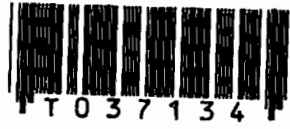


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์ผลการใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำจากท่ออลูมิเนียม



โดย
นาย จักรกฤษณ์ มาตรวิจิตร 41012046
นาย ตริพันธ์ ทับทอง 41012054

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

เลขที่.....สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขทะเบียน..... 37134
วัน, เดือน, ปี..... 4 ก.ย. 2543

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of the effect of Aluminium Rectangular Waveguide



By

Mr. Jakkrit Martvijit 41012046

Mr. Treepoj Tubtong 41012054

Project Report submitted in Partial Fulfillment of the requirements for the Bachelor's Degree

Department of Industrial Technology

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาโท การวิเคราะห์ผลการใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำจากท่อ
อลูมิเนียม

จัดทำโดย นาย จักรกฤษณ์ มาตรวิจิตร 41012046

นาย ตรีพงษ์ ทับทอง 41012054

สาขาวิชา เทคโนโลยีโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ณภาพินท์ อนันตรศิริชัย

รศ. ขวลิต เบญจางคประเสริฐ

ปีการศึกษา 2542

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง อนุมัติให้นำปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญาโท

.....ประธานกรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

.....กรรมการ

()

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การวิเคราะห์ผลการใช้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำจากท่อ อลูมิเนียม	
จัดทำโดย	นาย จักรกฤษณ์ มาตรวิจิตร	41012046
	นาย ตริพงษ์ ทับทอง	41012054
สาขาวิชา	เทคโนโลยีโทรคมนาคม	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ณภินท์ อนันตรศิริชัย รศ. ชวลิต เบญจางคประเสริฐ	
ปีการศึกษา	2542	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ เป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของท่อ Waveguide ที่ทำจากอลูมิเนียม โดยการเปรียบเทียบกับท่อ Waveguide ของชุดทดลองที่สร้างจากทองเหลือง และพื้นผิวภายในเคลือบด้วยโครเมียม จากตารางคุณสมบัติความต้านทานและความนำทางไฟฟ้า อลูมิเนียมมีค่าความต้านทานมากกว่าโครเมียม $0.02 \Omega \cdot m \times 10^{-8}$ และโครเมียมมีค่าความนำทางไฟฟ้ามากกว่าอลูมิเนียม $0.3 \text{ s/m} \times 10^6$ ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก

โดยการทดลองนี้ได้มีการวัดค่า VSWR, ค่ากำลังงานคลื่น และ ค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นของท่อ Waveguide พบว่า ท่อทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก ฉะนั้น การจะนำอลูมิเนียมมาสร้างเป็นท่อ Waveguide ในชุดทดลอง จึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่เหมาะสม เนื่องจากอลูมิเนียมที่ราคาถูกและน้ำหนักเบากว่า

ในขณะนี้คณะผู้จัดทำ ได้เขียนโปรแกรมสำหรับการออกแบบสร้างท่อ Waveguide โดยใช้ภาษา ปาสคาล เพื่อช่วยให้การคำนวณและออกแบบสร้างท่อ Waveguide เป็นไปได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น

Project Report	Analysis of the effect of Aluminium Rectangular Waveguide
By	Mr. Jakkrit Martvijit 41012046 Mr. Treepoj Tubtong 41012054
Department	Technology Telecommunication
Project Report Advisor	Ms. Noppin Anantarasirichai Assoc.Prof. Chawalit Benjangkprasert
Academe Year	1999

ABSTRACT

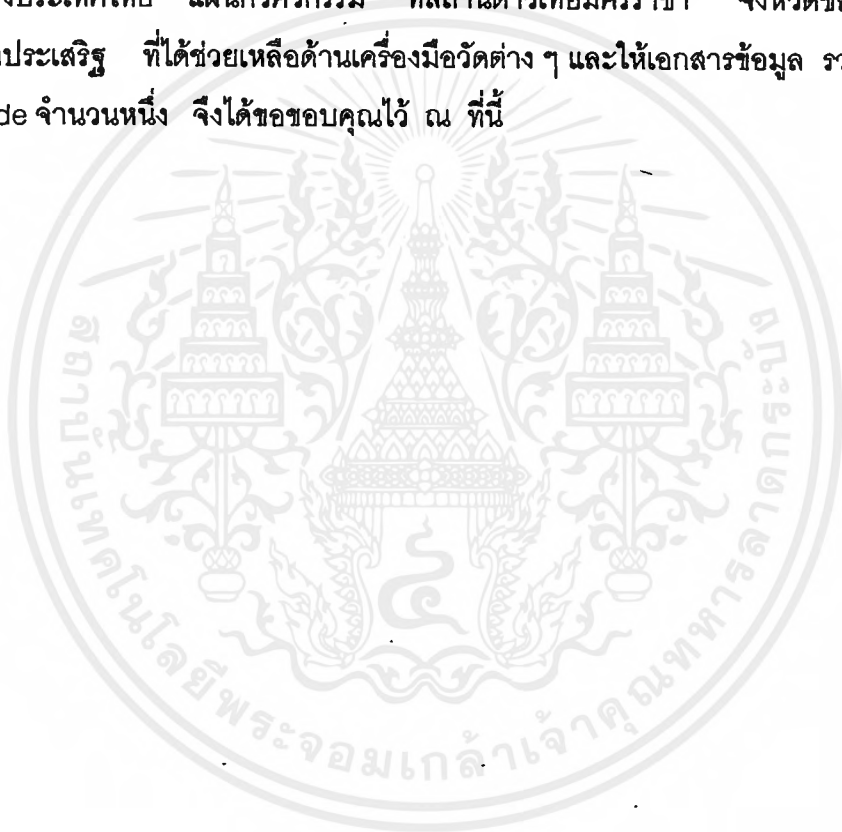
In this project, we have Analysis the efficiency of waveguide, which made from Aluminium by compared with waveguide of Microwave experimental set. Waveguide of Microwave experimental set made from Brass and cover with Chromium inside. From properties of resistivity and conductivity, Aluminium has more resistivity than Chromium $0.02 \Omega - m \times 10^{-8}$. Chromium has more conductivity than Aluminium $0.3 \text{ s/m} \times 10^6$. Both of them have approximately same properties.

In this experiment, we have measured VSWR, Power and Loss of the waveguides. We found that they have approximately efficiency. So that, Aluminium can be another material and another choice that use to build waveguide instead of waveguide of Microwave experimental set, Because it cheaper price and lighter weight than Brass.

Being faster and easier, our group had writer Program Pascal for designed and computed the waveguide.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำ และข้อมูลอย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ คือ อาจารย์ณภพินท์ อนันตรศิริชัย และ รศ. ขวลิขิต เบญจางคประเสริฐ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและการสนับสนุนในการวิจัยมาด้วยดีตลอด และพนักงานการสื่อสารแห่งประเทศไทย แผนกวิศวกรรม ที่สถานีดาวเทียมศรีราชา จังหวัดชลบุรี รวมทั้งคุณแอนก ศุภประเสริฐ ที่ได้ช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดต่าง ๆ และให้เอกสารข้อมูล รวมทั้งตัวอย่างท่อ Waveguide จำนวนหนึ่ง จึงได้ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 ขอบเขตโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน Rectangular Waveguide	3
2.1 บทนำ	3
2.2 ขั้นตอนในการวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นโดยใช้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.3 สมการคลื่น	4
2.4 คลื่นระนาบ (plane wave)	6
2.4.1 คลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ไปในทิศ z	6
2.5 การสร้างสมการคลื่น	6
2.6 การแก้สมการคลื่น	9
2.7 โหมดของคลื่น	10
2.7.1 คลื่น TEM	11
2.7.2 คลื่น TE	13
2.7.3 คลื่น TM	14
2.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม	14
2.8.1 สมการคลื่นและการแก้สมการคลื่น	15
2.9 โหมดส่งผ่านและโหมดคัตออฟ	20
2.10 การใช้งานเวฟไกด์	24
บทที่ 3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ Waveguide (ท่อนำคลื่น)	25
3.1 บทนำ	25
3.2 ทฤษฎี Waveguide	26
3.2.1 การแผ่กระจายของคลื่นในเวฟไกด์ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า	26
3.3 การเรียกชื่อโหมดต่าง ๆ ของ Waveguide.	27
3.4 ความถี่และความยาวคลื่นคัตออฟ	30
3.5 ความเร็วของคลื่นใน Waveguide	31
3.6 ความเร็วเฟสของคลื่นใน Waveguide	36

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.7 ความยาวคลื่นกลุ่มภายใน Waveguide	39
3.8 waveguide อิมพีแดนซ์	40
บทที่ 4 การออกแบบและทดลองท่อน Waveguide ชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า	42
4.1 การออกแบบ	42
4.2 การวิเคราะห์วัดค่า VSWR โดยใช้ชุดทดลอง Microwave	45
4.3 การวิเคราะห์ VSWR โดยใช้ Network Analyzer	48
4.4 การวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ	49
4.4.1 หากำลังงานจาก Gunn oscillator	53
4.4.2 หากำลังงานจาก Input ก่อนส่งผ่านท่อน Waveguide	53
4.4.3 หากำลังงานจาก Output ของท่อน Waveguide ชุดทดลอง	53
4.4.4 หากำลังงานจาก Output ของท่อน Waveguide อลูมิเนียม	54
4.5 การวิเคราะห์การวัดค่าลดทอนสัญญาณ (Power loss) ในท่อน Waveguide	54
บทที่ 5 Software ที่ช่วยในการคำนวณ	56
5.1 Software	56
5.1.1 วิธีการใช้งานโปรแกรมช่วยในการออกแบบท่อน Waveguide	56
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	58
6.1 สรุปผล	58
ภาคผนวก	59

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม	7
รูปที่ 2.2 ท่อนำคลื่นกับสนามไฟฟ้าสถิต	13
รูปที่ 2.3 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม	15
รูปที่ 2.4 การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่น TE และคลื่น TM	19
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของท่อนำคลื่นที่มีบริเวณไม่สม่ำเสมอ	20
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_{mn} กับ k_0 ในกรณีที่ $a = 2b$	21
รูปที่ 2.7 สภาพการส่งผ่านของคลื่นในท่อนำคลื่นในกรณีที่ $k_0 \rightarrow \infty$	22
รูปที่ 2.8 การเกิดโมดดิสเพอร์ชันในท่อนำคลื่น	23
รูปที่ 3.1 แสดงคลื่นระนาบที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำ	25
รูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นสนาม E และ H ภายใน Waveguide สี่เหลี่ยมผืนผ้า	27
รูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในโหมด TE ₁₀	27
รูปที่ 3.4 แสดงขนาดด้านกว้าง (a) และด้านสูง (b)	28
รูปที่ 3.5 แสดงรูปการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมด TE ₁₀ และ TE ₁₁ ทั้งสามด้าน	28
รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกลุ่มและความยาวคลื่นกระทบ	30
รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ของ V และ V _g ใน Waveguide	31
รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a ของ Waveguide และความยาวคลื่น	33
รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ของ V และ V _p	36
รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ของ λ กับ λ_g	39
รูปที่ 4.1 แสดงขนาดความกว้างและความสูงของท่อ Waveguide	42
รูปที่ 4.2 แสดงสัดส่วนของสายอากาศฮอร์น	44
รูปที่ 4.3 แสดงการวัดค่า VSWR โดยใช้ ชุดทดลอง Microwave	45
รูปที่ 4.4 แสดงการวัดค่า VSWR โดยใช้ Network Analyzer	47
รูปที่ 4.5 แสดงวงจร Power Bridge ที่อยู่ภายในเครื่องวัด	48
รูปที่ 4.6 การวัดกระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ Gunn oscillator	50
รูปที่ 4.7 การวัดกระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ ที่จุด Output ก่อนที่จะส่งผ่านท่อ Waveguide	50
รูปที่ 4.8 การวัดกระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ ที่ส่งผ่านท่อ Waveguide ชุดทดลอง	51
รูปที่ 4.9 การวัดกระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ ที่ส่งผ่านท่อ Waveguide ออสมิเนียม	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการติดต่อสื่อสารโทรคมนาคมได้นำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้งานทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ส่งและผู้รับได้รับข่าวสารที่ถูกต้องรวดเร็วและแม่นยำ แม้จะอยู่ห่างไกลกันก็ตาม เช่น จากทวีปหนึ่งไปยังอีกทวีปหนึ่ง โดยมีดาวเทียมสื่อสารคอยเชื่อมสัญญาณอยู่ในอวกาศซึ่งสูงจากผิวโลกประมาณ 35,876 กิโลเมตร โดยจะมีสถานีดาวเทียมภาคพื้นดิน (Satellite Earth Station) ซึ่งอยู่ตามจุดต่าง ๆ บนโลก ซึ่งสถานีเหล่านี้จะทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณผ่านจานดาวเทียมที่ใช้สัญญาณ Microwave ที่มีความถี่สูง และในการส่งสัญญาณจากเครื่องส่งไปยังจานสายอากาศ หรือการรับสัญญาณจากจานสายอากาศมายังเครื่องรับก็จำเป็นจะต้องใช้สายนำสัญญาณที่ไม่มีความสูญเสียความต้านทานของแท่นตัวนำภายใน ซึ่งก็คือค่า Loss หรือถ้ามีก็เป็นค่าที่น้อยมาก เพื่อให้การส่งจากเครื่องส่งสัญญาณไปยังสายอากาศมีคุณภาพของสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับทางด้านเครื่องรับก็จะรับสัญญาณได้ใกล้เคียงกับจานสายอากาศที่รับได้ และสายนำสัญญาณที่กล่าวมานี้ มีชื่อเรียกว่า Waveguide ซึ่งมีค่า Loss ที่น้อยมากและสามารถทนกำลังงานไฟฟ้าได้สูง

จากแนวคิดดังกล่าวนี้ เราจึงทำการวิเคราะห์ที่โอนำคลื่นที่สร้างจากอลูมิเนียม เพื่อมาเปรียบเทียบกับท่อ Waveguide จากชุดทดลองที่มีอยู่ว่ามีประสิทธิภาพอยู่ในระดับใด

รายงานนี้จะแบ่งออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ บทที่ 1 จะเป็นบทนำ บทที่ 2 เป็น ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน Rectangular Waveguide บทที่ 3 เป็นทฤษฎีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ Rectangular Waveguide บทที่ 4 เป็นการออกแบบและทดลองท่อ Waveguide บทที่ 5 เป็น Software ที่ช่วยในการคำนวณ และ บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการทดลอง

1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับพื้นฐานของ Waveguide
2. เพื่อเรียนรู้ทฤษฎีเกี่ยวกับการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เพื่อฝึกฝนค้นคว้าและวิจัย
4. เพื่อศึกษาและทดลองสร้างท่อ Waveguide แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า
5. เพื่อฝึกทักษะในการทดลองและใช้เครื่องมือวัด

1.2 ขอบเขตโครงการ

ทดลองสร้างท่อ Waveguide ที่ทำจากวัสดุหาง่ายและมีน้ำหนักเบา ซึ่งคาดว่าจะใช้ ได้ผลในระดับหนึ่ง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเดินทางของคลื่นมากขึ้น
2. มีทักษะในการทดลอง วิเคราะห์ และปฏิบัติงานมากขึ้น
3. มีความรู้ในการออกแบบใบงานสำหรับการทดลองเพื่องานวิจัยและพัฒนา
4. มีความรู้ความชำนาญในการใช้เครื่องมือวัดเพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน Rectangular Waveguide

2.1 บทนำ

โดยทั่วไป Waveguide มีลักษณะเป็นท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือวงกลม ซึ่งมีภายในเป็นรูกลวง ใช้ในการนำพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การใช้งานส่วนใหญ่ของ Waveguide จะอยู่ในย่านความถี่ Microwave และไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในย่าน radio-frequency เนื่องจากขนาดของท่อ Waveguide จะมีขนาดที่ใหญ่มากจึงไม่สะดวกในการใช้งาน

ที่ความถี่ในย่าน X-band (8-12 GHz) สำหรับตัวอย่างที่กล่าวถึงนี้ อยู่ใน Chart ของ U.S. Standard rectangular Waveguide (ซึ่งจะมีตารางให้ดูในภาคผนวก) ในที่นี้เราจะยกตัวอย่าง ขนาดของ WR-90 มีขนาดความกว้างภายใน (a) เท่ากับ 2.286 cm และขนาดความสูงภายใน (b) เท่ากับ 1.016 cm ส่วนความกว้างภายนอกเท่ากับ 2.54 cm และความสูงภายนอกเท่ากับ 1.27 cm

ในท่อ Waveguide สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะมีอยู่ภายในขอบเขตในช่องว่างของท่อ ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีการแผ่กระจายของ power ผ่านออกมา และในขณะเดียวกันก็เกิด dielectric loss แต่ก็ไม่สำคัญ เนื่องจากตามปกติ Waveguide มีอากาศอยู่เต็ม อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่เกิดจากความร้อนของผนังภายในนั้นทำให้เกิด power loss แต่ก็มีค่านี้น้อยมาก

เป็นไปได้ที่จะแผ่กระจายโหมดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้หลาย ๆ โหมดภายใน Waveguide โหมดเหล่านี้ใช้วิธีแก้ไขเดียวกันกับสมการของ Maxwell สำหรับ Waveguide โดยเฉพาะ Waveguide ที่กำหนดให้จะมี Cutoff frequency ที่แน่นอนสำหรับแต่ละโหมด ถ้าความถี่ของสัญญาณมากกว่า Cutoff frequency ที่กำหนดให้ พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็สามารถส่งผ่านไปได้โดยปราศจากการลดทอน แต่ทว่าถ้าสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำกว่า Cutoff frequency ก็จะทำให้เกิดลดทอนของสัญญาณขึ้น การเลือกขนาดของ Waveguide นั้น มีวิธีดังต่อไปนี้ กำหนด input ของสัญญาณ, พลังงานของโหมดที่จะสามารถส่งผ่านไปใน Waveguide ได้

2.2 ขั้นตอนในการวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นโดยใช้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

ขั้นตอนในการวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำสัญญาณ โดยใช้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้านั้นโดยทั่วไปจะมีขั้นตอนหลัก ๆ 3 ขั้นตอนดังนี้คือ (1) การสร้างสมการคลื่น (2) การแก้สมการคลื่นเพื่อหาผลเฉลยทั่วไป (3) การคำนึงถึงเงื่อนไขขอบเขตเพื่อหาผลเฉลยเฉพาะจากผลเฉลยทั่วไป ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงขั้นตอนที่ (1) และ (2) โดยใช้ตัวอย่างของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม และกล่าวถึงโหมด (mode) หรือแบบแผนของคลื่นแบบต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ในสายนำสัญญาณประเภทต่าง ๆ

2.3 สมการคลื่น

ถ้าให้ตัวกลางที่กำลังพิจารณาอยู่เป็นแบบไอโซโทรปิกและแบบเชิงเส้น และมีค่าคงตัวของตัวกลางเป็น σ , μ และ ϵ สมการแมกซ์เวลล์สองสมการแรกจะเขียนได้เป็น

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.2)$$

โดยที่ \mathbf{J}_0 เป็นกระแสที่กระตุ้นจากภายนอก เป็นกระแสการนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวกลางมีการนำไฟฟ้าเป็น σ ในกรณีที่คิดการส่งผ่านของคลื่นไปในบรรยากาศหรือไปตามสายนำสัญญาณนั้น โดยทั่วไปที่บริเวณที่พิจารณาอยู่จะไม่มีกระแสที่กระตุ้นจากภายนอกนั้นคือ $\mathbf{J}_0 = 0$ ในเงื่อนไขดังกล่าวนี้เมื่อคิดค่าเคิร์ลของสมการ (1) แล้วแทนค่า $\nabla \times \mathbf{H}$ จากสมการ (2) จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อคิดค่าเคิร์ลของสมการ (2) แล้วแทนค่า $\nabla \times \mathbf{E}$ จากสมการ (1) จะได้

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} = -\mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

และจากสูตรในการวิเคราะห์เวกเตอร์คือ $\nabla \times \nabla \times \mathbf{P} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{P}) - \nabla^2 \mathbf{P}$ โดยที่ \mathbf{P} เป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันใด ๆ เราจะสามารถเขียนสมการ (3) และสมการ (4) ได้ตามลำดับต่อไปนี้

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.6)$$

ผลที่ได้ตามสมการ (2.5) และสมการ (2.6) นี้จัดว่าเป็นสมการคลื่นแบบพื้นฐาน ซึ่งพิจารณาในบริเวณที่ตัวกลางมีการนำไฟฟ้าไม่เป็นศูนย์ สำหรับ \mathbf{E} และ \mathbf{H} นั้นจะเป็นค่าชั่วขณะและเป็นฟังก์ชันของทั้งตำแหน่งและเวลา ในการแสดงค่า \mathbf{E} และ \mathbf{H} นั้น โดยทั่วไปจะใช้การแสดงในรูปเฟสเซอร์เช่นเดียวกับที่ใช้ในวงจรกระแสสลับทั่วไป กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะแสดงไว้ด้วยตัวประกอบร่วม ซึ่งหมายความว่าคลื่นที่พิจารณาอยู่มีความถี่เชิงมุมเป็น ω และถูกสร้างจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่มีความถี่เดียวกัน (เรากำลังพิจารณาระบบที่เป็นเชิงเส้นอยู่) การใช้เทอม $e^{j\omega t}$ ดังกล่าวนี้นี้จะไม่ทำให้สูญเสียลักษณะทั่วไป (generality) ของสมการไป เพราะตามหลักการของฟูรีเยร์อินทิกรัล (Fourier integral) ฟังก์ชันที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาใด ๆ ย่อมกระจายให้อยู่ในรูปสเปกตรัมได้เสมอ เมื่อใช้ $e^{j\omega t}$ เป็นตัวประกอบร่วมแสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลา \mathbf{E} และ \mathbf{H} ส่วนที่เหลือซึ่งจะเขียนด้วย $\mathbf{E}_p, \mathbf{H}_p$ ก็จะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งเพียงอย่างเดียว เนื่อง

จาก \vec{E}_p และ \vec{H}_p สามารถเป็นค่าเชิงซ้อนได้เช่นเดียวกับเฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสในวงจรกระแสสลับ ดังนั้นโดยทั่วไปถ้าเราพิจารณาในระบบแกนประสานแบบคาร์ทีเซียนบนระนาบที่ $z = 0$ \vec{E}_p และ \vec{H}_p จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$\vec{E}_p = \hat{i}_x(E_{px} + jE_{pxi}) + \hat{i}_y(E_{py} + jE_{pyi}) + \hat{i}_z(E_{pz} + jE_{pzi}) \quad (2.7)$$

$$\vec{H}_p = \hat{i}_x(H_{px} + jH_{pxi}) + \hat{i}_y(H_{py} + jH_{pyi}) + \hat{i}_z(H_{pz} + jH_{pzi}) \quad (2.8)$$

โดยที่ตัวห้อย r และ i แสดงส่วนประกอบค่าจริงและส่วนประกอบค่าจินตภาพตามลำดับ เมื่อใช้การแสดงในรูปเฟสเซอร์ดังกล่าวนี้ สนามไฟฟ้าชั่วขณะ และสนามแม่เหล็กชั่วขณะจะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$\vec{E}(x,y,z,t) = \text{Re}\{\sqrt{2} \vec{E}_p(x,y,z) e^{j\omega t}\} \quad (2.9)$$

$$\vec{H}(x,y,z,t) = \text{Re}\{\sqrt{2} \vec{H}_p(x,y,z) e^{j\omega t}\} \quad (2.10)$$

สำหรับส่วนประกอบในทิศทาง ๆ เช่น E_x นั้นก็จะเขียนได้ดังนี้

$$E_x = \sqrt{2} \sqrt{E_{px}^2 + E_{pxi}^2} \cos(\omega t + \phi) \quad (2.11)$$

โดยที่

เมื่อใช้การแสดง \vec{E}, \vec{H} ในรูปเฟสเซอร์ดังกล่าวมานี้ จะได้ $\partial/\partial t = j\omega$ และสมการคลื่นในสมการ (2.5) และสมการ (2.6) จะเขียนได้ดังนี้

$$\nabla^2 \vec{E}_p + k^2 \vec{E}_p \quad (2.12)$$

$$\nabla^2 \vec{H}_p + k^2 \vec{H}_p \quad (2.13)$$

โดยที่

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon - j\omega \mu \sigma \quad (2.14)$$

สมการที่ได้นี้เรียกว่า สมการเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz equation)

การแก้สมการคลื่นที่จะกล่าวถึงหลังจากนี้ก็จะเป็นการแก้สมการเพื่อหาค่าเฟสเซอร์ \vec{E}_p และ \vec{H}_p เป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการเขียนสัญลักษณ์ข้างล่างนี้จะเขียนเฟสเซอร์นี้เป็น \vec{E} และ \vec{H} เฉย ๆ ซึ่งเป็นที่เข้าใจกันว่า \vec{E} และ \vec{H} เป็นเฟสเซอร์ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งเท่านั้น และเมื่ออยากรู้ค่าชั่วขณะก็ใช้สมการ (2.9) และ (2.10)

2.4 คลื่นระนาบ (plane wave)

คลื่นระนาบคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในระนาบที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ และขนาดของสนามมีค่าสม่ำเสมอในระนาบดังกล่าว ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของคลื่นระนาบที่ส่งผ่านไปในตัวกลางทั่วไป

2.4.1 คลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ไปในทิศ z

เพื่อแสดงการแก้สมการคลื่นแบบง่ายที่สุด เราจะพิจารณาคลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทิศ z และมี E และ H เป็นฟังก์ชันของ z เท่านั้น โดยที่ไม่เป็นฟังก์ชันของ x, y นั่นหมายถึงคลื่นนี้จะมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าสม่ำเสมอในระนาบที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ คลื่นที่มีลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า “คลื่นระนาบ” และเพื่อให้เห็นภาพของคลื่นระนาบที่ชัดเจนขึ้นจะขอแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของสนามตามสมการแมกซ์เวลล์ 2 สมการแรก ซึ่งจะได้ผลดังนี้

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -j\omega\mu H_x \quad (2.15ก)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y \quad (2.15ข)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu H_z \quad (2.15ค)$$

และ

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = (\sigma + j\omega\epsilon)E_x \quad (2.16ก)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = (\sigma + j\omega\epsilon)E_y \quad (2.16ข)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = (\sigma + j\omega\epsilon)E_z \quad (2.16ค)$$

ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าคลื่นระนาบจะไม่เป็นฟังก์ชันของ x, y ดังนั้น $\partial/\partial x = 0, \partial/\partial y = 0$ ซึ่งจากสมการ (2.15ค) และสมการ (2.16ค) จะได้ว่า $E_z = H_z = 0$ นั่นคือคลื่นระนาบจะไม่มีส่วนประกอบของสนามในทิศของการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาดังนี้แล้วสมการ (2.15) และสมการ (2.16) จะลดรูปลงเป็นดังนี้

$$\frac{dE_y}{dz} = j\omega\mu H_x \quad (2.17ก)$$

$$\frac{dE_x}{dz} = -j\omega\mu H_y \quad (2.17ข)$$

2.5 การสร้างสมการคลื่น

ในการสร้างสมการคลื่นนั้น ถ้าจะกล่าวถึงขั้นตอนโดยทั่วไปก็จะเป็นไปตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 อย่างไรก็ตามในปัญหาของสายนำสัญญาณนั้นเรามักจะให้ทิศทางของการส่งผ่านคลื่นอยู่ใน

ทิศ z และให้มีค่าคงที่ของการส่งผ่านเป็น γ ดังนั้นโดยทั่วไปสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

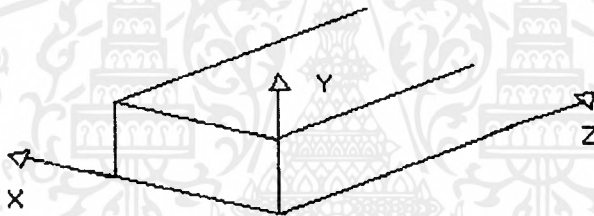
$$\begin{aligned} \vec{E}(x, y, z) &= \hat{i}xEx(x, y, z) + \hat{j}yEy(x, y, z) + \hat{k}zEz(x, y, z) \\ &= \hat{i}xExt(x, y)e^{-\gamma z} + \hat{j}yEyt(x, y)e^{-\gamma z} + \hat{k}zEzt(x, y)e^{-\gamma z} \end{aligned} \quad (2.18)$$

และ

$$\vec{H}(x, y, z) = \hat{i}xHxt(x, y)e^{-\gamma z} + \hat{j}yHyt(x, y)e^{-\gamma z} + \hat{k}zHzt(x, y)e^{-\gamma z} \quad (2.19)$$

โดยที่ดัชนีล่าง t แสดงว่าเป็นฟังก์ชันของระยะทางที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่

เพื่อให้เห็นภาพของการสร้างสมการคลื่นอย่างชัดเจน จะขอใช้ตัวอย่างของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ในกรณีนี้ระบบแกนประสานที่เหมาะสมก็จะเป็นแบบคาร์ทีเซียน การสร้างสมการคลื่นในกรณีนี้อาจจะใช้สมการ (2.5) ในหัวข้อ 2.3 โดยให้ $\partial/\partial z = -\gamma$ อย่างไรก็ตามในที่นี้จะแสดงวิธีสร้างสมการคลื่นจากสมการแมกซ์เวลล์ โดยจะพิจารณาในบริเวณที่ไม่มีแหล่งกำเนิดคลื่นปรากฏอยู่



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

นั่นคือ $J_0 = 0$ และ $\rho = 0$ จากชุดสมการทั้งสี่ของแมกซ์เวลล์ เราจะได้ชุดสมการในรูปดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial Ez}{\partial y} - \frac{\partial Ey}{\partial z} = -j\omega\mu H_x \quad (2.20ก)$$

$$\frac{\partial Ex}{\partial z} - \frac{\partial Ez}{\partial x} = -j\omega\mu H_y \quad (2.20ข)$$

$$\frac{\partial Ey}{\partial x} - \frac{\partial Ex}{\partial y} = -j\omega\mu H_z \quad (2.20ค)$$

$$\frac{\partial Hz}{\partial y} - \frac{\partial Hy}{\partial z} = (\sigma + j\omega\epsilon)E_x \quad (2.21ก)$$

$$\frac{\partial Hx}{\partial z} - \frac{\partial Hz}{\partial x} = (\sigma + j\omega\epsilon)E_y \quad (2.21ข)$$

$$\frac{\partial Hy}{\partial x} - \frac{\partial Hx}{\partial y} = (\sigma + j\omega\epsilon)E_z \quad (2.21ค)$$

$$\frac{\partial Dx}{\partial x} + \frac{\partial Dy}{\partial y} + \frac{\partial Dz}{\partial z} = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (2.23)$$

โดยที่ σ, μ, ϵ เป็นค่าคงที่ของตัวกลางในท่อนำคลื่น จากชุดสมการข้างบนเราจะสามารถสร้างสมการคลื่นของส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามเนื่องจากส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดไม่ได้เป็นอิสระจากกัน ดังนั้นเราจึงไม่จำเป็นต้องสร้างสมการคลื่นของส่วนประกอบทั้งหมดเพื่อนำไปแก้สมการหาผลเฉลยของแต่ละสมการแยกจากกัน ในกรณีของท่อนำคลื่นนี้ส่วนใหญ่จะสร้างสมการคลื่นและแก้สมการคลื่นของส่วนประกอบ E_z และ H_z เท่านั้น ทั้งนี้เพราะส่วนประกอบที่เหลือจะสามารถแสดงในรูปของ E_z และ H_z ได้ ซึ่งจะสามารถแสดงให้เห็นจริงได้ดังต่อไปนี้คือ ในการแสดง E_x ให้อยู่ในรูปของ E_z และ H_z นั้นจะทำได้โดยพิจารณาสมการ (2.21ก) ร่วมกับสมการ (2.20ข) และใช้ความสัมพันธ์ $\partial/\partial z = -\gamma$ ที่กล่าวไว้ข้างต้น และผลที่ได้จะเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} (\sigma + j\omega\epsilon)E_x &= \frac{\partial H_z}{\partial y} + \gamma H_y = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\gamma}{j\omega\mu} \left(-\gamma E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \\ E_x \left\{ \gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \right\} &= -j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ E_x &= \left(-j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) / \left\{ \gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \right\} \end{aligned} \quad (2.24ก)$$

ในทำนองเดียวกันจะสามารถเขียน E_y, H_x, H_y ได้ในรูปต่อไปนี้

$$E_y = \left(j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} - \gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) / \left\{ \gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \right\} \quad (2.24ข)$$

$$H_x = \left\{ (\sigma + j\omega\epsilon) \frac{\partial E_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial x} \right\} / \left\{ \gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \right\} \quad (2.24ค)$$

$$H_y = \left\{ -(\sigma + j\omega\epsilon) \frac{\partial E_z}{\partial x} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y} \right\} / \left\{ \gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \right\} \quad (2.24ง)$$

จากผลที่ได้นี้จะเห็นได้ว่าการสร้างสมการคลื่น และแก้สมการคลื่นของส่วนประกอบ E_z และ H_z ก็จะเพียงพอในการวิเคราะห์คุณสมบัติในการส่งผ่านของคลื่นได้ สำหรับการสร้างสมการคลื่นของ E_z นั้นจะทำได้โดยแทนค่าสมการ (2.20ก) และสมการ (2.20ข) ลงในสมการ (2.2) แล้วใช้สมการ (2.22) ประกอบก็จะได้ผลออกมาในรูปต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \left\{ \gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \right\} E_z = 0 \quad (2.25)$$

จะเห็นได้ว่าสมการคลื่นของ E_z นี้จะหาได้โดยตรงจากสมการคลื่นเฮล์มโฮลตซ์ที่กล่าวไว้ในสมการ (2.12) โดยพิจารณาสองส่วนประกอบ E_z เท่านั้น ในทำนองเดียวกันสมการคลื่นของ H_z จะหาได้จากสมการ (2.20ค) สมการ (2.21ก) สมการ (2.21ข) และสมการ (2.23) หรืออาจจะหาได้โดยตรงจากสมการเฮล์มโฮลตซ์ในหัวข้อ 2.3 สมการที่ (2.13) ได้ในรูปต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \left\{ \gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \right\} H_z = 0 \quad (2.26)$$

2.6 การแก้สมการคลื่น

เมื่อทำการสร้างสมการคลื่นได้ตามตัวอย่างในหัวข้อที่แล้ว ก็จะสามารถแก้สมการคลื่นนั้นได้ โดยทำตามขั้นตอนของการแก้สมการของสมการเชิงอนุพันธ์บางส่วน (Partial differential equations) ได้ ในปัญหาของสมการเชิงอนุพันธ์บางส่วนนี้ส่วนใหญ่ผลเฉลยที่ได้จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปในรูปผลคูณของฟังก์ชันของตัวแปรที่แยกจากกันได้ (separation of variables) กล่าวคือ E_z และ H_z ในสมการ (2.25) และสมการ (2.26) จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$E_z(x,y,z) = X(x)Y(y)Z(z) = X(x)Y(y)e^{-\gamma z} \quad (2.27ก)$$

$$H_z(x,y,z) = X(x)Y(y)Z(z) = X(x)Y(y)e^{-\gamma z} \quad (2.27ข)$$

ในการแก้สมการคลื่นก็จะสามารถทำได้ตามขั้นตอนทั่วไปคือ นำสมการ (2.27ก) แทนลงในสมการ (2.25) แล้วหารด้วย E_z ตลอด ผลที่ได้จะเป็นดังนี้

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \{\gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)\} = 0 \quad (2.28)$$

ซึ่งตามหลักการแล้วสมการ (2.28) จะเป็นจริงได้เสมอเมื่อพจน์ที่หนึ่งและพจน์ที่สองต่างก็ต้องเท่ากับค่าคงที่กล่าวคือ

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = -k^2 x \quad (2.29ก)$$

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = -k^2 y \quad (2.29ข)$$

และ $k^2 x, k^2 y$ จะต้องเป็นไปตามสมการ (2.28) นั่นคือ

$$\gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) = k^2 x + k^2 y \quad (2.30)$$

ผลเฉลยของสมการ (2.29ก) และสมการ (2.29ข) นั้นโดยทั่วไปจะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$X(x) = A \cos kx + B \sin kx \quad (2.31ก)$$

$$Y(y) = C \cos ky + D \sin ky \quad (2.31ข)$$

โดยที่ A, B, C, D เป็นค่าคงที่ เมื่อแทนค่าสมการ (2.28) ลงในสมการ (2.29ก) ก็จะได้ผลเฉลยทั่วไป (general solutions) ของ E_z ในรูปต่อไปนี้

$$E_z(x,y,z) = (A \cos kx + B \sin kx)(C \cos ky + D \sin ky)e^{-\gamma z} \quad (2.32)$$

ในผลเฉลยทั่วไปนี้ค่า kx, ky อาจจะเป็นอะไรก็ได้เพียงแต่ให้เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการ (2.30) ก็เพียงพอ แต่ในโครงสร้างของท่อนำคลื่นนั้น kx และ ky จะถูกกำหนดเฉพาะเจาะจงลงไป เพื่อให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขต ดังนั้นการแก้สมการคลื่นเพื่อให้ได้ผลเฉลยเฉพาะ (specific solutions) จึงต้องนำผลเฉลยทั่วไปไปหาสนามในส่วนประกอบต่าง ๆ ออกมา แล้วพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่บังคับสำหรับส่วนประกอบต่าง ๆ เหล่านั้น เพื่อกำหนดค่า kx, ky ที่เป็นไปได้ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 โหมดของคลื่น

เนื่องจากการส่งผ่านคลื่นไปตามสายนำสัญญาณซึ่งส่วนใหญ่จะมีเงื่อนไขขอบเขตที่เกิดจากโครงสร้างของสายนำสัญญาณบังคับอยู่ จึงทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้มีรูปแบบเฉพาะเท่านั้น นั่นคือ E_z, H_z ซึ่งเรียกว่าสนามในแนวแกน (axial components) และ E_x, E_y, H_x, H_y ซึ่งเรียกว่าสนามในแนวขวาง (transverse electromagnetic fields) จะมีการกระจายในระนาบตั้งฉากในรูปฟังก์ชันของ x, y ก็จริง แต่ตามแนวแกน z การเปลี่ยนแปลงไปในรูปของ $e^{-\gamma z}$ เท่านั้น ซึ่งเป็นลักษณะที่คลื่นเคลื่อนที่ในทิศ z สภาพที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีรูปแบบเฉพาะดังที่กล่าวมานี้เราเรียกว่า “โหมด” (mode) สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นโดยทั่วไปจะสามารถให้โหมดส่งผ่านไปได้หลายโหมดโดยขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับขนาดของท่อนำคลื่น

ในทางปฏิบัติโหมดที่ส่งผ่านไปตามสายนำสัญญาณไม่จำเป็นต้องมีส่วนประกอบของสนามครบทุกอัน จะมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขวางเท่านั้นคือจะไม่มีทั้ง E_z และ H_z และคลื่นที่ส่งผ่านไปในท่อนำคลื่นนั้นโดยทั่วไปจะพบว่า $E_z \neq 0$ หรือ $H_z \neq 0$ ดังนั้นจึงมีการแบ่งรูปแบบของคลื่นออกเป็นแบบหลัก ๆ 3 แบบดังต่อไปนี้

- (1) คลื่น TEM (transverse electromagnetic waves) คือคลื่นที่มี $E_z = H_z = 0$ และมีเฉพาะส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระนาบตั้งฉากกับการส่งผ่านหรือในแนวขวางเท่านั้น
- (2) คลื่น TE (transverse electric waves) หรือคลื่น H (H waves) คลื่นแบบนี้จะมีส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวขวางเท่านั้น คือ $E_z = 0$ แต่ $H_z \neq 0$ และส่วนประกอบในแนวขวางจะสามารถหาได้จาก ตามที่แสดงไว้ในสมการ (2.24)
- (3) คลื่น TM (transverse magnetic waves) หรือคลื่น E (E waves) คลื่นแบบนี้จะมีส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กในระนาบตั้งฉากเท่านั้นคือ $H_z = 0$ แต่ $E_z \neq 0$ และส่วนประกอบในแนวขวางจะสามารถหาได้จาก E_z ตามที่แสดงไว้ในสมการ (2.24)

ถึงแม้คลื่นทั้งสามแบบนี้จะเป็นพื้นฐานของคลื่นที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าแต่ละโหมดจะเกิดได้อย่างอิสระจากกัน ในสายนำสัญญาณประเภทท่อนำคลื่นโดยทั่วไปซึ่งมีผนังท่อนเป็นโลหะนั้นโหมด TE และโหมด TM จะเกิดขึ้นอย่างอิสระจากกัน แต่ในสายนำสัญญาณบางประเภท เช่น เส้นใยแสงนั้น โหมด TE และโหมด TM มักจะเกิดขึ้นพร้อมกันเพราะโหมด TE หรือ TM เพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตได้ การที่โหมด TE และโหมด TM ต้องเกิดขึ้นพร้อมกันนี้ เมื่อพิจารณาในแง่ของคณิตศาสตร์ก็ไม่มีปัญหาอะไรเพราะโหมด TE และโหมด TM ต่างก็เป็นผลเฉลยของสมการแมกซ์เวลล์ ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้น ผลบวกเชิงเส้นของโหมด

ทั้งสองก็สามารถเป็นผลเฉลยของสมการแมกซ์เวลล์เช่นเดียวกัน อนึ่งการเกิดโหมด TE และโหมด TM พร้อมกันนี้เราเรียกโหมดของคลื่นที่ได้นี้ว่าโหมดไฮบริด (hybrid mode)

ในลำดับต่อไปเราจะพิจารณาลักษณะเฉพาะของคลื่นทั้งสามแบบที่กล่าวไว้ข้างต้นโดยใช้สมการ (2.27) ที่แสดงไว้ในหัวข้อ 2.5

2.7.1 คลื่น TEM

ในกรณีของคลื่น TEM นี้ เนื่องจาก $E_z = H_z = 0$ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการ (2.24) ตามหลักการทางคณิตศาสตร์ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขวางจะไม่เป็น 0 ก็ต่อเมื่อ $|\gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)| = 0$ เงื่อนไขนี้จะทำให้ค่าคงที่ของการส่งผ่าน γ เขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (2.33)$$

จะเห็นได้ว่า ผลที่ได้จะมีรูปร่างเหมือนค่าคงที่ของการส่งผ่านของคลื่นระนาบที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 สมการ (2.24) และในกรณีที่ตัวกลางเป็นอวกาศว่าง จะได้ $\sigma = 0, \mu = \mu_0, \epsilon = \epsilon_0$ และทำให้ γ เขียนได้เป็น

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = j\frac{\omega}{c} = jk_0 \quad (2.34)$$

ซึ่งเหมือนกับกรณีของคลื่นระนาบที่ส่งผ่านในอวกาศว่างทุกประการ

ค่าที่น่าสนใจอีกค่าหนึ่งคือ อิมพีแดนซ์คลื่น (wave impedance) ในโหมด TEM นี้ ในกรณีที่สนามในแนวขวางมีส่วนประกอบเป็น E_x, E_y, H_x และ H_y นี้ จากสมการ (2.21ก) และสมการ (2.21ข) จะสามารถคำนวณค่าดังกล่าวโดยให้ $\partial/\partial z = -\gamma$ และแทนค่า γ ด้วยสมการ (2.33) ซึ่งจะได้ผลดังนี้

$$\eta = \frac{E_x}{H_y} = \frac{E_y}{H_x} = \frac{\gamma}{\sigma + j\omega\epsilon} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (2.35)$$

และในกรณีของอวกาศว่าง $\sigma = 0, \mu = \mu_0, \epsilon = \epsilon_0$ สมการ จะลดรูปลงเป็น

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2.36)$$

ผลที่ได้ตามสมการ (2.35) และสมการ (2.36) นี้ จะตรงกับค่าอินทรีนสิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่คลื่นส่งผ่านอยู่ ซึ่งก็ควรจะต้องเป็นเช่นนั้น เพราะโหมด TEM ที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเฉพาะในแนวขวางนี้ก็เหมือนกับคลื่นระนาบที่ส่งผ่านไปในตัวกลางนั่นเอง

ในลำดับต่อไปเราจะพิจารณารายละเอียดต่อไปว่าในกรณีที่ $E_z = H_z = 0$ นี้ จะสามารถหาผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขวางได้อย่างไร ในกรณีตัวอย่างที่กำลังพิจารณาอยู่นี้เมื่อแทนค่า $E_z = H_z = 0$ ลงในสมการ (2.21) สมการ (2.22) และสมการ (2.23) แล้วหาค่า $[\partial/\partial x$ สมการ (2.21ข) $-\partial/\partial y$ สมการ (2.21ก)] จะได้ผลดังนี้

$$(\sigma + j\omega\epsilon)\left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right) = -\gamma\left(\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y}\right)$$

เมื่อใช้สมการ (2.23) ข้างขวามือของสมการข้างบนจะเป็น 0 ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ในรูปต่อไปนี้

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = 0 \quad (2.37n)$$

ในการทำงานเดียวกันเราจะสามารถหาความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันได้อีก 3 สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = 0 \quad (2.37ข)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} - \frac{\partial E_y}{\partial y} = 0 \quad (2.37ค)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} - \frac{\partial H_y}{\partial y} = 0 \quad (2.37ง)$$

โดยที่สมการ (2.37ค) และสมการ (2.37ง) จะสามารถหาได้โดยตรงจากสมการ (2.22) และสมการ (2.23) ตามลำดับชุดสมการ (2.37) นี้ จะเป็นชุดสมการที่กำหนดรูปแบบของโหมด TEM นี้ อย่างไรก็ตามชุดสมการ (2.37) นี้ ยังสามารถทำให้กะทัดรัดและเข้าใจได้ง่ายขึ้นดังต่อไปนี้ ก่อนอื่นพิจารณาว่าสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ จะสามารถแสดงให้อยู่ในรูปเกรเดียนต์ของสเกลาร์โพเทนเชียลฟังก์ชันได้กล่าวคือ ถ้าให้ $V(x, y, z)$ เป็นสเกลาร์โพเทนเชียลฟังก์ชัน จะได้ $E = -\nabla V$ นั่นคือ

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \quad (2.38)$$

เมื่อลองนำสมการ (2.38) แทนลงในสมการ (2.37ก) จะเห็นได้ว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะหนึ่ง จากสมการ (2.38) นี้จะเห็นได้ว่า ถ้าเราสามารถสร้างสมการเพื่อหาผลเฉลยของ V ได้ก็จะสามารถหาผลเฉลยของสนามไฟฟ้าในแนวขวางได้ การสร้างสมการสำหรับ V นั้นจะทำได้โดยแทนสมการ (2.38) ลงในสมการ (2.37ค) ซึ่งจะได้ผลดัง

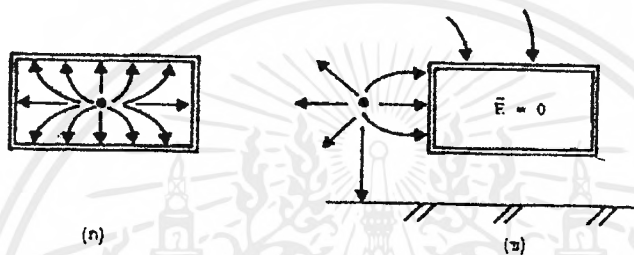
$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \quad (2.39)$$

ผลที่ได้ตามสมการ (2.39) นี้ อันที่จริงคือสมการลาปลาซแบบ 2 มิตินั่นเอง และเนื่องจากสมการลาปลาซเป็นสมการที่เกิดขึ้น และใช้ในการแก้ปัญหาในเรื่องของไฟฟ้าสถิต นั้นหมายความว่าโหมด TEM จะมีการกระจายของสนามไฟฟ้าในแนวขวางเหมือนกับการกระจายของสนามไฟฟ้าสถิตที่มี โครงสร้างของสายนำสัญญาณอันเดียวกัน สำหรับสนามแม่เหล็กก็จะเป็นไปในทำนองเดียวกัน เมื่อกล่าวโดยสรุปแล้วการหาผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขวางของโหมด TEM จะเหมือนกับการแก้ปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้าสถิต ซึ่งก็คือการแก้สมการลาปลาซนั่นเอง อนึ่งสมการ (2.39) นั้นเป็นสมการลาปลาซที่เขียนอยู่ในระบบแกนประสานแบบคาร์ทีเซียน ในกรณีที่ไม่ระบุ

ระบบแกนประสานนั้นสมการลาปลาซจะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$\nabla \cdot \nabla V = \nabla^2 V = 0 \quad (2.40)$$

คลื่น TEM นี้จะเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างของสายนำสัญญาณที่มีโลหะตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป เช่น สายคู่ขนาน และสายโคแอกเชียล เป็นต้น แต่ในกรณีของท่อนำคลื่นซึ่งเป็นโลหะเพียงชั้นเดียว ถ้าไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ภายในท่อนำคลื่นดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 (ก) ย่อมจะไม่สามารถมีสนามไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นในท่อนำคลื่นได้ เพราะเส้นแรงไฟฟ้าจะสิ้นสุดที่ผิวของท่อนำคลื่น ถึงแม้ท่อนำคลื่นจะมีความต่างศักย์เมื่อเทียบกับพื้นดินดังที่แสดงไว้ในรูป (ข) ดังนั้นคลื่น TEM จึงไม่สามารถเกิดขึ้นในท่อนำคลื่นได้ เพราะเรากำลังพิจารณาท่อนำคลื่นในบริเวณที่ไม่มีแหล่งกำเนิดคลื่นรวมอยู่



รูปที่ 2.2 ท่อนำคลื่นกับสนามไฟฟ้าสถิต

2.7.2 คลื่น TE

คลื่น TE หรือคลื่น H คือโหมดที่ $E_z = 0$ ในกรณีนี้เราจะสามารถหาผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ โดยทำการแก้สมการ (2.26) หาค่า H_z จากนั้นจะสามารถหาสนามในแนวขวางได้โดยใช้ชุดสมการ (2.24) เมื่อให้

$$k_c^2 \equiv \gamma^2 - j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \quad (2.41)$$

จากสมการจะได้

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2.42ก)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.42ข)$$

$$H_x = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.42ค)$$

$$H_y = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2.42ง)$$

การหาอิมพีแดนซ์คลื่นในกรณีนี้ก็จะทำได้ดังต่อไปนี้

$$Z_h = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{j\omega\mu}{\gamma} \quad (2.43)$$

โดยที่ตัวห้อย h หมายถึงคลื่น H และเมื่อเขียนสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กในรูปต่อไปนี้

$$\vec{E}_t = \hat{r}_x E_x + \hat{r}_y E_y, \vec{H}_t = \hat{r}_x H_x + \hat{r}_y H_y \quad (2.44)$$

จากสมการ (2.43) จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง \vec{E}_t และ \vec{H}_t ได้ในรูปต่อไปนี้

$$Z_h \vec{H}_t = \hat{r}_z \times \vec{E}_t \quad (2.45)$$

ข้อสังเกตที่ได้จากสมการ (2.45) นี้ก็คือ สนามไฟฟ้าในแนวขวางและสนามแม่เหล็กในแนวขวางจะตั้งฉากกันเสมอ

2.7.3 คลื่น TM

คลื่น TM หรือคลื่น E คือคลื่นที่ $H_z = 0$ ในการหาผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีนี้ก็จะทำได้โดยการทำการแก้สมการ (2.25) หาค่า E_z จากนั้นจึงแทนค่า E_z ลงในสมการ (2.24) เพื่อหาส่วนประกอบในแนวขวางต่อไป ซึ่งจะได้ผลดังนี้

$$E_x = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.46ก)$$

$$E_y = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.46ข)$$

$$H_x = \frac{(\sigma + j\omega\epsilon)}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.46ค)$$

$$H_y = -\frac{(\sigma + j\omega\epsilon)}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.46ง)$$

การหาอิมพีแดนซ์คลื่นของกรณีนี้ก็จะทำได้ดังนี้

$$Z_e = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{\gamma}{\sigma + j\omega\epsilon} \quad (2.47)$$

และจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวขวางได้ในรูปต่อไปนี้

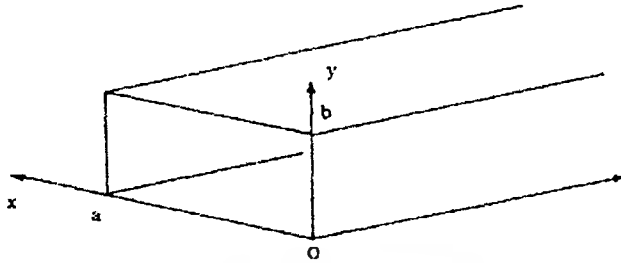
$$Z_e \vec{H}_t = \hat{r}_z \times \vec{E}_t \quad (2.48)$$

2.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular waveguide)

ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโดยทั่วไปจะมีรูปหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังที่แสดงไว้ในรูปที่

2.3 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจัดว่าเป็นสายนำสัญญาณของคลื่นไมโครเวฟที่มีที่ใช้กว้างขวางที่สุดแบบหนึ่ง ข้อดีของท่อนำคลื่นเมื่อเทียบกับสายโคแอกเซียลก็คือ มีค่าการบั่นทอนสัญญาณต่ำกว่า และสามารถทนต่อกำลังคลื่นได้สูงกว่า ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโดยพิจารณาท่อนำคลื่นที่ภายในเป็นอากาศ (หรือเป็นก๊าซบางอย่าง) ที่ไม่มีการสูญเสียของ

ตัวกลางอยู่ คือ $\sigma = 0$ และแกนของท่อเป็นเส้นตรงไม่คดงอ และรูปหน้าตัดของท่อไม่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน z



รูปที่ 2.3 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม

2.8.1 สมการคลื่นและการแก้สมการคลื่น

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้ เราจะสามารถทำตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5 ทุกประการ กล่าวคือ ก่อนอื่นทำการสร้างสมการคลื่นเสร็จแล้วทำการแก้สมการคลื่นเพื่อให้ได้ผลเฉลยทั่วไป จากนั้นจึงใส่เงื่อนไขขอบเขตเพื่อให้ได้ผลเฉลยเฉพาะออกมา ในกรณีของท่อนำคลื่นนี้ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.7 จะได้ผลเบื้องต้นว่า ไม่มีคลื่น TEM ส่งผ่านได้ จะมีเฉพาะคลื่น TE และ TM เท่านั้นที่ส่งผ่านได้ ดังนั้นจะพิจารณาคคลื่น TE และคลื่น TM ตามลำดับต่อไป

คลื่น TE

ในกรณีของคลื่น TE นี้เนื่องจาก $E_z = 0$ เพราะฉะนั้นสมการคลื่นที่ต้องการก็คือสมการคลื่นของ H_z ซึ่งในกรณีของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้เราจะสามารถใช้สมการ (2.26) ในหัวข้อ 2.5 ได้โดยตรงโดยให้ $\sigma = 0$ ตามเงื่อนไขที่ไม่มีการสูญเสียในตัวกลางดังกล่าวข้างต้น เพราะฉะนั้นสมการคลื่นสำหรับ H_z จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k_c^2 = 0 \quad (2.49)$$

โดยที่

$$k_c^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon = \gamma^2 + k^2 \quad (2.50)$$

ในการแก้สมการคลื่นเพื่อหาผลเฉลยทั่วไปของ H_z นั้นก็จะทำได้ตามขั้นตอนที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.2 ทุกประการ ซึ่งผลที่สุดจะสามารถเขียนผลเฉลยทั่วไปของ H_z ตามสมการ (2.32) ในหัวข้อ 2.6 ในรูปต่อไปนี้

$$H_z(x, y, z) = (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y)e^{-\gamma z} \quad (2.51)$$

สำหรับสนามในแนวขวางนั้นจะสามารถหาได้โดยใช้สมการ (2.42) ในหัวข้อ 2.7 โดยให้ $\sigma = 0$ ซึ่งจะได้ผลดังนี้

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2.52ก)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.52ข)$$

$$H_x = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.52ค)$$

$$H_y = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2.52ง)$$

โดยที่ $\gamma = j\beta$ เพราะ $\alpha = 0$ เมื่อ $\sigma = 0$

การหาผลเฉลยเฉพาะนั้นจะทำได้โดยพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังของท่อนำคลื่น จะทำด้วยตัวนำไฟฟ้าที่ดี เพราะฉะนั้นเงื่อนไขขอบเขตก็คือสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสกับท่อนำคลื่นที่ผิวของท่อนำคลื่นจะต้องเป็น 0 และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_x|_{y=0,b} = 0 \quad (2.53ก)$$

$$E_y|_{x=0,a} = 0 \quad (2.53ข)$$

เมื่อแทนสมการ (2.51) ลงในสมการ (2.52ก) จะได้ E_x ในรูปต่อไปนี้

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} (A \cos k_x x + B \sin k_x x) (-C k_y \sin k_y y + D k_y \cos k_y y) e^{-\gamma z} \quad (2.54)$$

จะเห็นได้ว่า จะเท่ากับ 0 ที่ $y = 0$ ก็ต่อเมื่อ $D = 0$ และ จะเท่ากับ 0 ที่ $y = b$ ก็ต่อเมื่อ

$$k_y b = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.55)$$

เมื่อทำการหาค่า E_y จากสมการ (2.52ข) และสมการ (2.51) จะได้ ในรูปต่อไปนี้

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} (-A k_x \sin k_x x + B k_x x) (C \cos k_y y + D \sin k_y y) e^{\pm j\beta z} \quad (2.56)$$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตตามสมการ (2.53ข) E_y จะเป็น 0 ที่ $x = 0$ ก็ต่อเมื่อ $B = 0$ และ E_y จะเป็น 0 ที่ $x = a$ ก็ต่อเมื่อ

$$k_x a = m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.57)$$

จากผลที่ได้นี้เราจะเขียนผลเฉลยเฉพาะของ Hz ได้ในรูปต่อไปนี้

$$\begin{aligned} H_{zmn} &= AC \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \\ &= A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \end{aligned} \quad (2.58)$$

โดยที่ $A_{mn} = AC$ ซึ่งจะถูกกำหนดจากกำลังคลื่นที่ส่งผ่าน สำหรับ β_{mn} หาได้จากสมการ (2.50) สมการ (2.55) และสมการ (2.57) ดังนี้

$$\gamma_{mn}^2 = (j\beta_{mn})^2 = k_{c_{mn}}^2 - \omega^2 \mu \epsilon = k_{c_{mn}}^2 - k^2 \quad (2.59ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$k^2_{cmm} = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (2.59ข)$$

เมื่อทำการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวขวางโดยแทนค่าสมการ (2.57) ลงในสมการ

(2.52) จะได้

$$E_{xmn} = \frac{j\omega\mu}{k^2_{cmm}} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (2.60ก)$$

$$E_{ymn} = -\left(\frac{j\omega\mu}{k^2_{cmm}}\right) \left(\frac{m\pi}{a}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (2.60ข)$$

$$H_{xmn} = \mu \frac{j\beta_{mn}}{k^2_{cmm}} \left(\frac{m\pi}{a}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (2.60ค)$$

$$H_{ymn} = \mu \frac{j\beta_{mn}}{k^2_{cmm}} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (2.60ง)$$

เมื่อคำนวณอิมพีแดนซ์คลื่นสำหรับคลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศ z จะได้ผลดังนี้

$$Z_{lnmn} = \frac{E_{xmn}}{H_{ymn}} = -\frac{E_{ymn}}{H_{xmn}} = \frac{\omega\mu}{\beta_{mn}} = \frac{k}{\beta_{mn}} \eta \quad (2.61)$$

ในกรณีที่สารไดอิเล็กตริกเป็นอวกาศว่างสมการ (2.59) และสมการ (2.61) จะได้ผลดังนี้

$$\beta^2_{mn} = k^2_o - k^2_{cmm} = k^2_o - \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right] \quad (2.62)$$

$$Z_{lnmn} = \frac{k_o}{\beta_{mn}} \eta_o \quad (2.63)$$

สำหรับความเร็วเฟสของคลื่นโหมดต่าง ๆ นั้นจะเขียนได้ดังนี้

$$V_{pmn} = \frac{\omega}{\beta_{mn}} = \frac{k_o}{\beta_{mn}} c = \frac{c}{[1 - (k_{cmm}/k_o)^2]^{1/2}} \quad (2.64)$$

และความยาวคลื่นของคลื่นที่ส่งผ่านในแกน z จะเป็นดังนี้

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{\beta_{mn}} = \frac{2\pi}{[k^2_o - k^2_{cmm}]^{1/2}} \quad (2.65)$$

คลื่น TM

ในกรณีของคลื่น TM นั้นเนื่องจาก $H_z = 0$ เพราะฉะนั้นสมการคลื่นที่ต้องสร้างก็คือสมการคลื่นของ E_z สมการคลื่นในกรณีนี้ก็จะสามารถใช้สมการ (2.25) ในหัวข้อ 2.2 ได้โดยตรง โดยให้ $\sigma = 0$ ตามเงื่อนไขที่ไม่นำการสูญเสียในตัวกลาง ซึ่งจะได้ผลดังนี้

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + k^2_c E_z = 0 \quad (2.66)$$

โดยที่ k_c คือค่าที่นิยามไว้ในสมการ (2.50) สมการคลื่นในรูปสมการ (2.67) นี้จะมีผลเฉลยทั่วไปของ E_z ในรูปที่เหมือนกับสมการ (2.51) ดังนี้

$$\vec{E}_z = (x, y, z) = (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y) e^{\pm kz} \quad (2.67)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสนามในแนวขวางนั้นจะสามารถหาได้โดยใช้สมการ (2.46) ในหัวข้อ 2.7.3 โดยให้ $\sigma=0, \gamma=j\beta$ ซึ่งจะได้ผลดังนี้

$$E_x = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.68ก)$$

$$E_y = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.68ข)$$

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.68ค)$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.68ง)$$

การหาผลเฉลยเฉพาะนั้นจะทำได้โดยพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังของท่อนำคลื่น ในกรณีนี้เราอาจพิจารณาจาก E_z ได้โดยตรง โดยให้ E_z ที่ผนังของท่อนำคลื่นเป็น 0 ดังต่อไปนี้

$$E_z|_{x=0,a} = 0 \quad (2.69ก)$$

$$E_z|_{y=0,b} = 0 \quad (2.69ข)$$

เมื่อพิจารณา ในสมการ (2.67) ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตในสมการ (2.69) จะเห็นได้ว่า จะเป็น 0 ที่ตำแหน่ง $x = 0$ ก็ต่อเมื่อ $A = 0$ และ E_z จะเป็น 0 ที่ตำแหน่ง $x = a$ ก็ต่อเมื่อ

$$k_x a = m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2.70)$$

ในทำนองเดียวกัน E_z จะเป็น 0 ที่ตำแหน่ง $y = 0$ ก็ต่อเมื่อ $C = 0$ และ E_z จะเป็น 0 ที่ตำแหน่ง $y = b$ ก็ต่อเมื่อ

$$k_y b = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.71)$$

จากผลที่ได้นี้เราจะเขียนผลเฉลยเฉพาะของ E_z ในรูปต่อไปนี้

$$\begin{aligned} E_{zmn}(x, y, z) &= BD \sin k_x x \sin k_y y e^{\pm j\beta_m z} \\ &= B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_m z} \end{aligned} \quad (2.72)$$

โดยที่ $B_{mn} = BD$ จะถูกกำหนดจากกำลังคลื่นที่ส่งผ่าน และ β_m จะมีค่าเหมือนกับในสมการ (2.62) เมื่อทำการคำนวณสนามในแนวขวางโดยแทนค่าสมการ (2.72) ลงในสมการ (2.68) จะได้ผลดังนี้

$$E_{xmn} = -\frac{j\beta_m}{k_c^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_m z} \quad (2.73ก)$$

$$E_{ymn} = -\frac{j\beta_m}{k_c^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_m z} \quad (2.73ข)$$

$$H_{xmn} = \mu \frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_m z} \quad (2.73ค)$$

$$H_{ymn} = \mu \frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_m z} \quad (2.73ง)$$

เมื่อคำนวณอิมพีแดนซ์คลื่นสำหรับคลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศ z จะได้ผลดังนี้

$$Z_{emn} = \frac{E_{xnm}}{H_{ynm}} = -\frac{E_{ynm}}{H_{xnm}} = \frac{\beta_{nm}}{\omega\epsilon} = \frac{\beta_{nm}}{k} \eta \tag{2.74}$$

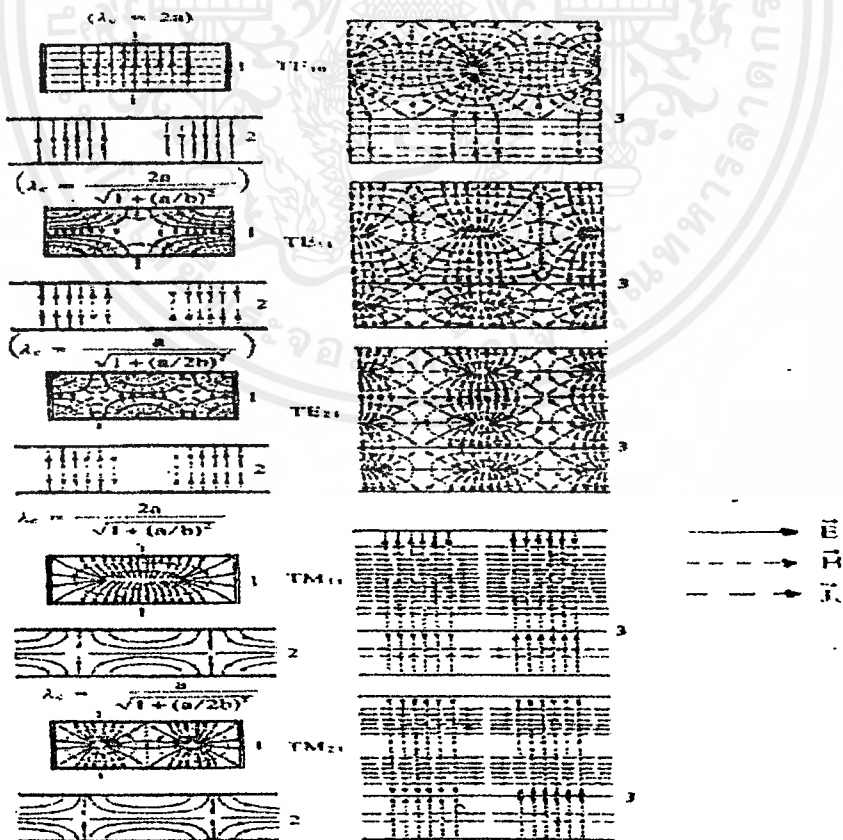
และในกรณีที่มีตัวกลางเป็นอวกาศว่างจะได้

$$Z_{emn} = \frac{\beta_{nm}}{k_0} \eta_0 \tag{2.75}$$

เมื่อเปรียบเทียบ Z_{emn} กับ Z_{imn} จะเห็นได้ว่ามีค่าไม่เท่ากัน และค่าของ Z_e และ Z_h ก็ยังเปลี่ยนแปลงไปตามอันดับของโหมด m และ n ด้วย อย่างไรก็ตามจะพบว่า $Z_{imn} Z_{emn} = \eta^2_0$ เสมอเพราะ β_{nm} ของ TE $_{mn}$ โหมด TM $_{mn}$ และ มีค่าเท่ากัน

สำหรับความเร็วเฟสและความยาวคลื่นที่ส่งผ่านไปในแกน z จะเป็นตามสมการ (2.64) และสมการ (2.65)

เมื่อก้าวโดยสรุปแล้ว คลื่นที่ส่งผ่านไปตามท่อนำคลื่นได้นั้น จะมีคลื่น TE และคลื่น TM ซึ่งคลื่นทั้งสองนี้ก็จะมีผลเฉลยเฉพาะที่มีแบบแผนของการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ซ้ำแบบกัน รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่น TE และคลื่น TM ในโหมดอันดับต่ำ ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ผนังโลหะจะมีทิศตั้งฉากกับผนังโลหะเสมอ สำหรับการระบุชนิดและอันดับของโหมดนั้น



รูปที่ 2.4 การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่น TE และคลื่น TM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปจะระบุในรูป TE_{mn} (หรือ H_{mn}) และ TM_{mn} (หรือ E_{mn}) ซึ่งหมายถึงโหมด TE อันดับ mn และโหมด TM อันดับ mn ตามลำดับ และจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงไว้ในสมการ (2.58) สมการ (2.61) สำหรับโหมด TE_{mn} จะเห็นได้ว่า m กับ n นั้น ด้านใดด้านหนึ่งจะเป็น 0 ก็ได้ แต่จะเป็น 0 พร้อมกันไม่ได้เพราะ Hz จะมีค่าคงที่และทำให้ส่วนประกอบอื่น ๆ เป็น 0 หมด สำหรับกรณีของโหมด TM_{mn} นั้น m และ n จะต้องไม่เป็น 0 ไม่เช่นนั้น E_z จะเป็น 0 และทำให้ส่วนประกอบที่เหลือเป็น 0 หมด

2.9 โหมดส่งผ่านและโหมดคัตออฟ (Transmission modes and cut-off modes)

ในหัวข้อ 2.8.1 เราได้เห็นแล้วว่า ผลเฉลยเฉพาะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นไปได้มีอยู่หลายแบบแผนด้วยกัน อย่างไรก็ตามผลที่ได้นี้ไม่ได้หมายความว่าคลื่นที่มีแบบแผนหรือโหมดอันดับต่าง ๆ เหล่านั้นจะส่งผ่านไปได้หมด คลื่นที่จะส่งผ่านไปได้นั้นจะต้องมีค่า β_{mn} เป็นค่าจริง เพราะถ้า β_{mn} เป็นค่าจินตภาพแล้ว การเปลี่ยนแปลงในทิศ z จะเขียนได้เป็น $e^{-|\beta_{mn}|z}$ ซึ่งหมายถึงถึงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีขนาดเล็กลงอย่างรวดเร็วในทิศ z โดยที่เฟสของสนามไม่เปลี่ยนแปลงตาม z ดังนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ก็ไม่ใช่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะส่งผ่านไปในทิศ z ได้ โหมดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสภาพดังกล่าวนี้ เราเรียกว่า โหมดจางหาย (evanescent mode) โหมดจางหายนี้ถึงแม้จะไม่สามารถส่งผ่านได้ แต่จะเกิดขึ้นเสมอตรงบริเวณที่มีความไม่สม่ำเสมอในท่อนำคลื่น เช่น ตำแหน่งที่มีฉากโลหะ (diaphragm) หรือมีเสาโลหะ (post) ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของท่อนำคลื่นที่มีบริเวณไม่สม่ำเสมอ

ในการพิจารณารายละเอียดว่า ภายใต้เงื่อนไขของขนาดของท่อนำคลื่นและความถี่ที่ถูกกำหนดมาให้ จะมีคลื่นโหมดอะไรบ้างที่ส่งผ่านได้บ้างนั้นจะสามารถทำได้โดยพิจารณาค่า β_{mn} ตามสมการ (2.62) เนื่องจาก $k_o = \omega\sqrt{\mu_o\epsilon_o} = \omega/c = 2\pi f/c$ และ $k_{cmn}^2 = (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2$ ดังนั้นเมื่อกำหนดขนาดของท่อนำคลื่นคือ a, b มาให้ก็จะหาค่า k_{cmn} สำหรับโหมดอันดับ mn ออกมาได้ ซึ่งก็จะทำให้รู้ว่าค่า k_o ที่จะทำให้โหมด mn ส่งผ่าน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้นั้นจะต้องมีค่าสูงกว่า k_{cmm} ถ้า $k_0 < k_{cmm}$ จะทำให้ β_{mn} เป็นค่าจินตภาพและโหมดนั้นก็จะเป็นโหมดจางหายไป ค่า k_{cmm} จึงถูกเรียกว่าคัตออฟเวฟเนัมเบอร์ (cut-off wave number) ของโหมด mn ไป

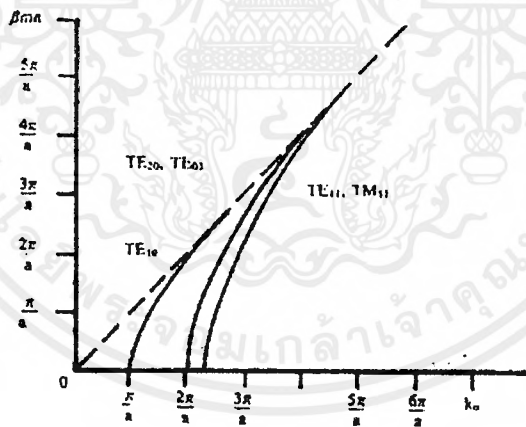
เราจะสามารถแสดงคัตออฟเวฟเนัมเบอร์ ความถี่คัตออฟ (cut-off frequency) และความยาวคลื่นคัตออฟ (cut-off wavelength) ของโหมดอันดับต่าง ๆ ได้ในรูปของขนาดของท่อนำคลื่นได้ดังต่อไปนี้

$$k_{cmm} = \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.76)$$

$$\lambda_{cmm} = \frac{2\pi}{k_{cmm}} = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.77)$$

$$f_{cmm} = \frac{ck_{cmm}}{2\pi} = \frac{c}{2\pi} \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.78)$$

เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนจะขอแสดงตัวอย่างผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง β_{mn} ในกรณีที่ $a = 2b$ ซึ่งจะได้ผลตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.6



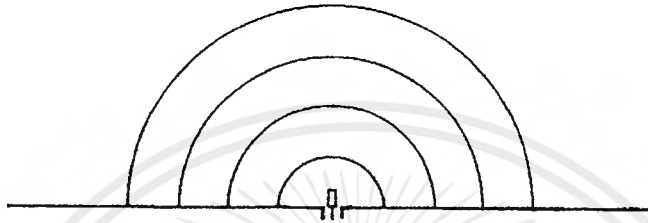
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_{mn} กับ k_0 ในกรณีที่ $a = 2b$

จากภาพจะมีข้อสังเกตที่สำคัญ ๆ ดังต่อไปนี้

- (1) เมื่อ $k_0 \rightarrow \infty$ β_{mn} จะมีค่าลู่เข้าหา k_0
- (2) ในช่วง $k_{c10} < k_0 < k_{c20}$ จะมีโหมด TE₁₀ เท่านั้นที่ส่งผ่านได้
- (3) มีโหมดบางโหมดที่มีค่า β_{mn} เท่ากัน เช่น TE₂₀ กับ TE₀₁ TE₁₁ กับ TM₁₁ เป็นต้น
- (4) ค่า β_{mn} จะเป็นฟังก์ชันของความถี่

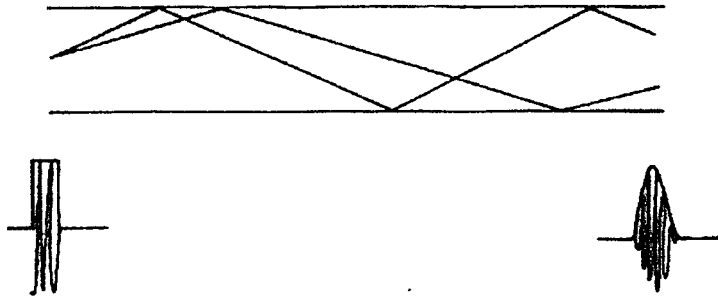
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อสังเกตข้อที่ (1) นั้นจะสามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ได้ดังนี้คือ การที่ $k_0 \rightarrow \infty$ นั่นก็คือ $f \rightarrow \infty$ หรือ $\lambda \rightarrow 0$ นั่นคือ เมื่อมองจากความยาวคลื่นจะมองเห็นว่าท่อนำคลื่นมีขนาดใหญ่มากเพราะฉะนั้นคลื่นที่ส่งผ่านอยู่ในท่อนำคลื่นนั้นก็เหมือนกับคลื่นทรงกลม (spherical wave) ที่แพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปในอวกาศโดยรอบในลักษณะที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ในสภาพเช่นนี้ค่าคงที่เฟสของโหมดต่าง ๆ ที่มองไปในทิศ z ก็จะลู่เข้าหาค่า k_0 ซึ่งเป็นค่าคงที่เฟสของคลื่นทรงกลมนั้น



รูปที่ 2.7 สภาพการส่งผ่านของคลื่นในท่อนำคลื่นในกรณีที่ $k_0 \rightarrow \infty$

ข้อสังเกตข้อ (2) นั้น เป็นเรื่องสำคัญมากเพราะในทางปฏิบัตินั้น เรามักต้องการให้เกิดคลื่นส่งผ่านได้เพียงโหมดเดียว ซึ่งในกรณีนี้คือโหมด TE₁₀ ทั้งนี้เพื่อให้พลังงานของคลื่นทั้งหมดส่งผ่านไปโน้มนำโหมด TE₁₀ นี้จัดว่าเป็นโหมดพื้นฐาน (fundamental mode หรือ dominant mode) ของคลื่นที่ส่งผ่านไปโน้มนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้ ในการออกแบบท่อนำคลื่นโดยทั่วไปก็จะออกแบบให้มีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของท่อนำคลื่นและความถี่ใช้งานในลักษณะดังกล่าว ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นจริงคือ ถ้า $k_0 < k_{c10}$ ก็จะไม่มีการส่งผ่านโหมดใด ๆ ส่งผ่านไปได้เลย และถ้า $k_0 > k_{c20}$ (หรือ k_{c10}) ก็จะทำให้โหมด TE₂₀ (หรือ TE₀₁) ส่งผ่านไปได้ด้วย ในสภาพที่มีคลื่นส่งผ่านได้พร้อมกันหลายโหมดเช่นนี้ เนื่องจากความเร็วกลุ่ม ของแต่ละโหมดไม่เท่ากัน ดังนั้นพลังงานของคลื่นที่ถูกพาไปในแต่ละโหมดก็จะถึงปลายทางไม่พร้อมกัน และเป็นสาเหตุของการเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) ของสัญญาณ รูปที่ 2.8 แสดงภาพดังกล่าวนี้ สาเหตุของการบิดเบี้ยวในลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า โหมดลิสเพอร์ชัน (modal dispersion) ในรูปได้แสดงสภาพที่เกิดขึ้นเมื่อส่งพัลส์แคบ ๆ ของไมโครเวฟไปในท่อนำคลื่นซึ่งพัลส์ลู่กันจะค่อย ๆ ลูกร่วงออกในระหว่างที่ส่งผ่านไป ซึ่งจัดว่าเป็นผลเสียต่อระบบสื่อสารมาก เพราะสัญญาณพัลส์ที่เครื่องรับปลายทางดีเทคออกมาได้จะมีรูปร่างบิดเบี้ยวไปจากสัญญาณต้นทาง ซึ่งในที่สุดก็จะเป็นการจำกัดความเร็วในการส่งพัลส์หรือบิตเรต (bit rate) ของระบบไป



รูปที่ 2.8 การเกิดโหมดดัดดิสเพอร์ชันในท่อนำคลื่น

ข้อสังเกตข้อที่ (3) นั้น เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอในท่อนำคลื่นแบบต่าง ๆ โดยเฉพาะในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่กำลังพิจารณาอยู่นี้ β_{nm} ของโหมด TE_{mn} และ TM_{mn} จะเท่ากันเสมอ (ยกเว้นกรณีที่ m หรือ n เท่ากับ 0) การที่ β มีค่าเท่ากันนี้เรียกว่าดีเจนเนอเรชันของโหมด (degeneration of modes) ซึ่งหมายถึงโหมดที่มี β เท่ากัน ซึ่งจะมีคัตออฟเฟรควเ้นั้มเบอร์หรือความถี่คัตออฟที่เท่ากัน และมีความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่มที่เท่ากัน แต่ไม่จำเป็นต้องมีการลดทอนสัญญาณเท่ากันเพราะการกระจายของสนามไม่เหมือนกัน การเกิดดีเจนเนอเรชันของโหมดนั้นส่วนใหญ่จะเป็นผลเสีย เพราะพลังงานของคลื่นถึงแม้จะถูกพาไปในโหมดที่มีความเร็วกลุ่มเท่ากัน แต่ถ้ามีค่าการลดทอนสัญญาณในแต่ละโหมดไม่เท่ากันก็จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณได้เช่นเดียวกัน

สำหรับข้อสังเกตข้อที่ (4) นั้นเป็นเรื่องที่สำคัญเช่นเดียวกัน เพราะการที่ β ของโหมดพื้นฐานเป็นฟังก์ชันของความถี่นั้นก็หมายความว่า ถึงแม้จะมีโหมดพื้นฐานส่งผ่านไปได้เพียงโหมดเดียวก็จะมีดิสเพอร์ชันเกิดขึ้นเพราะสเปกตรัมของสัญญาณจะส่งผ่านไปได้ด้วยความเร็วกลุ่มที่ต่างกัน ดิสเพอร์ชันในลักษณะดังกล่าวนี้ เราเรียกว่าเวฟไกด์ดิสเพอร์ชัน (waveguide dispersion) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่อนำคลื่นทุกประเภท

อันที่จริงยังมีดิสเพอร์ชันที่สำคัญอีกอันหนึ่งคือ ดิสเพอร์ชันของตัวกลาง หรือดิสเพอร์ชันของวัสดุ (material dispersion) ตัวกลางที่อยู่ในท่อนำคลื่นนั้นส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซหรือสารไดอิเล็กตริก ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะมีคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ทั้งสิ้น เพราะฉะนั้นเวลาคลื่นที่ประกอบด้วยหลาย ๆ สเปกตรัมส่งผ่านก็จะส่งผ่านไปได้ด้วยความเร็วกลุ่มที่ต่างกันเช่นเดียวกัน นั่นคือจะเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณระหว่างการส่งผ่านได้เช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของดิสเพอร์ชันทั้งสามแบบที่กล่าวมานี้ โดยทั่วไปโหมดดิสเพอร์ชันจะมีผลเสียมากที่สุด รองลงมาเป็นเวฟไกด์ดิสเพอร์ชันและดิสเพอร์ชันของวัสดุตามลำดับ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงต้องทำการส่งแบบโหมดเดียว (single mode transmission) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาของโหมดดิสเพอร์ชัน อันเป็นการส่งแบบหลายโหมด (multi-mode transmission) นั้นมีที่ใช้น้อยในท่อนำคลื่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเส้นใยแสง ซึ่งเดิมทีนั้นขนาดของเส้นใยแสงใหญ่กว่าความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่ทำการส่งมาก คือความยาวคลื่นเป็นประมาณ $1 \mu\text{m}$ ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแสงเป็น $50 \mu\text{m}$ ซึ่งในสภาพเช่นนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านได้พร้อมกันทีละหลาย ๆ โหมด ในกรณีของเส้นใยแสงดิสเพอร์ชันของวัสดุจะใหญ่กว่าเวฟไกด์ดิสเพอร์ชัน

2.10 การใช้งานเวฟไกด์

เวฟไกด์นำมาใช้ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 3 GHz จนถึง 100 GHz ขึ้นไป โดยเวฟไกด์ที่ใช้งานมีความกว้าง ตั้งแต่มิลลิเมตรขึ้นไปจนถึงราว ๆ 10 เซนติเมตร การใช้เวฟไกด์ที่ย่านความถี่เหล่านี้มีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมมากกว่าใช้สายโคแอกเซียล เพราะว่าเวฟไกด์ไม่มีความสูญเสียทางความต้านทานของแท่งตัวนำภายใน เช่น ในสายโคแอกเซียล ความสามารถในการทนกำลังงานไฟฟ้าของเวฟไกด์ขึ้นอยู่กับขนาดของไกด์ที่ใช้ เวฟไกด์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นก็ยังสามารถทนกำลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น

คลื่น TEM ไม่สามารถแพร่กระจายผ่านเวฟไกด์ได้ คลื่น TE และ TM เท่านั้นที่สามารถเดินทางหรือแพร่กระจายไปในเวฟไกด์ได้ และสามารถส่งคลื่นในโหมดต่าง ๆ กัน ไปในเวลาเดียวกันได้ ถ้าโหมดที่สูงกว่าส่งไปพร้อม ๆ กับโหมดหลัก กำลังงานไฟฟ้าในโหมดส่งคลื่นที่สูงกว่าจะสูญเสียโดยถูกลดทอนจนหายไป ดังนั้นในทางปฏิบัติการส่งคลื่นในโหมดหลักที่ความถี่ใช้งานค่าหนึ่ง จะใช้เวฟไกด์ที่มีขนาดเล็กที่สุดเพื่อป้องกันการเกิดของโหมดส่งคลื่นที่สูงกว่า ที่ความถี่เดียวกัน ถ้าใช้เวฟไกด์ที่ใหญ่จะทำให้เกิดโหมดส่งคลื่นที่สูงกว่า (Higher mode) และจะใช้กำลังงานไฟฟ้ามากกว่าการส่งคลื่นโหมดหลักในเวฟไกด์ที่มีขนาดเล็กกว่า

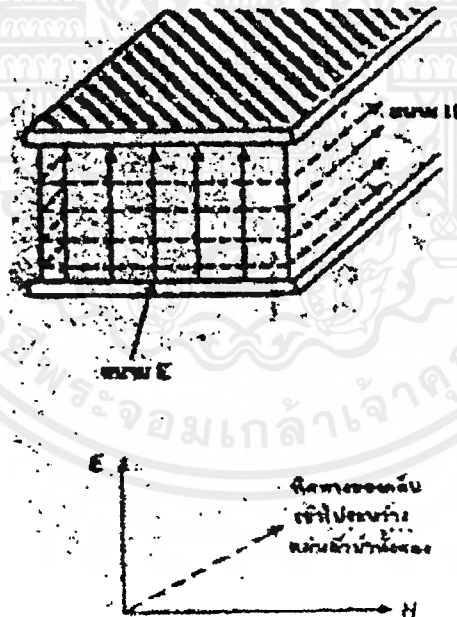
บทที่ 3

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ Waveguide (ท่อนำคลื่น)

3.1 บทนำ

โครงสร้างพื้นฐานของ Waveguide ก็คือ ท่อนำคลื่น ซึ่งสัญญาณ Microwave สามารถเดินทางผ่านไปได้ Waveguide โดยทั่วไปจะมีรูปร่างแบบชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า, ชนิดวงกลม และชนิดวงรี การแผ่กระจายของสัญญาณใน Waveguide จะมีการควบคุมให้อยู่ในเงื่อนไขขอบเขตที่แน่ชัด ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้รู้จักกันในชื่อของ Maxwell's Boundary Condition ดังนี้

- สนามไฟฟ้า (E) ที่แนวเส้นสัมผัส ถึงขอบข้างของ Waveguide จะต้องจางหายไปที่ขอบนั้น
- สนามแม่เหล็ก (H) จะตั้งฉากกับขอบข้างของ Waveguide และจะต้องจางหายไปที่ขอบนั้นเช่นกัน
- สนามแม่เหล็ก ขนานกับขอบเขตของการนำคลื่น เพื่อให้เกิดกระแสไหลที่ผิวภายในของ Waveguide ที่ตำแหน่งมุมที่ถูกต้อง



รูปที่ 3.1 แสดงคลื่นระนาบที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำ

↑ คือสนามไฟฟ้า

→ คือสนามแม่เหล็ก

3.2 ทฤษฎี Waveguide

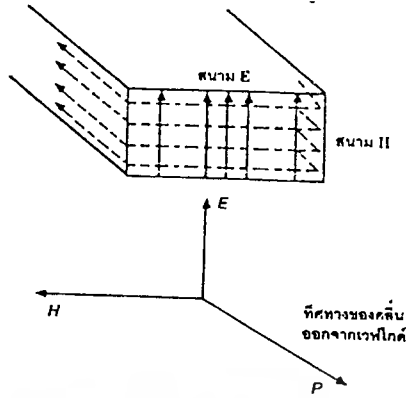
ถ้าเรานำแผ่นตัวนำ 2 แผ่น มากั้นขวางบังคับให้คลื่นเดินทางอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ซึ่งคลื่นที่เคลื่อนที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำนี้ เรียกว่า Plane wave (คลื่นระนาบ) ซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นที่มีสนาม E และสนาม H ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น และมี wavefront เป็นระนาบ สนาม E และสนาม H ระหว่างแผ่นตัวนำที่เกิดขึ้นมาจากประจุที่กระจายอยู่ตามผิวตัวนำและกระแสที่ไหลผ่านพื้นผิวตัวนำ เวกเตอร์สนาม E ที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับผิวตัวนำ โดยเริ่มจากประจุที่ผิวตัวนำด้านหนึ่งไปเทอร์มินัลหรือสิ้นสุดที่ประจุบนผิวตัวนำอีกด้านหรือที่เหลือ ส่วนสนาม H ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกระแสที่ไหลผ่านผิวตัวนำจะมีเวกเตอร์ของสนามขนานไปกับผิวตัวนำ การเกิดสนามทั้งสองในลักษณะเช่นนี้ จะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ สามารถแผ่กระจายไประหว่างแผ่นตัวนำทั้งสองได้ กลุ่มตัวประจุไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนไปตามผิวตัวนำนี้ ก่อให้เกิดสนาม E และสนาม H ที่มีลักษณะตามเงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อซึ่งอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.1

เมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวแล้ว คลื่นหรือสัญญาณก็จะสามารถผ่าน Waveguide ได้ตลอดเส้นทางแม่เหล็กไฟฟ้าใน Waveguide ชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

3.2.1 การแพร่กระจายของคลื่นในเวฟไกด์ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากหัวข้อที่แล้วซึ่งเป็นเพียงแผ่นตัวนำ 2 แผ่นขนานกัน แล้วอธิบายลักษณะคลื่นที่เดินทางผ่านนั้น ถ้าทำการปิดด้านข้างทั้งสองด้านเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ก็จะได้เวฟไกด์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งจะเกิดคุณลักษณะเฉพาะของสนาม E และสนาม H ที่ประกอบกันเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้ (แสดงเวกเตอร์ของสนามทั้งสองในรูปที่ 3.2)

1. สนาม E ที่เกิดขึ้นอยู่ภายในเวฟไกด์มีจุดความเข้มสูงสุดอยู่ที่กึ่งกลางของด้านยาวของเวฟไกด์และมีความเข้มของสนาม E เป็นศูนย์ที่ผนังด้านข้างหรือด้านกว้างของเวฟไกด์ (สนาม E ที่ขนานกับพื้นผิวตัวนำจะมีค่าความเข้มเป็นศูนย์)
2. สนาม H ที่เกิดขึ้นภายในเวฟไกด์จะต่อเนื่องกัน และวนไปรอบ เวฟไกด์ โดยที่เวกเตอร์ของสนาม H จะไม่ตั้งฉากกับผนังแผ่นตัวนำด้านใดเลย สนาม H จะวนต่อกันเป็นวงรอบ (Complete loop) และขนานไปกับผนังแผ่นตัวนำทุก ๆ ด้าน

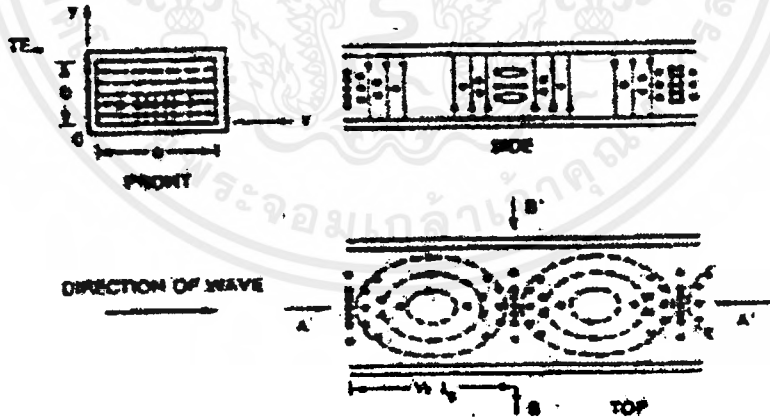


รูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นสนาม E และ H ภายในเวฟไกด์สี่เหลี่ยมผืนผ้า

3.3 การเรียกชื่อโหมดต่าง ๆ ของ Waveguide

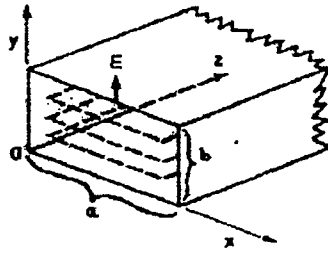
1. TE_{mn} สำหรับ Transverse Electric Modes (เช่น สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแนวด้านข้างของ Waveguide)
2. TM_{mn} สำหรับ Transverse Magnetic Modes (เช่น การไม่มีส่วนของสนามแม่เหล็ก ตลอดแนวแกนของการแผ่กระจายคลื่นของ Waveguide)

ในแต่ละกรณี ค่า m และ n จะเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม ซึ่งแสดงถึงจำนวนของ Half - Wave Length ของความเข้มระหว่างผนังของ Waveguide แต่ละคู่ ดังรูปที่ 3.2



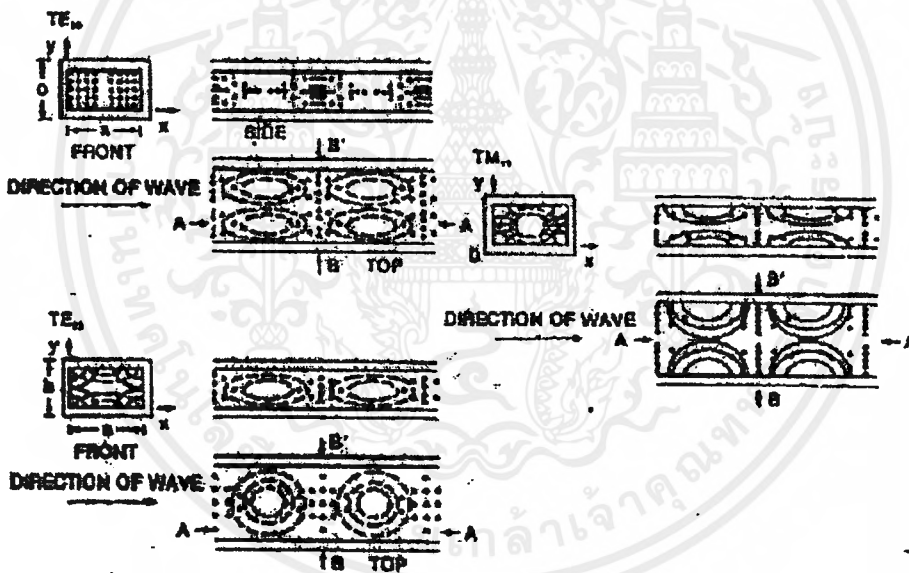
รูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในโหมด TE_{10}

ค่า m ถูกวัดตลอดแนวแกน X ของ Waveguide (เสมือนเป็นด้าน a) ขณะที่ ค่า n จะถูกวัดตลอดแนวแกน Y ของ Waveguide (เสมือนเป็นด้าน b)



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดด้านกว้าง (a) และด้านสูง (b)

ในแต่ละโหมดใน Waveguide จะจัดรวมกลุ่มด้วยการแบ่งคุณลักษณะของ Cutoff Frequency (f_c, m, n) ทางด้านต่ำ ซึ่งจะไม่มีการแผ่กระจายคลื่น Cutoff Frequency ก็คือ Parameter ทางรูปทรงเรขาคณิต ซึ่งขึ้นอยู่กับ รูปการตัดขวางของ Waveguide ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 แสดงรูปการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมด TE10 และ TE11 ทั้งสามด้าน

สำหรับค่า Cutoff Frequency หาได้จาก

$$f_{cutoff} = \frac{3 \times 10^{10}}{2\sqrt{\mu' \epsilon'}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

- f_{cutoff} = ความถี่คัตออฟสำหรับ Waveguide, (Hz)
 m = จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านกว้างของ Waveguide
 n = จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านแคบของ Waveguide
 a = ด้านกว้างของ Waveguide, (Cm)
 b = ด้านแคบของ Waveguide, (Cm)
 μ' = ค่าเพอมีอิตีวี่สัมพัทธ์ของตัวกลางใน Waveguide
 ϵ' = ค่าเพอมีตติวี่สัมพัทธ์ของตัวกลางใน Waveguide

ตัวอย่างที่ 3.1

จงหาความถี่ Cutoff ของ Waveguide โดยใช้โหมดคลื่น TE_{1,0} กำหนดให้ภายในท่อเท่ากับ 1.5x3.5 cm ใน Free space μ' และ ϵ' มีค่าเท่ากับ 1

วิธีหาที่โหมด TE_{1,0}

$$\begin{aligned}
 m &= 1 \\
 n &= 0 \\
 a &= 3.5 \\
 b &= 1.5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{cutoff} &= \frac{3 \times 10^{10}}{2\sqrt{\mu' \epsilon'}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \\
 &= \frac{3 \times 10^{10}}{2\sqrt{1(1)}} \sqrt{\left(\frac{1}{3.5}\right)^2 + \left(\frac{0}{1.5}\right)^2} \\
 &= 4.285 \times 10^9 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

$$f_{cutoff} = 4.285 \text{ GHz}$$

หรือ

$$f_{cutoff} = \frac{C}{\lambda_{cutoff}} \quad (3.2)$$

โดยที่

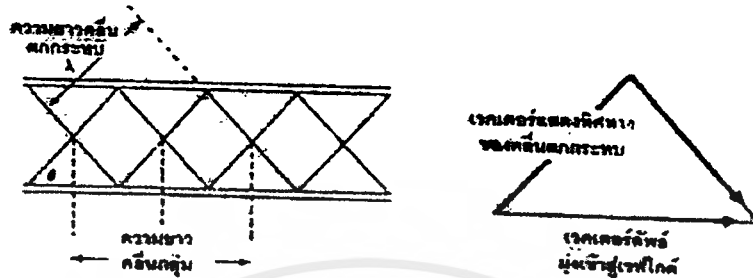
C คือ ค่าความเร็วแสง = 3×10^{10} (cm)

และในการหาค่าความยาวคลื่นหาได้โดย

$$\lambda(\text{cm}) = \frac{30}{f} \quad (3.3)$$

3.4 ความถี่และความยาวคลื่นคัตออฟ λ_{cutoff} ใน Waveguide

ความสัมพันธ์ทางความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ (Incident wave), คลื่นสะท้อน (Reflected) และคลื่นกลุ่ม (Group wave) ภายใน Waveguide ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกลุ่มและความยาวคลื่นกระทบ

เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้า E เป็นศูนย์ที่ผนังด้านข้างของ Waveguide คลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนเกิดขึ้นทุกระยะหนึ่งความยาวคลื่นในด้านกว้างของ Waveguide ที่ความถี่ของคลื่นค่าหนึ่ง และความกว้างของ Waveguide ค่าหนึ่งต้องมีมุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่เหมาะสม จึงจะทำให้สนาม E ที่ผนังด้านข้างของ Waveguide เป็นศูนย์

ความยาวคลื่นที่ยาวที่สุด (Longest Wavelength) ที่สามารถเดินทางไปใน Waveguide และยังคงให้ค่าสนามไฟฟ้า E ที่ผนังด้านข้างของ Waveguide เป็นศูนย์ มีค่าเท่ากับสองเท่าของด้านกว้าง a ของ Waveguide ซึ่งที่ค่าความยาวคลื่นนี้ จะมีมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเป็น 90 องศา จะทำให้เกิดคลื่นนิ่งจึงไม่มีการแผ่กระจายไปตาม Waveguide ค่าความยาวคลื่นและความถี่ที่จุดวิกฤตนี้ เรียกว่า ความยาวคลื่นคัตออฟ หาได้จาก

$$\lambda_{cutoff} = 2a \quad (3.4)$$

หรือ
$$\lambda_{cutoff} = \frac{c}{f_{cutoff}} \quad (3.5)$$

หรือ
$$\lambda_{cutoff} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (3.6)$$

ตัวอย่างที่ 3.2

จงหาความยาวคลื่นและความถี่คัตออฟ ซึ่งมีขนาดภายในท่อเท่ากับ 3.5×1.5 cm

วิธีหา

$$\begin{aligned} \lambda_{cutoff} &= 2a \\ &= 2 \times 3.5 \\ \lambda_{cutoff} &= 7 \text{ cm} \end{aligned}$$

และหาความถี่คัตออฟโดยใช้สมการที่ (3.2)

$$C = 3 \times 10^{10} \text{ cm./s}$$

$$f_{\text{cutoff}} = \frac{C}{\lambda_{\text{cutoff}}}$$

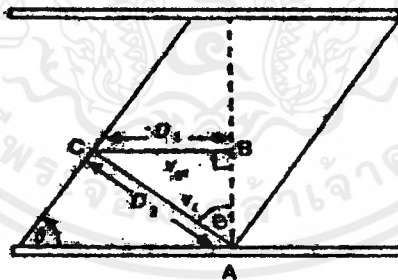
$$= \frac{3 \times 10^{10}}{7}$$

$$f_{\text{cutoff}} = 4.285 \text{ GHz}$$

3.5 ความเร็วของคลื่นใน Waveguide

คลื่น 2 ชุด เดินทางไปตาม Waveguide แบบซิกแซกเป็นรูปฟันปลา ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง เมื่อคิดคลื่นลัพท์ออกมาจะมีทิศทางของ Vector ไปตามแนวกึ่งกลางของ Waveguide ตามรูปที่ 3.5 ความเร็วของคลื่นลัพท์นี้ที่เดินทางไปในแนวกึ่งกลางของ Waveguide นี้ ขึ้นอยู่กับระยะทางรูปฟันปลา ซึ่งระยะนี้จะเกี่ยวข้องกับความเร็วของคลื่นตกกระทบด้วย

ความเร็วของคลื่นลัพท์จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงเสมอ และเรียกความเร็วของคลื่นลัพท์นี้ว่า "ความเร็วกลุ่ม" V_g (Group Velocity) ความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นตกกระทบ และความเร็วกลุ่ม V_g ดูได้จากรูปที่ 3.6 ซึ่งจะเห็นว่า Wave front ของคลื่นตกกระทบขนานฝั่งด้านข้างของ Waveguide ทำมุมเท่ากับ θ และสะท้อนออกไปด้วยมุมที่เท่ากัน



รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ของ V และ V_g ใน Waveguide

ระยะทางของคลื่นลัพท์ที่เดินทางไปตามแนวกึ่งกลางของ Waveguide ในเวลาที่กำหนด t มีค่าเป็น

$$\text{ระยะทาง} = \text{ความเร็ว} \times \text{เวลา}$$

จากรูปที่ 3.6 คลื่นลัพธ์ซึ่งเดินทางไปตามแนวกึ่งกลางของ Waveguide ได้ระยะทาง $D1$ ในเวลา t และ $D1$ มีค่าเท่ากับ

$$D1 = Vgt$$

ในเวลาที่เท่ากันคือ t คลื่นตกกระทบเดินทางไปได้ระยะทาง $D2$ ซึ่งเท่ากับ

$$D2 = Vt$$

จากสามเหลี่ยมมุมฉาก ABC ในรูปที่ 3.6 ค่า $\sin \theta$ จะเท่ากับ

$$\sin \theta = \frac{\text{ด้านตรงข้ามมุม } \theta}{\text{ด้านตรงข้ามมุมฉาก}}$$

ด้านตรงข้ามมุม θ คือระยะทาง Vgt ส่วนด้านตรงข้ามมุมฉาก คือ ระยะทาง Vt จะได้ว่า

$$\sin \theta = \frac{Vgt}{Vt}$$

เพราะว่าคิดในช่วงเวลา t เดียวกัน ดังนั้น

$$\sin \theta = \frac{Vg}{V}$$

$$Vg = V \sin \theta$$

(3.7)

โดยที่

Vg = ความเร็วกลุ่ม (m/s)

V = ความเร็วของคลื่นตกกระทบ

θ = มุมตกกระทบ

ตัวอย่างที่ 3.3

จงหาความเร็วกลุ่มของคลื่น TE ที่เดินทางไปตาม Waveguide และหาความเร็วเทียบกับความเร็วแสงด้วย เมื่อมุมตกกระทบเป็น 60 องศา

วิธีหาคำตอบ จากสมการที่ (3.7) เมื่อค่า μ' และ ϵ' เท่ากับ 1

$$Vg = V \sin \theta$$

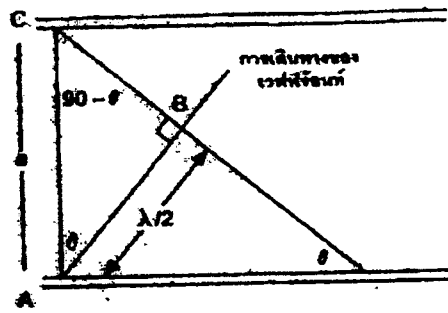
$$= 3 \times 10^8 \sin 60$$

$$Vg = 2.598 \times 10^8 \text{ m/s}$$

ความเร็วกลุ่ม Vg เทียบกับความเร็วแสงจะได้

$$\frac{Vg}{c} = \frac{2.598 \times 10^8}{3 \times 10^8}$$

$$= 0.866 \text{ หรือ } 0.866 \text{ เท่าของความเร็วแสงนั่นเอง}$$



รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a ของ Waveguide และความยาวคลื่น

ความสัมพันธ์ระหว่าง a ของ Waveguide และความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 Wavefront เคลื่อนที่ไปใน Waveguide ด้วยมุม θ และเข้าไปได้ระยะทาง $\lambda/2$ พิจารณาตามเหลี่ยมมุมฉาก ABC ดังรูปที่ 3.7 จะได้ด้านประกอบมุม θ เป็น a และ $\lambda/2$

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \frac{\text{ด้านประชิดมุม } \theta}{\text{ด้านตรงข้ามมุมฉาก}} \\ &= \frac{\lambda/2}{a} \\ \cos \theta &= \frac{\lambda}{2a}\end{aligned}$$

จากสามเหลี่ยมมุมฉากจะได้

$$\begin{aligned}\sin \theta &= \sqrt{1 - (\cos \theta)^2} \\ &= \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}\end{aligned}\quad (3.8)$$

แทนค่า $\sin \theta$ ลงในสมการที่ (3.6) จะได้

$$\begin{aligned}V_g &= V \sin \theta \\ V_g &= V \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}\end{aligned}\quad (3.9)$$

โดยที่

V_g	=	ความเร็วกลุ่ม, (m/s)
V	=	ความเร็วของคลื่นตกกระทบ
a	=	ด้านกว้างของ Waveguide
λ	=	ความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ

จากสมการที่ (3.9) ถ้าความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบมีค่าน้อยกว่าด้านข้างของ Waveguide มาก ๆ จะทำให้ความเร็วกลุ่ม V_g มีค่าเข้าใกล้ความเร็วของคลื่นตกกระทบและเมื่ออยู่ในตัวกลาง Free Space ซึ่ง μ' และ ϵ' มีค่าเป็น 1 ความเร็วกลุ่มจะมีค่าเข้าใกล้ความเร็วแสง ความเร็วกลุ่มจะเข้าใกล้ศูนย์ และเกิดคลื่นนิ่งขึ้นก็ต่อเมื่อ ความยาวคลื่นเข้าใกล้ความยาวคลื่นวิกฤต ตัวอย่างที่ 3.4

จงหาความเร็วกลุ่มใน Waveguide ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1.58×0.78 cm และมีความถี่เท่ากับ 10 GHz

วิธีหา หาความยาวคลื่นที่ความถี่ 10 GHz

$$\lambda = \frac{c}{f(\text{GHz})}$$

$$= \frac{3 \times 10^{10}}{10 \times 10^9}$$

$$\lambda = 30 \text{ cm}$$

ด้านกว้างของ Waveguide (a) เท่ากับ 1.58

ความยาวคลื่นคัตออฟเท่ากับ

$$\lambda_{\text{cutoff}} = 2a$$

$$= 2(1.58)$$

$$\lambda_{\text{cutoff}} = 3.16 \text{ cm}$$

เพราะว่า ค่าความยาวคลื่นของความถี่ที่กำหนดให้น้อยกว่าค่าความยาวคลื่นคัตออฟ ดังนั้นคลื่นนี้จึงเดินทางไปใน Waveguide ได้ จากสมการที่ (3.8) จะหาความเร็วกลุ่มได้เป็น

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

$$= 3 \times 10^{10} \sqrt{1 - \left\{\frac{3}{2(1.58)}\right\}^2}$$

$$V_g = 9.43 \times 10^9 \text{ cm/s}$$

ณ จุดคัตออฟ ถ้าค่าความยาวคลื่นเท่ากับ $2a$ สมการที่ (3.7) จะกลายเป็น

$$V_g(\text{m/s}) = V \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_{\text{cutoff}}^2}} \quad (3.10)$$

ตัวอย่างที่ 3.5

กำหนดค่าความยาวคลื่นคัตออฟของ Waveguide เท่ากับ 1.50 cm และความเร็วกลุ่มเท่ากับ 1.58×10^{10} cm/s จงหาความถี่ของคลื่นตกกระทบใน Waveguide นี้

วิธีหา

ใช้สมการที่ (3.10) เพื่อหาความยาวคลื่นของความถี่ตกกระทบที่ต้องการทราบ

$$Vg = V \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cutoff}} \right)^2}$$

$$\lambda = \lambda_{cutoff} \sqrt{1 - \left(\frac{Vg}{V} \right)^2}$$

$$\lambda = 1.50 \sqrt{1 - \left[\frac{(1.58 \times 10)^{10}}{(3 \times 10)^{10}} \right]^2}$$

$$\lambda = 1.27 \text{ cm}$$

จากนั้นมาคำนวณหาความถี่โดยใช้สมการที่ (3.3)

$$\lambda(\text{cm}) = \frac{30}{f}$$

$$= \frac{30}{1.27}$$

$$f = 23.6 \text{ GHz}$$

ความสัมพันธ์ของความเร็วและความถี่ คือ

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

และ

$$\lambda_{cutoff} = \frac{V}{f_{cutoff}}$$

ค่าอัตราส่วนของความยาวคลื่น สามารถแสดงให้อยู่ในรูปค่าอัตราส่วนของความถี่

$$\frac{\lambda}{\lambda_{cutoff}} = \frac{(V / f_{cutoff}) / (V)}{f}$$

$$= \frac{f_{cutoff}}{f} \tag{3.11}$$

แทนค่าสมการ (3.11) ลงในสมการที่ (3.10)

$$Vg(m/s) = V \sqrt{1 - (f_{cutoff} / f)^2}$$

ตัวอย่างที่ 3.6

จงหาความเร็วของคลื่นที่เดินทางใน Waveguide ซึ่งมีขนาดด้านในท่อเท่ากับ 4.75×2.21 cm กำหนดให้ใช้ที่ความถี่ 4 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda(\text{cm}) = \frac{30}{f}$$

$$= \frac{30}{4}$$

$$\lambda = 7.5 \text{ cm}$$

ด้านกว้างของ Waveguide = 4.75 cm

ตัวกลางที่ใช้เป็น Free Space ความเร็ว $V = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ ใช้สมการที่ได้คือ

$$V_g = V \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$$

$$= 3 \times 10^{10} \sqrt{1 - (7.5/2(4.75))^2}$$

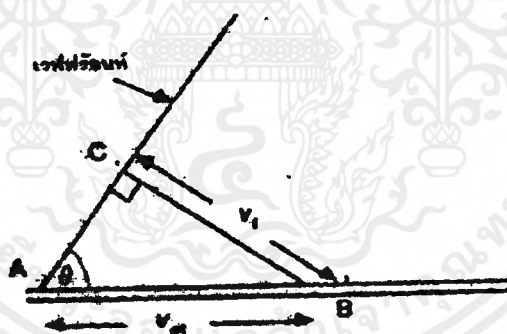
$$V_g = 1.84 \times 10^{10} \text{ Hz}$$

ความเร็วกลุ่มเทียบกับความเร็วแสงใน Free Space หาได้จาก

$$\frac{V_g}{c} = \frac{1.84 \times 10^{10}}{3 \times 10^{10}}$$

$$= 0.613$$

3.6 ความเร็วเฟสของคลื่นใน Waveguide



รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ของ V และ V_p

จากรูปที่ 3.8 ความเร็วเสมือนของ Wave front ตกกระทบ ซึ่งเดินทางไปตามผนังด้านข้างของ Waveguide จากจุด A ไป B มีชื่อเรียกว่า ความเร็วเฟสของคลื่นในขณะเดียวกัน Wave front จะเดินทางจากจุด C ไปถึง B ฉะนั้นจะได้ว่า

$$\sin \theta = \frac{CB}{AB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะว่า

$$CB = Vt$$

และ

$$AB = Vpt$$

จะได้เป็น

$$\sin \theta = \frac{Vt}{Vpt}$$

เวลาที่ใช้เท่ากัน ดังนั้น

$$\sin \theta = \frac{V}{Vp}$$

จะได้ความเร็วเฟส Vp เป็น

$$Vp(m/s) = \frac{V}{\sin \theta} \quad (3.12)$$

เมื่อมุมของคลื่นตกกระทบเข้าใกล้ 90 องศา ($\sin 90^\circ = 1$) ความเร็วเฟสจะเข้าใกล้ความเร็วของคลื่นตกกระทบ จะเห็นว่าความเร็วเฟสจะมีค่าเกินความเร็วแสง เมื่อมุมตกกระทบ (θ) อยู่ระหว่าง 0 และ 90 องศา Wave front ของคลื่นตกกระทบไม่สามารถเดินทางด้วยความเร็วเกินความเร็วแสงได้ มันจะเป็นไปได้เฉพาะการเคลื่อนที่เสมือนของ Wave front ที่ปรากฏบนผนังของ Waveguide ในความจริงแล้ว เราไม่สามารถส่งข้อมูล หรือสัญญาณไปที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วแสงได้ (C) ได้

แทนสมการที่ (3.8) ลงในสมการที่ (3.12) ความเร็วเฟส (Vp) จะเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นและด้านกว้างของ Waveguide (a)

$$Vp = \frac{V}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \quad (3.13)$$

โดยที่

Vp	=	ความเร็วเฟส, (m/s)
V	=	ความเร็วของคลื่นตกกระทบ
a	=	ด้านกว้างของ Waveguide
λ	=	ความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ

ตัวอย่างที่ 3.7

จงหาความเร็วเฟส เมื่อความยาวคลื่นเท่ากับ 7.58 และด้านกว้างของ มีค่าเท่ากับ 5.34 cm

วิธีหา ใช้สมการที่ (3.13)

$$V_p = \frac{V}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}$$

$$= \frac{3 \times 10^{10}}{\sqrt{1 - (7.58/2(5.34))^2}}$$

$$V_p = 6.045 \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

ถ้าความยาวคลื่นที่แทนลงในสมการที่ (3.13) เป็นความยาวคลื่นคัตออฟ, ตัวหารในสมการจะเป็นศูนย์ ทำให้ความเร็วเฟสเข้าสู่อนันต์ (Infinity) ซึ่งเป็นไปได้ที่จะส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปใน Waveguide ด้วยความเร็วอนันต์ (Infinity Velocity) ดังนั้น ที่ความยาวคัตออฟจะเกิดคลื่นนิ่งที่จุด Input ของ Waveguide และเพราะว่าความยาวคลื่นคัตออฟ (λ_{cutoff}) มีค่าเป็น 2 เท่าของด้านกว้างของ Waveguide

ดังนั้นสมการที่ (3.13) จะกลายเป็น $\lambda_{cutoff} = 2a$

โดยที่

$$V_p = \text{ความเร็วเฟส, (m/s)}$$

$$V = \text{ความเร็วของคลื่นตกกระทบ}$$

$$\lambda = \text{ความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ}$$

$$\lambda_{cutoff} = \text{ความยาวคัตออฟ}$$

แทนสมการที่ (3.11) ลงในสมการที่ (3.14) จะได้ความเร็วเฟสเป็นฟังก์ชันของความถี่ตกกระทบ และความถี่คัตออฟ (f_{cutoff})

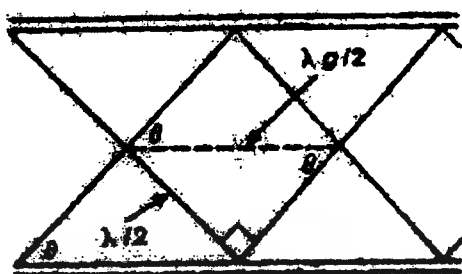
$$V_p = \frac{V}{\sqrt{1 - (f/f_{cutoff})^2}}$$

$$= \frac{3 \times 10^{10}}{\sqrt{1 - (0.5626)^2}}$$

$$V_p = 3.53 \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

3.7 ความยาวคลื่นกลุ่มภายใน Waveguide

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น λ และความยาวคลื่นกลุ่ม λ_g แสดงไว้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ของ λ กับ λ_g

$$\sin \theta = \frac{\lambda/2}{\lambda_g/2}$$

$$\lambda_g(m) = \frac{\lambda}{\sin \theta}$$

แทนสมการที่ (3.8) ลงในสมการที่ (3.16) จะได้เป็น

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

ความยาวคลื่นกลุ่มจะแปรค่าได้ตั้งแต่ความยาวเป็นอนันต์ ที่ความยาวคลื่นคัตออฟมาจนถึงความยาวคลื่นตกกระทบที่ความยาวคลื่นสั้นมาก ๆ และเพราะว่า ความยาวคลื่นคัตออฟเท่ากับ $2a$ สมการที่ (3.17) จะกลายเป็น

$$\lambda_g(m) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{cutoff})^2}} \quad (3.18)$$

$$= \frac{7.5}{\sqrt{1 - (7.5/10.68)^2}}$$

$$\lambda_g = 14.8 \text{ cm}$$

แทนสมการที่ (3.11) ลงในสมการที่ (3.18) จะได้ความเร็วกลุ่มในเทอมของความถี่เป็น

$$\lambda_g(m) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (f_{cutoff}/f)^2}} \quad (3.19)$$

ความเร็วของแสง, ความเร็วกลุ่ม และความเร็วเฟส มีความสัมพันธ์กันดัง

$$C = \sqrt{V_g V_p} \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	C	=	ความเร็วแสง, (m/s)
	Vg	=	ความเร็วกลุ่ม
	Vp	=	ความเร็วเฟส

3.8 Waveguide อิมพีแดนซ์

คำว่าคาแรคเตอร์อิมพีแดนซ์ จะใช้เรียกค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายแบบคู่ ขนาน และสายโคแอกเซียล แต่สำหรับ Waveguide แล้ว จะใช้คำว่า คาแรคเตอร์อิมพีแดนซ์แทน และขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก

$$Z = \frac{E}{H}$$

คาแรคเตอร์อิมพีแดนซ์ของโหมด TE หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Z_{TE} = \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{cutoff})^2}} \quad (3.21)$$

โดยที่	Z_{TE}	=	เวฟอิมพีแดนซ์ของโหมด TE, (Ω)
	377	=	คาแรคเตอร์อิมพีแดนซ์ของ Free Space, (Ω)
	λ	=	ความยาวคลื่นใช้งาน
	λ_{cutoff}	=	ความยาวคลื่นคัตออฟของ Waveguide

คาแรคเตอร์อิมพีแดนซ์ของโหมด TM หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Z_{TM} = 377 \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{cutoff})^2} \quad (3.22)$$

ตัวแปรต่าง ๆ จะเหมือนกันกับโหมด TE ค่าคงที่ 377 ในสมการเป็นค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของ Free Space ซึ่งเท่ากับ 377 Ω ความยาวคลื่นคัตออฟในสมการที่ (3.21) และ (3.22) สามารถหาได้จากสมการ (3.6)

ตัวอย่างที่ 3.10

จงหาคาแรคเตอร์อิมพีแดนซ์ของโหมด TE_{1,0} เมื่อใช้ที่ความถี่ที่ 12 GHz และ ความยาวคลื่นคัตออฟเท่ากับ 5.17 cm

วิธีหา ความยาวคลื่นที่ความถี่ 12 GHz หาได้โดยใช้สมการที่ (3.3)

$$\begin{aligned} \lambda(cm) &= \frac{30}{f(GHz)} \\ &= \frac{30}{12} \end{aligned}$$

$$\lambda = 2.5cm$$

สำหรับโหมด TE จะใช้สมการที่ (3.21) เพื่อหาคาแรงแคเตอร์สติกเวฟอิมพีแดนซ์

$$Z_{TE} = \frac{377}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{cutoff})^2}}$$

$$= \frac{377}{\sqrt{1 - (2.5 / 5.17)^2}}$$

$$Z_{TE} = 430 \Omega$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การออกแบบและทดลองท่อ Waveguide ชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า

4.1 การออกแบบ

ในการออกแบบ สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ

- 1) วัสดุที่จะใช้สร้างท่อ Waveguide
- 2) ย่านความถี่ที่จะใช้งาน
- 3) คำนวณขนาดความกว้าง และความสูงของท่อ Waveguide
- 4) คำนวณหาขนาดของสายอากาศฮอร์น

วัสดุที่จะใช้สร้างท่อ Waveguide

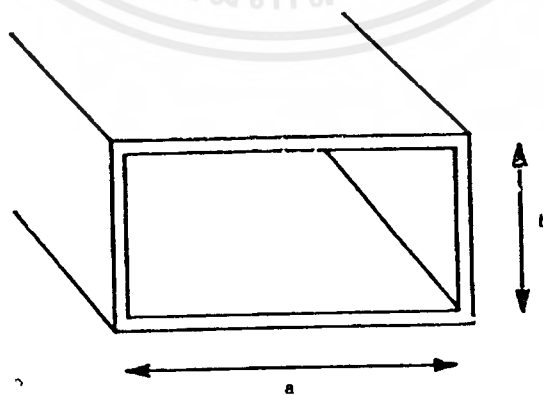
ในการออกแบบนี้เราจะใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุในการสร้างท่อ Waveguide เพราะอลูมิเนียมที่เรานำมาสร้าง เป็นวัสดุเหลือใช้จากงานต่าง ๆ มีน้ำหนักเบา และราคาถูกกว่าวัสดุอื่น ๆ เช่น ทองเหลือง เราจึงสนใจจะนำอลูมิเนียมมาทำการทดสอบ การสร้าง Rectangular Waveguide

ย่านความถี่ที่จะใช้งาน

ในตัวอย่างการทดลองนี้ เราจะใช้ย่านความถี่ X-band ทำการทดลอง ดังนั้นเราจึงต้องกำหนดขนาดของท่อ โดยการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งเราจะกำหนด Bandwidth ย่านความถี่ที่จะใช้งานได้ $\approx 40\%$ และมี Safety factor ให้ $\approx 30\%$

Safety factor $\approx 30\%$	ย่านความถี่ใช้งาน $\approx 40\%$	Safety factor $\approx 30\%$
------------------------------	----------------------------------	------------------------------

การคำนวณหาขนาดของท่อ



รูปที่ 4.1 แสดงขนาดความกว้าง และความสูงของท่อ Waveguide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง การออกแบบท่อ Waveguide ที่ใช้ในย่านความถี่ X-band ซึ่งมีความถี่ตั้งแต่ 8 GHz – 12 GHz

8GHz	12GHz
Safety factor $\approx 30\%$	ย่านความถี่ใช้งาน $\approx 40\%$

เมื่อกำหนดย่านความถี่ใช้งานให้เป็น 40% จะได้

$$\text{Bandwidth} = \text{Upper range} - \text{Lower range}$$

โดยที่

$$\text{Upper range} = \text{ย่านใช้งานสูงสุด}$$

$$\text{Lower range} = \text{ย่านใช้งานต่ำสุด}$$

$$12\text{GHz} - 8\text{GHz} = 4\text{GHz}$$

$$40\% = 4\text{GHz}$$

$$10\% = 1\text{GHz}$$

ในช่วง safety factor ที่ 30% จะได้

$$\frac{4}{40} \times 30 = 3\text{GHz}$$

เพราะฉะนั้น จุดเริ่มต้นของ Safety factor เท่ากับ

$$8\text{GHz} - 3\text{GHz} = 5\text{GHz}$$

และ จุดสิ้นสุดของ Safety factor เท่ากับ

$$12\text{GHz} - 3\text{GHz} = 15\text{GHz}$$

5GHz	8GHz	12GHz	15GHz
Safety factor ด้านล่าง	ย่านความถี่ใช้งาน	Safety factor ด้านบน	

Frequency cutoff ของท่อ Waveguide ที่ใช้งานในย่าน X-band เท่ากับ 5 GHz

เมื่อได้ Frequency cutoff แล้วนำมาหาค่า λ_{cutoff} โดยใช้สมการที่ (3.5) จะได้

$$\lambda_{cutoff} = \frac{c}{f_{cutoff}} = \frac{3 \times 10^{10}}{5 \times 10^9} = 6.0\text{cm.}$$

$$\text{ความกว้างของด้าน } a = \frac{\lambda_{cutoff}}{2} = \frac{6.0\text{cm.}}{2} = 3.0\text{cm.}$$

$$\text{ความสูงของด้าน } b = \frac{1}{2} a = \frac{3.0\text{cm.}}{2} = 1.5\text{cm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคำนวณหาขนาดของท่อได้แล้ว ขั้นตอนต่อไป คือการนำท่อที่ได้คำนวณแล้วนั้น มาทำการทดลอง ในที่นี้จะใช้ท่อที่มีขนาดเท่ากับท่อของโรงงานผู้ผลิต (ตามในตาราง Standard Rectangular Waveguide ซึ่งจะแสดงให้เห็นในภาคผนวก) ขนาดความกว้างภายใน = 2.286 cm. และความสูงภายใน = 1.016 cm. และความยาวของท่อ = 20 cm. โดยมี Frequency cutoff ที่ 6.562 GHz และมีย่านความถี่ที่ใช้งานที่เหมาะสม เท่ากับ 8.20 GHz ถึง 12.50 GHz ซึ่งเราจะนำท่อ Waveguide ที่สร้างจากอลูมิเนียม มาเปรียบเทียบการใช้งานกับท่อ Waveguide จากชุดทดลอง โดยท่อทั้งสองชนิดมีขนาด และความยาวเท่ากัน ท่อที่ ออกแบบสร้างขึ้นมานี้ มี Cutoff frequency ที่โดดเด่นต่าง ๆ คำนวณได้ดังนี้

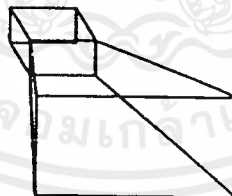
โดยใช้สูตร (3.1)

$$f_{cutoff} = \frac{3 \times 10^{10}}{2\sqrt{\mu \cdot \epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

MODE	TE10	TE01	TE11, TM11	TE20	TE02	TE21, TM21	TE12, TM12	TE22, TM22	TE30
f_{cutoff}	6.56 GHz	14.76 GHz	16.15 GHz	13.12 GHz	29.52 GHz	19.75 GHz	30.24 GHz	32.31 GHz	19.68 GHz

การคำนวณหาขนาดของสายอากาศฮอร์น

กำหนดขนาดความกว้างและความสูง (a , b) ของ Waveguide ในที่นี้ จะมีขนาดของท่อเท่ากับ 2.286 cm , 1.016 cm ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 แสดงสัดส่วนของ สายอากาศฮอร์น

ความกว้างของปลายเปิด ด้านกว้าง ของฮอร์น

$$A = 4 a \quad (4.1)$$

ความกว้างของปลายเปิด ด้านสูง ของฮอร์น

$$B = 4 b \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความลึกของสายอากาศฮอร์น

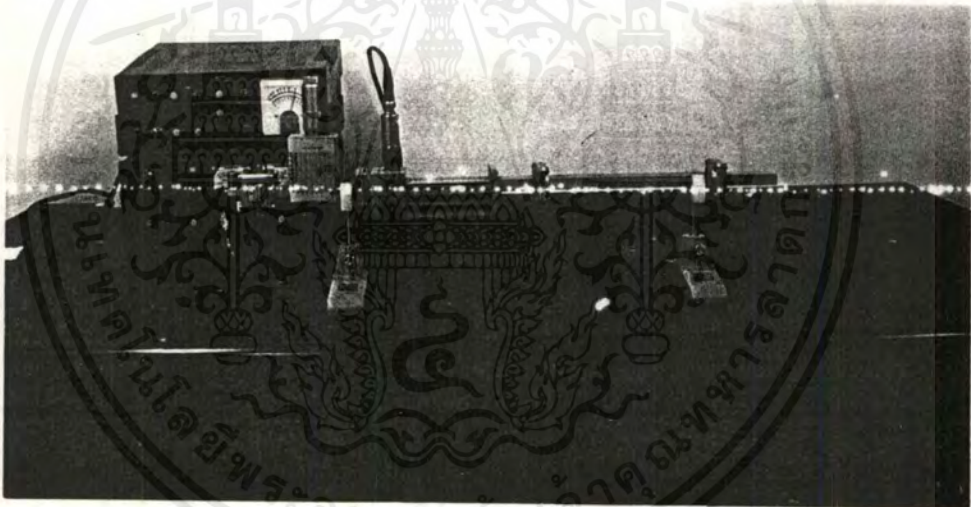
$$L = 4 \lambda_{cutoff} \quad (4.3)$$

ขนาดของฮอร์นที่คำนวณได้เมื่อเทียบ Waveguide ในหัวข้อที่แล้วเท่ากับ

$$\begin{aligned} A &= 4a \\ &= 4 \times 2.286 = 9.14 \text{ cm.} \\ B &= 4b \\ &= 4 \times 1.016 = 4.064 \text{ cm.} \\ L &= 4 \lambda_{cutoff} \\ &= 4.457 = 18.28 \text{ cm.} \end{aligned}$$

4.2 การวิเคราะห์วัดค่า VSWR โดยใช้ชุดทดลอง Microwave

Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) นิยามจาก อัตราส่วนระหว่างขนาดมากที่สุดของสนามไฟฟ้า (E_{max}) และขนาดน้อยที่สุดของสนามไฟฟ้า (E_{min}) โดยใช้ชุดทดลอง Microwave



รูปที่ 4.3 แสดงการวัดค่า VSWR โดยใช้ชุดทดลอง Microwave

วิธีคำนวณหาค่า VSWR โดยใช้วิธี 3 dB method วิธีนี้เป็นการวัด VSWR โดยวัดระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด ($d1$ และ $d2$) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของ Voltage ที่มีค่าต่ำสุด การคำนวณค่า VSWR หาค่าได้จากสมการ (3.18)

$$VSWR = \frac{\lambda g}{\pi(d2 - d1)}$$

โดยที่

- λg = ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น
- $d1$ = ระยะการเกิดค่า Voltage ต่ำสุด ครั้งที่ 1 (cm.)
- $d2$ = ระยะการเกิดค่า Voltage ต่ำสุด ครั้งที่ 2 (cm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองจะใช้ความถี่ = 8.75GHz

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{f(\text{GHz})} \\ &= \frac{3 \times 10^{10}}{8.75 \times 10^9} \\ \lambda &= 3.248 \text{cm.} \\ \lambda_g &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{\text{cutoff}})^2}} \\ &= \frac{3.428}{\sqrt{1 - (3.428 / 4.57)^2}} \\ \lambda_g &= 5.18 \text{cm.}\end{aligned}$$

คำนวณหาค่า VSWR ของท่อ Waveguide ของชุดทดลอง Microwave โดยวัดระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดได้ $d1 = 0.9 \text{cm}$. และ $d2 = 1.9 \text{cm}$. จะได้ค่า VSWR ดังนี้

$$\begin{aligned}VSWR &= \frac{\lambda_g}{\pi(d2 - d1)} \\ &= \frac{5.18}{3.14(1.9 - 0.9)} \quad \therefore VSWR \text{ Waveguide ของชุดทดลอง} = 1.649\end{aligned}$$

คำนวณหาค่า VSWR ของท่อ Waveguide อลูมิเนียม โดยวัดระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดได้ $d1 = 1.0 \text{cm}$. และ $d2 = 1.95 \text{cm}$. จะได้ค่า VSWR ดังนี้

$$\begin{aligned}VSWR &= \frac{\lambda_g}{\pi(d2 - d1)} \\ &= \frac{5.18}{3.14(1.95 - 1.0)} \quad \therefore VSWR \text{ Waveguide อลูมิเนียม} = 1.735\end{aligned}$$

จากนั้นสามารถนำค่า VSWR มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และค่าความสูญเสียกำลังงาน (Return power loss)

สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับหาได้จากสมการ

$$\Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (4.4)$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของท่อ Waveguide ชุดทดลอง มีค่าดังนี้ แทนค่าลงในสมการ (4.4)

$$\begin{aligned}\Gamma &= \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \\ &= \frac{1.649 - 1}{1.649 + 1}\end{aligned}$$

\therefore สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของ Waveguide ชุดทดลอง = 0.244

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของท่อ Waveguide อลูมิเนียม มีค่าดังนี้ แทนค่าลงในสมการ (4.4)

$$\begin{aligned}\Gamma &= \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \\ &= \frac{1.735 - 1}{1.735 + 1}\end{aligned}$$

∴ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของท่อ Waveguide อลูมิเนียม = 0.268

ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกำลังงานย้อนกลับ (Return power loss) หาได้จากสมการ

$$P_{return} = 20 \log \frac{1}{\Gamma} \quad (4.5)$$

โดยที่

$$P_{return} = \text{กำลังงานย้อนกลับ (dB)}$$

$$\Gamma = \text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ}$$

คำนวณหาค่าความสูญเสียที่เกิดจากกำลังงานย้อนกลับของท่อ Waveguide ชุดทดลอง มีค่าดังนี้ แทนค่าลงในสมการ (4.5)

$$\begin{aligned}P_{return} &= 20 \log \frac{1}{\Gamma} \\ &= 20 \log \frac{1}{0.244}\end{aligned}$$

∴ ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกำลังงานย้อนกลับของท่อ Waveguide ชุดทดลอง = 12.25 dB

คำนวณหาค่าความสูญเสียที่เกิดจากกำลังงานย้อนกลับของท่อ Waveguide อลูมิเนียม มีค่าดังนี้ แทนค่าลงในสมการ (4.5)

$$\begin{aligned}P_{return} &= 20 \log \frac{1}{\Gamma} \\ &= 20 \log \frac{1}{0.268}\end{aligned}$$

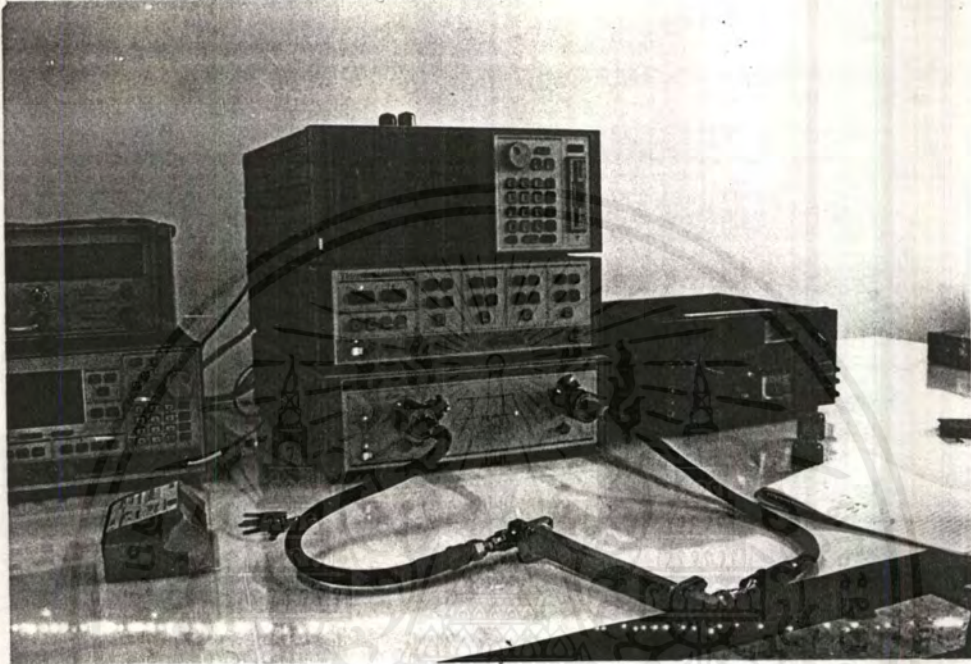
∴ ค่าความสูญเสียที่เกิดจากกำลังงานย้อนกลับของท่อ Waveguide อลูมิเนียม = 11.43 dB

การเปรียบเทียบ VSWR ของ Waveguide ทั้ง 2 ชนิด โดยใช้ Terminator เป็น load		
$VSWR = \frac{E_{max}}{E_{min}}$	Waveguide ของชุดทดลอง	Waveguide อลูมิเนียม
E_{min}	1	1
E_{max}	1.6	1.7
$VSWR$	1.6	1.7

E_{min} = ค่าการเบี่ยงเบนของเข็มมิเตอร์ต่ำสุด, E_{max} = ค่าการเบี่ยงเบนของเข็มมิเตอร์สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์ VSWR โดยใช้ Network Analyzer



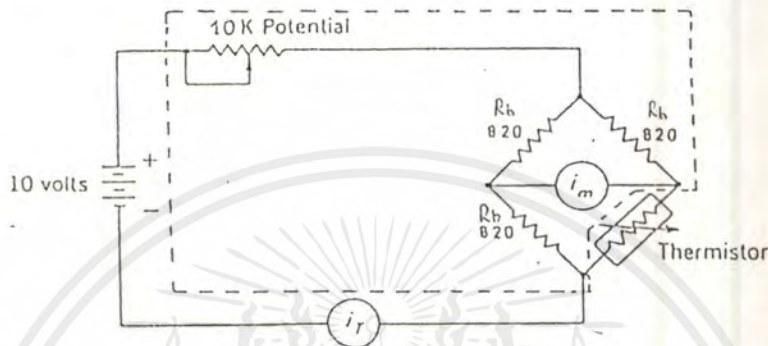
รูปที่ 4.4 แสดงการวัดค่า VSWR โดยใช้ Network Analyzer

ตารางเทียบ VSWR ของท่อทั้ง 2 ชนิด โดยใช้ Network Analyzer วิเคราะห์		
วิเคราะห์ความถี่ (GHz)	Waveguide ของชุดทดลอง	Waveguide อลูมิเนียม
8.75	1.71	1.73
8.94	1.78	1.92
9.87	2.18	2.21
10.29	2.23	2.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ

เนื่องจากกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ อยู่ในรูปของการแผ่รังสี ดังนั้น การวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟจึงไม่สามารถทำได้โดยตรงเหมือนกับคลื่นความถี่ต่ำ หลักการพื้นฐานของการวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ ที่จะนำมาทดลองก็คือ "Microwave power bridge" โดยการนำค่ากระแสไฟฟ้ามาคำนวณหาค่า Power (กำลังงาน) ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.5 แสดงวงจร Power Bridge ที่อยู่ในเครื่องวัด

ในการทดลองวัดเราจะใช้ย่านความถี่ X-band (8.20 – 12.50 GHz) โดยเลือกความถี่ 8.75 GHz เนื่องจากมีค่า *VSWR* ค่อนข้างต่ำ (เทียบกับตารางวัดค่า *VSWR* โดยใช้ Network Analyzer วิเคราะห์ ในหัวข้อที่ 4.3) โดยที่ขนาดของท่อ Waveguide มีความกว้าง และความสูงของท่อเท่ากับ 2.286 cm. , 1.016 cm. ตามลำดับ ซึ่งมี $f_{cutoff} = 6.562$ GHz และความยาวของท่อทั้งหมดเท่ากับ 20 cm. โดยในการวัดจะวัดกระแสไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ แล้วนำผลของกระแสไฟฟ้าที่วัดค่าได้บนหน้าปัดเครื่องวัด ไปคำนวณหากำลังงานคลื่นไมโครเวฟโดยใช้สมการ

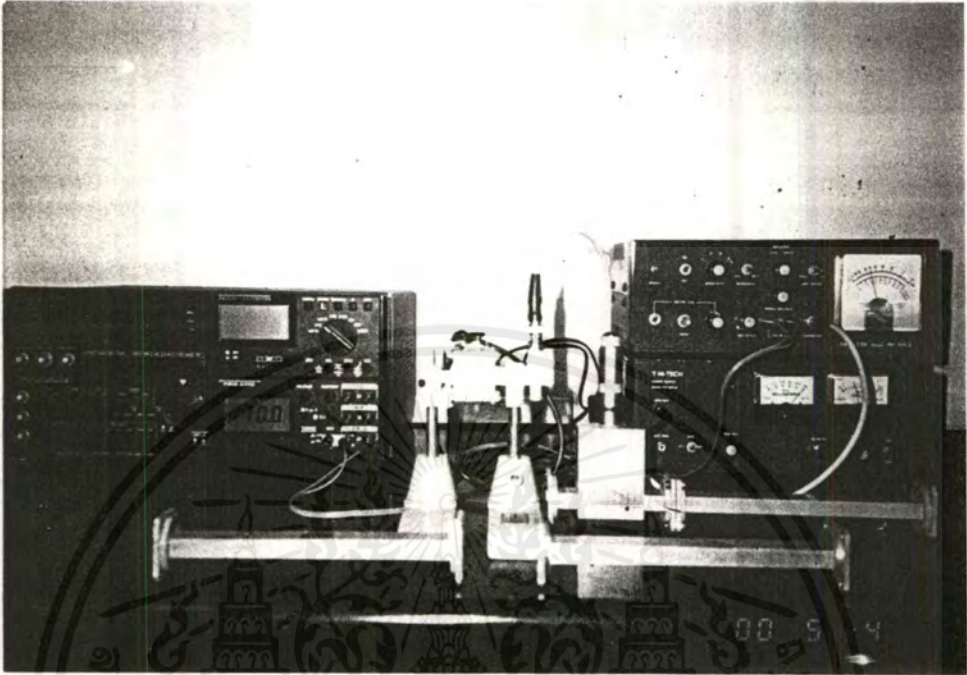
$$I_b = \frac{1}{4} I_t \quad (4.4)$$

$$P_t = I_b^2 R_b \quad (4.5)$$

สมการทั้งสองนี้ได้มาจากการคำนวณวงจร Microwave power bridge จากรูปที่ 4.3 สำหรับหาค่ากำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ

ซึ่งในการทำการทดลองจะป้อนแรงดันให้แก่ Gunn. Oscillator เท่ากับ 5.0 Volt ต่อผ่านด้วย Attenuator ให้อยู่ที่ scale 10 mm. จากนั้นจะต่อด้วยท่อ Waveguide ขนาดความยาว 20cm. และต่อด้วยท่อ Waveguide ที่จะทำการทดลองเปรียบเทียบตามลำดับ ซึ่งจะแสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองในหน้าต่อไป

ทำการวัดโดยการประกอบอุปกรณ์ตามรูปดังรูปต่อไปนี้

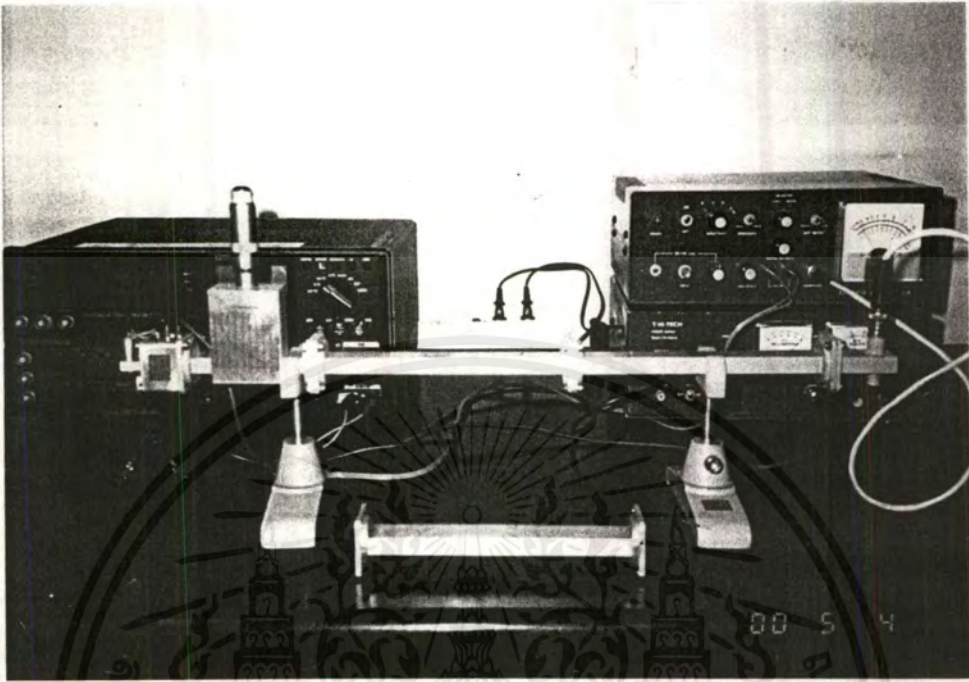


รูปที่ 4.6 การวัดกระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ Gunn. Oscillator

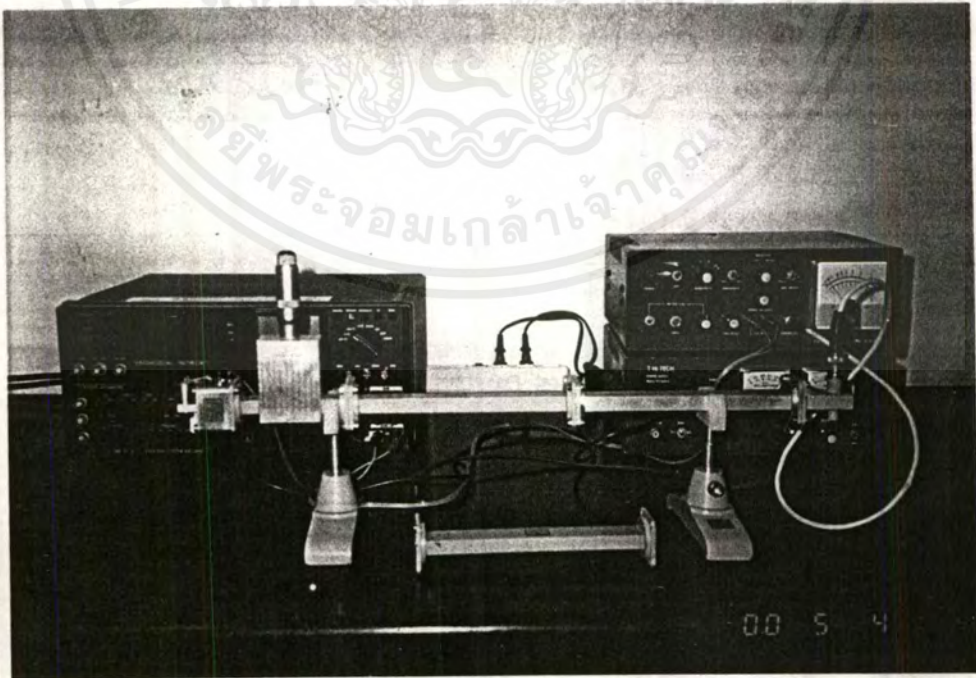


รูปที่ 4.7 การวัดกระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่จุด output ก่อนที่จะส่งผ่านท่อ Waveguide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การวัดกระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านท่อ Waveguide ของชุดทดลอง



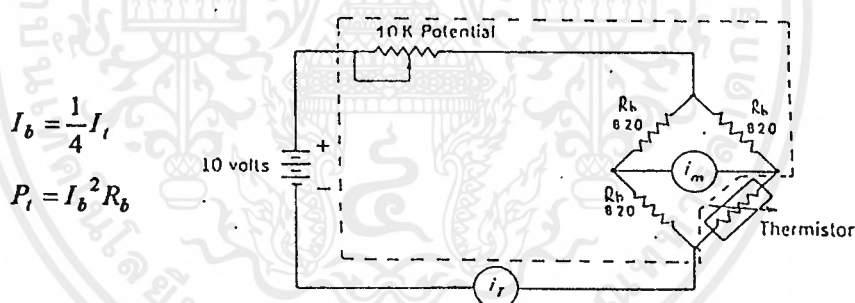
รูปที่ 4.9 การวัดกระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ส่งผ่านท่อ Waveguide อลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่าที่ได้จากการวัดกระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ

อุปกรณ์ที่ทำการวัด	ค่าที่วัดได้
วัดกระแสไฟฟ้าจาก Gunn OSC	$310\mu A$
วัดกระแสไฟฟ้า Input ก่อนผ่านท่อ Waveguide	$220\mu A$
กระแสไฟฟ้า Output ที่วัดจากท่อ Waveguide ชุดทดลอง	$120\mu A$
กระแสไฟฟ้า Output ที่วัดจากท่อ Waveguide อลูมิเนียม	$100\mu A$

จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณหากำลังงานคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้สมการ (4.4) และ (4.5) เมื่อเทียบกับวงจร Bridge ที่อยู่ในเครื่องวัด ดังรูปต่อไปนี



$$I_b = \frac{1}{4} I_t$$

$$P_t = I_b^2 R_b$$

โดยที่

- P_t คือ กำลังงานไฟฟ้า
- R_b คือ ค่าความต้านทานในวงจร Bridge มีค่าเท่ากับ 820Ω
- I_b คือ กระแสที่ไหลตกคร่อม R_b
- I_t คือ กระแสรวมที่ไหลในวงจร Bridge

วิธีการคำนวณหาค่า กำลังงาน (Power) โดยการแทนค่าผลที่ได้จากการวัดกระแสไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ ลงในสมการ (4.4) และ (4.5)

4.4.1 หากำลังงานจาก Gunn oscillator

$$\begin{aligned}
 I_b &= \frac{1}{4} I_t \\
 &= \frac{310 \times 10^{-6}}{4} \\
 I_b &= 77.5 \times 10^{-6} \\
 P_t &= I_b^2 R_b \\
 &= (77.5 \times 10^{-6})^2 \times 820 \\
 P_t &= 4.92 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นกำลังงานจาก Gunn Oscillator มีค่าเท่ากับ $4.92 \mu W$

4.4.2 หากำลังงานจาก Input ก่อนผ่านท่อ Waveguide

$$\begin{aligned}
 I_b &= \frac{1}{4} I_t \\
 &= \frac{220 \times 10^{-6}}{4} \\
 I_b &= 55 \times 10^{-6} \\
 P_t &= I_b^2 R_b \\
 &= (55 \times 10^{-6})^2 \times 820 \\
 P_t &= 2.48 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นกำลังงานจาก Input ก่อนผ่านท่อ Waveguide มีค่าเท่ากับ $2.48 \mu W$

4.4.3 หากำลังงานจาก Output ของท่อ Waveguide ทุตทดลอง

$$\begin{aligned}
 I_b &= \frac{1}{4} I_t \\
 &= \frac{120 \times 10^{-6}}{4} \\
 I_b &= 30 \times 10^{-6} \\
 P_t &= I_b^2 R_b \\
 &= (30 \times 10^{-6})^2 \times 820 \\
 P_t &= 0.738 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นกำลังงานจาก Output ของท่อ Waveguide ทุตทดลองมีค่าเท่า $0.738 \mu W$

4.4.4 หากำลังงานจาก Output ของท่อ Waveguide อลูมิเนียม

$$\begin{aligned}
 I_b &= \frac{1}{4} I_t \\
 &= \frac{100 \times 10^{-6}}{4} \\
 I_b &= 25 \times 10^{-6} \\
 P_t &= I_b^2 R_b \\
 &= (25 \times 10^{-6})^2 \times 820 \\
 P_t &= 0.512 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นกำลังงานจาก Output ของท่อ Waveguide อลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ $0.512 \mu\text{W}$

ค่ากำลังงานคลื่นไมโครเวฟที่คำนวณได้จากสมการ (4.5) ได้ค่ากำลังงานของอุปกรณ์ทั้งหมด ดังตารางต่อไปนี้

การวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ $P_t = \frac{1}{4} I_t^2 R_b$	
วัดกำลังงานจาก Gunn Oscillator	$4.92 \mu\text{W}$
วัดกำลังงาน Input ก่อนผ่านท่อ Waveguide	$2.48 \mu\text{W}$
กำลังงานที่วัดจากท่อ Waveguide ชุดทดลอง	$0.738 \mu\text{W}$
กำลังงานที่วัดจากท่อ Waveguide อลูมิเนียม	$0.512 \mu\text{W}$

4.5 การวิเคราะห์การวัดค่าลดทอนสัญญาณ (Power loss) ในท่อ Waveguide

ในการทดลองจะตั้งค่า Attenuator ไว้ที่ 0 dB โดยการปรับหมุน Micrometer ให้อยู่ที่สเกล 10 mm. ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น และคำนวณหาค่าลดทอนสัญญาณ Microwave โดยปกติจะแสดงเป็นหน่วย (dB) ซึ่งมีนิยามดังนี้คือ

$$P_{(dB)} = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการส่งผ่าน	Power input	Power output	Power loss (dB)
ผ่าน Waveguide ชุด ทดลอง	2.48 μW	0.738 μW	-5.20dB
ผ่าน Waveguide อุดมเนียม	2.48 μW	0.512 μW	-6.85dB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

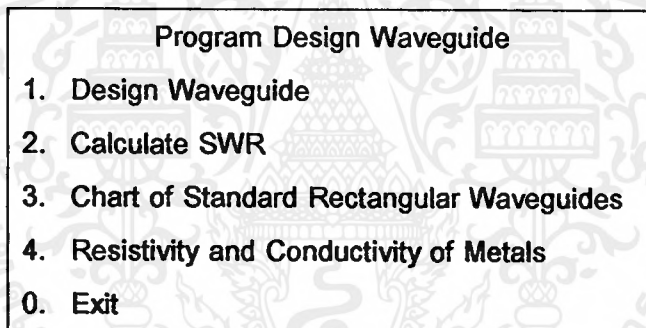
บทที่ 5 Software ที่ช่วยในการทดลอง

5.1 Software

โปรแกรมที่จัดทำขึ้นมานี้ เป็นโปรแกรมที่ช่วยในการคำนวณหาขนาดด้านกว้าง, ขนาดด้านสูง, ย่านความถี่ที่ใช้งานได้ดีที่สุด, ขนาดของสายอากาศฮอร์น และ แสดง Higher Mode Frequency cutoff ในโหมดต่าง ๆ โปรแกรมนี้เขียนโดยใช้ภาษาปาสคาล ส่วนรายละเอียดของคำสั่งในโปรแกรม จะแสดงให้เห็นในภาคผนวก

5.1.1 วิธีการใช้งานโปรแกรมช่วยในการคำนวณออกแบบท่อ Waveguide

1. ใส่แผ่น Program Design waveguide ที่ drive A
2. คลิกไปที่ My computer
3. เข้าไปที่ Floppy drive A จากนั้นเลือกการใช้งานที่หัวข้อ Project โปรแกรมจะขึ้น Menu มาให้ ดังนี้



โดย

Menu 1: จะคำนวณหาขนาด Waveguide ด้านกว้าง และด้านสูง (a,b) ตามลำดับ และ ย่านความถี่ที่เหมาะสมในการใช้งาน โดยจะต้องกำหนด Frequency cutoff ให้แก่โปรแกรม

Input Frequency :=.....

จากนั้นกด Enter โปรแกรมจะทำการประมวลผลหาขนาดความกว้าง และความสูงของ Waveguide และแสดงย่านความถี่ที่เหมาะสมในการใช้งาน จากนั้นกด Enter อีกครั้ง หน้าจอจะแสดงขนาดของสายอากาศฮอร์น และกด Enter อีกครั้ง จะแสดงค่า Higher Mode Frequency Cutoff ที่ โหมดต่าง ๆ ตั้งแต่ TE₁₀, TE₀₁, TM₁₁, TE₂₀, TE₀₂, TE₂₁, TE₁₂, TM₁₂, TE₂₂, TM₂₂ และ TE₃₀ จากนั้นกด Enter อีกครั้งเพื่อกลับไป Menu หลัก

Menu 2: คือการคำนวณค่า VSWR ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Γ) และค่า Return Power loss โดยจะต้องกำหนดค่า $d1: = ?$, $d2: = ?$ และค่า Frequency ให้แก่โปรแกรมซึ่ง $d1$ และ $d2$ มาจากระยะความห่างระหว่างจุดสองจุดของ Slotted line ในชุดทดลอง Microwave

INPUT d1 (cm) : =
INPUT d2 (cm) : =
INPUT f (GHz) : =
INPUT a (cm) : =

ถ้าต้องการกลับสู่ Menu หลักให้กด Enter

Menu 3: คือการแสดง ตารางมาตรฐาน ขนาดความกว้าง , ความสูงของท่อ Waveguide และย่านความถี่ที่เหมาะสมในการใช้งาน ถ้าต้องการกลับสู่ Menu หลักให้กด Enter

Menu 4: คือการแสดงค่าความต้านทาน และ ค่าความนำทางไฟฟ้า ของโลหะชนิดต่าง ๆ ถ้าต้องการกลับสู่ Menu หลักให้กด Enter

Menu 0: คือการออกจากโปรแกรม

ดังที่กล่าวมาข้างต้น ผู้ใช้สามารถคำนวณและสามารถออกแบบท่อ Waveguide ได้เพื่อนำค่าต่าง ๆ ที่ได้มาไปทำการสร้างเป็นท่อ Waveguide ต่อไป

บทที่ 6

การสรุปผลการทดลอง

6.1 สรุปผล

การนำท่อ Waveguide ของชุดทดลอง และ Waveguide อลูมิเนียม มาเปรียบเทียบกันจากที่ผ่านมาในบทที่ 4 ทำให้เราได้ผลการทดลอง โดยที่ท่ออลูมิเนียมมีค่า VSWR , ค่าลดทอนของสัญญาณ และค่ากำลังงานไฟฟ้าต่ำกว่า Waveguide จากชุดทดลอง Microwave เล็กน้อย

จึงมีความเห็นว่า ในอนาคตเราอาจใช้อลูมิเนียม ซึ่งมีราคาถูกกว่าวัสดุที่ทำด้วยทองเหลือง ซึ่งภายในเคลือบด้วยโครเมียม และค่า Resistivity , Conductivity ของทั้งสองนี้มีค่าดังต่อไปนี้ โดยท่อที่สร้างจากอลูมิเนียมมีค่า Resistivity = $2.62 \Omega \cdot m \times 10^{-8}$, Conductivity = $38.16 \text{ S/m} \times 10^6$ และโครเมียมมีค่า Resistivity = $2.60 \Omega \cdot m \times 10^{-8}$, Conductivity = $38.46 \text{ S/m} \times 10^6$ ที่อุณหภูมิ 20° เซลเซียส (ตารางค่าความต้านทาน และ ค่าความนำของโลหะอยู่ในภาคผนวก) ส่วนค่ากำลังงานคลื่นไมโครเวฟของท่อ Waveguide ชุดทดลอง และท่อ Waveguide อลูมิเนียมมีกำลังงานคลื่นไมโครเวฟเท่ากับ $0.738 \mu W$ และ $0.512 \mu W$ ตามลำดับ ส่วนทางด้านค่าความลดทอนสัญญาณในท่อมีค่า -5.20 dB และ -6.85 dB ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความลดทอนต่างกันเพียง -1.65 dB เท่านั้น ซึ่งผลต่างของค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมากเพื่อมาสร้างเป็นชุดทดลอง Microwave แทนชุดทดลองเดิม เนื่องจากอลูมิเนียมมีวิธีการสร้างให้เป็นท่อนำคลื่นได้ง่าย น้ำหนักเบาประมาณ 1 ใน 3 ของทองเหลือง แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานจริงในภาคสนาม เพราะอลูมิเนียมเป็น เนื้อโลหะที่ยุบตัวง่ายไม่แข็งแรงพอ และมีพื้นผิวที่ไม่เรียบพอที่จะใช้กับการใช้งานจริง

คาดว่า คงจะเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีที่จะใช้อลูมิเนียมมาทำเป็นชุดทดลอง Microwave แทนของเดิม เพราะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันและราคาถูกกว่า น้ำหนักเบากว่า ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพจะไม่เท่าเทียม แต่ก็สามารถแสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่าง ๆ ใน Microwave ได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งเพียงพอที่จะใช้เป็นชุดทดลองพื้นฐานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERISTICS OF STANDARD RECTANGULAR WAVEGUIDES

EIA* designation WR ^b ()	Physical dimensions				Cutoff frequency for air-filled waveguide in GHz	Recommended frequency range for TE ₁₀ mode in GHz
	Inside, in cm (in.)		Outside, in cm (in.)			
	Width	Height	Width	Height		
2300	58.420 (23.000)	29.210 (11.500)	59.055 (23.250)	29.845 (11.750)	0.257	0.32-0.49
2100	53.340 (21.000)	26.670 (10.500)	53.973 (21.250)	27.305 (10.750)	0.281	0.35-0.53
1800	45.720 (18.000)	22.860 (9.000)	46.350 (18.250)	23.495 (9.250)	0.328	0.41-0.62
1500	38.100 (15.000)	19.050 (7.500)	38.735 (15.250)	19.685 (7.750)	0.394	0.49-0.75
1150	29.210 (11.500)	14.605 (5.750)	29.845 (11.750)	15.240 (6.000)	0.514	0.64-0.98
975	24.765 (9.750)	12.383 (4.875)	25.400 (10.000)	13.018 (5.125)	0.606	0.76-1.15
770	19.550 (7.700)	9.779 (3.850)	20.244 (7.970)	10.414 (4.100)	0.767	0.96-1.46
650	16.510 (6.500)	8.255 (3.250)	16.916 (6.660)	8.661 (3.410)	0.909	1.14-1.73
510	12.954 (5.100)	6.477 (2.500)	13.360 (5.260)	6.883 (2.710)	1.158	1.45-2.20
430	10.922 (4.300)	5.461 (2.150)	11.328 (4.460)	5.867 (2.310)	1.373	1.72-2.61
340	8.636 (3.400)	4.318 (1.700)	9.042 (3.560)	4.724 (1.860)	1.737	2.17-3.30
284	7.214 (2.840)	3.404 (1.340)	7.620 (3.000)	3.810 (1.500)	2.079	2.60-3.95
229	5.817 (2.290)	2.908 (1.145)	6.142 (2.418)	3.233 (1.273)	2.579	3.22-4.90
187	4.755 (1.872)	2.215 (0.872)	5.080 (2.000)	2.540 (1.000)	3.155	3.94-5.99
159	4.039 (1.590)	2.019 (0.795)	4.364 (1.718)	2.344 (0.923)	3.714	4.64-7.05
137	3.485 (1.372)	1.580 (0.622)	3.810 (1.500)	1.905 (0.750)	4.304	5.38-8.17
112	2.850 (1.122)	1.262 (0.497)	3.175 (1.250)	1.588 (0.625)	5.263	6.57-9.99
90	2.286 (0.900)	1.016 (0.400)	2.540 (1.000)	1.270 (0.500)	6.562	8.20-12.50
75	1.905 (0.750)	0.953 (0.375)	2.159 (0.850)	1.207 (0.475)	7.874	9.84-15.00
62	1.580 (0.622)	0.790 (0.311)	1.783 (0.702)	0.993 (0.391)	9.494	11.90-18.00
51	1.295 (0.510)	0.648 (0.255)	1.499 (0.590)	0.851 (0.335)	11.583	14.50-22.00
42	1.067 (0.420)	0.432 (0.170)	1.270 (0.500)	0.635 (0.250)	14.058	17.60-26.70
34	0.864 (0.340)	0.432 (0.170)	1.067 (0.420)	0.635 (0.250)	17.361	21.70-33.00
28	0.711 (0.280)	0.356 (0.140)	0.914 (0.360)	0.559 (0.220)	21.097	26.40-40.00
22	0.569 (0.224)	0.284 (0.112)	0.772 (0.304)	0.488 (0.192)	26.362	32.90-50.10
19	0.478 (0.188)	0.239 (0.094)	0.681 (0.268)	0.442 (0.174)	31.381	39.20-59.60
15	0.376 (0.148)	0.188 (0.074)	0.579 (0.228)	0.391 (0.154)	39.894	49.80-75.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERISTICS OF STANDARD RECTANGULAR WAVEGUIDES (Cont.)

EIA* designation WR ^b ()	Physical dimensions				Cutoff frequency for air-filled waveguide in GHz	Recommended frequency range for TE ₁₀ mode in GHz
	Inside, in cm (in.)		Outside, in cm (in.)			
	Width	Height	Width	Height		
12	0.310 (0.122)	0.155 (0.061)	0.513 (0.202)	0.358 (0.141)	48.387	60.50–91.90
10	0.254 (0.100)	0.127 (0.050)	0.457 (0.180)	0.330 (0.130)	59.055	73.80–112.00
8	0.203 (0.080)	0.102 (0.040)	0.406 (0.160)	0.305 (0.120)	73.892	92.20–140.00
7	0.165 (0.065)	0.084 (0.033)	0.343 (0.135)	0.262 (0.103)	90.909	114.00–173.00
5	0.130 (0.051)	0.066 (0.026)	0.257 (0.101)	0.193 (0.076)	115.385	145.00–220.00
4	0.109 (0.043)	0.056 (0.022)	0.211 (0.083)	0.157 (0.062)	137.615	172.00–261.00
3	0.086 (0.034)	0.043 (0.017)	0.163 (0.064)	0.119 (0.047)	174.419	217.00–333.00

*Electronic Industry Association ^b Rectangular waveguide

Resistivity and Conductivity of Metals

Metal	Resistivity $\Omega\text{-m} \times 10^{-8}$ at 20° C	Conductivity S/m $\times 10^6$ at 20° C
Silver	1.62	61.73
Copper	1.72	58.13
Gold	2.44	40.98
Chromium	2.60	38.46
Aluminum	2.62	38.16
Brass	3.90	25.64
Nickel	6.90	14.49
Platinum	10.50	9.52
Lead	21.90	4.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Excitations of Modes in Rectangular Waveguides

In general, the field intensities of the desired mode in a waveguide can be established by means of a probe or loop-coupling device. The probe may be called a monopole antenna; the coupling loop, the loop antenna. A probe should be located so as to excite the electric field intensity of the mode and a coupling loop in such a way as to generate the magnetic field intensity for the desired mode. If two or more probes or loops are to be used, care must be taken to ensure the proper phase relationship between the currents in the various antennas. This factor can be achieved by inserting additional lengths of transmission line in one or more of the antenna feeders. Impedance matching can be accomplished by varying the position and depth of the antenna in the guide or by using impedance-matching stubs on the coaxial line feeding the waveguide. A device that excites a given mode in the guide can also serve reciprocally as a receiver or collector of energy for that mode. The methods of excitation for various modes in rectangular waveguides are shown in Fig. 4-1-6.

In order to excite a TE_{10} mode in one direction of the guide, the two exciting antennas should be arranged in such a way that the field intensities cancel each other in one direction and reinforce in the other. Figure 4-1-7 shows an arrangement for launching a TE_{10} mode in one direction only. The two antennas are placed a quarter wavelength apart and their phases are in time quadrature. Phasing is compensated by use of an additional quarter-wavelength section of line connected to the antenna feeders. The field intensities radiated by the two antennas are in phase opposition to the left of the antennas and cancel each other, whereas in the region to the right of the

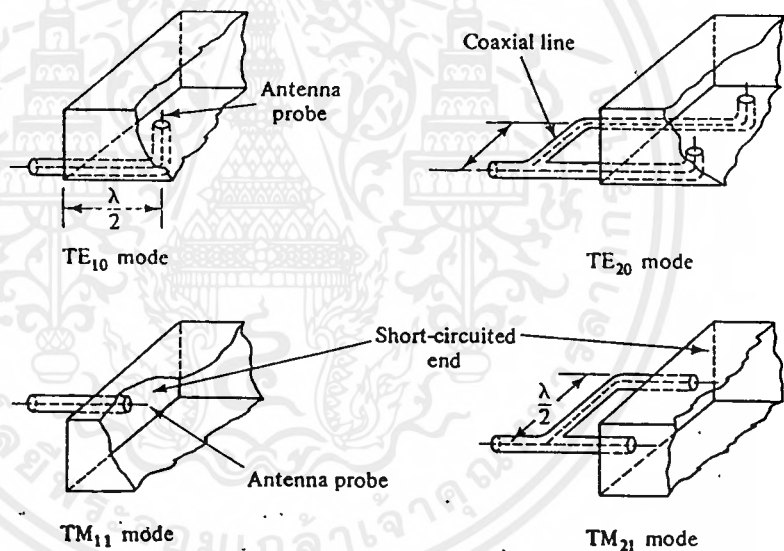


Figure 4-1-6 Methods of exciting various modes in rectangular waveguides.

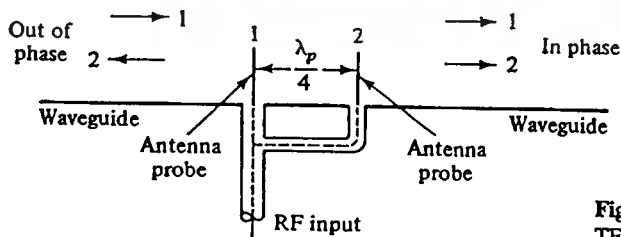


Figure 4-1-7 A method of launching a TE_{10} mode in one direction only.

antennas the field intensities are in time phase and reinforce each other. The resulting wave thus propagates to the right in the guide.

Some higher modes are generated by discontinuities of the waveguide such as obstacles, bends, and loads. However, the higher-order modes are, in general, more highly attenuated than the corresponding dominant mode. On the other hand, the dominant mode tends to remain as a dominant wave even when the guide is large enough to support the higher modes.

```

program DESIGN_WAVEGUIDE;
uses crt,graph;
var Gd, Gm, l, Width: Integer;
    sa, sb, fc : string[10] ;
    hmf,f,vswr,x,xx,xxx,d1,d2,a,lf,hf,cf,aa,bb : real;
    choice:char;

procedure opengl;
begin
    Gd := Detect; InitGraph(Gd, Gm, ' ');
    if GraphResult <> grOk then Halt(1);
end;
procedure closegl;
begin
    closegraph;
end;
procedure f2s;
begin
    clrscr;
    gotoxy(10,5);write('Input Frequency : = ');
    read(f);
    a:=(30/f)/2;
    aa:=a;
    bb:=a/2;
    gotoxy(10,7);write('Width : = ',a:6:3);
    gotoxy(10,8);write('Height : = ',(a/2):6:3 );
    lf:=f*30/100;
    hf:=f*70/100;
    cf:=f*50/100;
    gotoxy(10,10);write('Frequency Range : = ',f+lf:6:3,' - ',f+hf:6:3,' GHz');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

readin;
end;
procedure waveguide1;
begin
  opengl;
  outtextxy(100,5,'Cutoff frequency for air-filled waveguide 1');
  str(f,fc);
  outtextxy(450,5,fc);
  outtextxy(550,5,'GHz');
  line(50,450,640,450);
  line(50,40,50,450);
  line(45,300,55,300);
  outtextxy(35,450,'0');
  outtextxy(35,300,'1');
  line(45,150,55,150);
  outtextxy(35,150,'2');
  line(45,75,55,75);
  outtextxy(20,75,'2.5');
  outtextxy(15,30,'SWR');
  outtextxy(40,470,'Low Frequency Respond');
  outtextxy(400,470,'Height Frequency Respond');
  line(300,445,300,455);
  str(f+(f*50/100):6:3,fc);
  outtextxy(260,460,fc);
  line(550,445,550,455);
  str(f+lf:6:3,fc);
  outtextxy(50,460,fc);
  str(f+hf:6:3,fc);
  outtextxy(550,460,fc);
  outtextxy(500,430,'Frequency = GHz');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

rectangle(400,50,600,150);
outtextxy(450,40,'Waveguide Size');
outtextxy(350,80,'Height');
outtextxy(350,100,'Cm');
str((a/2):6:3,sb);
outtextxy(340,90,sb);
outtextxy(480,160,'Width');
outtextxy(480,180,'Cm');
str(a:6:3,sa);
outtextxy(470,170,sa);
write(' ');
readln;
closegl;
end;

procedure designh;
begin
end;

procedure cal_swr;
var lg,g,a2,aa :real;
begin
  clrscr;
  gotoxy(34,5);writeln('CALCULATE SWR');
  gotoxy(20,9);write('Input d1 : = ');
  read(d1);
  gotoxy(20,10);write('Input d2 : = ');
  read(d2);
  gotoxy(20,11);write('Input f : = ');
  read(f);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

gotoxy(20,12);write('Input a := ');
read(aa);
g:=30/f;
a2:=sqrt(abs(1-((g/(2*aa))*(g/(2*aa)))));
lg:=g/a2;
vswr:=lg/(pi*(d1-d2));
xxx:=(vswr-1)/(vswr+1);
xx:=ln(20)*(1/xxx);
x:=ln(10)*(1/(1-xxx));
gotoxy(20,14);write('VSWR := ',vswr:6:3);
gotoxy(20,15);write('S11 := ',xxx:6:3,' dB');
gotoxy(20,16);write('P return := ',xx:6:3,' dB');
gotoxy(20,17);write('POWER mismatch := ',x:6:3,' dB');
writeln(' ');
readln;
end;

procedure horn;
var ha : string[10];
begin
  opengl;
  line(550,150,550,350);
  line(550,150,300,225);
  line(550,350,300,275);
  line(50,225,300,225);
  line(50,275,300,275);
  str(a*4:6:3,ha);
  outtextxy(570,240,'A');
  outtextxy(570,250,ha);
  outtextxy(570,260,'Cm');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

str(4*f:6:3,ha);
outtextxy(420,240,'L');
outtextxy(420,255,ha);
outtextxy(420,265,'Cm');
rectangle(100,350,300,450);
line(200,300,100,350);
line(250,300,300,350);
line(100,450,200,382);
line(250,350,250,382);
line(250,300,200,300);{hor top}
line(200,350,200,382);
line(300,450,250,382);
line(250,382,200,382);
outtextxy(200,460,'A =');
str(a*4:6:3,ha);
outtextxy(240,460,ha);
outtextxy(310,420,'B =');
str(4*(a/2):6:3,ha);
outtextxy(350,420,ha);
outtextxy(230,50,'DESIGN HORN');
outtextxy(200,250,'a =');
str(a:6:3,ha);
outtextxy(230,250,ha);
setcolor(red);
line(300,250,550,250);
line(180,225,180,275);
write(' ');
readln;
closegl;

```

end;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
procedure equ(dd1,dd2,ff:real);
```

```
var
```

```
vswr,lg,g : real;
```

```
begin
```

```
g:=30/f;
```

```
vswr:=lg/(pi*(d1-d2));
```

```
xxx:=(vswr-1)/(vswr+1);
```

```
xx:=ln(20)*(1/xxx);
```

```
x:=ln(10)*(1/(1-xxx));
```

```
end;
```

```
procedure plot;
```

```
var p1:string[10];
```

```
ip1,c:integer;
```

```
begin
```

```
opengl;
```

```
line(50,50,50,400);
```

```
line(50,400,600,400);
```

```
str(vswr:3:0,p1);
```

```
val(p1,ip1,c);
```

```
line(50,ip1,100,300);
```

```
write(' ');
```

```
readln;
```

```
closegl;
```

```
end;
```

```
procedure f_cut(a,b,m,n:real);
```

```
begin
```

```
hmf:=(3E+10/2)*sqrt(((m/a)*(m/a))+((n/b)*(n/b)));
```

```
hmf:=hmf*1E-9;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end;
```

```
procedure h_mode;
```

```
begin
```

```
  clrscr;
```

```
  gotoxy(25,2);write('Heighter Mode Frequency Cutoff');
```

```
  gotoxy(20,5);write('MODE');
```

```
  gotoxy(40,5);write('Frequency (GHz)');
```

```
  gotoxy(20,7);write('TE 1 0');
```

```
  gotoxy(20,8);write('TE 0 1');
```

```
  gotoxy(20,9);write('TE 1 1');
```

```
  gotoxy(20,10);write('TM 1 1');
```

```
  gotoxy(20,11);write('TE 2 0');
```

```
  gotoxy(20,12);write('TE 0 2');
```

```
  gotoxy(20,13);write('TE 2 1');
```

```
  gotoxy(20,14);write('TM 2 1');
```

```
  gotoxy(20,15);write('TE 1 2');
```

```
  gotoxy(20,16);write('TM 1 2');
```

```
  gotoxy(20,17);write('TE 2 2');
```

```
  gotoxy(20,18);write('TM 2 2');
```

```
  gotoxy(20,19);write('TE 3 0');
```

```
  f_cut(aa,bb,1,0);
```

```
  gotoxy(40,7);write(hmf:6:3);
```

```
  hmf:=0;
```

```
  f_cut(aa,bb,0,1);
```

```
  gotoxy(40,8);write(hmf:6:3);
```

```
  f_cut(aa,bb,1,1);
```

```
  gotoxy(40,9);write(hmf:6:3);
```

```
  gotoxy(40,10);write(hmf:6:3);
```

```
  f_cut(aa,bb,2,0);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

gotoxy(40,11);write(hmf:6:3);
f_cut(aa,bb,0,2);
gotoxy(40,12);write(hmf:6:3);
f_cut(aa,bb,2,1);
gotoxy(40,13);write(hmf:6:3);
gotoxy(40,14);write(hmf:6:3);
f_cut(aa,bb,1,2);
gotoxy(40,15);write(hmf:6:3);
gotoxy(40,16);write(hmf:6:3);
f_cut(aa,bb,2,2);
gotoxy(40,17);write(hmf:6:3);
gotoxy(40,18);write(hmf:6:3);
f_cut(aa,bb,3,0);
gotoxy(40,19);write(hmf:6:3);
readln;
end;

procedure rcm;
begin
  clrscr;
  gotoxy(20,3);write('Resistivity and Conductivity of Metals');
  gotoxy(6,5);write('Metal      Resistivity      Conductivity');
  gotoxy(10,6);write('      ',char(234),'-m x 10e-8 at20',char(248),'C');
  gotoxy(45,6);write('s/m x 10e6 at20',char(248),'C');
  gotoxy(6,8);write('silver      1.62      61.73');
  gotoxy(6,9);write('copper      1.72      58.13');
  gotoxy(6,10);write('gold        2.44      40.98');
  gotoxy(6,11);write('chromium    2.60      38.46');
  gotoxy(6,12);write('aluminum    2.62      38.16');
  gotoxy(6,13);write('brass       3.90      25.64');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

gotoxy(6,14);write('nickle      6.90      14.49');
gotoxy(6,15);write('platinum   10.50     9.52');
gotoxy(6,16);write('lead      21.90     4.56');

readln;

end;

procedure menu3;
begin
  clrscr;
  gotoxy(15,3);write('Characteristics of Standard rectangular Waveguide');
  gotoxy(28,5);write('Physical dimensions');
  gotoxy(2,6);write('EIA      Inside, in cm,(in)  Outside, in cm,(in.)  f-Cutoff f-Range');
  gotoxy(1,7);write('WRb()      GHz      GHz');
  gotoxy(10,7);write(' Width  Heigth  Width  Heigth');
  gotoxy(1,9);write('2300    58.420  29.210  59.055  29.845  0.257  0.32-
0.49');
  gotoxy(11,10);write('(23.000) (11.500) (23.250) (11.750)');
  gotoxy(1,11);write('2100    53.340  26.670  53.973  27.305  0.281  0.35-
0.53');
  gotoxy(11,12);write('(21.000) (10.500) (21.250) (10.750)');
  gotoxy(1,13);write('1800    45.720  22.860  46.350  23.495  0.328  0.41-
0.62');
  gotoxy(11,14);write('(18.000) ( 9.000) (18.250) ( 9.750)');
  gotoxy(1,15);write('1500    38.100  19.050  38.735  19.685  0.394  0.49-
0.75');
  gotoxy(11,16);write('(15.000) ( 7.500) (15.250) ( 7.750)');
  gotoxy(1,17);write('1150    29.210  14.605  29.845  15.240  0.514  0.64-
0.98');
  gotoxy(11,18);write('(11.500) ( 5.750) (11.750) ( 6.000)');
  gotoxy(1,19);write(' 975    24.765  12.383  25.400  13.018  0.606  0.76-
1.15');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

gotoxy(11,20);write('( 9.750) ( 4.875) (10.000) ( 5.125)');
gotoxy(1,21);write(' 770   19.550   9.779   20.244   10.414   0.767   0.96-
1.46');
gotoxy(11,22);write('( 7.700) ( 3.850) ( 7.970) ( 4.100)');
gotoxy(1,23);write(' 650   16.510   8.255   16.016   8.661   0.909   1.14-1.73');
gotoxy(11,24);write('( 6.500) ( 3.250) ( 6.660) ( 3.410)');
readln;
clrscr;
gotoxy(12,1);write('Characteristics of Standard rectangular Waveguide PAGE-2');
gotoxy(28,3);write('Physical dimensions');
gotoxy(2,4);write('EIA   Inside, in cm,(in)   Outside, in cm,(in.)   f-Cutoff   f-Range');
gotoxy(1,5);write('WRb()   GHz   GHz');
gotoxy(10,5);write(' Width   Heigth   Width   Heigth');
gotoxy(1,6);write(' 510   12.954   6.477   13.360   6.883   1.158   1.45-2.20');
gotoxy(11,7);write('( 5.100) ( 2.500) ( 5.260) ( 2.710)');
gotoxy(1,8);write(' 430   10.922   5.461   11.328   5.867   1.373   1.72-2.61');
gotoxy(11,9);write('( 4.300) ( 2.150) ( 4.460) ( 2.310)');
gotoxy(1,10);write(' 340   8.636   4.318   9.042   4.724   1.737   2.17-3.30');
gotoxy(11,11);write('( 3.400) ( 1.700) ( 3.560) ( 1.860)');
gotoxy(1,12);write(' 284   7.214   3.404   7.620   3.810   2.079   2.60-3.95');
gotoxy(11,13);write('( 2.840) ( 1.340) ( 3.000) ( 1.500)');
gotoxy(1,14);write(' 229   5.817   2.908   6.142   3.233   2.579   3.22-4.90');
gotoxy(11,15);write('( 2.290) ( 1.145) ( 2.418) ( 1.273)');
gotoxy(1,16);write(' 187   4.755   2.215   5.080   2.540   3.155   3.94-5.99');
gotoxy(11,17);write('( 1.872) ( 0.872) ( 2.000) ( 1.000)');
gotoxy(1,18);write(' 159   4.039   2.019   4.364   2.344   3.714   4.64-7.05');
gotoxy(11,19);write('( 1.590) ( 0.795) ( 1.718) ( 0.923)');
gotoxy(1,20);write(' 157   3.458   1.580   3.810   1.905   4.304   5.38-8.17');
gotoxy(11,21);write('( 1.372) ( 0.622) ( 1.500) ( 0.750)');
gotoxy(1,22);write(' 112   2.850   1.262   3.175   1.588   5.263   6.57-9.99');

```

```

gotoxy(11,23);write('( 1.122) ( 0.497) ( 1.250) ( 0.625)');
gotoxy(1,24);write(' 90    2.286    1.016    2.540    1.270    6.562    8.20-12.50');
gotoxy(11,25);write('( 0.900) ( 0.400) ( 1.000) ( 0.500)');
readln;
clrscr;
gotoxy(12,1);write('Characteristics of Standard rectangular Waveguide PAGE-3');
gotoxy(28,3);write('Physical dimensions');
gotoxy(2,4);write('EIA    Inside, in cm,(in)    Outside, in cm,(in.)    f-Cutoff    f-Range');
gotoxy(1,5);write('WRb()                                GHz    GHz');
gotoxy(10,5);write(' Width    Heighth    Width    Heighth');
gotoxy(1,6);write(' 75    1.905    0.953    2.159    1.207    7.874    9.84-15.00');
gotoxy(11,7);write('( 0.750) ( 0.375) ( 0.850) ( 0.475)');
gotoxy(1,8);write(' 62    1.580    0.790    1.783    0.993    9.497    11.90-18.00');
gotoxy(11,9);write('( 0.622) ( 0.311) ( 0.702) ( 0.391)');
gotoxy(1,10);write(' 51    1.295    0.648    1.499    0.851    11.586    14.50-
22.00');
gotoxy(11,11);write('( 0.510) ( 0.255) ( 0.590) ( 0.335)');
gotoxy(1,12);write(' 42    1.067    0.432    1.270    0.635    14.058    17.60-
26.70');
gotoxy(11,13);write('( 0.420) ( 0.170) ( 0.500) ( 0.250)');
gotoxy(1,14);write(' 34    0.864    0.432    1.067    0.635    17.361    21.70-
33.00');
gotoxy(11,15);write('( 0.340) ( 0.170) ( 0.420) ( 0.250)');
gotoxy(1,16);write(' 28    0.711    0.356    0.914    0.559    21.097    26.50-
40.00');
gotoxy(11,17);write('( 0.280) ( 0.140) ( 0.360) ( 0.220)');
gotoxy(1,14);write(' 22    0.596    0.284    0.772    0.488    26.362    32.90-
50.10');
gotoxy(11,15);write('( 0.224) ( 0.112) ( 0.304) ( 0.192)');

```

```

gotoxy(1,16);write(' 19    0.478    0.239    0.681    0.442    31.381    39.20-
59.60');
gotoxy(11,17);write('( 0.188) ( 0.094) ( 0.268) ( 0.174)');
gotoxy(1,18);write(' 15    0.376    0.188    0.579    0.391    39.894    49.80-
75.80');
gotoxy(11,19);write('( 0.148) ( 0.074) ( 0.228) ( 0.154)');
gotoxy(1,18);write(' 12    0.310    0.155    0.513    0.358    48.387    60.50-
91.90');
gotoxy(11,19);write('( 0.122) ( 0.061) ( 0.202) ( 0.141)');
gotoxy(1,20);write(' 10    0.254    0.127    0.457    0.330    59.055    73.80-
112.00');
gotoxy(11,21);write('( 0.100) ( 0.050) ( 0.180) ( 0.130)');
gotoxy(1,22);write('  8    0.203    0.102    0.406    0.305    73.892    92.20-
140.00');
gotoxy(11,23);write('( 0.080) ( 0.040) ( 0.160) ( 0.120)');
gotoxy(1,24);write('  7    0.165    0.084    0.343    0.262    90.909    114.00-
173.00');
gotoxy(11,25);write('( 0.055) ( 0.033) ( 0.135) ( 0.103)');
readln;
clrscr;
gotoxy(12,1);write('Characteristics of Standard rectangular Waveguide PAGE-4');
gotoxy(28,3);write('Physical dimensions');
gotoxy(2,4);write('EIA    Inside, in cm,(in)    Outside, in cm,(in.)    f-Cutoff    f-Range');
gotoxy(1,5);write('WRb()                                GHz    GHz');
gotoxy(10,5);write(' Width    Heigth    Width    Heigth');
gotoxy(1,6);write(' 5    0.130    0.066    0.257    0.193    115.385    145.00-
220.00');
gotoxy(11,7);write('( 0.051) ( 0.026) ( 0.101) ( 0.076)');
gotoxy(1,8);write('  4    0.109    0.056    0.211    0.157    137.615    172.00-
261.00');

```

```

gotoxy(11,9);write('( 0.043) ( 0.022) ( 0.083) ( 0.062)');
gotoxy(1,10);write(' 3    0.086    0.043    0.163    0.119 174.419 217.00-
333.00');
gotoxy(11,11);write('( 0.034) ( 0.017) ( 0.064) ( 0.047)');
readln;
end;

procedure menu;
begin
  repeat
    clrscr;
    gotoxy(26,5);write('Program Design Waveguide');
    gotoxy(24,10);write('1.Design Waveguide');
    gotoxy(24,11);write('2.Calculate SWR');
    gotoxy(24,12);write('3.Chart of Standard rectangular Waveguide');
    gotoxy(24,13);write('4.Resistivity and Conductivity of Metals');
    gotoxy(24,14);write('0.EXIT');
    choice:=readkey;
    case choice of
      '1':begin f2s ;waveguide1; hom ;h_mode;end;
      '2':begin cal_swr; write(""); readln; end;
      '3':begin menu3; end;
      '4':begin rcm; end;
      '0':clrscr;
    end;{case}
  until (choice='0');
end;

begin
  menu;
end.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. ทฤษฎีและการใช้งานความถี่ย่านไมโครเวฟ
โดย พิชัย ภัคดีพานิชเจริญ
2. Earth Station Technology (Thai version)
โดย สุชิน จิตรายานนท์
3. Microwave Devices and Circuits
โดย Samuel Y. Liao
4. เอกสารต่าง ๆ จากสถานีดาวเทียมศรีราชา
5. Microwave Engineering : Passive, Active and Non-Reciprocal Circuits.
โดย Joseph Helszajn DSc CEng FIEE, Heriot – Watt University.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้