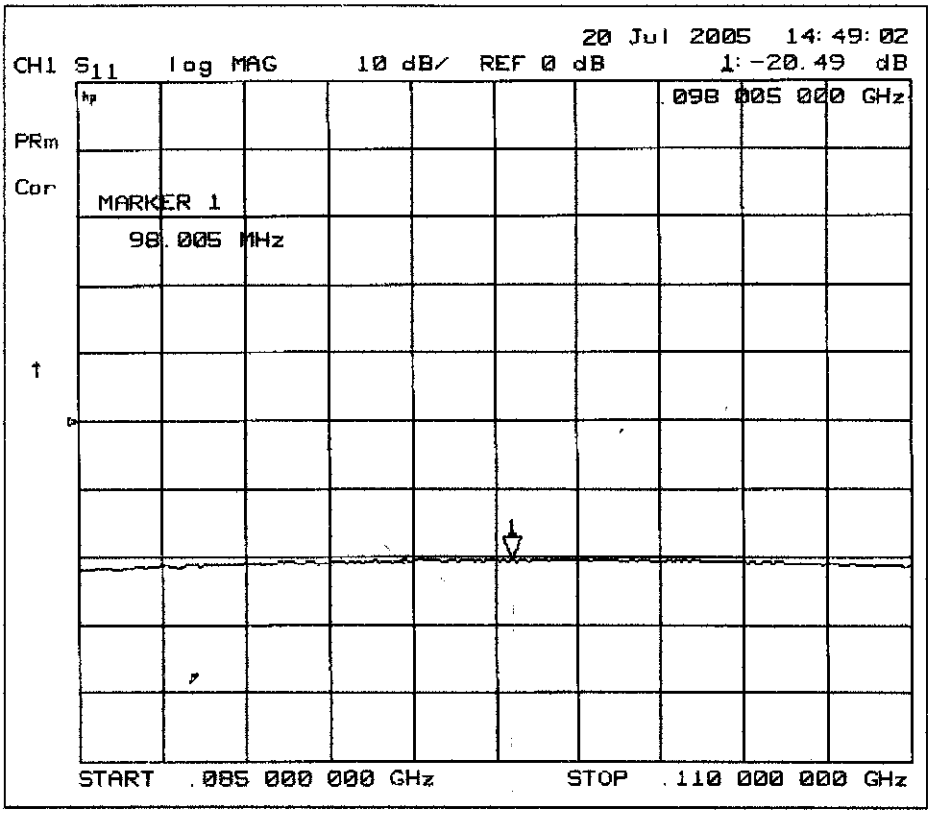


รูปที่ 3.16 ภาพแสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณต้นแบบ

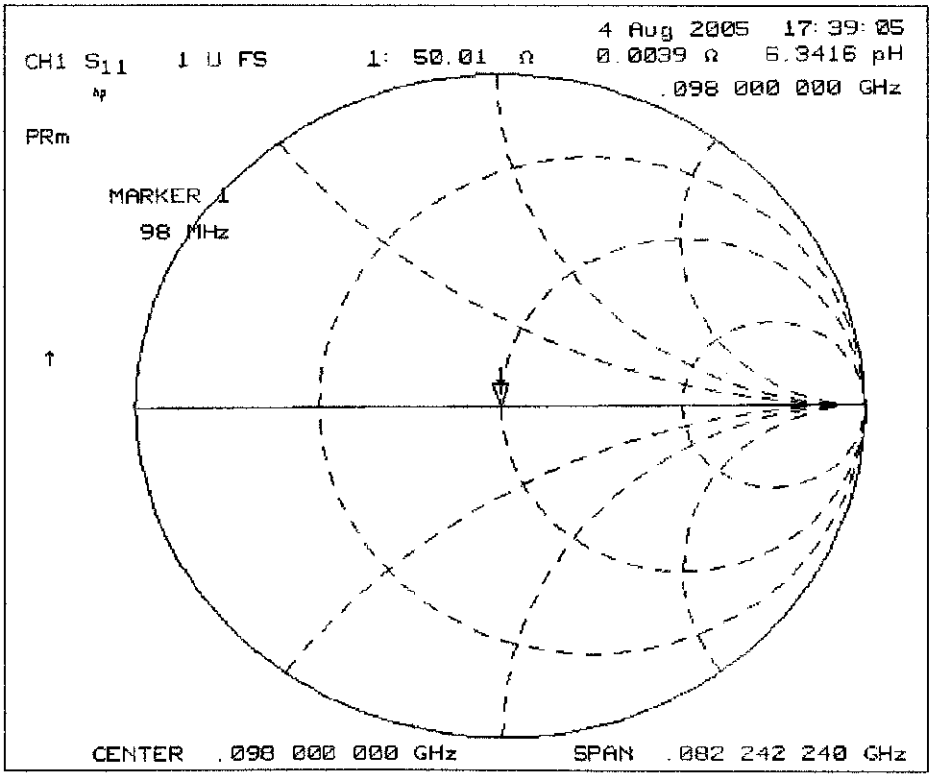
จะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะประมาณ 58.039 โอห์ม ที่ความถี่ 98 MHz ดังจะเห็นได้จากผลการวัดดังรูปที่ 3.17 และจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ต่ำมากประมาณ -20.49 dB ตลอดจนย่านความถี่ที่ใช้วัดดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ภาพผลการวัดแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดสายส่งสัญญาณต้นแบบ

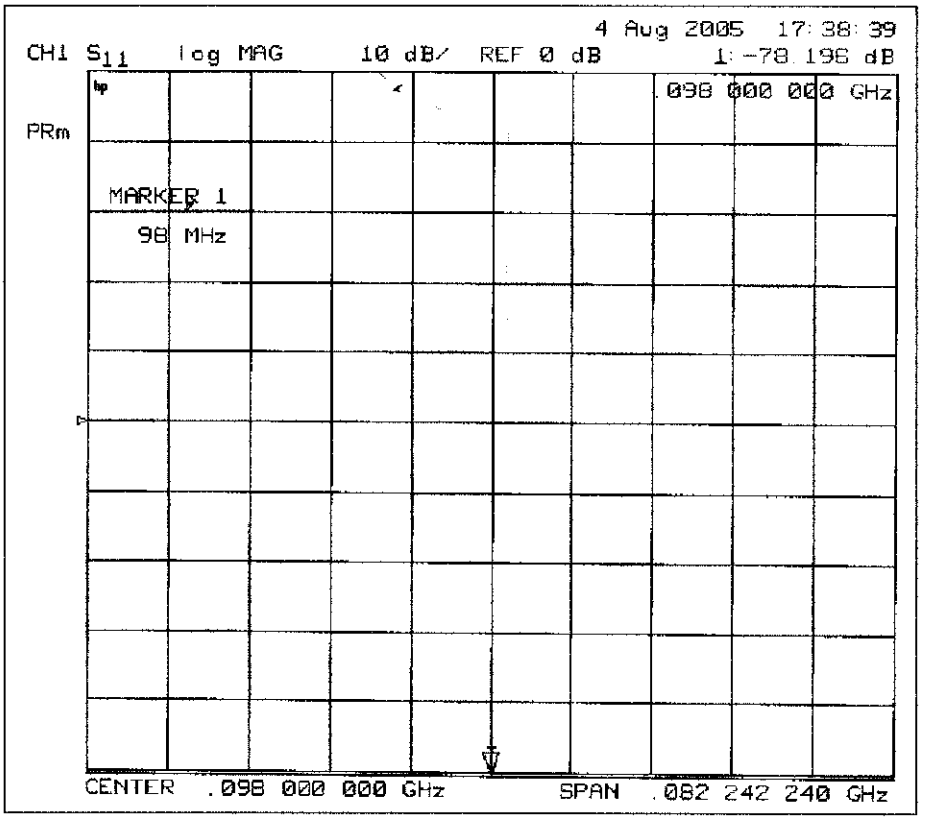


รูปที่ 3.18 ภาพผลการวัดแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ ย่านความถี่ต่างๆ



รูปที่ 3.19 ภาพผลการวัดแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดสายส่งสัญญาณต้นแบบ

จากสายส่งสัญญาณต้นแบบจะเห็นได้ว่า ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ได้นั้น ยังผิดพลาดจากค่าที่ต้องการอยู่ เนื่องจากขั้วต่อสำหรับวัดทดสอบมีความยาวมากเกินไปอาจจะทำให้เครื่อง Network Analyzer มองขั้วต่อสำหรับวัดทดสอบนี้เป็นสายส่งสัญญาณตัวหนึ่ง จึงทำการปรับเปลี่ยนความยาวของขั้วต่อสำหรับวัดทดสอบให้มีความยาวสั้นลง โดยให้ขั้วต่อสำหรับวัดทดสอบเหลือความยาวรวมทั้งหมดประมาณ 70 มม. ซึ่งเมื่อทำการปรับแก้แล้วนำไปวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะจะได้ค่าประมาณ 50.01 โอห์ม ดังรูปที่ 3.19 และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ ย่านความถี่การใช้งานจะอยู่ที่ประมาณ -78.196 dB ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ภาพผลการวัดแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ ย่านความถี่ต่างๆ

3.2.2 การออกแบบสายเฟสสำหรับสายอากาศแถวลำดับโดยใช้สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง

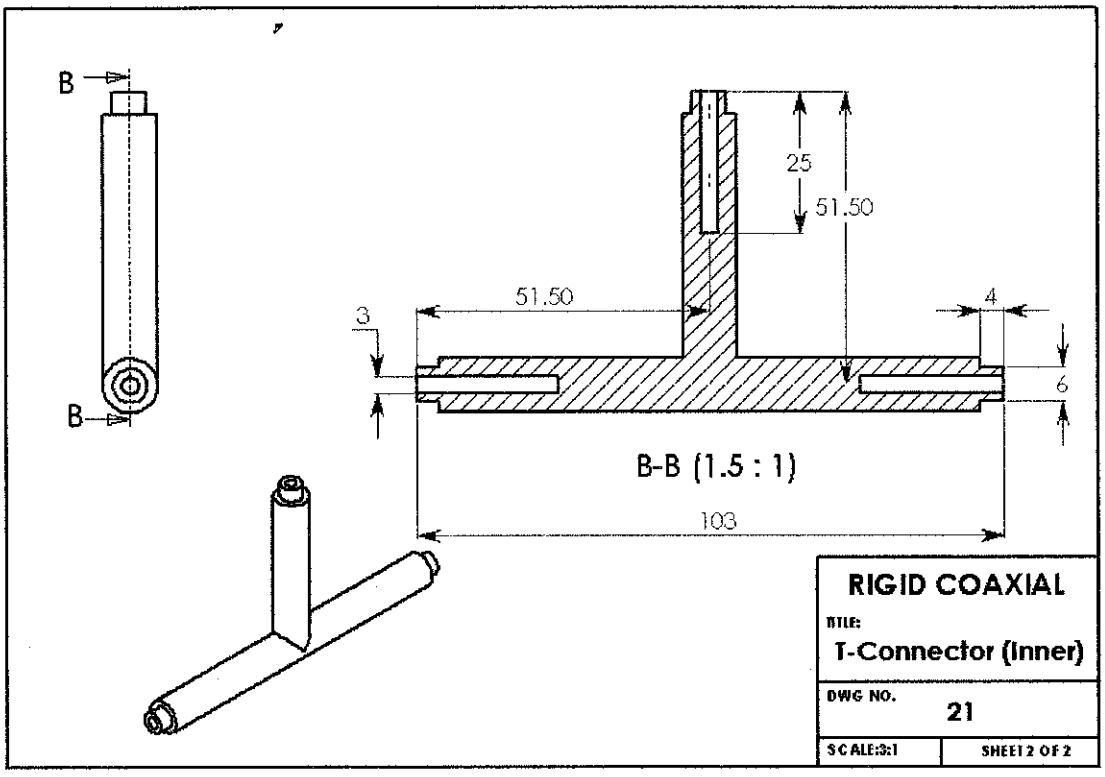
จากสายส่งสัญญาณต้นแบบ ได้ทำการเปลี่ยนขนาด Outer ไปเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1\frac{1}{8}$ นิ้ว (28.575 มม.) หนา 3 มม. ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิม

ในการสร้างสายเฟสที่จริงนั้นจะเป็นการสร้างเพื่อเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศ โดยนำสายอากาศสองตัวมาจัดแถวลำดับกันในรูปแบบเชิงเส้นแกนร่วม (Collinear) ดังนั้นการเชื่อม

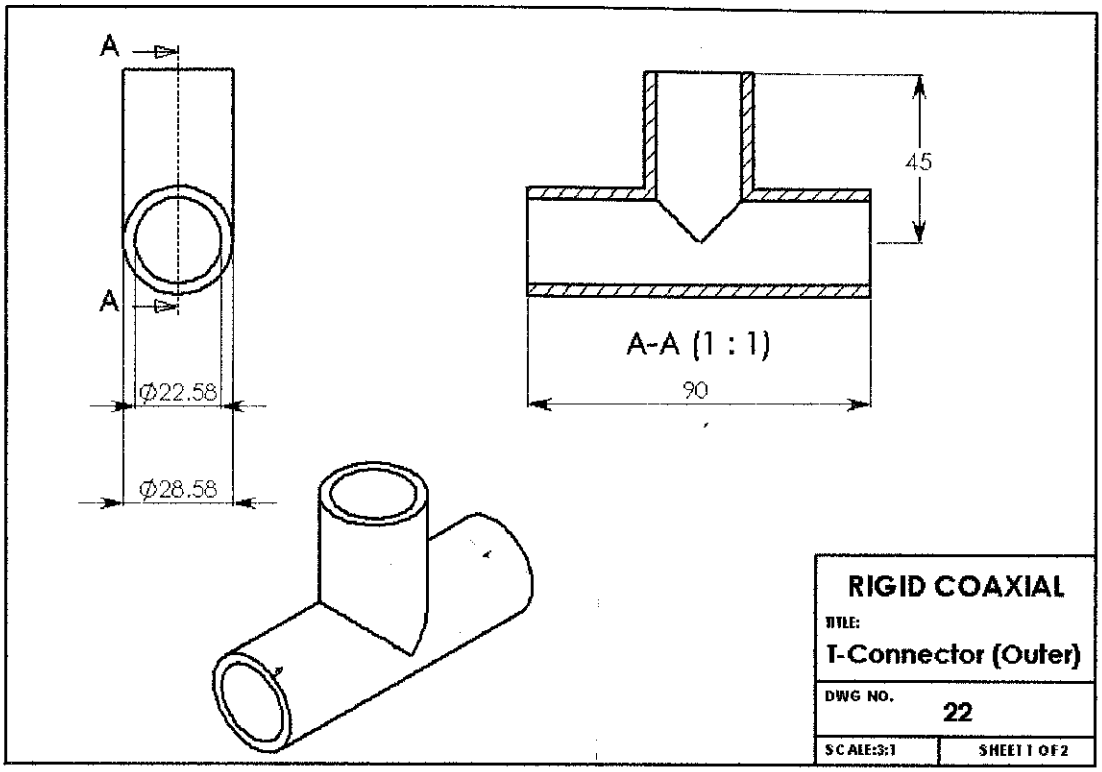
ระหว่างสายอากาศทั้งสองตัวนี้จะต้องใช้ T-Connector ซึ่งเป็นตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นรูปตัว T และ Elbow ซึ่งเป็นข้อต่อชนิดงอ 90°

ตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นรูปตัว T มีส่วนประกอบดังนี้

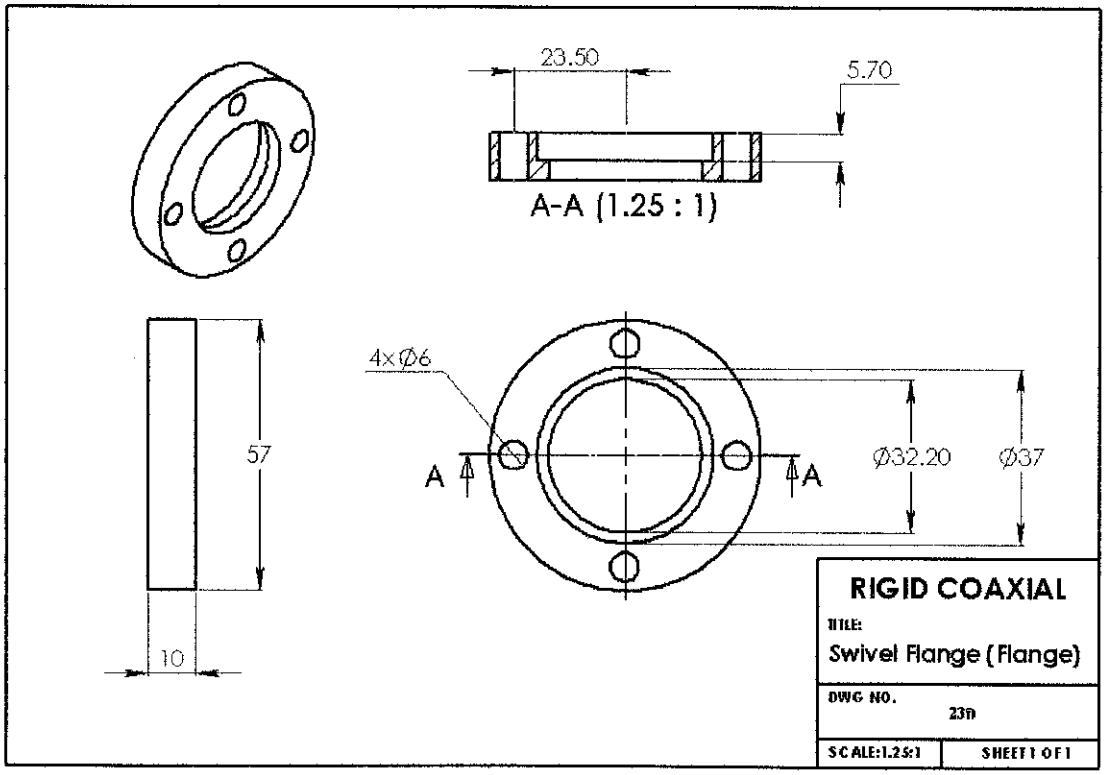
1. T-Connector (Inner) จะมีการออกแบบดังรูปที่ 3.21
2. T-Connector (Outer) จะมีการออกแบบดังรูปที่ 3.22
3. Swivel Flange มีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนของ Flange และ Ring ดังการออกแบบในรูปที่ 3.23a และ 3.23b ตามลำดับ
4. Inner Conductor Connector1
5. Insulator



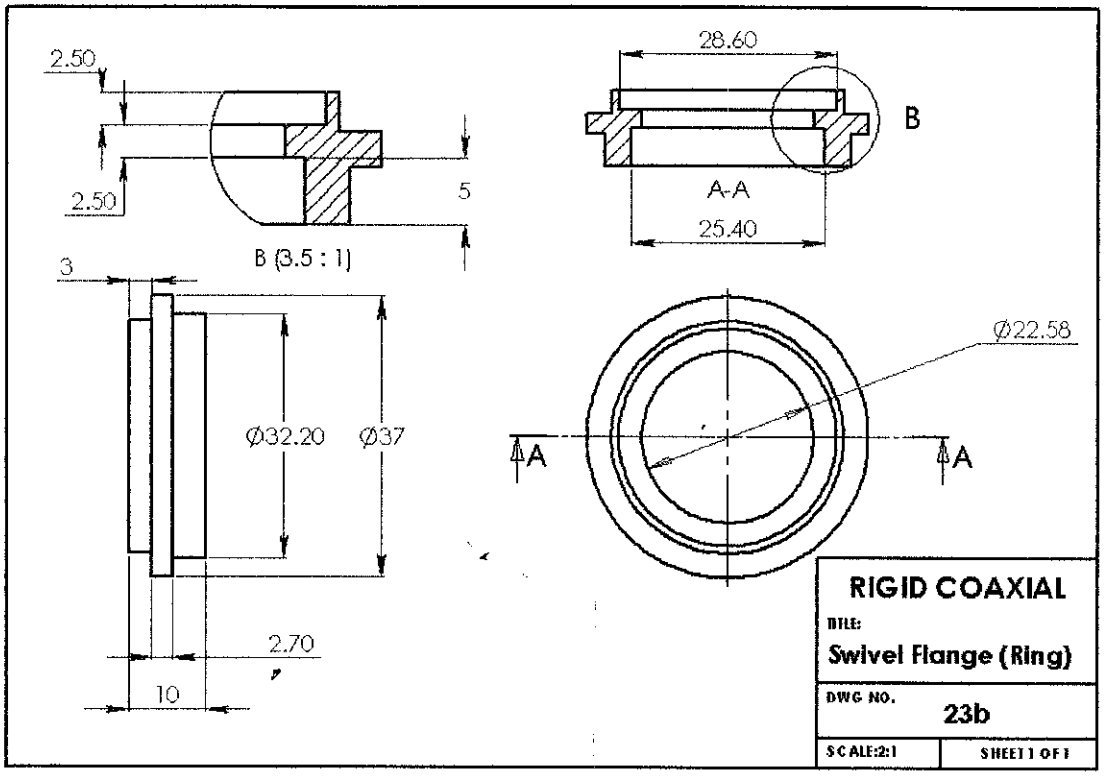
รูปที่ 3.21 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Inner ของตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นรูปตัว T



รูปที่ 3.22 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Outer ของตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นรูปตัว T

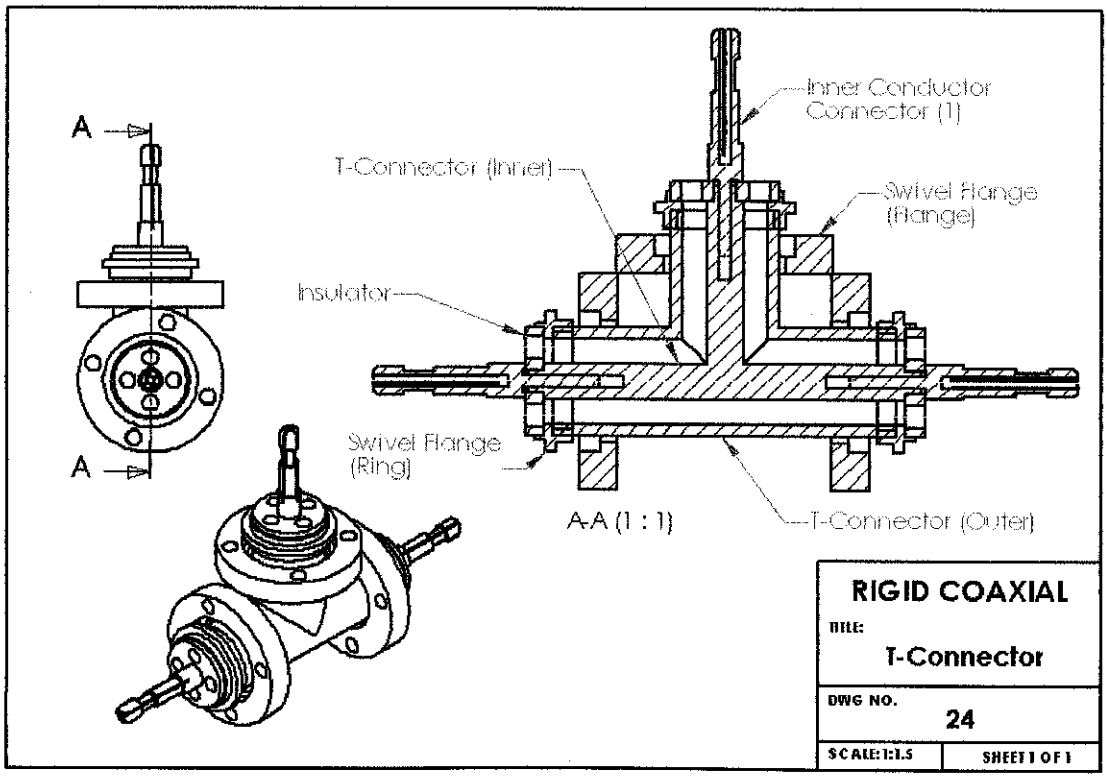


รูปที่ 3.23ก ภาพวาดแสดงการออกแบบ Swivel Flange (Flange)

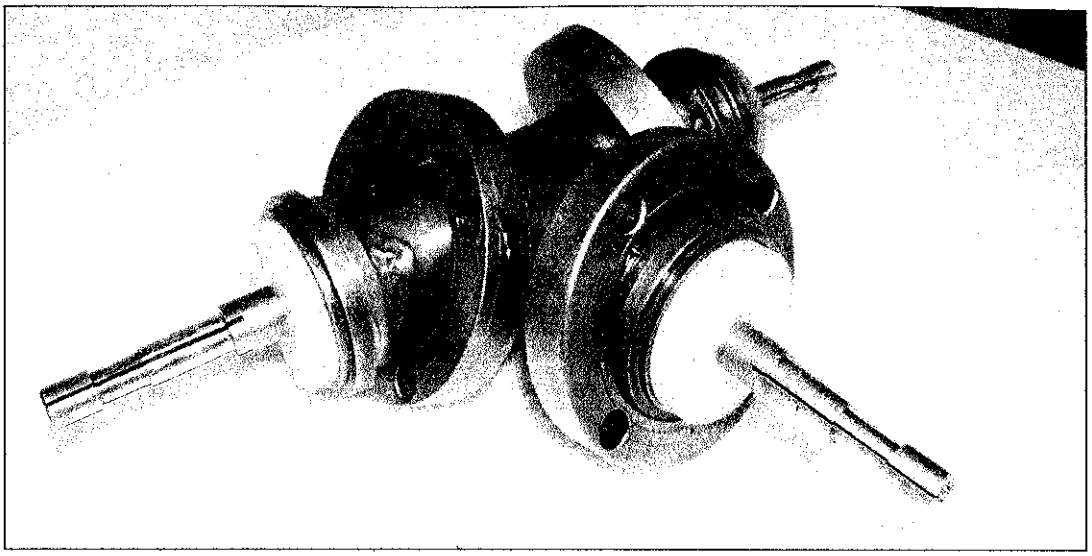


รูปที่ 3.23ข ภาพวาดแสดงการออกแบบ Swivel Flange (Ring)

ซึ่งเมื่อทำการประกอบแล้วจะได้ดังรูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25



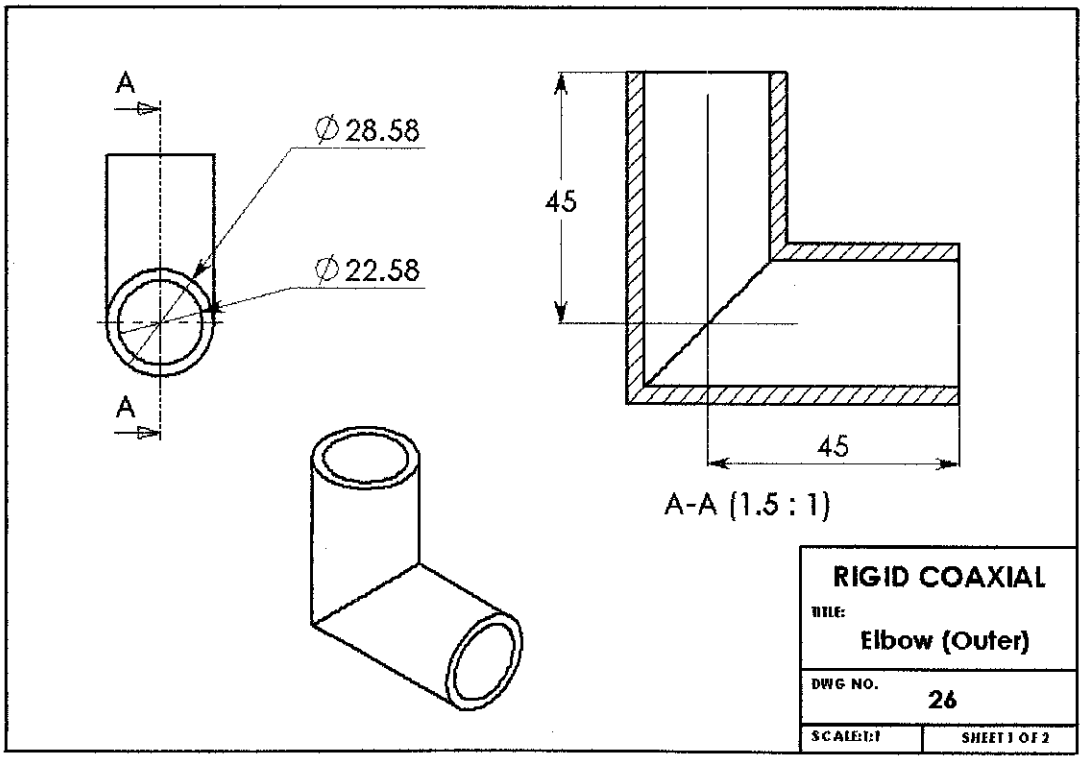
รูปที่ 3.24 ภาพวาดแสดงการประกอบตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นรูปตัว T



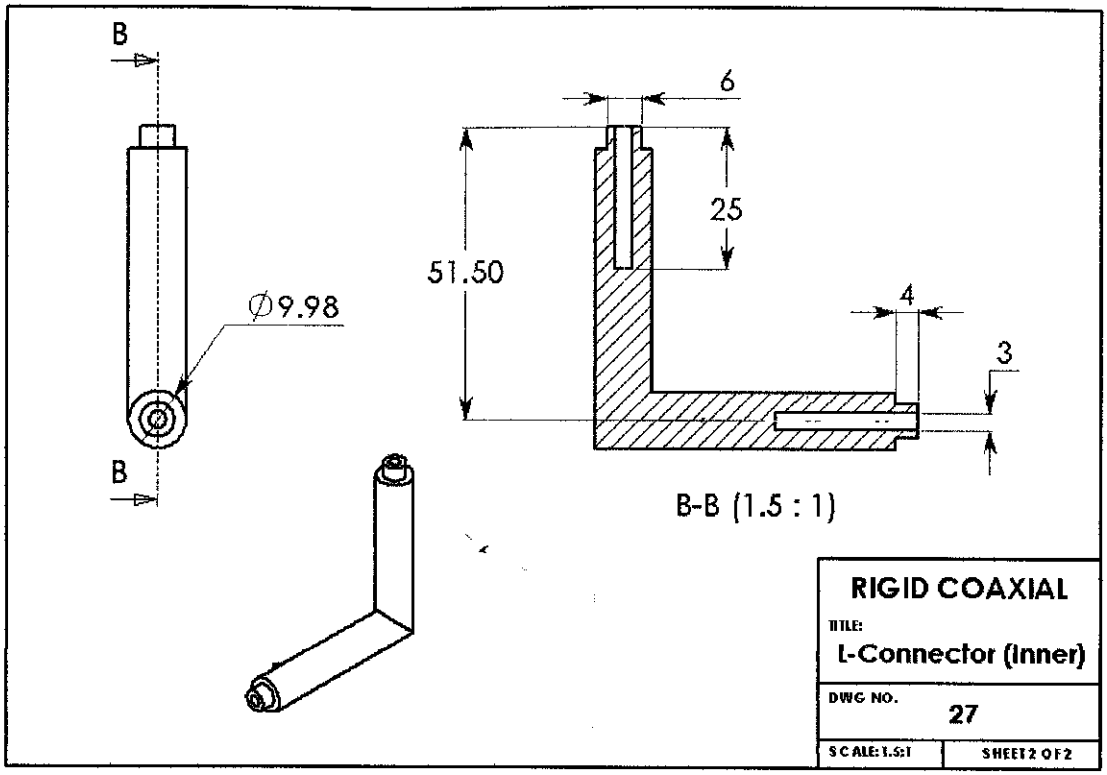
รูปที่ 3.25 ภาพตัวเชื่อมต่อที่มีลักษณะเป็นรูปตัว T

ข้อต่อชนิดงอ 90° มีส่วนประกอบดังนี้

1. Elbow (Outer) จะมีการออกแบบดังรูปที่ 3.26
2. Elbow (Inner) จะมีการออกแบบดังรูปที่ 3.27
3. Swivel Flange
4. Inner Conductor Connector1
5. Insulator

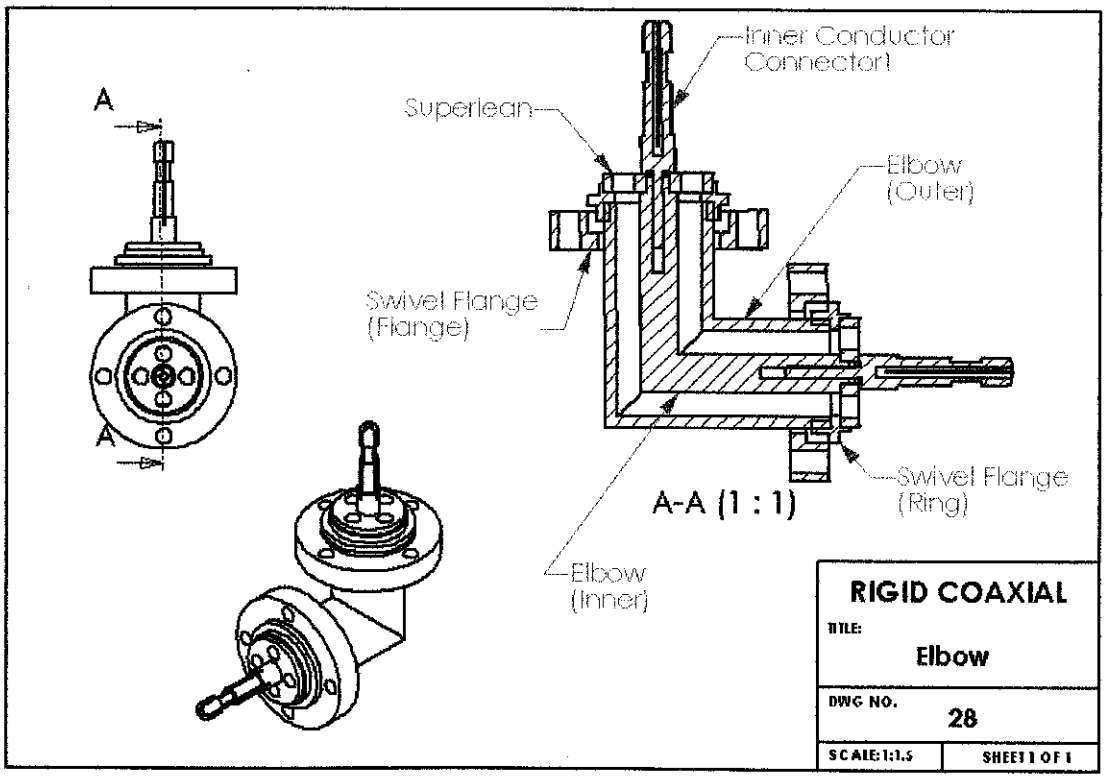


รูปที่ 3.26 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Outer ของข้อต่อชนิดงอ 90°

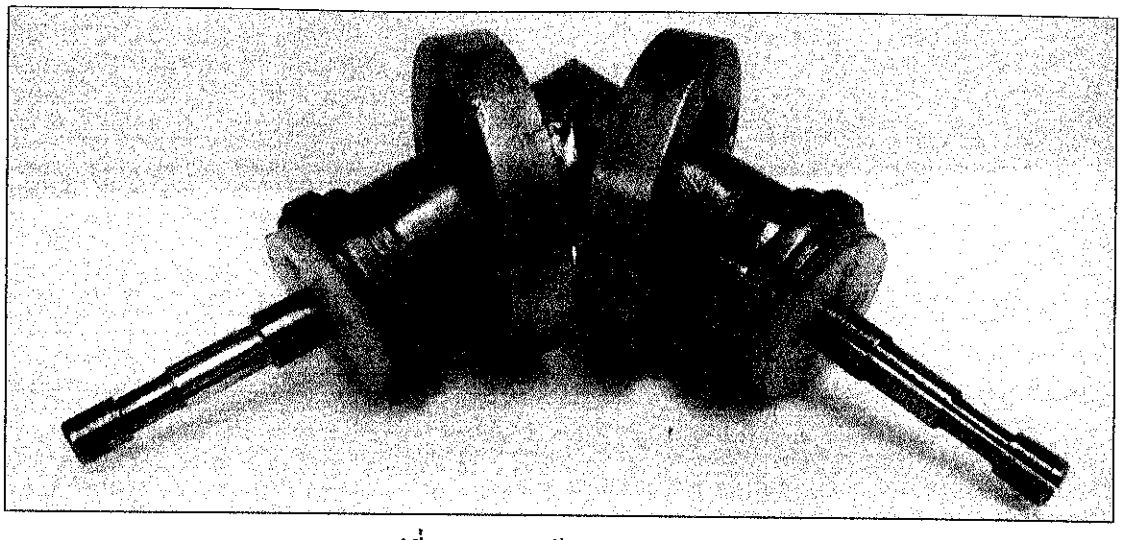


รูปที่ 3.27 ภาพวาดแสดงการออกแบบ Inner ของข้อต่อชนิดงอ 90°

ซึ่งเมื่อทำการประกอบแล้วจะได้ดังรูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.29

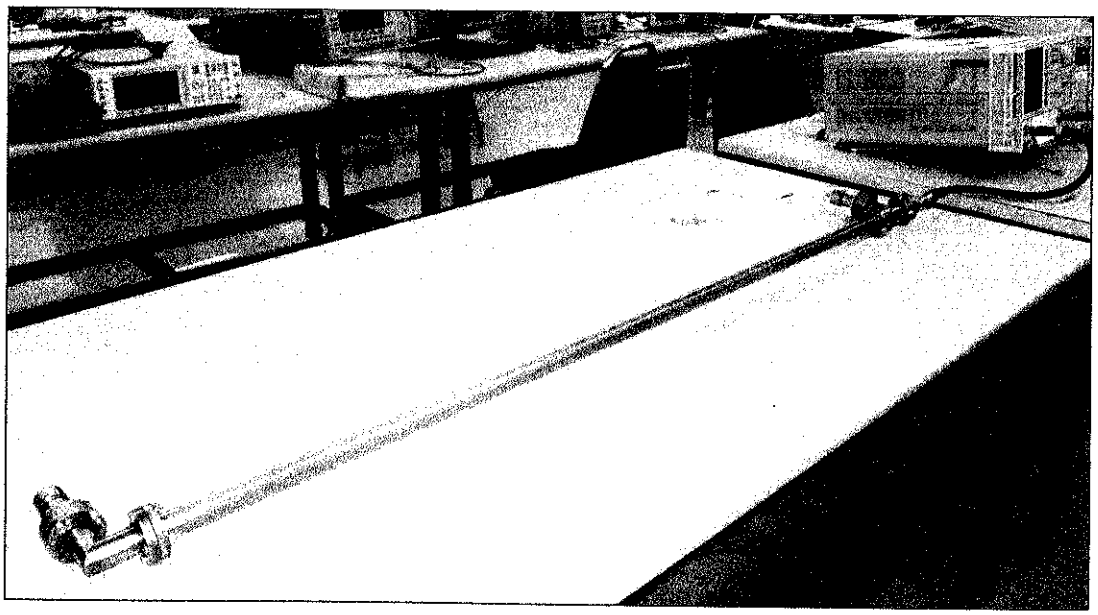


รูปที่ 3.28 ภาพวาดแสดงการประกอบของข้อต่อชนิดงอ 90°



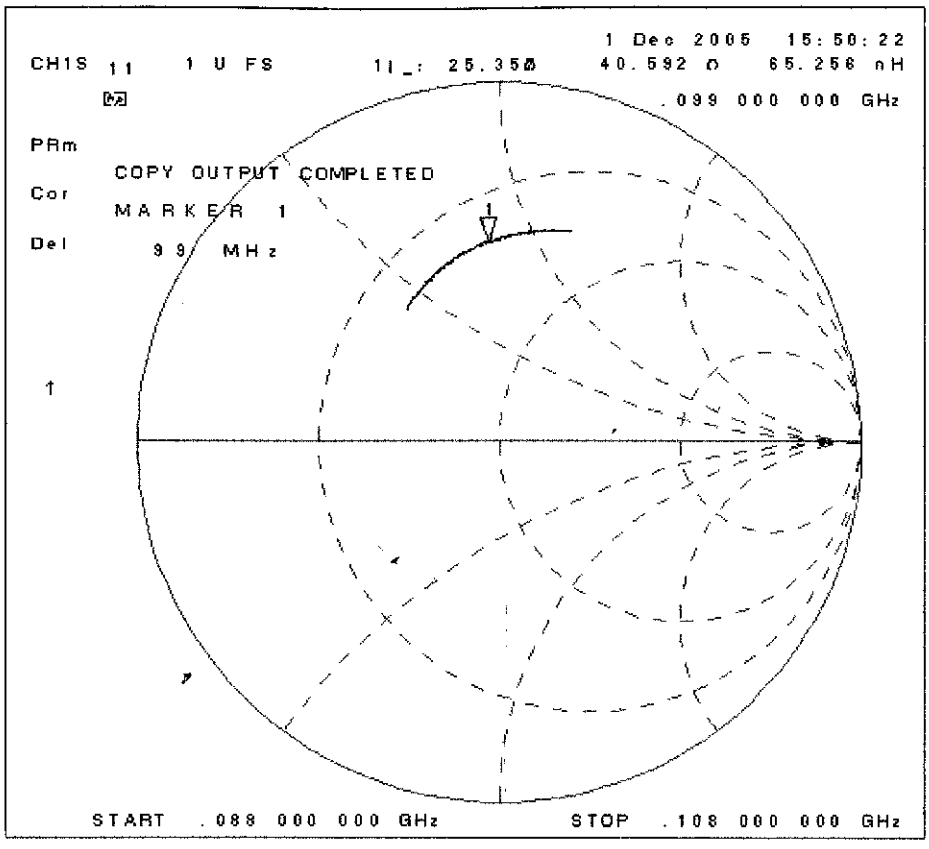
รูปที่ 3.29 ภาพข้อต่อชนิดงอ 90°

เมื่อทำการประกอบชิ้นส่วนของสายส่งสัญญาณที่นำสายอากาศสองตัวมาขนานกัน (ในที่นี้ใช้โหลด 50 โอห์ม) ดังรูปที่ 3.30 โดยที่โหลดทั้งสองตัวนั้นห่างกันครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้สายส่งสัญญาณจะทำหน้าที่เป็นตัวแปลงอิมพีแดนซ์ชนิดสายส่งสัญญาณ จะเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ที่ต้นสาย และเปรียบเสมือนว่าสายที่ต่อระหว่างสายอากาศทั้งสองตัวนี้ ที่ความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ไม่มีความต้านทานเลย

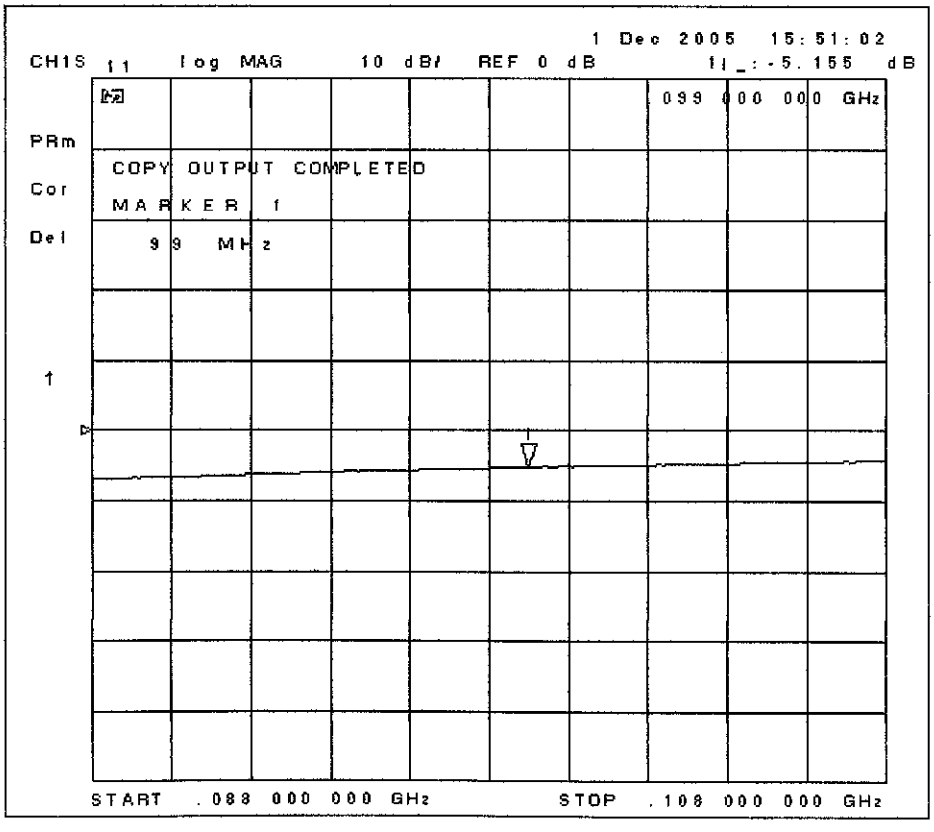


รูปที่ 3.30 ภาพแสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณเมื่อต่อโหลดสองตัว

แล้วทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะด้วย Network Analyzer จะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะประมาณ 25.35 โอห์ม ดังรูปที่ 3.31 และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ ย่านความถี่การใช้งานจะมีค่าประมาณ -5.15 dB ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.31 ภาพผลการวัดแสดงค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ได้จากการวัดสายส่งสัญญาณต้นแบบ

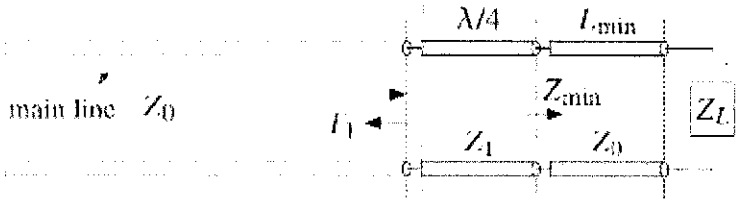


รูปที่ 3.32 ภาพผลการวัดแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ ย่านความถี่ต่างๆ

จากค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ได้นี้ จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ได้นั้นลดลงไปถึงครึ่งหนึ่งจากที่ทำการออกแบบไว้ที่ 50 โอห์ม

3.3 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะชนิดสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง

การออกแบบตัวแปลงอิมพีแดนซ์ในที่นี้เป็นการออกแบบตัวตัวแปลงอิมพีแดนซ์ที่ต้องการให้ใช้งานที่ความถี่ 98 MHz และต้องการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ให้ได้เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น (50 โอห์ม) โดยหลักการที่ใช้ในการออกแบบตัวแปลงนี้เลือกใช้ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น λ/4 ชนิดเอามาต่ออนุกรม แบบ 2- section ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 10.2.2 ซึ่งมีขั้นตอนการออกแบบดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.15 ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น $\lambda/4$

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่าตัวแปลงอิมพีแดนซ์จะมีความยาวอยู่ 2 ส่วนคือ ความยาวส่วนที่ 1 มีความยาวเท่ากับ $\lambda/4$ นั้นคือ

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{3.061}{4} = 0.765 \ m$$

และความยาวส่วนที่ 2 คือความยาวเท่ากับ $l_{\max}$ ซึ่งสามารถคำนวณหาความยาวส่วนที่ 2 นี้ได้ตามสมการที่ (2.43ก)

$$l_{\max} = \frac{\theta_L}{4\pi}\lambda \qquad ;0 \le \theta_L \le \pi$$

ซึ่ง θ_L คือมุมเฟสของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในหน่วยเรเดียน

ตัวอย่างสำหรับการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบตัวแปลงอิมพีแดนซ์ จะใช้ค่าของ Z_L ที่ได้จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายเฟสสำหรับสายอากาศแถวลำดับที่ได้มาต่อแบบขนานกัน (รูปที่

3.30) มีค่าเท่ากับ 25.35 Ω และค่า Z_0 เป็นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณที่ออกแบบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 50 Ω

คำนวณหาค่า θ_L จากสมการที่ (2.42)

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_O}{Z_L + Z_O} = \frac{25.35-50}{25.35+50} = -0.327 = 0.327\angle\pi$$

จะได้ค่าของ θ_L เท่ากับ π

ดังนั้นจากสมการที่ (2.43ก) สามารถคำนวณได้ว่า

$$l_{max} = \frac{\theta_L}{4\pi}\lambda = \frac{\pi}{4\pi}\lambda = \frac{\lambda}{4}$$

ซึ่ง ณ ที่ตำแหน่ง $l = l_{max}$ นี้จะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่น Z_{max} สามารถคำนวณหาขนาดของค่าอิมพีแดนซ์นี้ได้ ซึ่งตัวแปร S ในสมการคือค่าของคลื่นนิ่ง Standing Wave Ratio คำนวณจากสมการที่ (2.12) นั่นคือ

$$S = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} = \frac{1+0.327}{1-0.327} = 1.971$$

ดังนั้น Z_{max} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.65) ว่ามีค่าเท่ากับ

$$Z_{max} = Z_0\frac{1+\Gamma_L}{1-\Gamma_L} = Z_0\frac{1+|\Gamma_L|}{1-|\Gamma_L|} = SZ_0 = 1.971\times 50 = 98.55\ \Omega$$

และจากรูปที่ 2.15 เป็นกรณีของตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบหนึ่งหน้าตัด ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนที่เป็นตัวแปลงอิมพีแดนซ์ได้ตามสมการที่ (2.44ข) ดังนี้

$$Z_t = \sqrt{Z_0 Z_{max}} = \sqrt{S_L}\ Z_0 = \sqrt{1.971}\times 50 = 70.19\ \Omega$$

จากตัวอย่างดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการคำนวณหาค่าความยาวของ l_{max} ซึ่งจะใช้คำสั่งดังต่อไปนี้

$$[Z_1, l_m] = \text{qwt1}(25.35,50,'\text{max}')$$

%Answer

$Z_1 =$ 70.2208

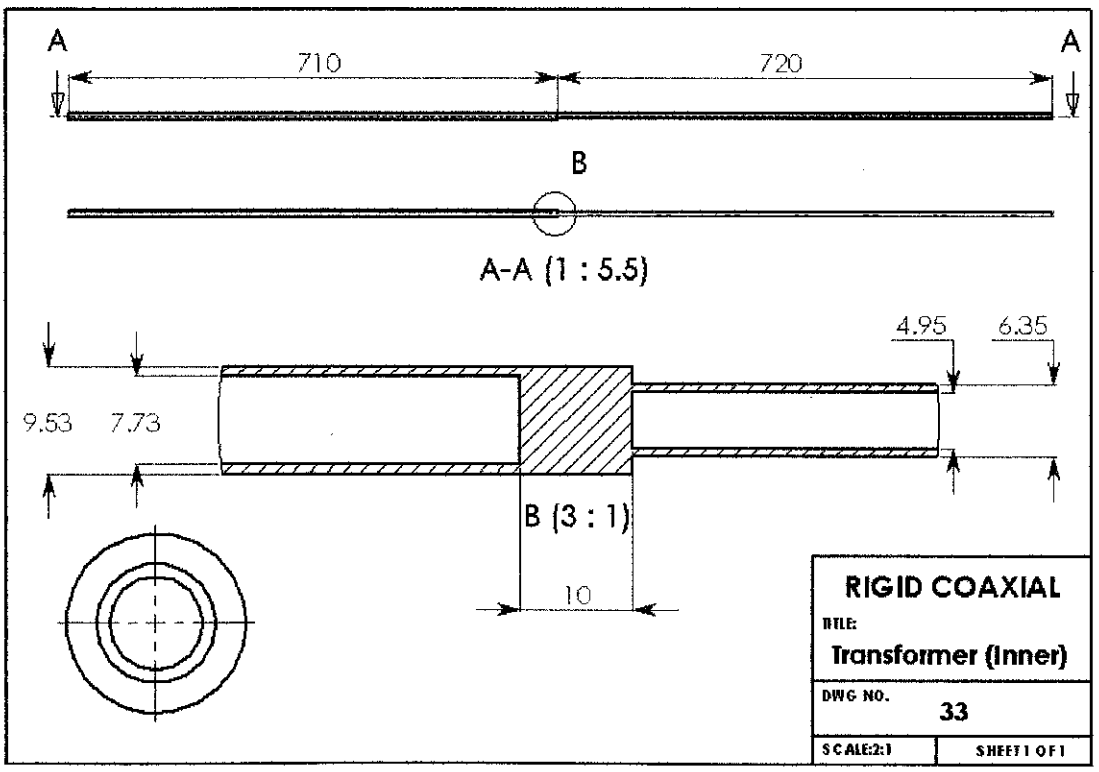
$l_m =$ 0.2500

$$\therefore l_{max} = 0.25\lambda = 0.765 \ m$$

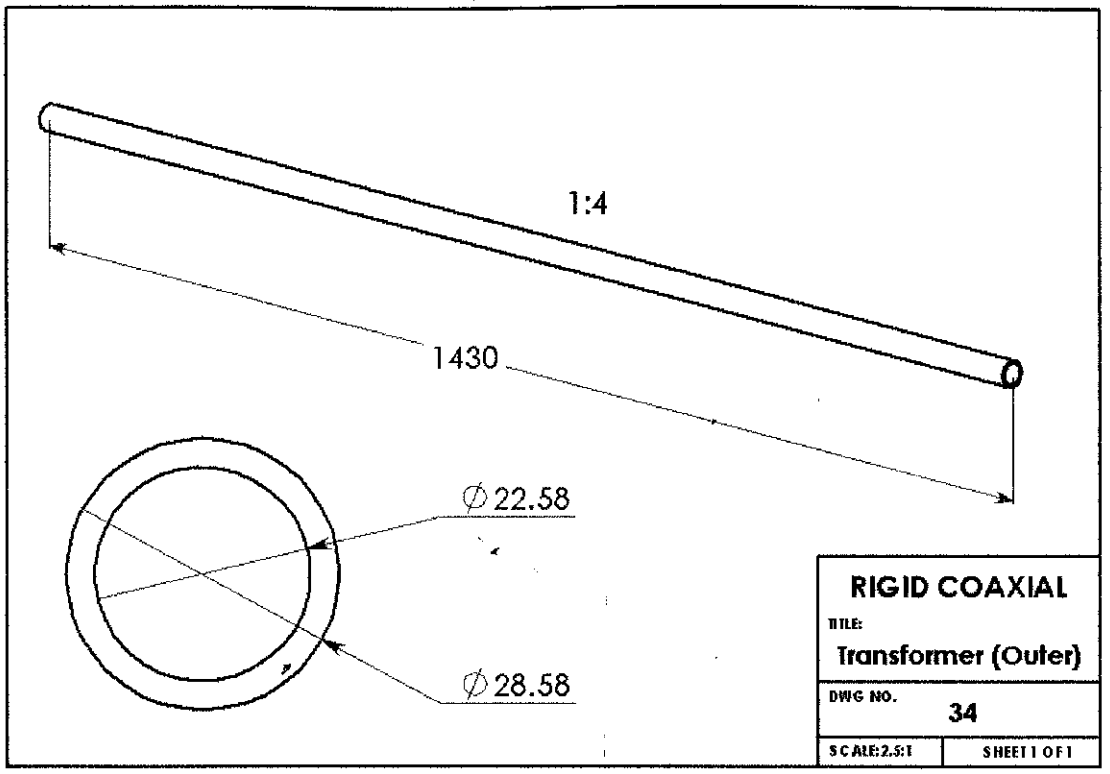
จะเห็นได้ว่าตัวแปลงอิมพีแดนซ์นี้จะได้ความยาวทั้ง 2 ส่วน เท่ากับ $\lambda/4$ ซึ่งการออกแบบสามารถทำได้เช่นเดียวกับชิ้นงานส่วนอื่น

ตัวแปลงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะชนิดสายส่งสัญญาณแบบท่อแข็ง มีส่วนประกอบดังนี้

1. Outer จะมีการออกแบบดังรูปที่ 3.26
2. Inner จะมีการออกแบบดังรูปที่ 3.27
3. Fixed Flange
4. Insulator for Inner

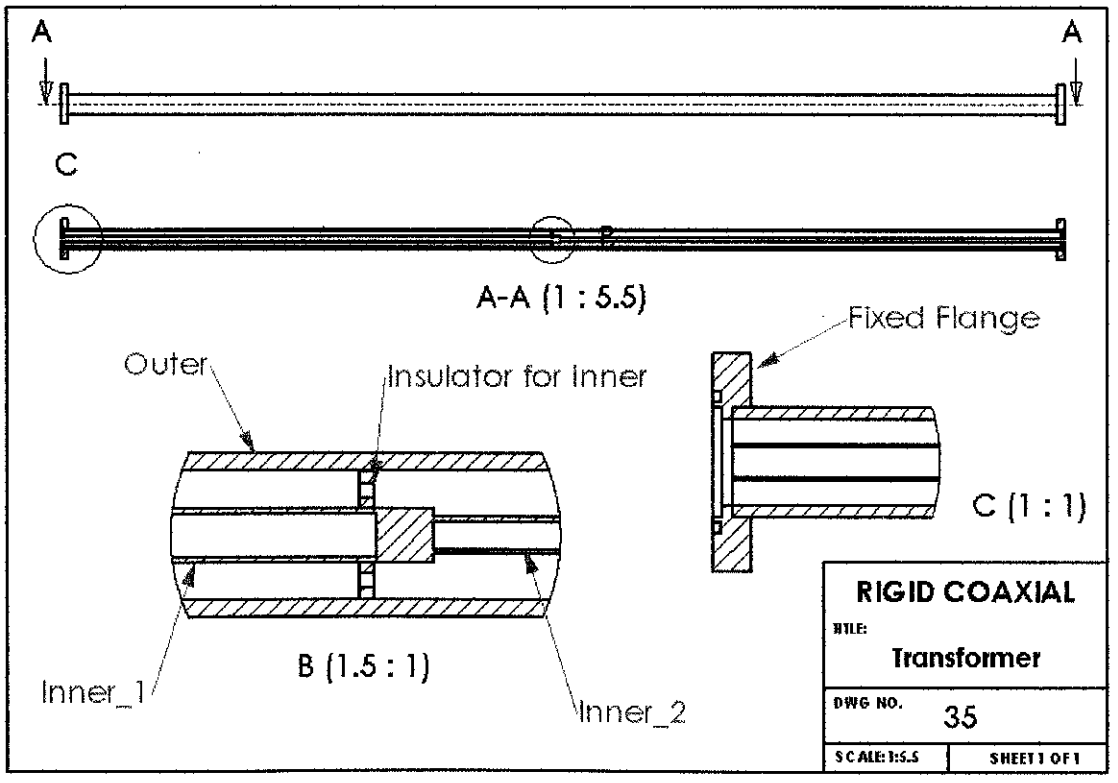


รูปที่ 3.33 ภาพวาดแสดงตัวแปลงอิมพีแดนซ์ (Inner)

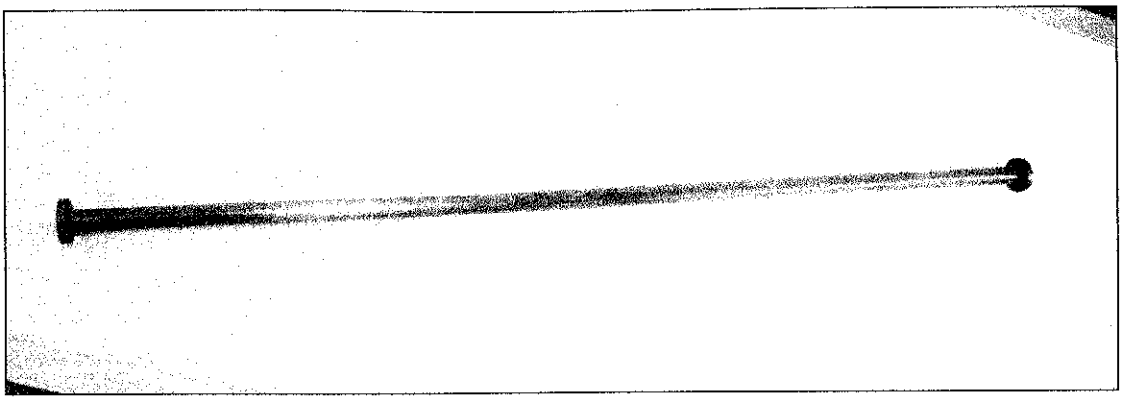


รูปที่ 3.34 ภาพวาดแสดงตัวแปลงอิมพีแดนซ์ (Outer)

ซึ่งเมื่อทำการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ แล้วจะได้ดังรูปที่ 3.35 และรูปที่ 3.36

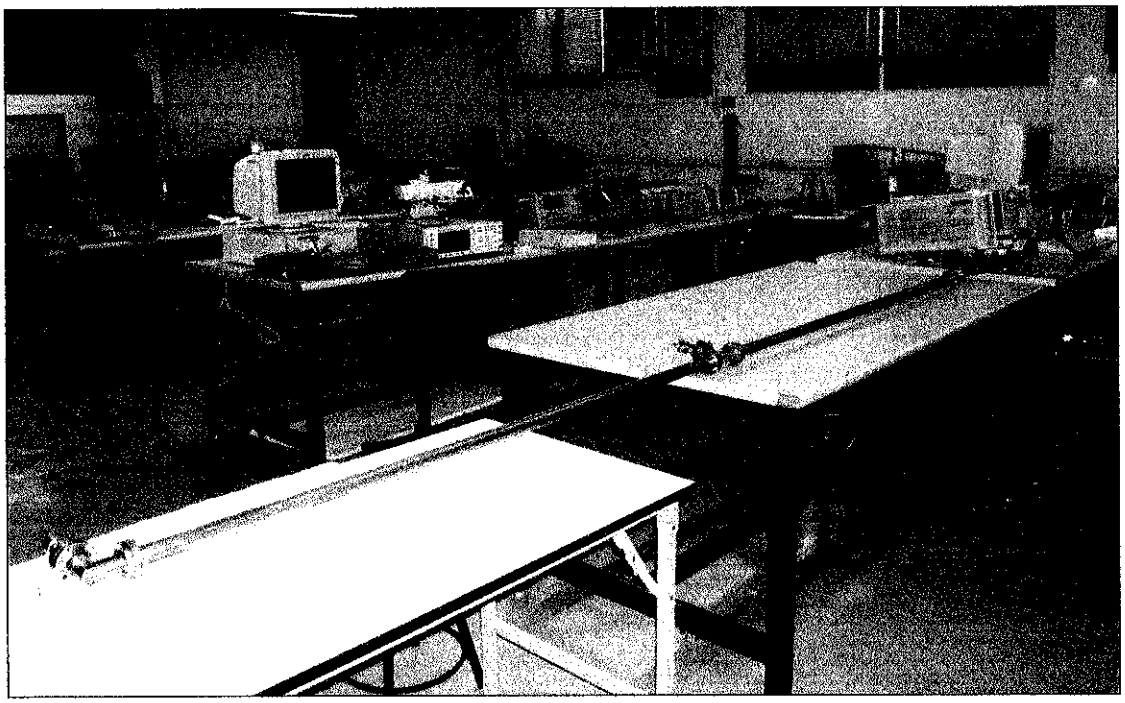


รูปที่ 3.35 ภาพวาดแสดงส่วนประกอบของตัวแปลงอิมพีแดนซ์



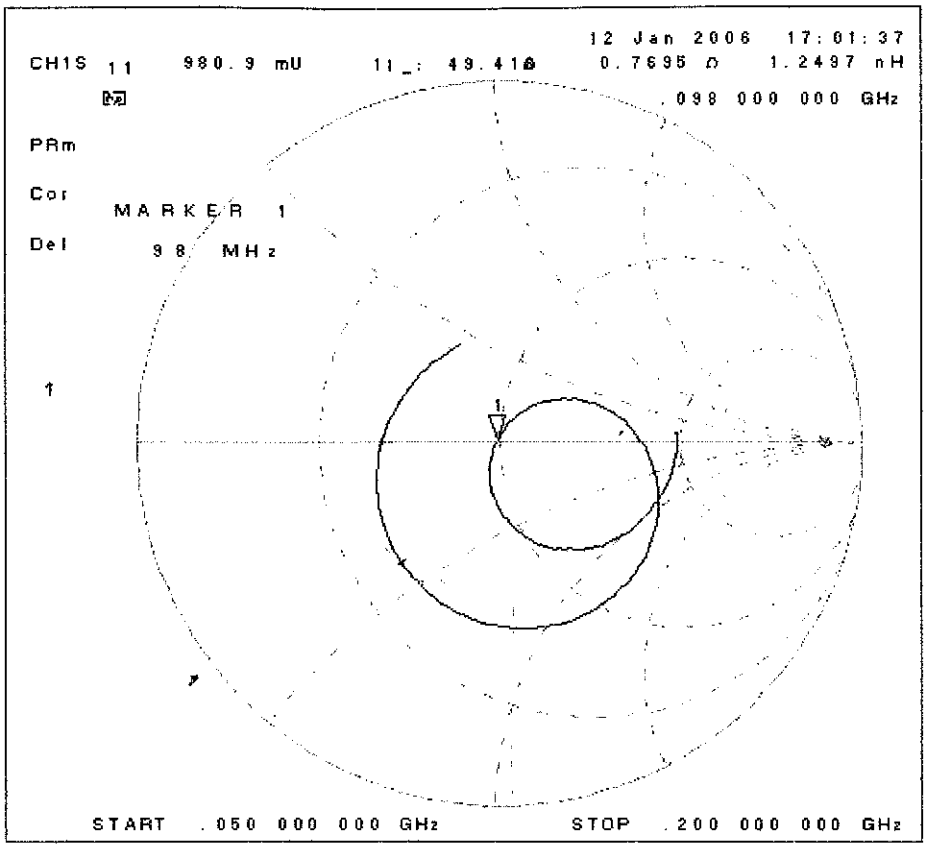
รูปที่ 3.36 ภาพตัวแปลงอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการออกแบบ

เมื่อทำการต่อชิ้นส่วนของสายเฟสที่มีสายอากาศสองตัวมาขนานกันอยู่ (ชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบจากชุดที่ 3.1) และตัวแปลงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.37

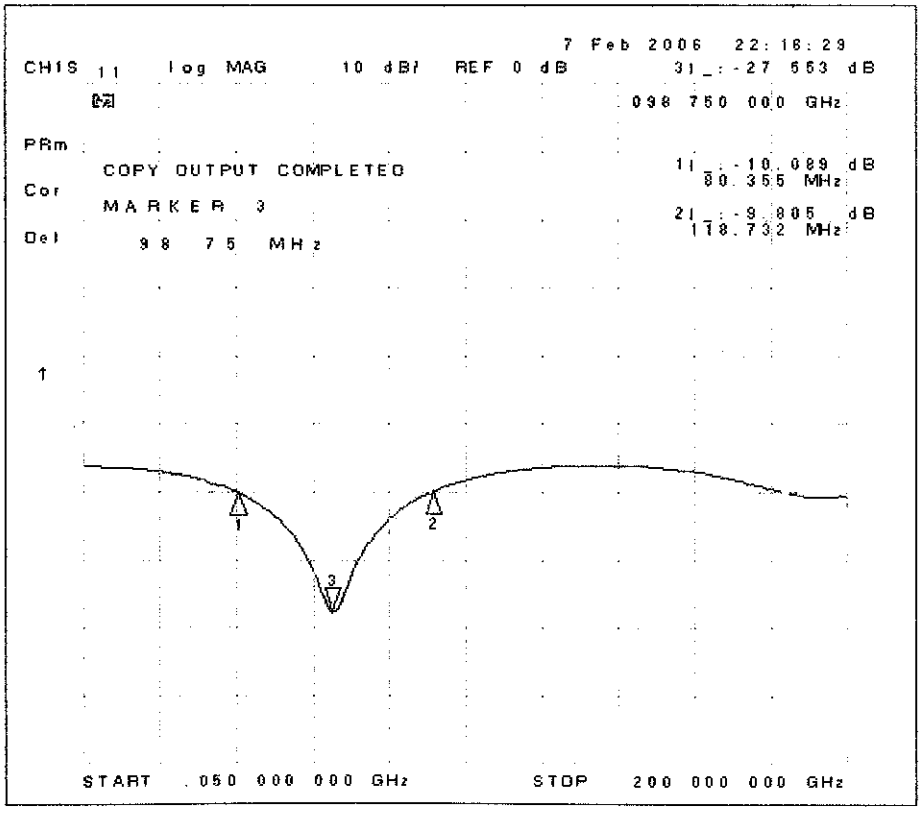


รูปที่ 3.37 ภาพแสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณเมื่อต่อโหลดสองตัวและตัวแปลงอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการออกแบบ

แล้ววัดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะด้วย Network Analyzer จะได้ 49.41 Ω ดังรูปที่ 3.38 และมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนประมาณ -10 dB (SWR=1.5) ณ ย่านความถี่ 80.355-118.732 MHz การใช้งานดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.38 ภาพผลการวัดแสดงค่าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ได้



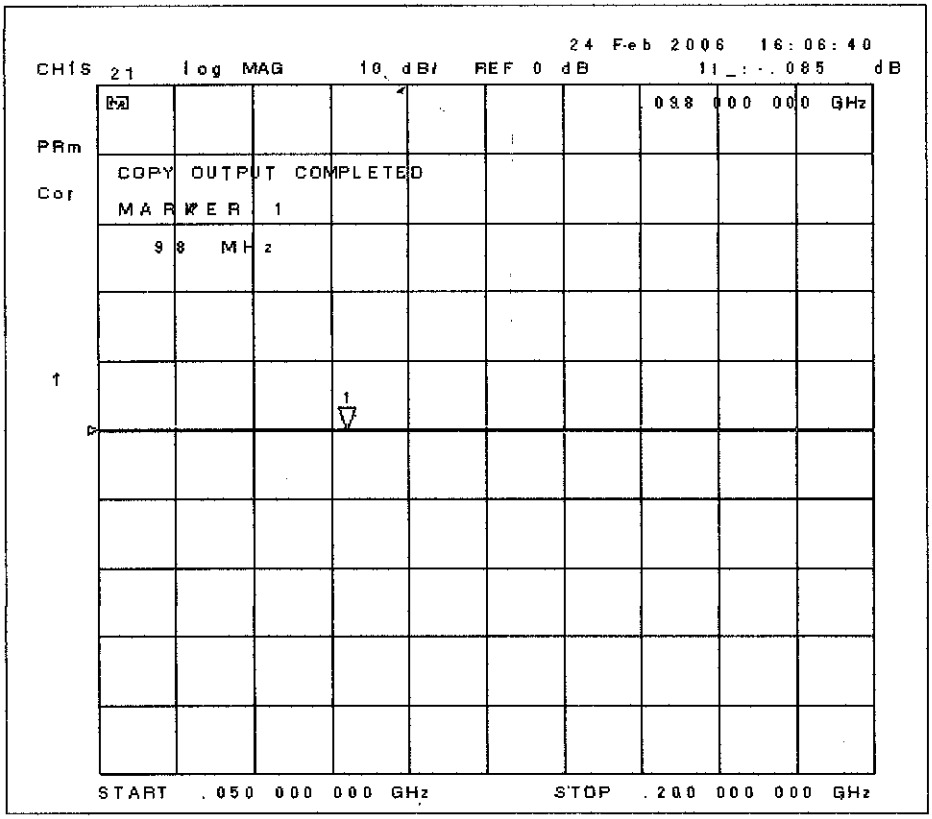
รูปที่ 3.39 ภาพผลการวัดแสดงค่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ ย่านความถี่การใช้งาน

จากสายส่งสัญญาณต้นแบบความยาว λ/2 ที่ได้จากรูปที่ 3.9 สามารถวัดค่าการลดทอนของสัญญาณได้ประมาณ 0.085 dB ดังรูปที่ 3.40 ซึ่งค่าการลดทอนที่ 100 ฟุต สามารถหาได้จาก

$$1.5\ m = 0.085\ dB$$

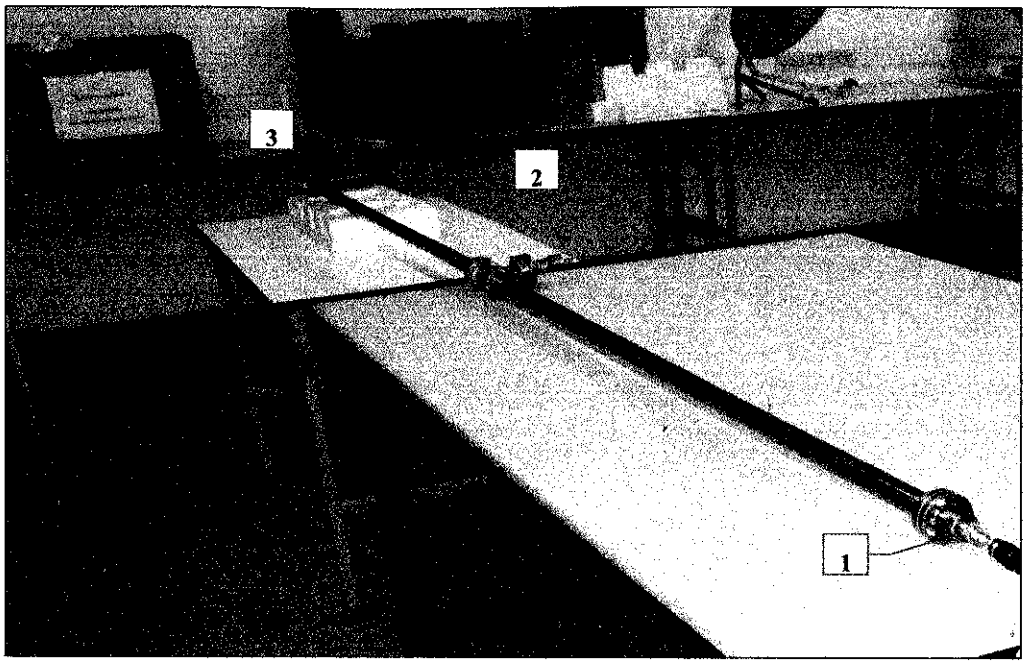
$$100\ m = \frac{0.085 \times 100}{1.5} = 5.67\ {}^{dB}\!/_{100\ m}$$

นั้นคือ ค่าการลดทอนจะประมาณ 5.67 dB / 100 m

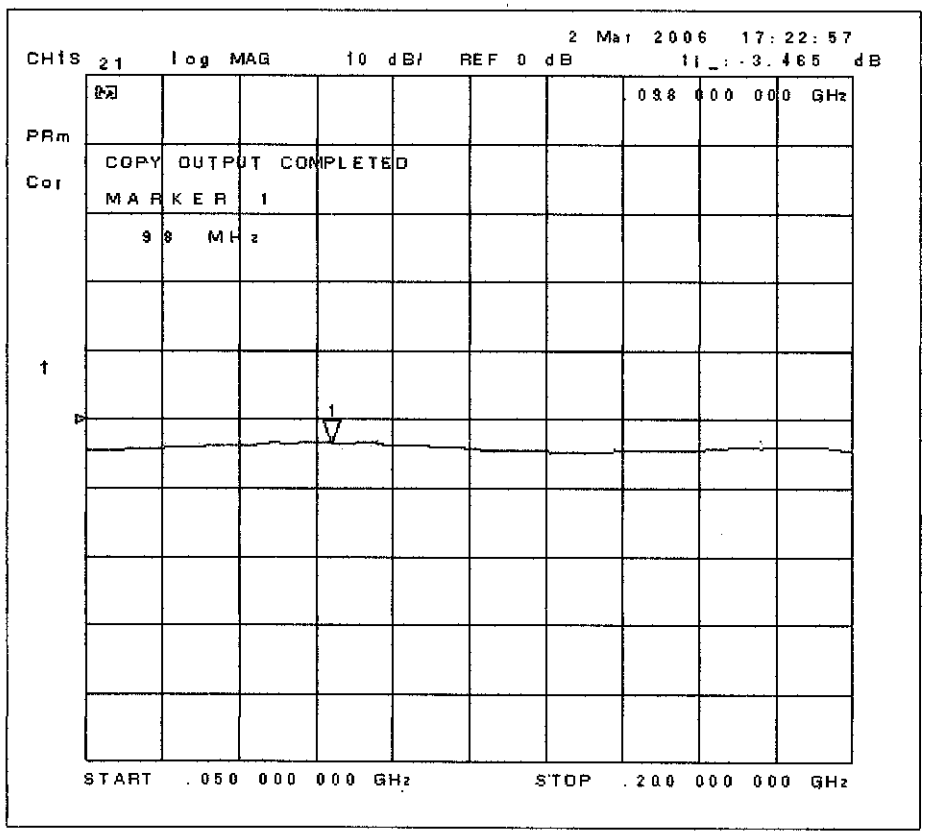


รูปที่ 3.40 ภาพผลการวัดแสดงค่าการลดทอน ณ ย่านความถี่การใช้งาน ของสายส่งสัญญาณความยาว λ/2

จากการต่อสายส่งสัญญาณดังรูปที่ 3.41 เมื่อนำมาวัดค่าการแบ่งกำลังที่ส่งออกไปในแต่ละทาง โดยทำการวัดแบบ 2-port ซึ่งทำการต่อ Port 1 ของ Network Analyzer เข้ากับตำแหน่งที่ 1 ต่อ Port 2 เข้ากับตำแหน่งที่ 2 ส่วน Port 3 ต่อเข้ากับโหลด 50 โอห์ม จะได้ค่าประมาณ 3.465 dB ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.42 จากนั้นทำการสลับการต่อที่ Port 2 และ Port 3 ซึ่งจะได้ค่าประมาณ 3.495 dB ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.43

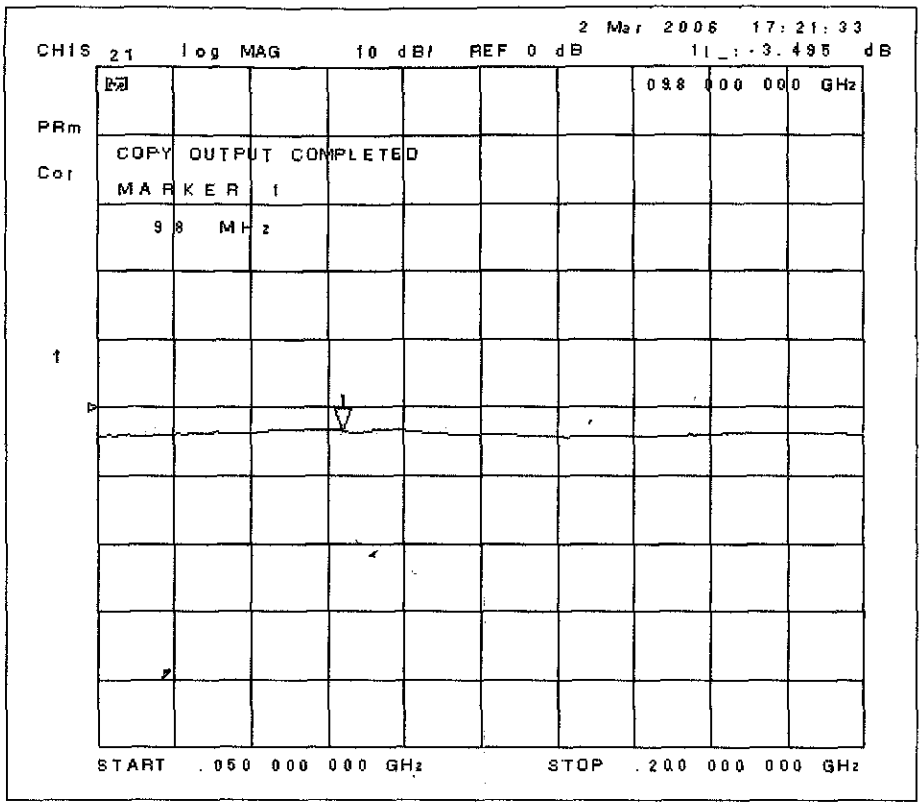


รูปที่ 3.41 ภาพแสดงจุดที่ใช้สำหรับการวัดทดสอบค่ากำลังงาน

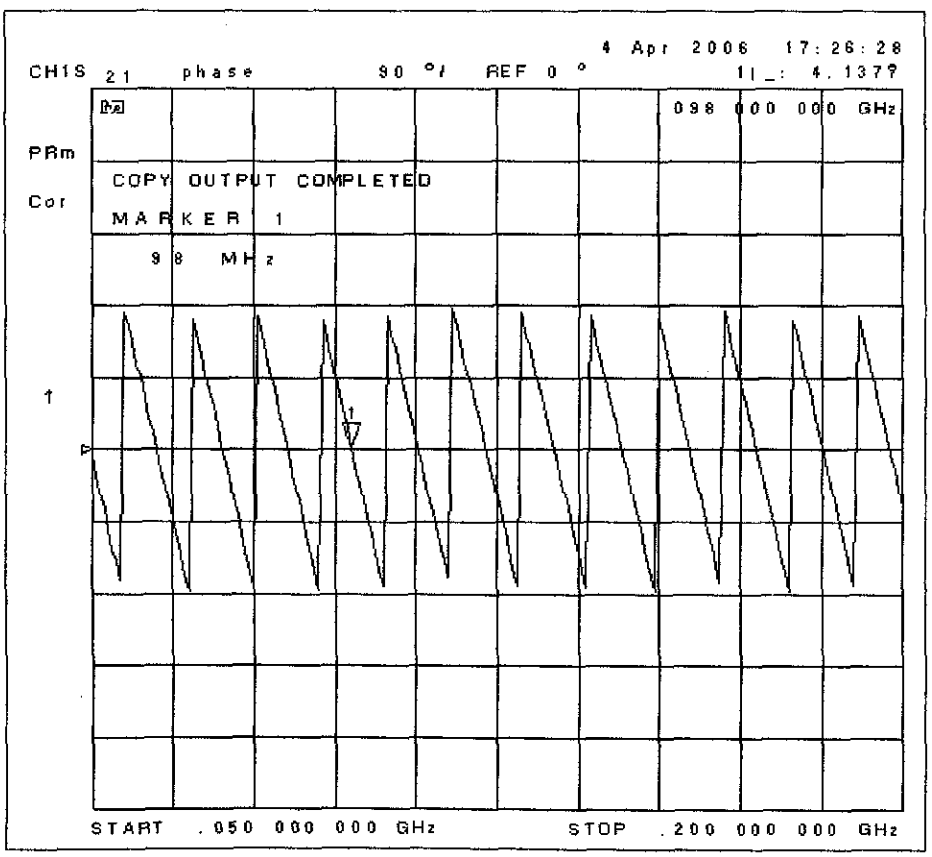


รูปที่ 3.42 ภาพผลการวัดแสดงค่ากำลังงาน ณ จุดที่ 3

จากผลการวัดที่ได้ดังรูปที่ 3.42 และ 3.43 แสดงให้เห็นได้ว่า การทำสายเฟสสำหรับสายอากาศแถวลำดับ เปรียบเสมือนการแบ่งกำลังนั่นเอง



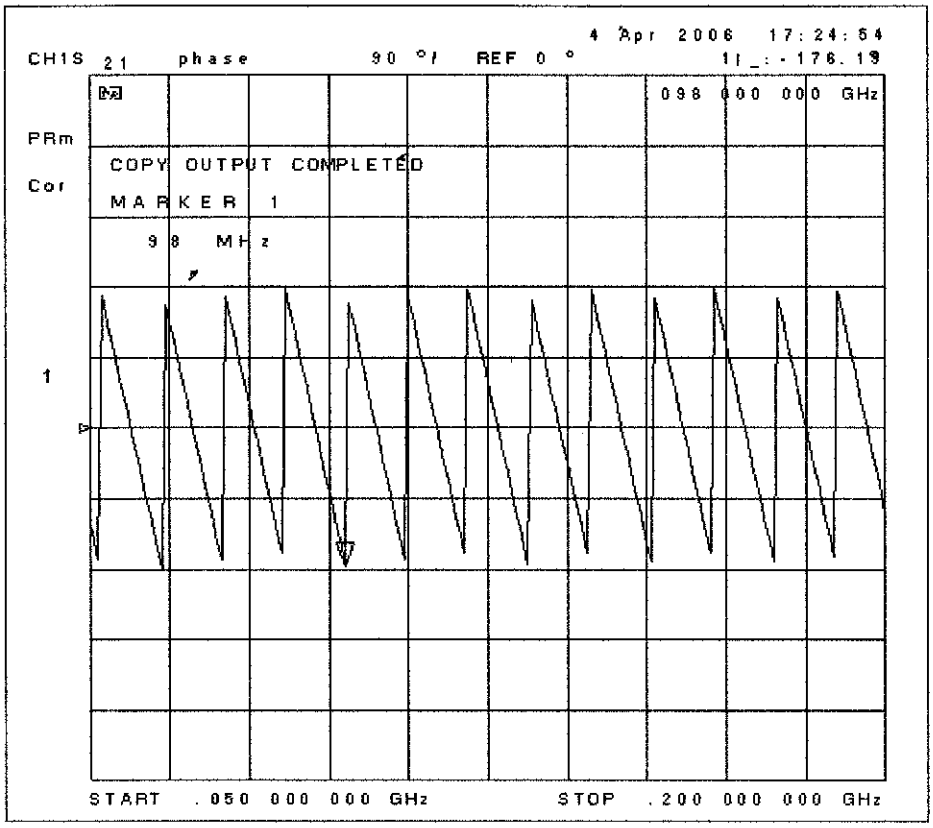
รูปที่ 3.43 ภาพผลการวัดแสดงค่ากำลังงาน ณ จุดที่ 2



รูปที่ 3.44 ภาพผลการวัดแสดงเฟส ณ จุดที่ 2

จากรูปที่ 3.41 เมื่อทำการวัดเฟสของสัญญาณที่ตกในสายส่งสัญญาณ ณ ตำแหน่งที่ 2 และ 3 (ตำแหน่งที่ใช้เชื่อมต่อสายอากาศ) โดยใช้เครื่อง Network Analyzer จะได้ว่า ณ ตำแหน่งที่ 2 นั้นมีการเริ่มของเฟสที่ประมาณ 4.13° ซึ่งใกล้เคียงกับ 0° ดังแสดงในรูปที่ 3.44 ส่วนการเริ่มของเฟส ณ ตำแหน่งที่ 3 จะอยู่ที่ประมาณ -176.1° ซึ่งใกล้เคียงกับ -180° ดังแสดงในรูปที่ 3.45

จะเห็นได้ว่าการเริ่มของเฟสในตำแหน่งที่ 2 และ 3 นั้นเริ่มที่ 0° และ 180° เนื่องจากระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองห่างกันเป็นระยะเท่ากับ $\lambda/2$



รูปที่ 3.45 ภาพผลการวัดแสดงเฟส ณ จุดที่ 3

3.4 สรุป

การสร้างสายเฟสสำหรับสายอากาศแถวลำดับที่ใช้ในภาคส่งของการสื่อสารด้วยระบบ FM นั้น ต้องใช้สายส่งสัญญาณที่สามารถทนกำลังส่งได้สูง เช่น สายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง การวางสายอากาศแถวลำดับในที่นี้จะเป็นสายอากาศสองตัวขนานกันในแนวเชิงเส้นแกนร่วม ซึ่งจะวางห่างกันเป็นความยาว $\lambda/2$ จึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ จะต้องใช้ตัวแปลงอิมพีแดนซ์คุณลักษณะชนิดสายส่งสัญญาณแบบท่อแข็งเพื่อแปลงค่าอิมพีแดนซ์ให้ได้ตามที่ต้องการ

บทที่ 4
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

โครงงานฉบับนี้เป็นการนำเสนอสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง ซึ่งได้ออกแบบมาใช้งานร่วมกับสายอากาศสำหรับเครื่องส่งวิทยุกำลังส่งสูง ในย่านความถี่เอฟเอ็ม สายส่งสัญญาณชนิดที่ได้เลือกมานี้มีลักษณะเด่นคือมีลักษณะทางกายภาพที่แข็งแรง รองรับหรือทนต่อกำลังงานของเครื่องส่งได้ มีค่าการสูญเสียน้อยมากเมื่อเทียบกับสายส่งสัญญาณที่ใช้งานในระบบเดียวกัน สามารถป้องกันการรบกวนจากสัญญาณภายนอกและยังสามารถทำการแมตซ์ระหว่างเครื่องส่งวิทยุกับสายอากาศได้โดยง่าย

ในเชิงทฤษฎีแล้ว สมการที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการออกแบบขนาดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมทั่ว ๆ ไปนั้น จะสามารถแยกพิจารณาว่า จะนำสายส่งสัญญาณนั้นมาใช้งานในย่านความถี่สูง ความถี่กลางหรือความถี่ต่ำ ซึ่งในการออกแบบสำหรับโครงงานนี้ได้ออกแบบโดยพิจารณาว่านำไปใช้งานในย่านความถี่สูง จะทำให้มีค่าความลึกผิวค่อนข้างต่ำ กระแสจึงไหลอยู่เฉพาะบริเวณผิวตัวนำ ไม่แพร่เข้าไปในผิว และสามารถละเลยไม่นำค่าความต้านทานและค่าความนำไฟฟ้ามาพิจารณาได้เนื่องจากมีผลน้อยมาก ณ ที่ความถี่ใช้งานสูง ทำให้เหลือพารามิเตอร์ที่นำมาใช้คำนวณค่าอิมพีแดนซ์เพียงแค่ค่าของความเหนี่ยวนำและค่าความจุทางไฟฟ้าเท่านั้น ในส่วนของการทำสายเฟสได้นำหลักการง่าย ๆ มาช่วยในการหาระยะความยาวของสาย คือควรจะมีความยาวเท่ากับความยาวครึ่งคลื่นเป็นอย่างน้อย เพื่อที่จะได้ให้กระแสเดินทางบนตัวนำไปถึงแต่ละช่วงมีเฟสตรงกัน ณ ทุก ๆ จุดรอยต่อของสายที่มีการเชื่อมต่อแบบแถวลำดับกันของสายอากาศ สำหรับตัวแปลงอิมพีแดนซ์ที่เลือกนำมาใช้ในการแปลงอิมพีแดนซ์ ณ ที่จุดปลายด้านที่ทำการลำดับกันแล้วนั้น ก็อาศัยหลักการทำนองเดียวกันคือ ต้องการให้กระแสมีความต่อเนื่องเช่นเดียวกันกับกระแสในส่วนของสายส่งสัญญาณ จึงคำนวณหาความยาวของสายส่งที่จะทำให้กระแสมีค่าน้อยที่สุดที่บริเวณปลายสายขึ้นมาก่อน แล้วใช้ตัวแปลงอิมพีแดนซ์ความยาวหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่นต่อกับสายส่งสัญญาณนั้น สมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณดังได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 2 ของรายงานฉบับนี้

การคำนวณหาขนาดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งนั้น จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของตัวนำที่นำมาใช้ทำเป็นแกนใน แกนนอกและชนิดของตัวกลางที่คั่นกลางอยู่ระหว่างตัวนำทั้งสองนี้ แต่ไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของตัวนำเลย ซึ่งในโครงงานครั้งนี้ได้เลือกใช้ท่อทองแดงมาทำเป็นตัวนำทั้งแกนในและแกนนอก เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ไม่ยากและมีขนาดให้เลือกได้หลายขนาด โดยสมมุติให้ตัวกลางที่คั่นระหว่างตัวนำทั้งสองนี้เป็นอากาศ ในส่วนของการออกแบบเพื่อที่จะนำสาย

ส่งสัญญาณไปใช้งานจริงร่วมกับสายอากาศสำหรับเครื่องส่งวิทยุกำลังสูงนั้น จะต้องออกแบบให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ทำออกมาใกล้เคียงกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อที่จะทำให้สามารถถ่ายโอนกำลังงานระหว่างเครื่องส่งวิทยุและสายอากาศมากที่สุดเช่นกัน ซึ่งเมื่อมีการนำเอาสายอากาศมาต่อแบบแถวลำดับกันเพื่อที่จะเพิ่มอัตราขยายขึ้นนั้น ก็จะต้องมีการทำสายเฟสและการทำแมตซ์ให้กับสายส่งสัญญาณ ในบทที่ 3 ได้แสดงผลการวัดและทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ ค่าการลดทอนที่ได้ออกแบบและสร้าง จะพบว่าผลการทดสอบนั้นออกมาค่อนข้างเป็นที่น่าพอใจ คือมีค่าค่อนข้างตรงตามทฤษฎี มีความคลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎีอยู่บ้าง แต่ก็นับว่าตรงตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้จริงของสายส่งสัญญาณที่จะมีการใช้งานจริง

4.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับสายส่งสัญญาณแบบแกนร่วมชนิดท่อแข็ง ที่ได้ทำการทดสอบนี้ นับว่ามีค่าอิมพีแดนซ์ตรงตามทฤษฎีอยู่ แต่ภายหลังการนำเอาสายส่งสัญญาณตัวนี้มาทำสายเฟส เพื่อใช้กับสายอากาศมาต่อเรียงกันแบบแถวลำดับแล้วนั้น ตัวแปลงอิมพีแดนซ์ที่เลือกใช้ในการแมตซ์ระหว่างสายอากาศกับเครื่องส่งวิทยุนั้น จะพบได้ว่าให้ค่าความกว้างแถบความถี่ที่สามารถใช้งานได้มีค่าค่อนข้างจำกัดอยู่ ไม่กว้างมากนัก จึงเห็นว่าควรที่จะมีการปรับปรุงและพัฒนาตัวแปลงอิมพีแดนซ์ให้สามารถคลอบคลุมความกว้างแถบของความถี่ที่กว้าง ๆ กว่านี้ได้

บรรณานุกรม

[1] Lessons In Electric Circuits – Volume II Chapter 14: **Transmission Lines** from http://www.ibiblio.org/obp/electricCircuits/AC/AC_14.html#xtocid181990

[2] W.H. Hayt and J.A. Buck. **Engineering Electromagnetics: Transmission Lines**. 6th ed., McGraw-Hill, New York, 2001. pp. 442

[3] วิสันต์ อาชาเดโชพล และ Advanced Engineering Group. **สายอากาศและเทคนิคการติดตั้ง: บทที่ 2 ความรู้ขั้นพื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ**. หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์: กรุงเทพฯ. 2001. หน้า 43

[4] Sophocles J. Orfanidis. Electromagnetic Waves and Antennas: **Ch 11 Impedance Matching** from http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/

ประวัติผู้เขียน

นายมนตรี รัตน์นิยมชัย เกิดเมื่อวันอังคารที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2526 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลบ้านโข้ง อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนอู่ทอง อำเภออู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทร 0-5857-4727

นางสาวณัฐกานต์ หารทา เกิดเมื่อวันจันทร์ที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2527 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลนิคม อำเภอสหัสขันธ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนสหัสขันธ์ศึกษา อำเภอสหัสขันธ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทร 0-7879-7946

นางสาวสุภาพร หล่อเหลี่ยม เกิดเมื่อวันอาทิตย์ที่ 13 พฤศจิกายน พ.ศ. 2526 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลท่าช้าง อำเภอวิเศษชัยชาญ จังหวัดอ่างทอง สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนสตรีอ่างทอง อำเภอเมือง จังหวัดอ่างทอง เมื่อปี พ.ศ. 2544 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทร 0-9020-6766

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี