

การศึกษาคุณสมบัติของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบไม่ต่อเนื่อง
ON THE STUDY OF CHARACTERISTICS OF DISCONTINUOUS
RECTANGULAR WAVEGUIDE



โดย

นาย ดามพ์ สืบเพ็ง

น.ส. นวรัตน์ กล้าจอหอ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 42297
วัน, เดือน, ปี 16 พ.ค. 2545

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบไม่ต่อเนื่อง
ON THE STUDY OF CHARACTERISTICS OF
DISCONTINUOUS RECTANGULAR WAVEGUIDE

ชื่อนักศึกษา นายคัมพ์ สืบเพ็ง 42015595
นางสาวนวรรตน์ กล้าจอหอ 42015602

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์มนต์ชัย แซ่มซ้อย
อาจารย์พิชญ สุพรรณกุล

ปริญญา อดุทธากรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีโทรคมนาคม
ภาควิชา เทคนิคอดุทธากรรม
ปีการศึกษา 2543

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรอดุทธากรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
()

.....กรรมการ
()

.....กรรมการ
()

.....กรรมการ
()

.....กรรมการ
()

!

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบไม่ต่อเนื่อง
**ON THE STUDY OF CHARACTERISTICS OF
 DISCONTINUOUS RECTANGULAR WAVEGUIDE**

ชื่อนักศึกษา นายคัมพ์ สิบเพ็ง 42015595
 นางสาวนวรรตน์ กล้าจอหอ 42015602

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์มนต์ชัย แซ่มะชัย
 อาจารย์พิชญ์ สุพรรณฤกษ์

ปริญญา อุดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีโทรคมนาคม
ภาควิชา เทคนิคอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบไม่ต่อเนื่องชนิดต่างๆ ซึ่งในการนำพาคลื่นโดยใช้ท่อนำคลื่นนั้น ในบางครั้งจำเป็นจะต้องมีท่อนำคลื่นที่โค้งงอในโครงสร้างต่างๆ กันไป โดยการศึกษาประกอบไปด้วยส่วนของการเชื่อมต่อท่อนำคลื่นแบบทำมุมตั้งฉากแบบเหลี่ยมเดียว ท่อนำคลื่นทำมุมตั้งฉากแบบสองเหลี่ยมและท่อนำคลื่นแบบข้อต่อที่ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ในย่านความถี่ 8-12 GHz ซึ่งผลของการทดลองได้แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของท่อนำคลื่นโดยอาศัยคุณสมบัติของพารามิเตอร์ S จากการวัดโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน

Title **ON THE STUDY OF CHARACTERISTICS OF DISCONTINUOUS
RECTANGULAR WAVEGUIDE.**

Student Mr.Darm Suepeng 42015595

Miss.Nawarat Klachoho 42015602

Advisor Mr.Monchai Chamchoy

Mr.Pichaya Supanakoon

Degree Bachelor Degree of Industrial Technology

Programme Telecommunication Technology

Department Industrial Technology

Academic year 2000

ABSTRACT

In this project , the characteristics of the discontinuous rectangular waveguides are studied. Occasionally , the discontinuous waveguides are required to propagate waves. The five different types of discontinuous waveguides , namely, the H-plane and E-plane waveguide with 90° corner and one bend , the H-plane and E-plane waveguide with 90° corner and two bands , and the T-junction discontinuous waveguide , are considered in X band at 12 GHz. The measured results show characteristic curves of waveguides with respect to S-parameters , which are measured by the network analyzer. Finally , the with respect to measured results are compared with the simulated results.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเป็นผลสำเร็จ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจและคอยให้ความช่วยเหลือ ขอขอบพระคุณท่านบูรพาจารย์ทั้งหลายท่านซึ่งเป็นผู้เขียนเอกสารและตำราอ้างอิงต่าง ๆ ทุกท่าน โดยเฉพาะท่านอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์มนต์ชัย แซ่มะซ้อย และอาจารย์พิชญ์ สุพรรณกุล ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือด้านข้อมูลต่าง ๆ ทั้งในทฤษฎีและปฏิบัติเป็นอย่างดี และที่ขาดเสียไม่ได้ ก็ต้องขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสคณะผู้จัดทำได้มีโอกาสเข้ามาศึกษา ณ สถาบันแห่งนี้

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ รวมถึงแนวความคิดและแนวทางปฏิบัติให้แก่คณะผู้จัดทำ จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จผลตามเป้าหมายทุกประการ

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวความคิดในการทำปริยฐานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริยฐานิพนธ์	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	2
2.1 บทนำ	2
2.1.1 สมการคลื่น	3
2.2 โมดคลื่น $TE_{m,n}$	4
2.3 โมดคลื่น $TE_{1,0}$	9
2.4 โมดคลื่น $TM_{m,n}$	13
2.5 คลื่นในตัวนำทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	20
2.6 ความยาวคลื่นคัตออฟและความถี่คัตออฟในท่อนำคลื่น	21
2.7 ความเร็วในท่อนำคลื่น	23
2.8 ความเร็วเฟสในท่อนำคลื่น	26
2.9 ความยาวคลื่นกลุ่มในท่อนำคลื่น	28
2.10 แบบแผนคลื่นอันดับสูงขึ้นไปในท่อนำคลื่น	29
2.11 โค้งงอและมุม	29
2.12 กำลังงานที่ส่งผ่านในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	32
2.13 กำลังงานสูญเสียในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	33
2.14 พารามิเตอร์ S	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14.1 นิยามของเมตริกซ์พารามิเตอร์ S	36
2.15 3ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบ 3 พอร์ต	39
บทที่ 3 การสร้างและออกแบบ	51
บทที่ 4 ผลการทดลอง	58
4.1 บทนำ	58
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์	58
4.3 การวัดผลโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	80
เอกสารอ้างอิง	

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	5
รูปที่ 2.2 รูปแบบของสนามสำหรับ โมด TE_{10}	12
รูปที่ 2.3 ค่าคัตออฟแบบแผนคลื่นอันดับสูงขึ้นไป (higher-order modes)	15
รูปที่ 2.4 การแพร่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบของท่อนำคลื่น ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular waveguide) ในอัตราส่วน 2 : 1	16
รูปที่ 2.4 (ต่อ) การแพร่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบของท่อนำคลื่น ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular waveguide) ในอัตราส่วน 2 : 1	17
รูปที่ 2.5 การแพร่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบของท่อนำคลื่น ทรงสี่เหลี่ยม (square waveguide) ในอัตราส่วน 2 : 1	18
รูปที่ 2.5 (ต่อ) การแพร่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบของท่อนำคลื่น ทรงสี่เหลี่ยม (square waveguide) ในอัตราส่วน 2 : 1	19
รูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	20
รูปที่ 2.7 ลักษณะของคลื่นในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	21
รูปที่ 2.8 คลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและกลุ่มความยาวคลื่นภายในท่อนำคลื่น	22
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง v และ v_g ในท่อนำคลื่น	24
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของความกว้างของท่อนำคลื่น a กับความยาวคลื่น	25
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของ v และ v_p	26
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของ λ กับ λ_g	28
รูปที่ 2.13 การโค้งงอของท่อนำคลื่น a) โค้งงอในแนวสนามแม่เหล็ก (H bend) b) โค้งงอในแนวสนามไฟฟ้า (E bend)	31
รูปที่ 2.14 การโค้งงอของท่อนำคลื่น a) โค้งงอ 90° b) โค้งงอ 45° c) มุมสนาม แม่เหล็กขนาดแคบ (H corner narrow dimension) d) มุมสนามไฟฟ้า ขนาดกว้าง (E corner wide dimension)	31
รูปที่ 2.15 ภาพตัดของท่อนำคลื่นที่สามารถโค้งงอได้	32
รูปที่ 2.16 โครงข่ายที่ใช้ในการพิจารณาพารามิเตอร์	35
รูปที่ 2.17 วงจรสำหรับเมตริกซ์พารามิเตอร์ S	37
รูปที่ 2.18 องค์ประกอบสองส่วนเชื่อมต่อกันแบบแคสแคด	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างรูปแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นซึ่งสามารถเรียกว่ามีข้อต่อแบบสามแขน	40
รูปที่ 2.20 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามแม่เหล็กแบบสมมาตร	46
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามไฟฟ้าแบบสมมาตร	50
รูปที่ 3.1 การทำงานหลักของแผนการดำเนินงาน	51
รูปที่ 3.2 รูปทรงทางเรขาคณิตและระบบพิกัดของโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	53
รูปที่ 3.3 โครงสร้างและขนาดท่อนำคลื่นแบบเหลี่ยมเดียวในรูปแบบสนามไฟฟ้า	53
รูปที่ 3.4 โครงสร้างและขนาดท่อนำคลื่นแบบเหลี่ยมเดียวในรูปแบบสนามแม่เหล็ก	54
รูปที่ 3.5 โครงสร้างและขนาดท่อนำคลื่นแบบสองเหลี่ยมในรูปแบบสนามไฟฟ้า	54
รูปที่ 3.6 โครงสร้างและขนาดท่อนำคลื่นแบบสองเหลี่ยมในรูปแบบสนามแม่เหล็ก	55
รูปที่ 3.7 โครงสร้างและขนาดท่อนำคลื่นแบบข้อต่อที่ในรูปแบบสนามไฟฟ้า	55
รูปที่ 3.8 โครงสร้างและขนาดท่อนำคลื่นแบบข้อต่อที่ในรูปแบบสนามแม่เหล็ก	56
รูปที่ 4.1 รูปร่างและโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก	58
รูปที่ 4.2 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในระนาบสนามแม่เหล็ก	58
รูปที่ 4.3 พารามิเตอร์ S_{12} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในระนาบสนามแม่เหล็ก	59
รูปที่ 4.4 รูปร่างและโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวและสองเหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้า	59
รูปที่ 4.5 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามไฟฟ้า	60
รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์ S_{12} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามไฟฟ้า	60

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 รูปร่างและ โครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียว และสองเหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็ก	61
รูปที่ 4.8 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียว ในระนาบสนามแม่เหล็ก	62
รูปที่ 4.9 พารามิเตอร์ S_{12} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียว ในระนาบสนามแม่เหล็ก	62
รูปที่ 4.10 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยม ในระนาบสนามไฟฟ้า	63
รูปที่ 4.11 พารามิเตอร์ S_{12} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยม ในระนาบสนามไฟฟ้า	63
รูปที่ 4.12 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยม ในระนาบสนามแม่เหล็ก	64
รูปที่ 4.13 พารามิเตอร์ S_{12} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยม ในระนาบสนามแม่เหล็ก	64
รูปที่ 4.14 รูปร่างและ โครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อทึบ ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	65
รูปที่ 4.15 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อทึบ ในระนาบสนามไฟฟ้า	66
รูปที่ 4.16 พารามิเตอร์ S_{12} และ S_{21} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อทึบ ในระนาบสนามไฟฟ้า	66
รูปที่ 4.17 พารามิเตอร์ S_{22} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อทึบ ในระนาบสนามไฟฟ้า	67
รูปที่ 4.18 พารามิเตอร์ S_{23} และ S_{32} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อทึบ ในระนาบสนามไฟฟ้า	67

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.19 พารามิเตอร์ S_{33} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ ในระนาบสนามไฟฟ้า	68
รูปที่ 4.20 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ ในระนาบสนามแม่เหล็ก	69
รูปที่ 4.21 พารามิเตอร์ S_{12} และ S_{21} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ ในระนาบสนามแม่เหล็ก	69
รูปที่ 4.22 พารามิเตอร์ S_{22} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ ในระนาบสนามแม่เหล็ก	70
รูปที่ 4.23 พารามิเตอร์ S_{23} และ S_{32} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ ในระนาบสนามแม่เหล็ก	70
รูปที่ 4.24 พารามิเตอร์ S_{33} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ ในระนาบสนามแม่เหล็ก	71
รูปที่ 4.25 การวัดผล โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	71
รูปที่ 4.26 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในระนาบสนามแม่เหล็ก	72
รูปที่ 4.27 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียว ในระนาบสนามไฟฟ้า	73
รูปที่ 4.28 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียว ในระนาบสนามแม่เหล็ก	74
รูปที่ 4.29 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยม ในระนาบสนามไฟฟ้า	75
รูปที่ 4.30 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยม ในระนาบสนามแม่เหล็ก	76
รูปที่ 4.31 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ ในระนาบสนามไฟฟ้า โดยการป้อนให้มีการคู่คลื่นทางพอร์ต 1	77

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.32 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ ในระนาบสนามไฟฟ้า โดยการป้อนให้มีการดูคลื่นทางพอร์ต 2	77
รูปที่ 4.33 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ ในระนาบสนามแม่เหล็ก โดยการป้อนให้มีการดูคลื่นทางพอร์ต 1	78
รูปที่ 4.34 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ ในระนาบสนามแม่เหล็ก โดยการป้อนให้มีการดูคลื่นทางพอร์ต 2	79



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 การประมาณค่าของ H_z ที่ $\beta_z = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ และ 2π ที่ $x=0, a$ และ $a/2$	11
ตาราง 2.2 การประมาณค่าของ H_x ที่ $\beta_z = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ และ 2π ที่ $x=0, a$ และ $a/2$	11
ตาราง 2.3 การประมาณค่าของ E_y ที่ $\beta_z = 0, \pi/2, \pi$ และ $3\pi/2$	12



บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวความคิดในการทำปริญญานิพนธ์

เนื่องจากในปัจจุบัน มีการใช้ประโยชน์จากการสื่อสารย่านไมโครเวฟมากขึ้นและได้มีการพัฒนาวิธีการส่งข่าวสารให้มีความเร็วมากขึ้น ความผิดพลาดของการส่งข้อมูลข่าวสารลดลงด้วยวิธีการส่งแบบต่างๆ รวมถึงการพัฒนาของอุปกรณ์นำพาคลื่นให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น มีขนาดเล็ก ลง น้ำหนักเบาและราคาถูกลง ทำให้มีอุปกรณ์นำพาคลื่นเกิดขึ้นอีกหลายชนิดด้วยโครงสร้างที่แตกต่างกันไป

ท่อนำคลื่นแบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการส่งผ่านสัญญาณในย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งนิยมใช้ในช่วงของย่านความถี่สูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสายโคแอกเซียลแล้วจะพบว่ามีค่าการสูญเสียต่ำกว่าการใช้สายโคแอกเซียล และในการส่งผ่านสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นนี้ในบางครั้งจำเป็นจะต้องมีท่อนำคลื่นที่โค้งงอในโครงสร้างต่าง ๆ กันไป เราจึงได้เลือกที่จะศึกษาหาโครงสร้างที่ดีที่สุดที่สามารถเป็นไปได้จริง เพื่อนำมาใช้ในการเชื่อมต่อ โดยได้ทำการศึกษาหาโครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เหมาะสมในการส่งผ่านสัญญาณเมื่อท่อนำคลื่น โค้งงอเป็นมุมตั้งฉาก และท่อนำคลื่นแบบข้อต่อ T ในย่านความถี่ 8-12 GHz

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์

เพื่อศึกษาคุณลักษณะของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีหลายโครงสร้าง โดยทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างที่ดีที่สุดในทางทฤษฎีและในทางปฏิบัติ และนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาสร้างและทำการทดลอง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความเข้าใจในทฤษฎีและหลักการของการส่งผ่านสัญญาณด้วยท่อนำคลื่น
2. สามารถออกแบบและสร้างท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องในลักษณะต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง
3. สามารถติดตั้งระบบการวัดและทำการวัดคุณสมบัติของท่อนำคลื่นได้

บทที่ 2

ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

2.1 บทนำ

โดยทั่วไปท่อนำคลื่น (waveguide) จะเป็นท่อโลหะกลวงแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือแบบทรงกลมใช้ในการส่งคลื่นไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่จะทำงานในช่วงความถี่ไมโครเวฟ และมีมิติเมตรหรือเซนติเมตร

สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นจะถูกจำกัดอยู่ภายในที่ว่างของท่อ ทำให้ไม่มีการสูญเสียกำลังงานการแพร่กระจาย และค่าความสูญเสียของไดอิเล็กตริก (dielectric loss) มีค่าน้อยมาก

การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่น สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell) ในรูปแบบของดิฟเฟอเรนเชียล (Differential form) เมื่อมีประจุอยู่ภายในท่อนำคลื่นและความหนาแน่นกระแสเป็นศูนย์ ($\rho=0$)

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

และ

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

ในทฤษฎีสายส่งปกติจะสมมติให้สนามทั้งหมดเปลี่ยนแปลงในทิศทางแกน Z (+Z เป็นบวก)

$$\exp(-\gamma Z) \quad (2.5a)$$

เมื่อ γ เป็นค่าคงที่การแพร่กระจายซึ่งเป็นปริมาณเชิงซ้อน (complex)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.5b)$$

α เป็นค่าคงที่การลดทอนต่อหน่วยความยาว (neper/m)

β เป็นค่าคงที่เฟส (radians/m)

การเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะอยู่ในเทอมของ

$$\exp(j\omega t) \quad (2.6)$$

เงื่อนไขที่สอดคล้องตามสมการแมกซ์เวลล์สำหรับโหมดคลื่น

$$E = H_z = 0 \quad (\text{TEM}) \quad (2.7a)$$

$$E \neq 0, H_z = 0 \quad (\text{TM}) \quad (2.7b)$$

$$E = 0, H_z \neq 0 \quad (\text{TE}) \quad (2.7c)$$

$$E \neq 0, H_z \neq 0 \quad (\text{HE}) \quad (2.7d)$$

โหมด TEM (Transverse ElectroMagnetic wave) จะพบในระบบสายคู่ขนาน (two wire line) หรือสายโคแอกเซียล (coaxial line)

โหมด TE (Transverse Electric wave) และ โหมด TM (Transverse Magnetic wave) จะพบในท่อที่เป็นรูมีหลายรูปแบบ เช่น ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก(Rectangular) , ทรงสามเหลี่ยม (triangular) , ทรงกลม (circular) และหน้าตัดจำพวกวงรี

HE จะใช้อธิบายการแพร่กระจายในบางส่วนของท่อนำคลื่นไดอิเล็กตริกโหลด (loaded dielectric waveguides) หรือ ท่อนำคลื่นไดอิเล็กตริกแบบเปิด (open dielectric waveguides)

2.1.1 สมการคลื่น

ถ้า E_z หรือ H_z แทนสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางในเทอมตามยาวอย่างเดียว การหาเงื่อนไขขอบเขตโดยใช้สมการทำได้โดยเริ่มจากการเคิร์ล (curl) สมการของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = -j\omega\mu_0(\nabla \times \bar{H}) \quad (2.8a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำจัด $(\nabla \times \bar{H})$ ในสมการนี้โดย

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \bar{E} \quad (2.8b)$$

จากสมการเวกเตอร์

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{A}) = \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \bar{A} \quad (2.8c)$$

ดังนั้นจะได้

$$\nabla(\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla^2 \bar{E} = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \bar{E} \quad (2.8d)$$

จากสมการดิฟเฟอเรนเชียล $(\nabla \cdot \bar{E}) = 0$ ทำให้ได้ผลลัพธ์ของสมการ (2.8d) เป็น

$$(\nabla^2 + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0) \bar{E} = 0 \quad (2.8e)$$

ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ E_z ในระบบพิกัดฉากเป็น

$$(\nabla^2 + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0) E_z = 0 \quad (2.9a)$$

ทำนองเดียวกันเวกเตอร์ H_z ในระบบพิกัดฉากเป็น

$$(\nabla^2 + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0) H_z = 0 \quad (2.9b)$$

2.2 โหมดคลื่น $TE_{m,n}$

$TE_{m,n}$ ได้มาจากโหมด ซึ่ง $E_z = 0, H_z \neq 0$ ในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular waveguide) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เริ่มพิจารณาจากสนามตามขวางในเทอมของ H_z และแทนสมการ (2.5) และ (2.6) ลงในสมการ (2.1) และ (2.2) และทำโดยใช้ขอบเขตเงื่อนไขในสมการ (2.7c) โดยให้

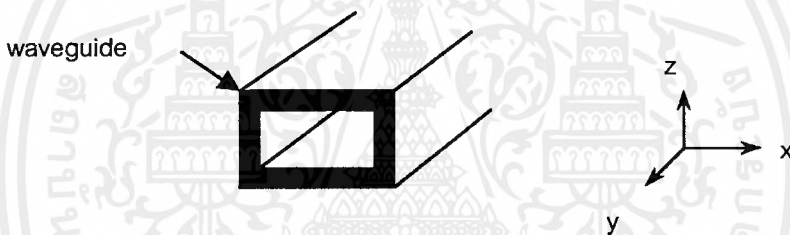
$$\begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & -\gamma \\ E_x & E_y & 0 \end{vmatrix} = -j\omega\mu_0 \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

หรือ

$$\gamma E_x = -j\omega\mu_0 H_x \quad (2.11)$$

$$\gamma E_y = -j\omega\mu_0 H_y \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.1 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ในทำนองเดียวกันจะหาความสัมพันธ์สำหรับสนามแม่เหล็กเป็น

$$\begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & -\gamma \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = j\omega\epsilon_0 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

หรือ

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + \gamma H_y = j\omega\epsilon_0 E_x \quad (2.15)$$

$$\frac{-\partial H_z}{\partial x} - \gamma H_x = j\omega\epsilon_0 E_y \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = 0 \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) จะได้

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} - \gamma H_z = 0 \quad (2.19)$$

แทนสมการ (2.15) ลงในสมการ (2.12) จะได้

$$H_y = \frac{-\gamma}{k^2 c} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกัน แทนสมการ (2.16) ในสมการ (2.11) จะได้

$$H_x = \frac{-\gamma}{k^2 c} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.21)$$

เมื่อทราบสมการของ H_x และ H_y แล้วจะสามารถหาค่า H_z ได้ ส่วน E_y และ E_x สามารถหาได้จากสมการ (2.11) และ (2.12) ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นสามารถหาได้จากสมการ (2.22)

$$Z_{TE} = \frac{E_y}{H_x} = \frac{\omega \mu_0}{j\gamma} \quad (2.22)$$

จากสมการของคลื่นจะทำให้ได้ค่า H_z ที่ใช้ในสมการ (2.9b) โดยสามารถหาค่า H_z ในรูปของ X และ Y ได้เป็น

$$H_z = XY \quad (2.23)$$

ถ้าแทนผลลัพธ์ที่ได้ด้วยสมการคลื่นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$YX'' + XY'' = -H_x = -k_c^2 XY \quad (2.24a)$$

หรือ

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} = -k_c^2 \quad (2.24b)$$

โดยสมการที่ได้มาจากสมการ

$$\frac{X''}{X} = -k_x^2 \quad (2.25a)$$

$$\frac{Y''}{Y} = -k_y^2 \quad (2.25b)$$

ภายใต้เงื่อนไข

$$k_x^2 + k_y^2 = k_c^2 \quad (2.26)$$

การตีเฟอเรนเชียลสมการในระบบพิกัดฉากจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$X = A \cos(k_x x) + B \sin(k_x x) \quad (2.27)$$

$$Y = C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y) \quad (2.28)$$

หา H_z จากสมการ (2.23) จะได้

$$H_z = \cos(k_x x) \cos(k_y y) \quad (2.29)$$

การเปลี่ยนแปลงของ H_z อาจเกิดจากความสัมพันธ์การแพร่กระจายของ γ และ k_c โดยกำหนดให้ $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$ จะได้

$$\gamma^2 = k_c^2 - k_0^2 \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายของคลื่น γ^2 จะมีค่าเป็นลบ เมื่อ γ เป็นศูนย์ ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากจะ คัดออฟและ

$$k_0^2 = k_c^2 \quad (2.31a)$$

ถ้า γ มีค่าเป็นบวกจะเกิดการลดทอนและ

$$\gamma^2 = \alpha^2 = k_c^2 \quad (2.31b)$$

ภายใต้เงื่อนไข $k_0^2 \ll k_c^2$

การลดทอนทางความถี่จะนำไปสู่การลดทอนที่เป็นมาตรฐานของการแพร่กระจายในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากจะเกิดขึ้นเมื่อ $k_0 > k_c$ จากความสัมพันธ์ทางการแพร่ในสมการ (2.30) สามารถนำมาเขียนใหม่ในเทอมของความยาวคลื่นในอวกาศ (free-space wavelength (λ_0)) และความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (guide wavelength (λ_g)) และความยาวคลื่นคัดออฟ (cutoff wavelength (λ_c)) เป็น

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda_g}\right)^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2 \quad (2.32)$$

หลังจากทราบความสัมพันธ์ระหว่าง $\lambda_g, \lambda_0, \lambda_c$ ในสมการที่ผ่านมาและ γ, k_0, k_c จากสมการ (2.30) จากนั้นเราจะหาค่าคงที่ k_x และ k_y ที่อาจจะทำให้อยู่ในรูปของส่วนประกอบในเทอมของ H_z

$$H_y = \frac{\gamma k_y}{k_x^2 + k_y^2} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \quad (2.33)$$

$$H_x = \frac{\gamma k_x}{k_x^2 + k_y^2} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \quad (2.34)$$

$$E_y = \frac{-j\omega\mu_0 k_x}{k_x^2 + k_y^2} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \quad (2.35)$$

$$E_x = \frac{j\omega\mu_0 k_y}{k_x^2 + k_y^2} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ผนังของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

$$E_x=0 \quad \text{ที่ } y=0 \quad (2.37)$$

$$E_x=0 \quad \text{ที่ } y=b \quad (2.38)$$

และ

$$E_y=0 \quad \text{ที่ } x=0 \quad (2.39)$$

$$E_y=0 \quad \text{ที่ } x=a \quad (2.40)$$

จากสองเงื่อนไขแรกจะทำให้ได้

$$k_y = \frac{n\pi}{b} \quad (2.41a)$$

ในทำนองเดียวกันถ้าพิจารณาสองเงื่อนไขต่อมาจะได้

$$k_x = \frac{m\pi}{a} \quad (2.41b)$$

ดังนั้น k_c^2 ในสมการ (2.26) จะได้

$$k_c^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (2.42)$$

2.3 โหมดคลื่น TE_{10}

โหมดหลักในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากจะกำหนดให้

$$m = 1 \quad (2.43a)$$

$$n = 0 \quad (2.43b)$$

จาก k_x และ k_y ในเทอมของ m และ n แทนลงในสมการ (2.29) และ (2.33) ถึง (2.36) จะได้ว่ารูปแบบของสนามสำหรับ โหมด TE_{10} เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_z = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (2.44a)$$

$$H_y = 0 \quad (2.44b)$$

$$H_x = j\left(\frac{2a}{\lambda_g}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (2.44c)$$

$$E_z = 0 \quad (2.44d)$$

$$E_y = -j\left(\frac{2a}{\lambda_0}\right) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sin\left(\frac{x}{a}\right) \quad (2.44e)$$

$$E_x = 0 \quad (2.44f)$$

ค่าความยาวคลื่นตัดออฟเมื่อ $m=1, n=0$ ในสมการ (2.42) จะเป็น

$$\lambda_c = 2a \quad (2.44g)$$

โครงสร้างรูปแบบสนามของโหมด TE_{10} พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเฟส $\exp j\omega t - \beta z$ ในการแสดงสนามและตรงกับส่วนจริงที่ $t=0$

$$H_z = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos(\beta z)$$

$$H_x = \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_g}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin(\beta z)$$

$$E_y = -\left(\frac{\lambda_c}{\lambda_0}\right) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin(\beta z)$$

การประมาณค่าของ H_z ที่ $\beta z = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ และ 2π ที่ $x=0, a$ และ $a/2$ แสดงในตาราง 2.1 ส่วนการประมาณค่า H_x แสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.1 การประมาณค่าของ H_z ที่ $\beta_z = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ และ 2π ที่ $x=0, a$ และ $a/2$

β_z	x	H_z	x	H_z	x	H_z
0	0	1	a	-1	a/2	0
$\pi/2$	0	0	a	0	a/2	0
π	0	-1	a	1	a/2	0
$3\pi/2$	0	0	a	0	a/2	0
2π	0	1	a	-1	a/2	0

ตาราง 2.2 การประมาณค่าของ H_x ที่ $\beta_z = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ และ 2π ที่ $x=0, a$ และ $a/2$

β_z	x	H_x	x	H_x	x	H_x
a/2	0	0	0	0	a	0
a/2	$\pi/2$	λ_c / λ_g	0	0	a	0
a/2	π	0	0	0	a	0
a/2	$3\pi/2$	$-\lambda_c / \lambda_g$	0	0	a	0
a/2	2π	0	0	0	a	0

การประมาณค่าของ E_y ที่กึ่งกลางของท่อนำคลื่นเมื่อ $\beta_z = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ แสดงในตาราง

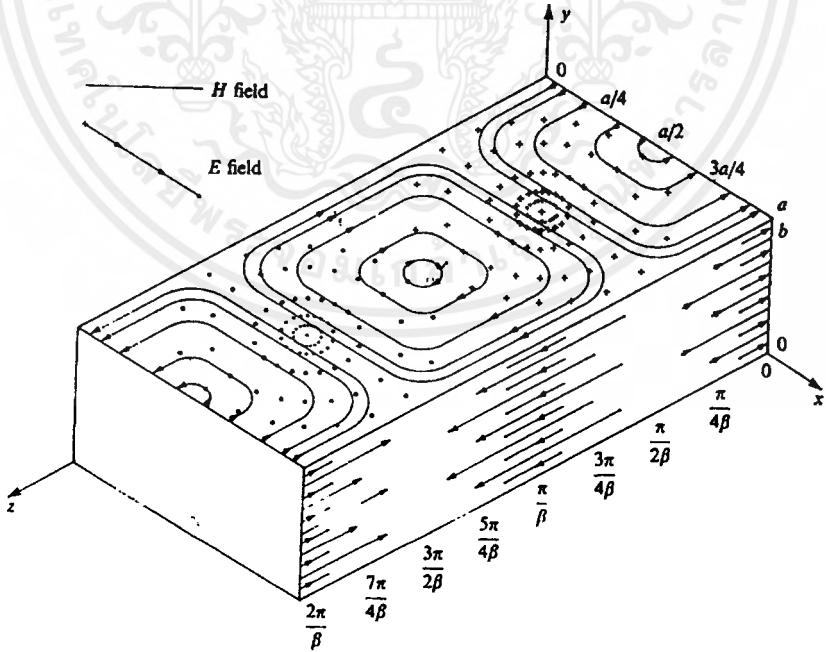
2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.3 การประมาณค่าของ E_y ที่ $\beta_z = 0, \pi/2, \pi$ และ $3\pi/2$

β_z	x	E_y
0	a/2	0
$\pi/2$	a/2	$-\lambda_c / \lambda_g \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$
π	a/2	0
$3\pi/2$	a/2	$\lambda_c / \lambda_g \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$
2π	a/2	0

รูปแบบของสนามสำหรับโหมด TE_{10} แสดงดังรูปที่ 2.2 ค่าตัดออฟของแบบแผนคลื่นอันดับสูงขึ้นไป (higher-order modes) แสดงดังรูปที่ 2.3 และ รูปแบบสนามของโหมดต่างๆในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแสดงดังรูปที่ 2.4 และรูปแบบสนามของโหมดต่างๆในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.2 รูปแบบของสนามสำหรับ โหมด TE_{10}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โมดคลื่น TM_{mn}

โมด TM_{mn} จะเหมือนกับ โมด TE_{mn} เพียงแต่จะเปลี่ยนจาก H_z เป็น E_z และให้มีค่าเป็นศูนย์ สนามทั้งหมดจะถูกแทนในรูปของ E_z และสมการคลื่นของ E_z ในรูปของฟังก์ชัน x และ y จะเป็น

$$E_z = \sin(k_x x) \sin(k_y y) \quad (2.45)$$

$$E_x = \frac{-jk_x}{k_x^2 + k_y^2} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \quad (2.46)$$

$$E_y = \frac{jk_y}{k_x^2 + k_y^2} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \quad (2.47)$$

$$H_x = \frac{j\omega\mu_0 k_y}{k_x^2 + k_y^2} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \quad (2.48)$$

$$H_y = \frac{-j\omega\mu_0 k_x}{k_x^2 + k_y^2} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$k_c^2 = k_x^2 + k_y^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \quad (2.50)$$

หาค่าคงที่ k_x และ k_y ในการแทนค่าคงที่โดย

$$E_z = 0 \text{ ที่ } y=0 \quad (2.51)$$

$$E_z = 0 \text{ ที่ } y=b \quad (2.52)$$

$$E_z = 0 \text{ ที่ } x=0 \quad (2.53)$$

$$E_z = 0 \text{ ที่ } x=a \quad (2.54)$$

จากเงื่อนไขดังกล่าวจะได้

$$k_y = \frac{n\pi}{b} \quad (2.55a)$$

$$k_x = \frac{m\pi}{a} \quad (2.55b)$$

โมดต่ำสุดของโมด TE_{mn} จะเป็นโมด TE_{11} นั่นคือ $m=n=0$ ความยาวคลื่นตัดออกจากสมการ (2.26) เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_c^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2 = \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \quad (2.56)$$

เมื่อค่าคัตออฟต่ำสุดคือ

$$m = 1 \quad (2.57a)$$

$$n = 1 \quad (2.57b)$$

และค่าความยาวคลื่นคัตออฟ (λ_c) คงที่เป็น

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \quad (2.58)$$

หรือ

$$\lambda_c = \frac{2ab}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2.59)$$

สนามต่างๆ ในโหมด TM_{11} จะเป็น

$$E_z = \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (2.60a)$$

$$E_x = -j \left(\frac{\lambda_c}{2a}\right) \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_g}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (2.60b)$$

$$E_y = -j \left(\frac{\lambda_c}{2b}\right) \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_g}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (2.60c)$$

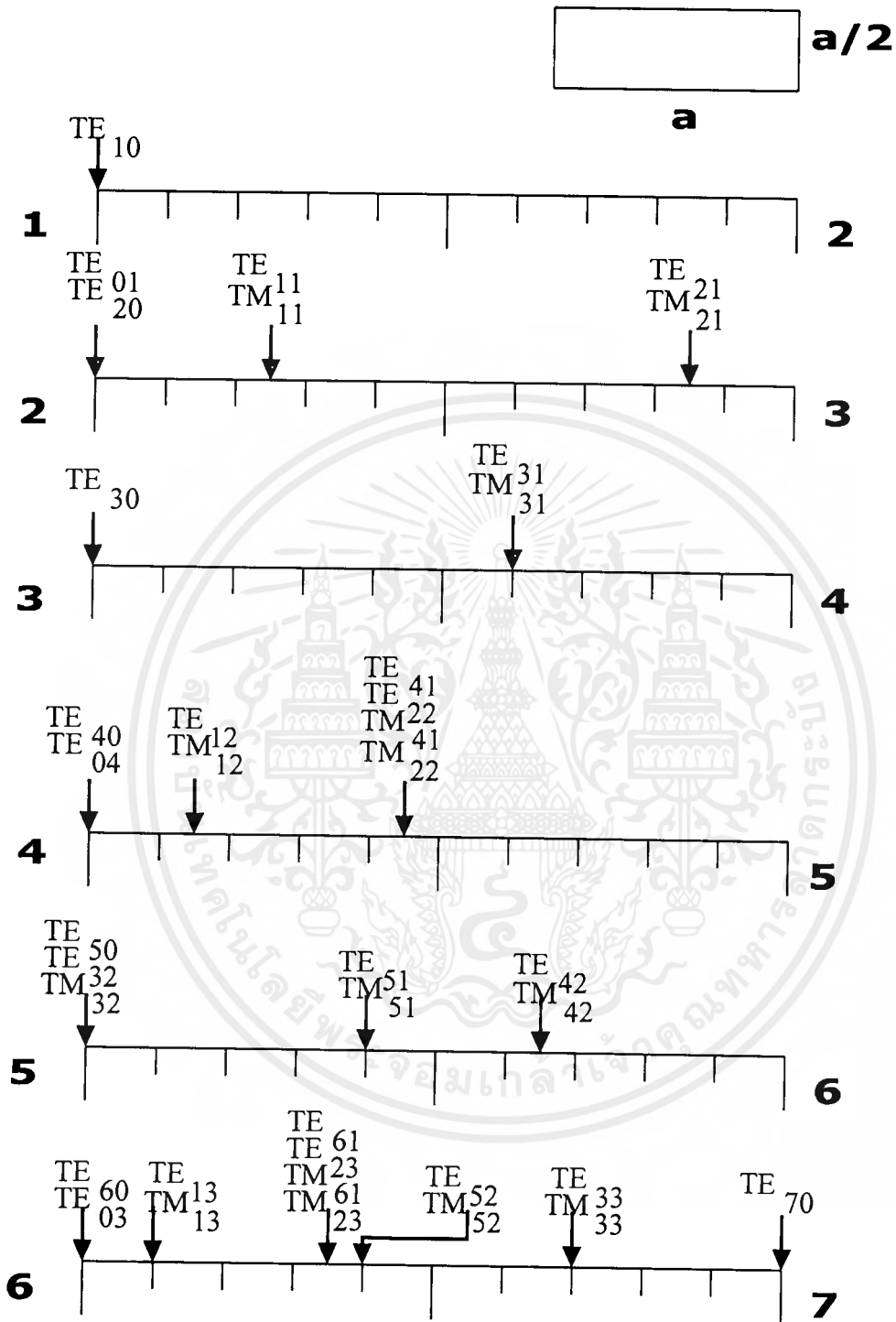
$$H_x = j \left(\frac{\lambda_c}{2b}\right) \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_0}\right) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (2.60d)$$

$$H_y = -j \left(\frac{\lambda_c}{2a}\right) \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_0}\right) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (2.60e)$$

$$H_z = 0 \quad (2.60f)$$

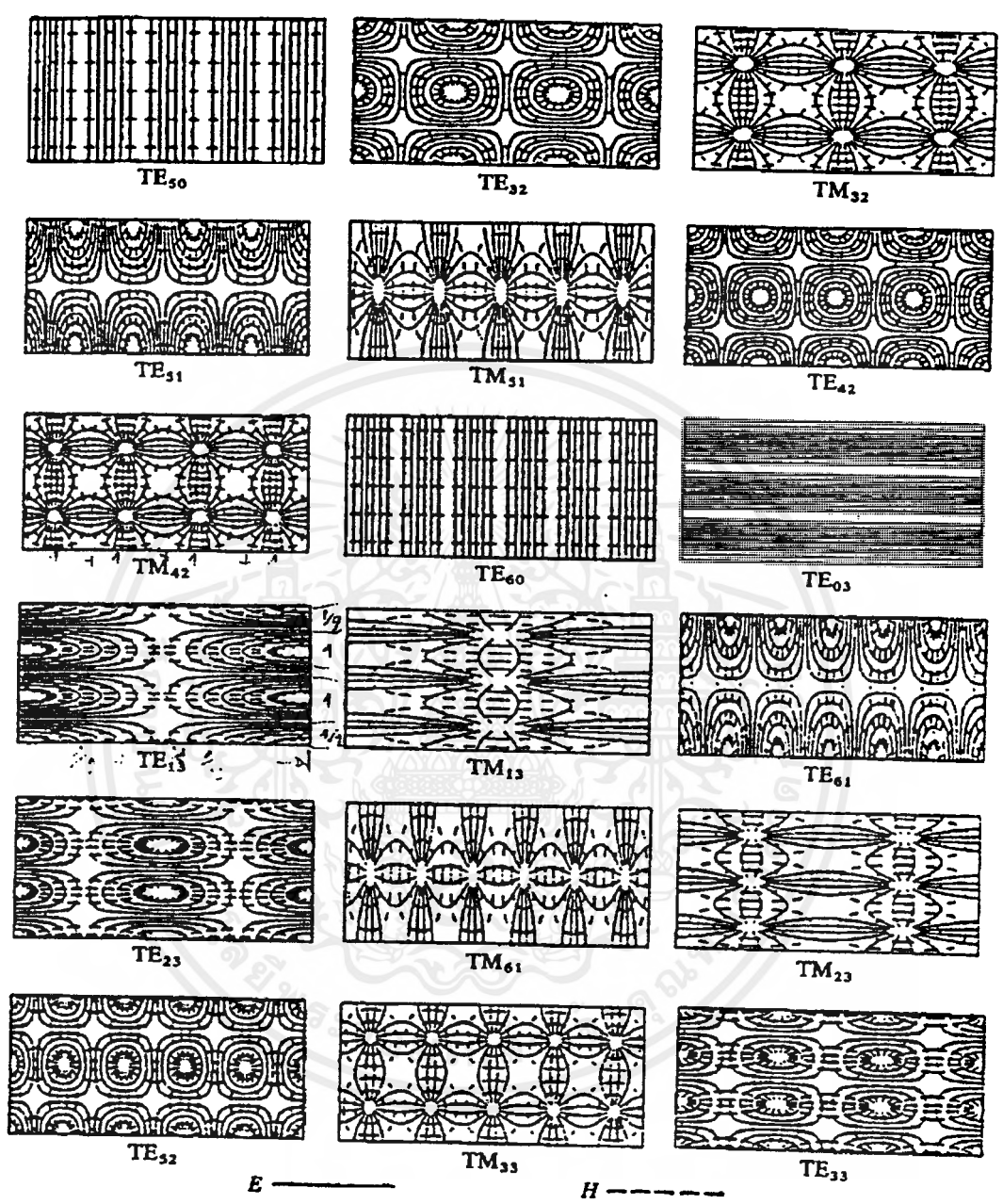
ส่วนประกอบของสนามจะแสดงคังรูป (2.4) และ (2.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



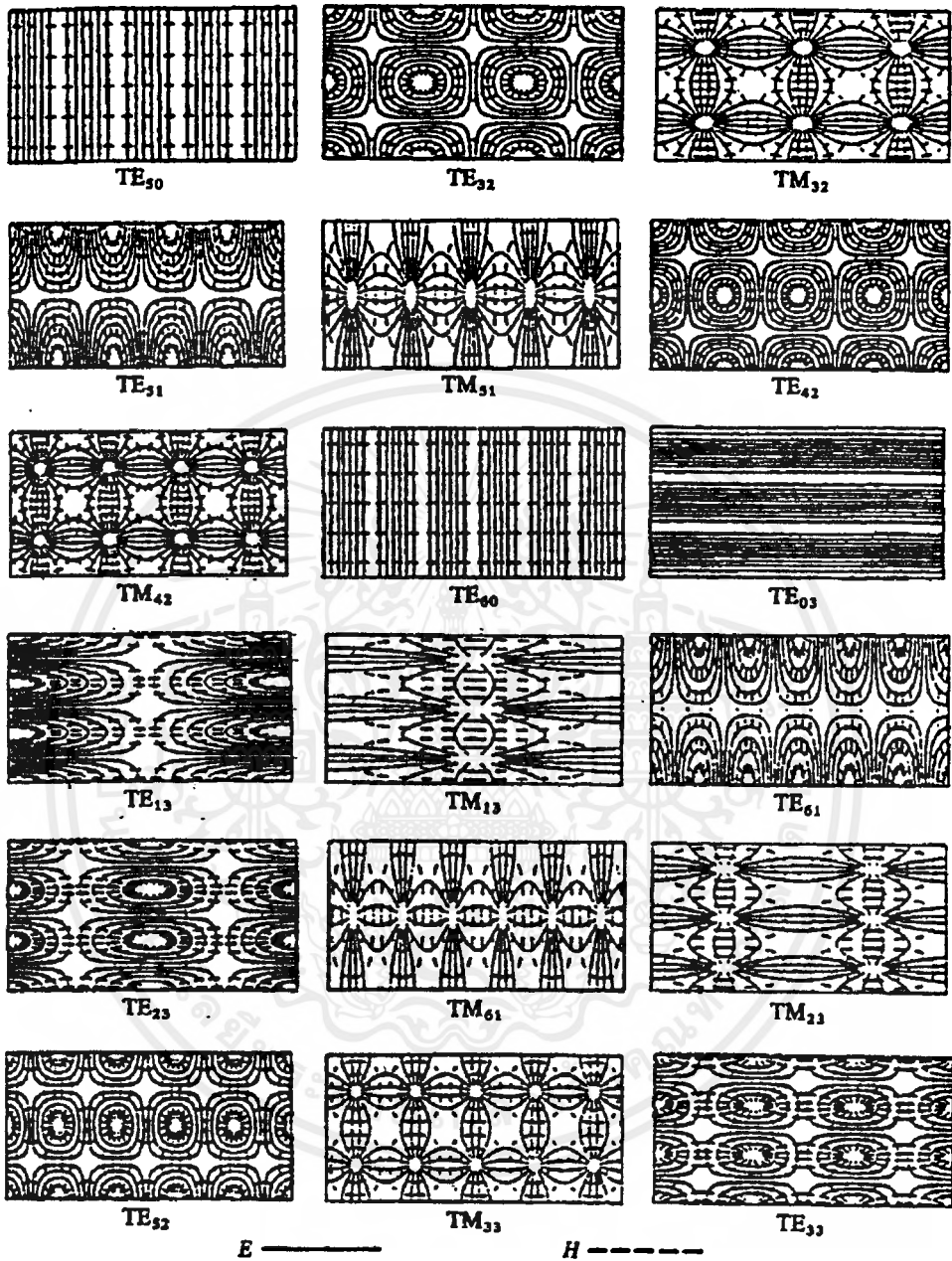
รูปที่ 2.3 ค่าคัตออฟของแบบแผนคลื่นอันดับสูงขึ้นไป (higher-order modes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



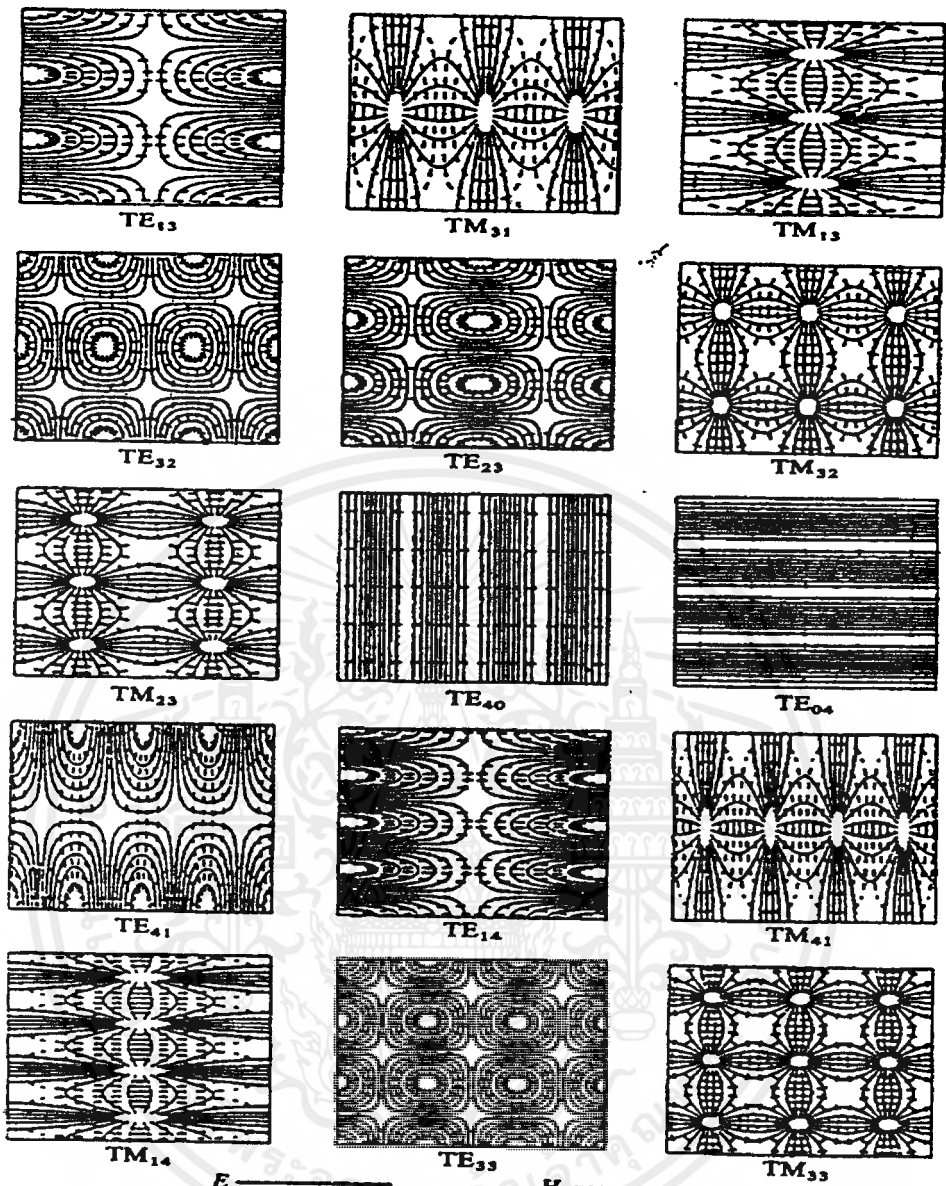
รูปที่ 2.4 การแพร่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบของท่อนำคลื่น ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular waveguide) ในอัตราส่วน 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



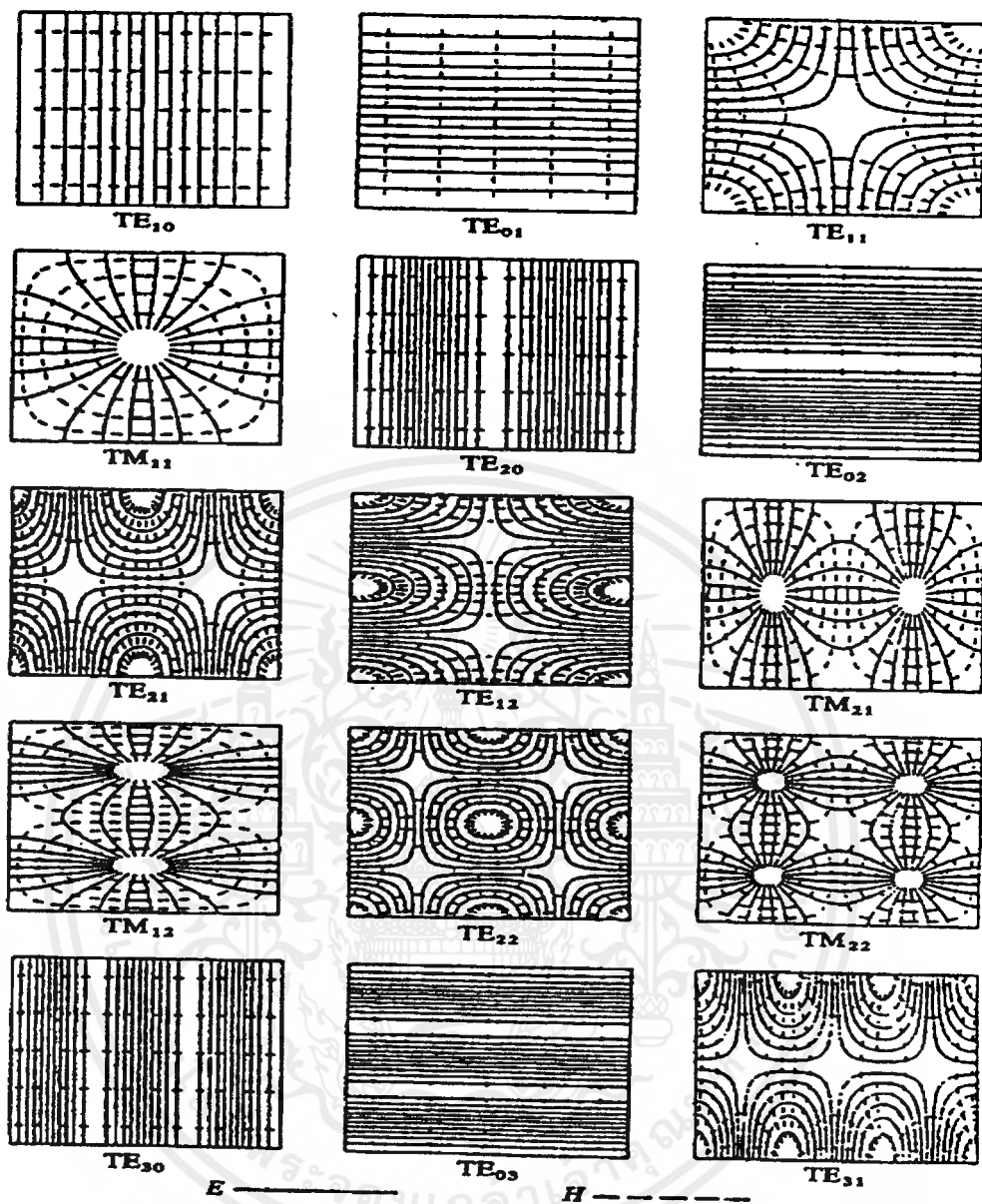
รูปที่ 2.4 (ต่อ) การแพร่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบของท่อนำคลื่น ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular waveguide) ในอัตราส่วน 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การแพร่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม (square waveguide) ในอัตราส่วน 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

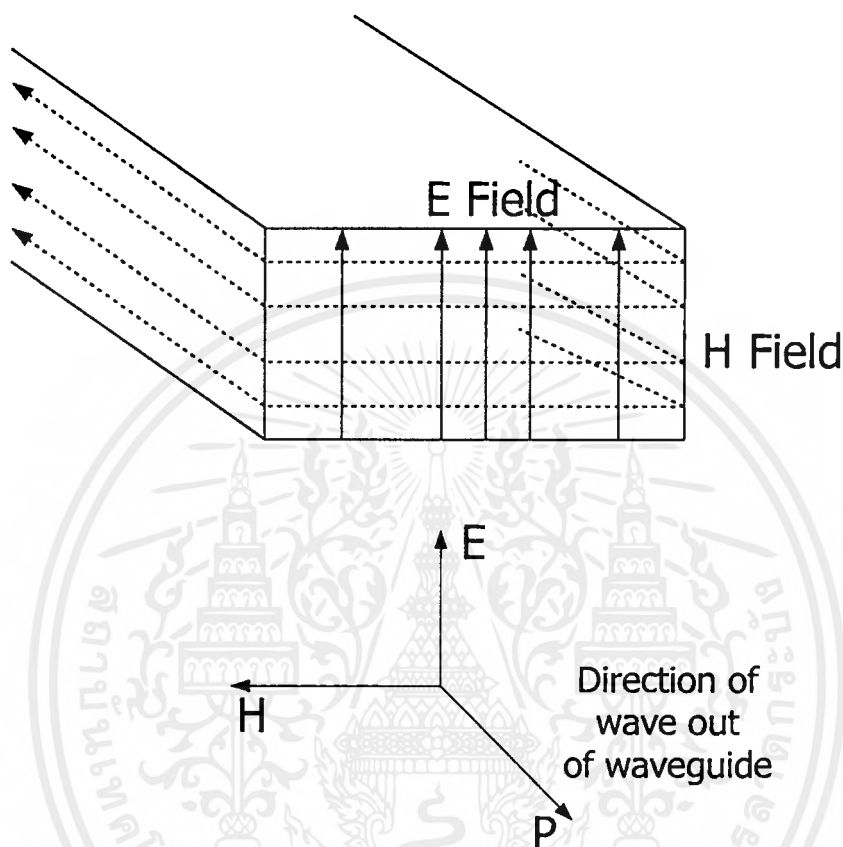


รูปที่ 2.5(ต่อ) การแพร่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระนาบของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม (square waveguide) ในอัตราส่วน 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 คลื่นในตัวนำทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (WAVE IN RECTANGULAR GUIDE)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีคุณลักษณะเฉพาะ ดังรูป 2.6



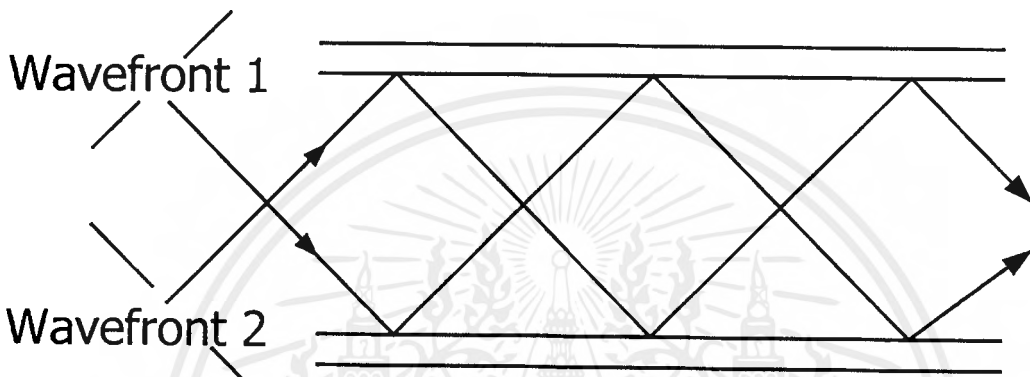
รูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นอยู่ภายในท่อนำคลื่นจุดที่มีความเข้มสูงสุด คือ จุดกึ่งกลางของความยาวท่อนำคลื่นและความเข้มของสนามไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ที่ผนังด้านข้าง คือ สนามไฟฟ้าที่ขนานกับพื้นผิวตัวนำจะมีค่าความเข้มเป็นศูนย์

สนาม H ที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นจะต่อเนื่องกันและวนไปรอบท่อนำคลื่น โดยที่เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กจะไม่ตั้งฉากกับผนังของแผ่นตัวนำ สนามแม่เหล็กจะวนต่อกันเป็นวงรอบและขนานไปกับผนังตัวนำ

คลื่น TEM นั้น ไม่สามารถแพร่กระจายไปในท่อนำคลื่นซึ่งเป็นตัวกลางที่มีตัวนำเดี่ยว ฉะนั้นโหมดของคลื่นในท่อนำคลื่นมี 2 โหมด คือ $TE_{m,n}$ และ $TM_{m,n}$

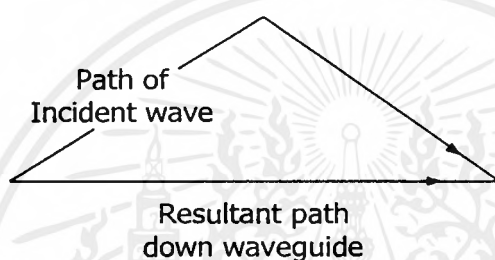
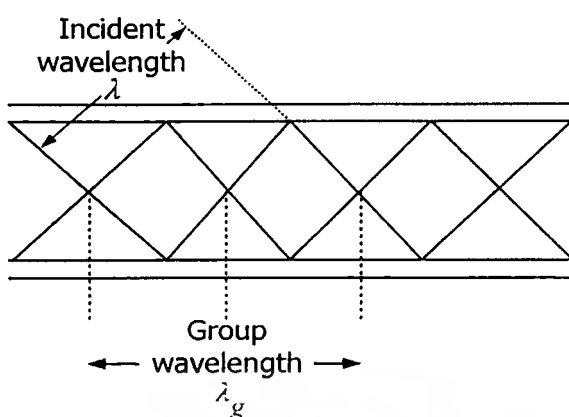
จากรูป 2.7 แสดงถึงระนาบคลื่นจาก 2 แหล่ง ซึ่งมีขนาดและความถี่เท่ากันเข้าไปในท่อนำคลื่นในลักษณะซิกแซกขึ้นลงเนื่องจากการสะท้อนกับผิวดำน้ำ แต่คลื่นทั้งสองจะหักล้างกันและให้สนามไฟฟ้าที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นเป็นศูนย์ ไปด้วยตลอดแนวการแพร่กระจายของคลื่น จากคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะให้มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนกลับ โดยที่มุมตกกระทบซึ่งให้แนวของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ตรงกันไปตามผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของคลื่นที่ใช้งาน และขนาดของท่อนำคลื่น



รูปที่ 2.7 ลักษณะของคลื่นในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

2.6 ความยาวคลื่นคัตออฟและความถี่คัตออฟในท่อนำคลื่น

ความสัมพันธ์ทางความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ (Incident wave) และคลื่นสะท้อน (Reflected wave) และกลุ่มของคลื่น (Group wave) ภายในท่อนำคลื่นเป็นไปตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 คลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและกลุ่มความยาวคลื่น ภายในท่อนำคลื่น

เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ ที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่น คลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อน ต้องเกิดขึ้นทุกระยะห่างหนึ่งความยาวคลื่น ในด้านกว้างของท่อนำคลื่นที่ความถี่ของคลื่นค่าหนึ่ง ความกว้างของท่อนำคลื่นค่าหนึ่ง และต้องมีมุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่เหมาะสม จึงจะทำให้สนามไฟฟ้าที่ผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นเป็นศูนย์.

ความยาวคลื่นที่ยาวที่สุด ที่สามารถเดินทางไปตามท่อนำคลื่นและยังคงให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ผนังด้านข้างเป็นศูนย์ มีค่าเท่ากับ 2 เท่าของด้านกว้าง a ของท่อนำคลื่นซึ่งมีค่าความยาวคลื่นนี้ จะมีมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเป็น 90° จะทำให้เกิดคลื่นนิ่งจึงไม่มีการแพร่กระจายไปตามท่อนำคลื่น ค่าความยาวคลื่นและความถี่ที่จุดนี้ เรียกว่า ความยาวคลื่นคัตออฟ (Cutoff wavelength) และความถี่คัตออฟ (Cutoff frequency) ของท่อนำคลื่น

$$\begin{aligned}\lambda_{cutoff} &= 2 (\text{waveguide width}) \\ &= 2a\end{aligned}\quad (2.61)$$

โดยที่ λ_{cutoff} = ความยาวคลื่นคัตออฟ (Cutoff wavelength)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a = ความกว้างของท่อนำคลื่น
สามารถหาความถี่คัตออฟได้

$$f_{cutoff}(H_z) = V / \lambda_{cutoff} \quad (2.62)$$

แทน $\lambda_{cutoff} = 2a$ จะได้

$$f_{cutoff}(H_z) = V / 2a \quad (2.63)$$

แทน V ด้วย $c / \sqrt{\mu' \epsilon'}$ จะได้

$$f_{cutoff} = c / 2a \sqrt{\mu' \epsilon'} \quad (2.64)$$

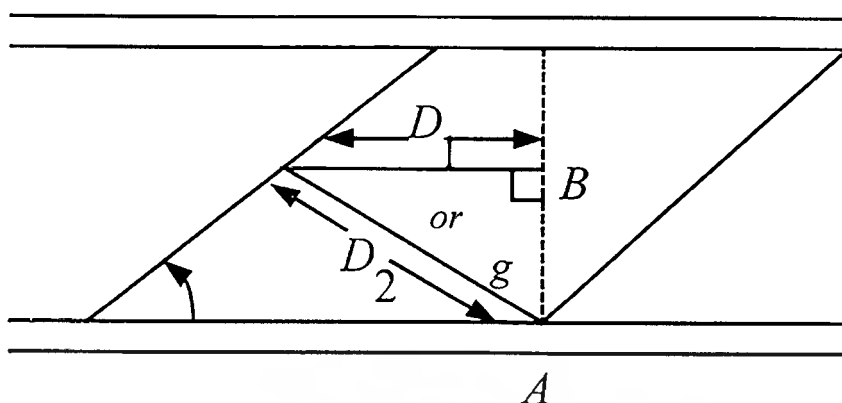
μ' = ค่าความซึมซาบ (Relative permeability)

ϵ' = ค่าคงที่ของ ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

2.7 ความเร็วในท่อนำคลื่น (VELOCITIES IN WAVE GUIDE)

คลื่น 2 ชุด เดินทางไปตามท่อนำคลื่นแบบซิกแซก เป็นรูปพื้นปลา ด้วยความเร็วของแสง เมื่อคลื่นลัพธ์ (resultant wave) ออกมาจะมีทิศทางเวกเตอร์ ซึ่งไปตามแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่น ดังรูปที่ 2.8 ความเร็วของคลื่นลัพธ์ ที่เดินทางไปในแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นนี้ขึ้นอยู่กับระยะทาง รูปพื้นปลา ซึ่งระยะทางลักษณะพื้นปลา นี้ จะเกี่ยวข้องกับความเร็วของคลื่นตกกระทบด้วยความเร็วของท่อนำคลื่นจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงเสมอ ใช้ชื่อว่า “ความเร็วกลุ่ม (Group velocity (V_g))”

ความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นตกกระทบ (incident wave velocity) และความเร็วกลุ่ม (group velocity) แสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าหน้าคลื่น (wavefront) ของคลื่นตกกระทบชนผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นเท่ากับ θ และสะท้อนออกไปด้วยมุมที่เท่ากัน



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง v และ v_g ในท่อนำคลื่น

จากรูปที่ 2.9 คลื่นลัพธ์ ซึ่งเดินทางไปตามแนวกึ่งกลางของท่อนำคลื่นได้ระยะทาง D_1 ในเวลา t และ D_1 จะมีค่าเท่ากับ

$$D_1 = v_x t$$

ในเวลาเท่ากันคือ t คลื่นตกกระทบเดินทางไปได้ระยะทาง D_2

$$D_2 = vt$$

จาก $\triangle ABC$ ค่า

$$\sin \theta = (v_x t) / (vt)$$

$$\sin \theta = v_x / v$$

$$v_x = v \sin \theta \quad (2.65)$$

โดยที่ v_x คือ ความเร็วกลุ่ม (group velocity .m/s)

v คือ ความเร็วคลื่น (velocity of wave)

θ คือ มุมตกกระทบ

ถ้าต้องการหาความสัมพันธ์ของความเร็วกลุ่มที่อยู่ในเทอมของ a ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้าง a ของท่อนำคลื่นและความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ แสดงดังรูปที่ 2.10 หน้าคลื่น (wavefront) เคลื่อนที่ไปในท่อนำคลื่นด้วยมุม θ และเข้าไปเป็นระยะทาง $\lambda/2$ จากสามเหลี่ยมมุมฉาก ABC

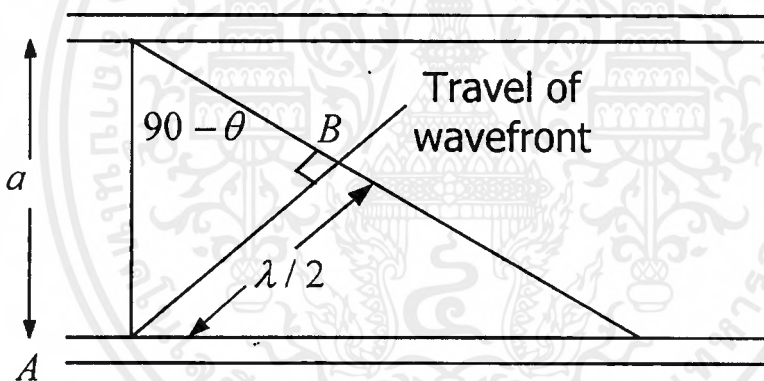
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\cos\theta &= \lambda/2a \\ \sin\theta &= \sqrt{1-(\lambda/2a)^2}\end{aligned}\quad (2.66)$$

เปลี่ยน \cos ในรูปแบบของ \sin จะได้

$$\begin{aligned}v_x &= v \sin\theta \\ v_x &= v \sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}\end{aligned}\quad (2.67)$$

จากสมการ (2.67) ถ้าความยาวคลื่นตกกระทบบมีค่าน้อยกว่าด้านกว้างของท่อ นำคลื่นมากๆ จะทำให้ความเร็วกลุ่ม (v_g) มีค่าเข้าใกล้ความเร็วของคลื่นตกกระทบบ และเมื่ออยู่ในตัวกลางที่ว่าง (ซึ่ง μ และ ϵ มีค่าเป็น 1) v_g มีค่าเข้าใกล้ความเร็วแสง หรือ ความเร็วกลุ่มจะเข้าใกล้ศูนย์และเกิดคลื่นนิ่ง ขึ้นต่อเมื่อความยาวคลื่นเข้าใกล้ความยาวคลื่นตัดออฟ



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของความกว้างของท่อ นำคลื่น a กับความยาวคลื่น

ณ จุดตัดออฟความยาวคลื่นเท่ากับ $2a$ สมการ (2.67) จะกลายเป็น สมการ (2.68)

$$v_x (m/s) = v \sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{cutoff}}\right)^2}\quad (2.68)$$

จากความสัมพันธ์ของความเร็วกับความถี่ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

และ

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

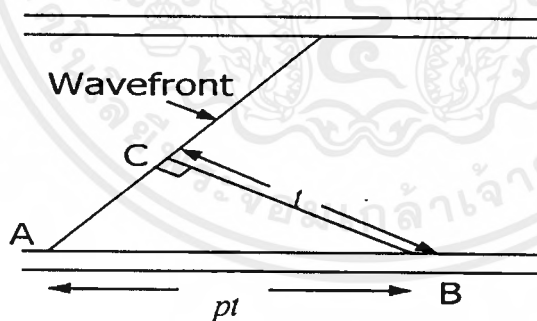
$$\frac{\lambda}{\lambda_{cutoff}} = \frac{f_{cutoff}}{f} \quad (2.69)$$

แทนสมการ (2.71) ใน สมการ (2.70) จะได้

$$v_g (m/s) = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{cutoff}}{f} \right)^2} \quad (2.70)$$

2.8 ความเร็วเฟสในท่อนำคลื่น (PHASE VELOCITY IN WAVEGUIDE)

ความเร็วเสมือน (Apparent velocity) ของท่อนำคลื่นตกกระทบ ซึ่งเดินทางไปตามผนังด้านข้างของท่อนำคลื่นจากจุด A ไป B ดังรูปที่ 2.11 เราเรียกว่า “ความเร็วเฟส (Phase velocity (v_p))” ของคลื่น



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของ v กับ v_p

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

จาก $BC = vt$, $AB = v_p t$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin \theta = \frac{v_t}{v_p t} \quad \text{เมื่อเวลา } t \text{ เท่ากัน}$$

$$\sin \theta = \frac{v}{v_p}$$

$$v_p (m/s) = \frac{v}{\sin \theta} \quad (2.71)$$

จากสมการ (2.71) เมื่อมุมของคลื่นตกกระทบเข้าใกล้ 90 องศา ความเร็วเฟส (phase velocity) จะเข้าใกล้ความเร็วของคลื่นตกกระทบ และเมื่อมุมตกกระทบอยู่ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา ความเร็วเฟสจะมีค่าเกินความเร็วแสง หน้าคลื่นของคลื่นตกกระทบไม่สามารถเดินทางด้วยความเร็วเกินความเร็วแสงได้ มันจะเป็นไปได้เฉพาะการเคลื่อนที่เสมือน (apparent) ของหน้าคลื่นที่ผ่นงของหน้าคลื่น

จากสมการ (2.68) แทนลงในสมการ (2.71) จะได้

$$v_p = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (2.72)$$

จากสมการ (2.72) เมื่อความยาวคลื่นเป็นความยาวคลื่นคutoff ด้วส่วนในสมการจะเป็นศูนย์ ทำให้ความเร็วเฟสเข้าสู่อันันต์ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นที่ความยาวคลื่นคutoff จะเกิดคลื่นนิ่งที่ปากท่อหน้าคลื่น

จากความยาวคลื่นคutoff $\lambda_{\text{cutoff}} = 2a$
สามารถเขียนสมการ (2.74) ใหม่เป็น

$$v_p = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{cutoff}}}\right)^2}} \quad (2.73)$$

หรือ

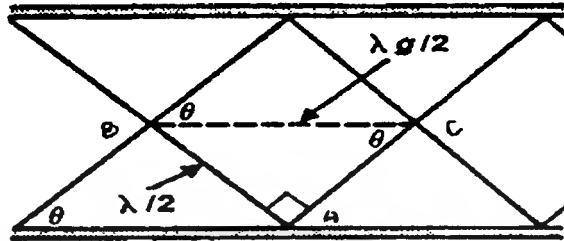
$$v_p = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{\text{cutoff}}}{f}\right)^2}} \quad (2.74)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ความยาวคลื่นกลุ่มในท่อนำคลื่น (GROUP WAVELENGTH IN WAVEGUIDE)

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นตกกระทบ λ และความยาวคลื่นกลุ่ม λ_g แสดงดังรูป

2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของ λ กับ λ_g

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

$$\lambda_g(m) = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad (2.75)$$

$$\lambda_g(m) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (2.76)$$

ความยาวคลื่นกลุ่มจะแปรค่าได้ตั้งแต่ความยาวเป็นอนันต์ ที่ความยาวคลื่นคัตออฟลงมาถึงความยาวคลื่นตกกระทบที่ความยาวคลื่นสั้นมากๆคือส่วนเข้าใกล้ 1

จากความยาวคลื่นคัตออฟเท่ากับ $2a$ จะได้

$$\lambda_g(m) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{cutoff}}\right)^2}} \quad (2.77)$$

$$\lambda_g(m) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{cutoff}}{f}\right)^2}} \quad (2.78)$$

ความเร็วแสง ความเร็วกลุ่ม และความเร็วเฟส มีความสัมพันธ์กันดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v = c = \sqrt{v_g v_p} \quad (2.79)$$

2.10 แบบแผนคลื่นอันดับสูงขึ้นไปในท่อนำคลื่น (HIGHER MODES IN WAVEGUIDE)

ในโหมดหลัก (principle mode) ของการส่งคลื่นในท่อนำคลื่นจะพิจารณาเฉพาะด้านกว้างของท่อนำคลื่นส่วนในโหมดสูงกว่า (higher mode) จะนำด้านแคบของท่อนำคลื่นมาพิจารณาด้วย โดยใช้ TE_{mn} หรือ TM_{mn} แทนโหมดสูงกว่า

สมการความถี่ คัดต่อฟของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก หาได้จากสมการ (2.80)

$$f_{cutoff} = \frac{3 \times 10^{10}}{2\sqrt{\mu' \epsilon'}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2.80)$$

โดยที่ m = จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านกว้างของท่อนำคลื่น

n = จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านแคบของท่อนำคลื่น

a = ขนาดด้านกว้างของท่อนำคลื่น, cm

b = ขนาดด้านแคบของท่อนำคลื่น, cm

ϵ' = relative permittivity ของตัวกลางในท่อนำคลื่น

μ' = relative permeability ของตัวกลางในท่อนำคลื่น

ความยาวคลื่นคัดต่อฟหาได้จากสมการ (2.80)

$$\lambda_{cutoff} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (2.81)$$

2.11 โค้งงอและมุม (BENDS AND CORNERS)

การเปลี่ยนแปลงของขนาด รูปร่าง หรือ ทิศทางของท่อนำคลื่น จะมีผลกระทบต่อ การสะท้อนกลับและทำให้ค่า SWR (Standing Wave Ratio) มีค่าเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อมองเป็นเรื่องของสายอากาศ เราจะสังเกตเห็นว่าในระบบจำเป็นจะต้องมีการโค้งงอและทิศทางรวมถึงความกว้างของส่วนที่โค้งงอ ดังรูป 2.13a ส่วนใหญ่จะมีผลกระทบต่อ สนามแม่เหล็ก การโค้งงอในระนาบสนามแม่เหล็กส่วนของท่อนำคลื่นที่โค้งงอจะขนานไปกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

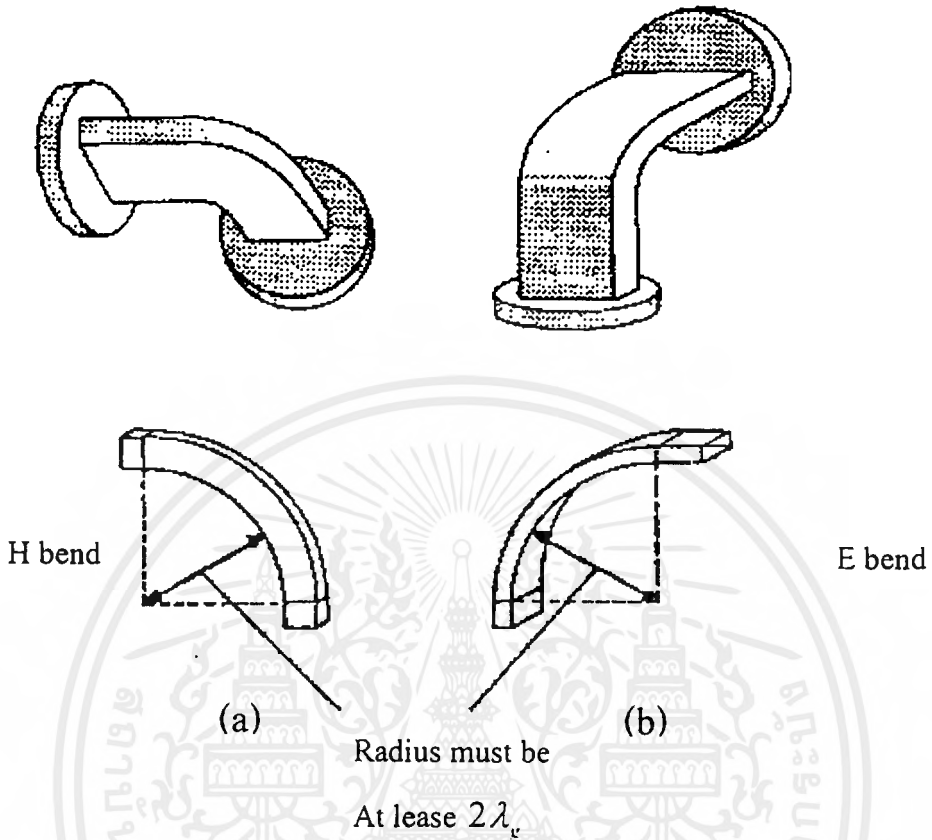
ระนาบสนามแม่เหล็กในโหมดหลัก (dominant mode) เมื่อโค้งงอในด้านแคบ (ดังรูป 2.13b) เส้นสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะผิดรูปไป ในการโค้งแต่ละแบบจะทำให้ค่า SWR เพิ่มขึ้นมากกว่า 1.05 : 1 ดังนั้นในการโค้งงอจำเป็นต้องให้รัศมีของส่วนที่โค้งงอไม่น้อยกว่า $2\lambda_g$

ที่ความถี่ต่ำจะทำให้รัศมีตรงส่วนโค้งงอยาวขึ้น การโค้งแบบตั้งฉากที่จุดไม่ต่อเนื่องของท่อนำคลื่นจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นรวมที่ยังไม่สามารถอนุโลมได้และในทางทฤษฎีค่าของ SWR จะเป็นอนันต์อีกวิธีการหนึ่ง (ในรูป 2.14b) ท่อนำคลื่นโค้งงอ 45° ทั้งคู่ในรูปแบบสนามแม่เหล็ก ที่ส่วนโค้งในรูปที่ 2.14b มีความยาว $l = \frac{\lambda_g}{4}$ ในทางปฏิบัติค่า SWR ที่แนะนำมีค่าประมาณ 1.1

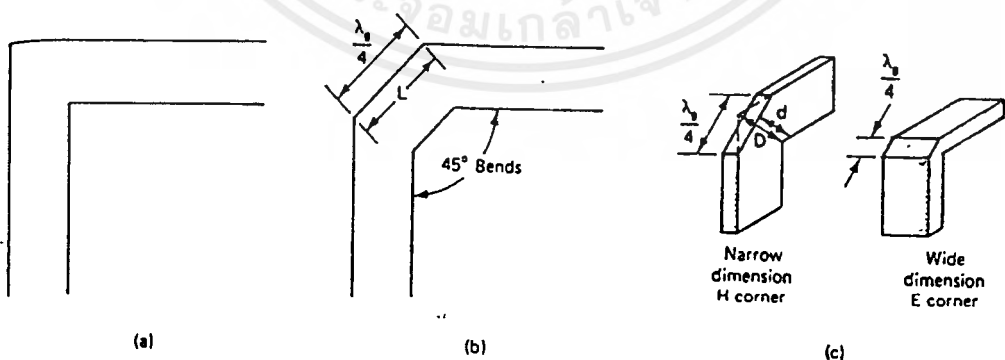
อย่างไรก็ตามการสะท้อนกลับของคลื่นและค่า SWR จะขึ้นอยู่กับความยาวของ l ทำให้ที่มุมหัวต่อมีผลต่อความถี่

แบบที่ดีกว่าการโค้งแบบ 45° คือการโค้งแบบ 90° ในรูปที่ 2.14c โดยมีเงื่อนไขว่า $d=0.65D$ ค่า SWR ที่ได้จากการโค้งในรูปแบบสนามแม่เหล็กมีค่า 1.05 เท่านั้นแต่ไม่สามารถเปลี่ยนโมดของการทำงาน เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการโค้งในรูปแบบสนามไฟฟ้าโดยรวมจะมีค่าน้อยกว่า เนื่องจากผลของความยาว d

แน่นอนในระบบไมโครเวฟยังต้องการการโค้งงอแบบพิเศษซึ่งท่อนำคลื่นจะมีความยืดหยุ่นได้ ตัวอย่างเช่น ในรูป 2.15 จะเห็นลักษณะภายนอกเคลือบด้วยยางเพื่อป้องกันสนิม และความชื้นที่ผิวของท่อนำคลื่นจะเป็นข้อต่อทองเหลืองซึ่งที่ปลายจะเชื่อมต่อกัน ดังนั้นขนาดภายในจะคงที่ทุกตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ที่ผิวของท่อนำคลื่นยังเคลือบด้วยโครเมียมเพื่อลดปรากฏการณ์ทางผิว (skin effect)

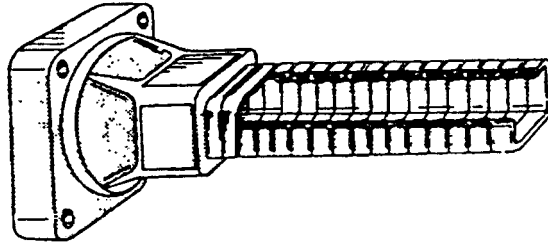


รูปที่ 2.13 การโค้งงอของท่อนำคลื่น a) โค้งงอในแนวสนามแม่เหล็ก (H bend) b) โค้งงอในแนวสนามไฟฟ้า (E bend)



รูปที่ 2.14 การโค้งงอของท่อนำคลื่น a) โค้งงอ 90° b) โค้งงอ 45° c) มุมสนามแม่เหล็กขนาดแคบ (H corner narrow dimension) d) มุมสนามไฟฟ้าขนาดกว้าง (E corner wide dimension)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ภาพตัดของท่อนำคลื่นที่สามารถโค้งงอได้

2.12 กำลังงานที่ส่งผ่านในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Power Transmission in Rectangular Waveguide)

กำลังงานที่ส่งผ่านท่อนำคลื่นสามารถคำนวณได้จาก

$$P_r = \oint P ds = \oint \frac{1}{2} (E \times H^*) \cdot ds \quad (2.82)$$

สำหรับการสูญเสียที่ไดอิเล็กตริกน้อยมากๆ กำลังงานเฉลี่ยต่อเวลาที่ไหลผ่านท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากหาโดย

$$P_r = \frac{1}{2Z_g} \int_a^b |E|^2 da = \frac{Z_g}{2} \int_a^b |H|^2 da \quad (2.83)$$

เมื่อ $Z_g = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x}$

$$|E|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2$$

$$|H_x|^2 = |H_x|^2 + |H_y|^2$$

ที่โหมด TE_{mn} กำลังงานเฉลี่ยที่ส่งผ่านท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากหาได้จาก

$$P_r = \frac{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}}{2\eta} \int_0^b \int_0^a (|E_x|^2 + |E_y|^2) dx dy \quad (2.84)$$

ที่โหมด TM_{mn} กำลังงานเฉลี่ยที่ส่งผ่านท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_r = \frac{1}{2\eta\sqrt{1-(f_c/f)^2}} \int_0^b \int_0^a (|E_x|^2 + |E_y|^2) dx dy \quad (2.85)$$

เมื่อ $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$ เป็นอิมพีแดนซ์ตามความจริงในไดอิเล็กตริกที่ไม่มีขอบเขต

2.13 กำลังงานการสูญเสียในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Power Losses in Rectangular Waveguide)

กำลังงานการสูญเสียในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากมี 2 ชนิด

1. การสูญเสียในไดอิเล็กตริก
2. การสูญเสียในผนังของท่อนำคลื่น

ข้อดีข้อหนึ่งของท่อนำคลื่น คือมันเป็นอิสระจากการสูญเสียในไดอิเล็กตริก ในไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำ ($\sigma \ll \mu\epsilon$) ค่าคงที่การแพร่กระจายสำหรับการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียที่ไม่มีขอบเขต (unbounded lossy dielectric) จะถูกกำหนดโดยสมการ

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{\eta\sigma}{2} \quad (2.86)$$

การลดทอนโดยตรงต่อไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่ำในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก สำหรับโหมด TE_{mn} หรือโหมด TM_{mn} หาได้โดย

$$\text{โหมด TE} \quad \alpha_g = \frac{\sigma\eta}{2\sqrt{1-(f_c/f)^2}} \quad (2.87)$$

$$\text{โหมด TM} \quad \alpha_g = \frac{\sigma\eta}{2} \sqrt{1-(f_c/f)^2} \quad (2.88)$$

ที่ $f \gg f_c$ ค่าคงที่ของการลดทอนในท่อซึ่งไดอิเล็กตริกไม่มีขอบเขตโดยใช้สมการ (2.86) อย่างไรก็ตามถ้าทำงานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่คัตออฟที่ $f \ll f_c$ ค่าคงที่ของการลดทอนจะมีค่ามากและไม่เกิดการแพร่กระจาย

พิจารณากำลังงานสูญเสียโดยตรงที่ผนังของท่อนำคลื่น เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแพร่ผ่านท่อนำคลื่นที่มีการสูญเสีย สามารถเขียนขนาดได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|E| = |E_{0z}| e^{-\alpha_g z} \quad (2.89)$$

$$|H| = |H_{0z}| e^{-\alpha_g z} \quad (2.90)$$

โดยที่ E_{0z} และ H_{0z} เป็นความเข้มสนามที่ $Z = 0$ มันเป็นประเด็นที่น่าสนใจสำหรับท่อนำคลื่นที่มีการสูญเสียต่ำ (low-loss guide) กำลังงานเฉลี่ยจะลดลงเป็นสัดส่วนกับ $e^{-\alpha_g z}$ ดังนั้น

$$P_r = (P_r + P_{loss}) e^{-2\alpha_g z} \quad (2.91)$$

กรณี $P_{loss} \ll P_r$ และ $2\alpha_g z \ll 1$

$$\frac{P_{loss}}{P_r} + 1 = 1 + 2\alpha_g z \quad (2.92)$$

สุดท้ายจะได้

$$\alpha_g = \frac{P_L}{2P_r} \quad (2.93)$$

โดยที่ P_L เป็นกำลังงานสูญเสียต่อหน่วยความยาว ดังนั้น ค่าคงที่ของการลดทอนของผนังท่อนำคลื่น มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนของกำลังงานสูญเสียต่อหน่วยความยาวต่อสองเท่าของกำลังงานที่ส่งผ่านท่อนำคลื่น

เมื่อความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่พื้นผิวของผนังของท่อนำคลื่นที่มีการสูญเสียต่ำ (low-loss guide) ลดลงตามค่าเอกโพเนนเชียลโดยคำนึงถึงความถี่ระหว่างการแพร่ของคลื่นที่ผนัง มันดีกว่าการกำหนดความต้านทานพื้นผิวของผนังท่อนำคลื่นเป็น

$$R_s \equiv \frac{\rho}{\delta} = \frac{1}{\sigma \delta} = \frac{\alpha_g}{\sigma} = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \Omega \quad (2.94)$$

โดยที่ ρ คือ พิกัดความต้านทานของผนังตัวนำ หน่วยเป็น โอห์มต่อเมตร (ohms per meter)

σ คือ ค่าความนำหน่วยเป็น โมห์ต่อเมตร (mhos per meter)

δ คือ ความลึกข้างใน หน่วยเป็น เมตร (meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานสูญเสียต่อหน่วยความยาวของท่อนำคลื่น ได้มาจากการอินทิเกรตความเข้มกำลังงานบนพื้นผิวของตัวนำต่อหน่วยความยาวของท่อนำคลื่น

$$P_L = \frac{R_s}{2} \int_s |H_t|^2 ds \quad \text{W/unit length} \quad (2.95)$$

โดยค่า H_t คือส่วนประกอบในทิศทางของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ผนังท่อนำคลื่น แทนสมการ (2.84) และสมการ (2.95) ลงในสมการ (2.93) ผลที่ได้เป็น

$$\alpha_g = \frac{R_s \int_s |H_t|^2 ds}{2Z_g \int_a |H|^2 da} \quad (2.96)$$

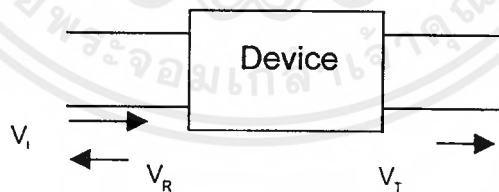
เมื่อ

$$|H|^2 = |H_x|^2 + |H_y|^2 \quad (2.97)$$

$$|H_t|^2 = |H_{tx}|^2 + |H_{ty}|^2 \quad (2.98)$$

2.14 พารามิเตอร์ S

พารามิเตอร์ S จะพบบ่อยในการวิเคราะห์ไมโครเวฟ สำหรับการวิเคราะห์โครงข่ายที่มีการวัดทางขนาด (magnitude) และความสัมพันธ์ทางเฟส



รูปที่ 2.16 โครงข่ายที่ใช้ในการพิจารณาพารามิเตอร์ S

V_i แทน แรงดันอินพุท

V_R แทน แรงดันคลื่นสะท้อน

V_T แทน แรงดันคลื่นที่ส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Γ แทน สัมประสิทธิ์ของแรงคืนสะท้อน

$$\Gamma = \frac{V_R}{V_T} \quad (2.99)$$

ระบบสายส่งที่คิดจะต้องมีคุณสมบัติของการแมทชิ่ง อิมพีแดนซ์ที่เหมาะสม ดังนั้น พารามิเตอร์ S จึงหมายถึงการวัดคุณลักษณะการส่งผ่านสัญญาณทางไมโครเวฟ ในระบบสายส่ง TEM ส่วนใหญ่จะมีคุณลักษณะเฉพาะของความต้านทานที่ 50 โอห์ม ดังนั้น เมื่อไม่มีการระบุค่าคุณลักษณะเฉพาะของความต้านทานจะสมมติเป็น 50 โอห์ม

ในเทอมของ S_{11} ซึ่งแทนอัตราส่วนของแรงคืนคลื่นสะท้อน (V_R) ต่อแรงคืนตกกระทบ (V_I)

$$S_{11} = \frac{V_R}{V_I} \quad (2.100)$$

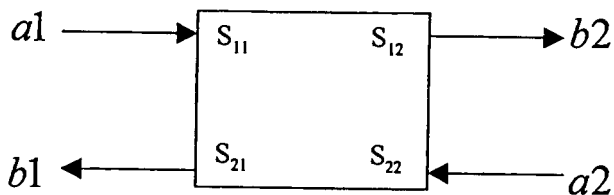
ซึ่งก็คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนทางอินพุต (Γ) นั่นเอง

ในเทอมของ S_{21} แทนอัตราส่วนของแรงคืนคลื่นส่งผ่าน (V_T) ต่อแรงคืนอินซิเดนซ์ V_I

$$S_{21} = \frac{V_T}{V_I} \quad (2-101)$$

2.14.1 นิยามของเมตริกซ์พารามิเตอร์ S

จากรูปที่ 2.17 เป็นการกำหนดพารามิเตอร์ S



รูปที่ 2.17 วงจรสำหรับเมตริกซ์พารามิเตอร์ S

a_n เป็นขนาดแรงดันของคลื่นอินซิดেন্ট โดย b_n เป็นขนาดแรงดันของคลื่นลีฟวิ่ง (leaving wave) จะ ได้ผลลัพธ์ของสมการเป็น

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (2.102)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (2.103)$$

สำหรับโหลดที่มีการแมทซ์สมบูรณ์จะส่งผลให้ $a_2 = 0$ ผลลัพธ์ที่ได้ดังนี้

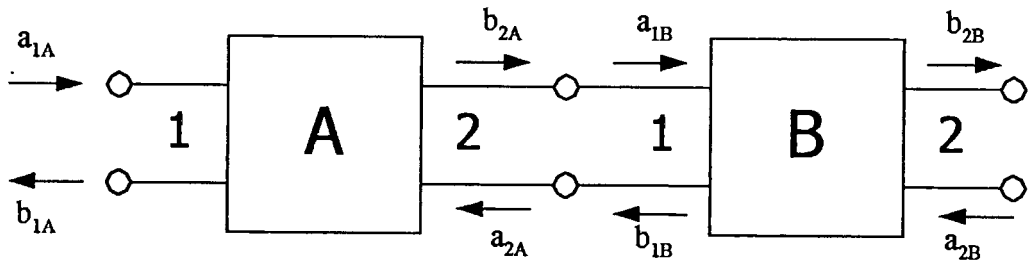
$$b_1 = S_{11}a_1 \quad (2.104)$$

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (2.105)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 \quad (2.106)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (2.107)$$

ในกรณีที่มืองค์ประกอบ 2 ส่วนต่อกันอยู่ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 องค์ประกอบสองส่วนเชื่อมต่อกันแบบкасечек

เราจะได้

$$b_{1A} = S_{11}^A a_{1A} + S_{12}^A a_{2A} \quad (2.108a)$$

$$b_{2A} = S_{21}^A a_{1A} + S_{22}^A a_{2A} \quad (2.108b)$$

$$b_{1B} = S_{11}^B a_{1B} + S_{12}^B a_{2B} \quad (2.109a)$$

$$b_{2B} = S_{21}^B a_{1B} + S_{22}^B a_{2B} \quad (2.109b)$$

ถ้าพอร์ท 2 ของ A และพอร์ท 1 ของ B มีการนอร์มอไลซ์อิมพีแดนซ์ที่เหมือนกัน เราจะได้

$$b_{2A} = a_{1B} \quad (2.110a)$$

$$b_{1B} = a_{2A} \quad (2.110b)$$

โดยเป็นการกำจัด b_{2A} , b_{1B} , a_{1B} และ a_{2A} จากสมการที่ 2.108 และสมการที่ 2.109 เราจะได้

$$\begin{bmatrix} b_{1A} \\ b_{2B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^A + \frac{S_{12}^A S_{11}^B S_{21}^A}{1 - S_{22}^A S_{11}^B} & \frac{S_{12}^A S_{12}^B}{1 - S_{22}^A S_{11}^B} \\ \frac{S_{21}^A S_{21}^B}{1 - S_{22}^A S_{11}^B} & S_{22}^B + \frac{S_{21}^B S_{22}^A S_{12}^B}{1 - S_{22}^A S_{11}^B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1A} \\ a_{2B} \end{bmatrix} \quad (2.111)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 3 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบ 3 พอร์ต (3 PORTS OR WAVEGUIDE JUNCTIONS HAVING THREE ARMS)

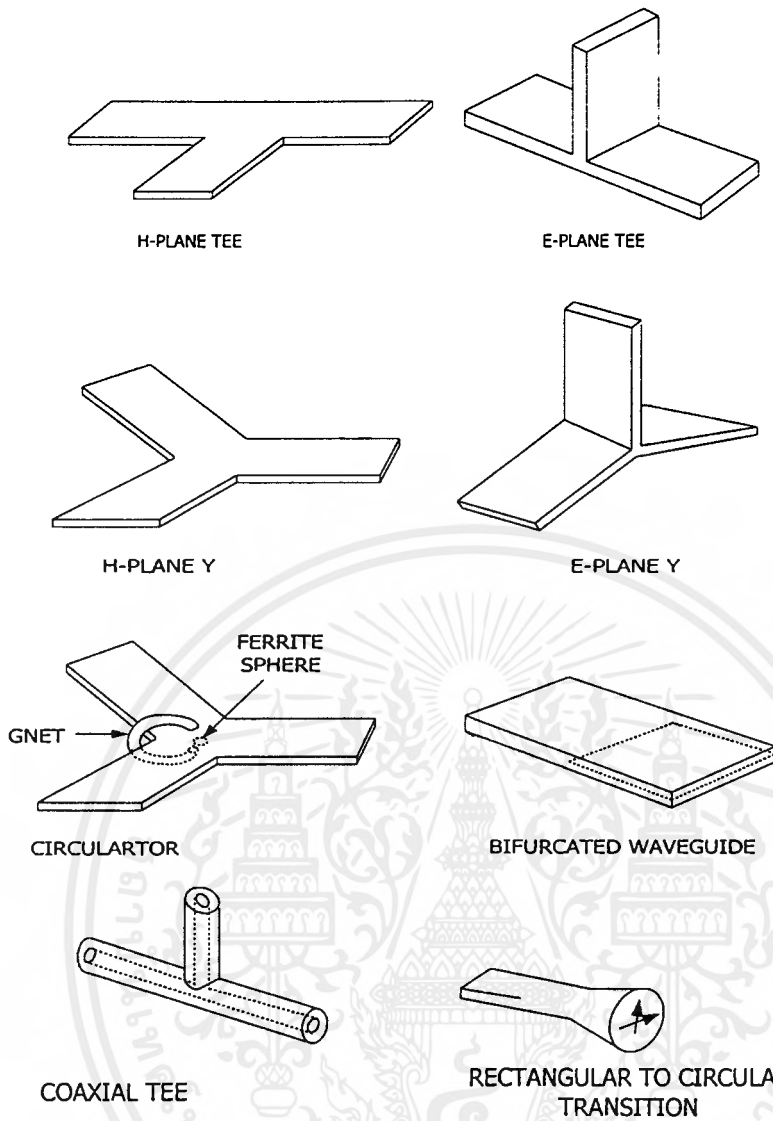
ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบ 3 พอร์ต จะมีรูปร่างได้หลายแบบเมื่อพิจารณาการแพร่กระจายในโหมดเดี่ยว (single mode) ในแต่ละแขน ดังแสดงในรูปที่ 2.19

ในบางกรณี อาจจะมีรูปร่างเป็นแบบ 2 แขน แต่แทนด้วย 3 พอร์ต เช่น ถ้าท่อนำคลื่นทรงกระบอกที่มีส่วนกากบาท โดยแขนนี้จะมีการแพร่กระจายในโหมดออร์ทोगอนอล 2 (2 orthogonal mode) วงกลมแขนหนึ่งเป็นแขนคงที่ และในอีก 2 แขนจะมีการแพร่กระจายในโหมดเดี่ยว (single mode)

ในกรณีอื่น ๆ รูปร่างจะมีมากกว่า 3 แขนแต่แทนเป็น 3 พอร์ต เช่น มี 4 แขนแต่มีคู่หนึ่งที่มีทิศทางเดียวกันภายในแขนหนึ่ง แต่จะยากในการเชื่อมต่อ ก็อาจจะเรียกได้ว่าเป็น 3 พอร์ต ในทำนองเดียวกันถ้าความถี่ที่ใช้ในการทำงานต่ำกว่าความถี่คัตออฟในโหมดหลัก (dominant mode) ของแขนทั้ง 3 เมื่อนั้นอาจจะเรียกว่าเป็นแบบ 3 พอร์ต (โดยสมมติว่าในแต่ละแขนมีการแพร่กระจายในโหมดเดี่ยว)

ในกรณีที่ท่อนำคลื่นมีองค์ประกอบเล็ก ๆ ภายใน เช่น crystal , varactor หรือ bolometer มันจะเป็นการสะดวกขึ้นถ้ามีนำพารามิเตอร์มาผสมกัน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสในแขนหนึ่ง จะทำให้ท่อนำคลื่นในแต่ละแบบมีขนาดลดลง

ตัวอย่างที่จะทำการพิจารณาในที่นี้จะสนใจระบบที่ใช้วัดเท่านั้น โดยไม่สนใจโมโนกราฟที่ได้จากสโคป ทั้งนี้เพราะกราฟที่ได้จากสโคปจะไม่เป็นที่ยอมรับ



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างรูปแบบโครงสร้างของท่อนำคลื่นซึ่งสามารถเรียกว่ามีข้อต่อแบบสามแขน

จากเมตริกซ์ของ Hermitian กำหนดให้ H_x , H_y หรือ H_z ในที่นี้จะพิจารณาเป็น $H_x = Z_0^{-1} - S \cdot Z_0^{-1} S$ เป็นเมตริกซ์ที่ได้จากการนอร์มอไลซ์ (normalizing)

$$H_x = \begin{bmatrix} SH_{11} & SH_{12} & SH_{13} \\ SH_{21} & SH_{22} & SH_{23} \\ SH_{31} & SH_{32} & SH_{33} \end{bmatrix} \quad (2.112)$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
SH_{11} &= \frac{1 - |S_{11}|^2}{Z_{01}} + \frac{1 - |Z_{21}|^2}{Z_{02}} - \frac{|S_{31}|^2}{Z_{03}} , \\
SH_{12} &= - \left(\frac{\overline{S_{11}} S_{12}}{Z_{01}} + \frac{\overline{S_{21}} S_{22}}{Z_{02}} + \frac{\overline{S_{31}} S_{32}}{Z_{03}} \right) , \\
SH_{13} &= - \left(\frac{\overline{S_{11}} S_{13}}{Z_{01}} + \frac{\overline{S_{21}} S_{23}}{Z_{02}} + \frac{\overline{S_{31}} S_{33}}{Z_{03}} \right) , \\
SH_{21} &= - \left(\frac{\overline{S_{12}} S_{11}}{Z_{01}} + \frac{\overline{S_{22}} S_{21}}{Z_{02}} + \frac{\overline{S_{32}} S_{31}}{Z_{03}} \right) , \\
SH_{22} &= \frac{-|S_{12}|^2}{Z_{01}} + \frac{1 - |Z_{22}|^2}{Z_{02}} - \frac{|S_{32}|^2}{Z_{03}} , \\
SH_{23} &= - \left(\frac{\overline{S_{12}} S_{13}}{Z_{01}} + \frac{\overline{S_{22}} S_{23}}{Z_{02}} + \frac{\overline{S_{32}} S_{33}}{Z_{03}} \right) , \\
SH_{31} &= - \left(\frac{\overline{S_{13}} S_{11}}{Z_{01}} + \frac{\overline{S_{23}} S_{21}}{Z_{02}} + \frac{\overline{S_{33}} S_{31}}{Z_{03}} \right) , \\
SH_{32} &= - \left(\frac{\overline{S_{13}} S_{12}}{Z_{01}} + \frac{\overline{S_{23}} S_{22}}{Z_{02}} + \frac{\overline{S_{33}} S_{32}}{Z_{03}} \right) , \\
\text{และ} \quad SH_{33} &= \frac{-|S_{13}|^2}{Z_{01}} - \frac{|Z_{23}|^2}{Z_{02}} + \frac{1 - |S_{33}|^2}{Z_{03}} \tag{2.113}
\end{aligned}$$

ในที่นี้กำหนดให้ H_s เป็นบวก เงื่อนไขคือกำหนดให้

$$\begin{aligned}
SH_{11} &> 0 , \\
SH_{11} SH_{22} - SH_{12} SH_{21} &> 0 ,
\end{aligned}$$

และ $\det H_s > 0$ (2.114)

ซึ่ง

$$\begin{aligned}
SH_{22} &> 0 , \\
SH_{33} &> 0 ,
\end{aligned}$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} SH_{22}SH_{33} - SH_{23}SH_{32} > 0 \\ SH_{11}SH_{33} - SH_{13}SH_{31} > 0 \end{aligned} \quad (2.115)$$

การแทนเงื่อนไขนี้จะครอบคลุมพลังงานอินพุตที่ส่งไปยังข้อต่อของท่อนำคลื่นจะเป็นบวก โดยการกระตุ้นจะเป็นวงปิดหรือพลังงานจะถูกดูดกลืนโดยข้อต่อ ตัวอย่างเช่น พิจารณาแหล่งจ่ายที่แขนด้านหนึ่งและโหลดไม่มีผลกระทบต่อแขนที่เหลือทั้งสอง พลังงานอินพุตที่ข้อต่อจะเป็น

$$P_{in} = \frac{|a_1|^2 - |b_1|^2}{Z_{01}} = |a_1|^2 \left(\frac{1 - |S_{11}|^2}{Z_{01}} \right) \quad (2.116)$$

และพลังงานที่เอาต์พุตเป็น

$$P_{out} = \frac{|b_2|^2}{Z_{02}} + \frac{|b_3|^2}{Z_{03}} = |a_1|^2 \left(\frac{|S_{21}|^2}{Z_{02}} + \frac{|S_{31}|^2}{Z_{03}} \right) \quad (2.117)$$

ส่วนพลังงานที่ถูกดูดกลืนในข้อต่อ จะเป็น

$$P_{in} - P_{out} > 0$$

หรือ

$$|a_1|^2 \left(\frac{1 - |S_{11}|^2}{Z_{01}} - \frac{|S_{21}|^2}{Z_{02}} - \frac{|S_{31}|^2}{Z_{03}} \right) > 0 ,$$

หรือ

$$\frac{1 - |S_{11}|^2}{Z_{01}} - \frac{|S_{21}|^2}{Z_{02}} - \frac{|S_{31}|^2}{Z_{03}} > 0 ,$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SH_{11} > 0 \tag{2.118}$$

ส่วนใหญ่แล้ว 3 พอร์ท จะมีการสูญเสียต่ำมากและคุณสมบัติของการสูญเสียในข้อต่อท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากจะสามารถปรับให้ดีขึ้นได้ กล่าวโดยคร่าว ๆ ดังนี้

จากคุณสมบัติการแทนที่เหมือนในเงื่อนไขที่เป็นจริง (reallizability) จะทำให้ส่วนประกอบที่มี H_s หายไป เราจะมีเงื่อนไขการสูญเสียอยู่ทั้งหมด 6 เงื่อนไข ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{1 - |S_{11}|^2}{Z_{01}} - \frac{|S_{21}|^2}{Z_{02}} - \frac{|S_{31}|^2}{Z_{03}} &= 0, \\ -\frac{S_{11}S_{12}}{Z_{01}} - \frac{S_{21}S_{22}}{Z_{02}} - \frac{S_{31}S_{32}}{Z_{03}} &= 0, \\ -\frac{|S_{12}|^2}{Z_{01}} + \frac{1 - |S_{22}|^2}{Z_{02}} - \frac{|S_{32}|^2}{Z_{03}} &= 0, \\ -\frac{S_{11}S_{13}}{Z_{01}} - \frac{S_{21}S_{23}}{Z_{02}} - \frac{S_{31}S_{33}}{Z_{03}} &= 0, \\ -\frac{|S_{13}|^2}{Z_{01}} - \frac{|S_{23}|^2}{Z_{02}} + \frac{1 - |S_{33}|^2}{Z_{03}} &= 0, \\ -\frac{S_{12}S_{13}}{Z_{01}} - \frac{S_{22}S_{23}}{Z_{02}} - \frac{S_{32}S_{33}}{Z_{03}} &= 0 \end{aligned} \tag{2.119}$$

การแทนในเงื่อนไขนี้จะครอบคลุมพลังงานอินพุตที่ส่งไปในข้อต่อท่อนำคลื่นซึ่งเท่ากับศูนย์ สำหรับทุก ๆ ผลรวมหรือการกระตุ้นในวงปิด หรือไม่มีพลังงานที่ถูกดูดกลืนในข้อต่อ

เหมือนในกรณี 2 พอร์ท เงื่อนไขจะกำหนดให้ $H_s = 0$ ซึ่งอาจจะไม่จำเป็นในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ส่วนใหญ่และอาจจะได้มาจากวิธีอื่น ตัวอย่างเช่น เงื่อนไขการสูญเสียต่ำจะคำนึงถึง $H_s = Z_0^{-1} - S^* Z_0^{-1} S = 0$ ในรูปแบบที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนี้

$$\begin{aligned} S^* Z_0^{-1} S &= Z_0^{-1}, \\ S^* &= Z_0^{-1} S^{-1} Z_0 = Z_0^{-1} \frac{adj S}{\det S} Z_0 \end{aligned} \tag{2.120}$$

องค์ประกอบที่มีลักษณะเหมือนสมการและขนาดที่ทำของแต่ละข้างสมการ ตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|S_{21}| = \frac{1}{|\det S|} \frac{Z_{02}}{Z_{01}} |S_{12}S_{33} - S_{13}S_{32}| \quad (2.121)$$

เราจะใช้กฎทั่วไปซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนการกำหนดได้

1. $\det(AB) = \det A \det B$
2. $\det(\text{transpose} A) = \det A$
3. $\det A^* = \det(\text{transpose } \bar{A})$

การทำตามขั้นตอนจะนำไปสู่ผลลัพธ์ตามต้องการ

$$\det(Z_0^{-1}) = \det(S^*) \det(Z_0^{-1}) \det(S),$$

$$1 = \det(S^*) \det(S) = (\det S)^* (\det S) = |\det S|^2,$$

ดังนั้น

$$|\det S| = 1 \quad (2.122)$$

จากสมการจะทำให้ได้องค์ประกอบของเมตริกซ์เป็น

$$\begin{aligned} |S_{11}| &= |S_{22}S_{33} - S_{23}S_{32}|, \\ |S_{12}| &= \frac{Z_{01}}{Z_{02}} |S_{21}S_{33} - S_{23}S_{31}|, \\ |S_{13}| &= \frac{Z_{01}}{Z_{03}} |S_{21}S_{32} - S_{22}S_{31}|, \\ |S_{21}| &= \frac{Z_{02}}{Z_{01}} |S_{12}S_{33} - S_{13}S_{32}|, \\ |S_{22}| &= |S_{11}S_{33} - S_{13}S_{31}|, \\ |S_{23}| &= \frac{Z_{02}}{Z_{03}} |S_{11}S_{32} - S_{12}S_{31}|, \\ |S_{31}| &= \frac{Z_{03}}{Z_{01}} |S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}|, \\ |S_{32}| &= \frac{Z_{03}}{Z_{02}} |S_{11}S_{23} - S_{13}S_{21}|, \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|S_{33}| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| \quad (2.123)$$

โครงสร้างของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้า ดังแสดงตามโคอะแกรมข้างล่าง ถ้าแขนทั้งสามเป็นแขนกึ่งและพื้นผิวในแขนที่ 1 และ 2 เป็นแบบปิด เงื่อนไขตามพารามิเตอร์ S เป็นดังนี้

สำหรับท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามแม่เหล็ก

$$\begin{aligned} S_{11} &= S_{22} & , & & S_{12} &= S_{21} \\ S_{13} &= S_{31} = S_{23} = S_{32} \end{aligned} \quad (2.124)$$

สำหรับท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามไฟฟ้า

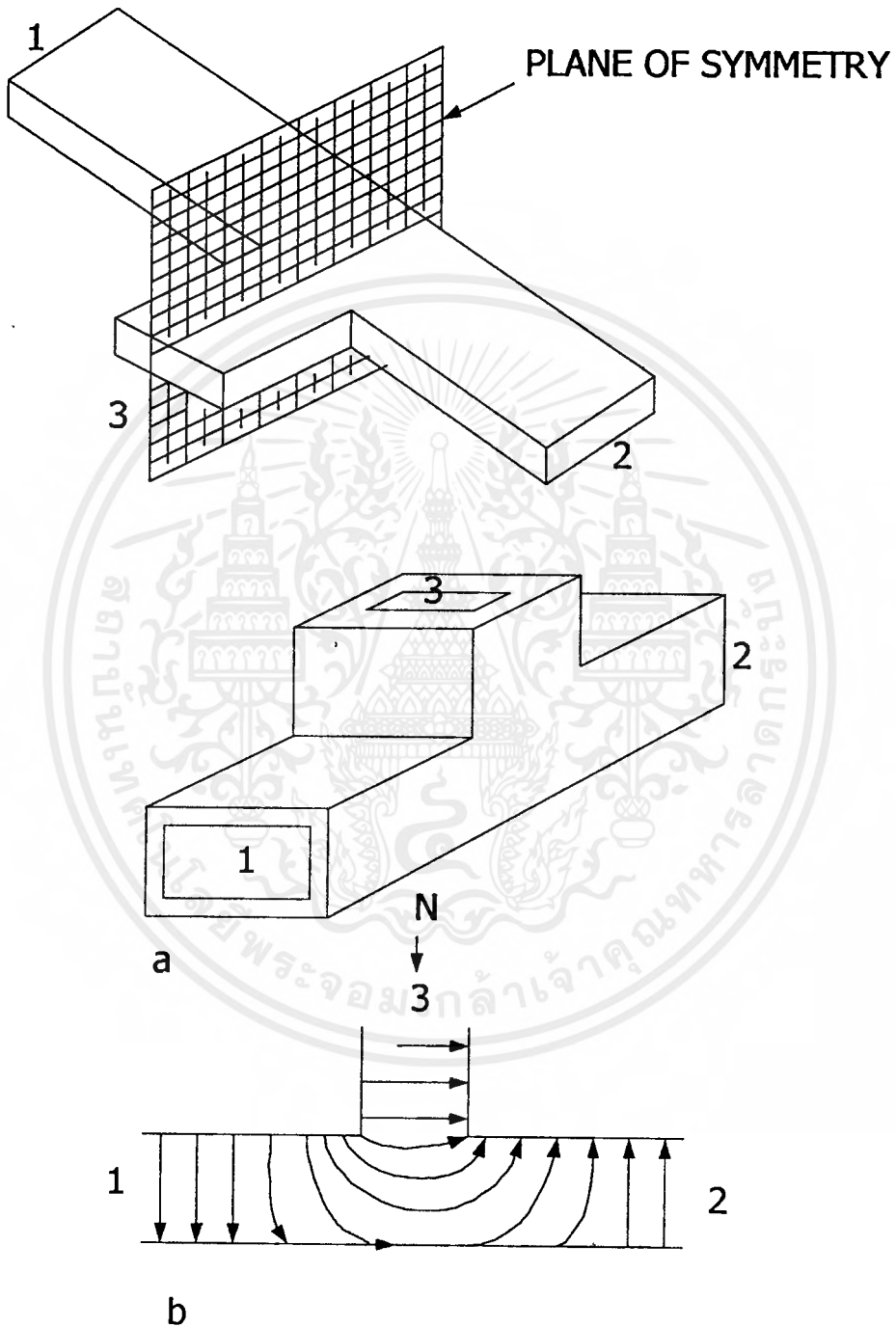
$$\begin{aligned} S_{11} &= S_{22} & , & & S_{12} &= S_{21} \\ S_{32} &= S_{23} = -S_{13} = -S_{31} \end{aligned} \quad (2.125)$$

มีทฤษฎีอยู่ 3 ทฤษฎี ที่กล่าวถึง ผลของคุณสมบัติการสูญเสียค่าของ 3 พอร์ต โดยสองอันดับแรก จะเกี่ยวกับผลกระทบของการเชื่อมต่อวงจรในแขนหนึ่งของ 3 พอร์ต

1. เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อวงจร ซึ่งไม่มีการส่งผ่านพลังงานระหว่างแขนทั้งสอง
2. ถ้า 3 พอร์ตเป็นแบบสมมาตรกับการเชื่อมต่อวงจรที่แขน เหมาะแก่การเชื่อมต่อวงจรซึ่งการส่งแบบสมมาตรระหว่างแขนทั้งสอง ซึ่งปราศจากการสูญเสียหรือผลกระทบ
3. 3 พอร์ต จะมีการสูญเสียค่า จะไม่สามารถสมบูรณ์ได้ถ้าไม่มีผลกระทบ คือไม่มีกรณี

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0$$

ตัวอย่างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามแม่เหล็กจะเป็นแบบที่สมมาตรและมีการสูญเสียค่า ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามแม่เหล็กแบบสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสมมาตรและคุณสมบัติการลดทอนของจำนวนพหามิตอร์จากก้าวไปสี่ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} \end{bmatrix}$$

หนึ่งในเงื่อนไขการสูญเสียค่าจากสมการที่ (2.119) เป็น

$$1 - |S_{33}|^2 = 2|S_{13}|^2 \quad (2.126)$$

เมื่อเรากำหนดให้ $S_{33} = 0$ จะได้

$$|S_{33}| = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

การบวกกันของเงื่อนไขการสูญเสียค่าจะเป็น

$$\overline{S_{11}}S_{13} + \overline{S_{21}}S_{23} + \overline{S_{31}}S_{33} = 0 \quad (2.127)$$

แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการสมมติข้างบนเป็น

$$S_{11} = -S_{12}$$

เงื่อนไขการสูญเสียค่าอื่น ๆ ที่ต้องการ เช่น

$$\begin{aligned} & 1 - |S_{11}|^2 = |S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 \\ \text{หรือ} & 1 - |S_{12}|^2 = |S_{21}|^2 + \frac{1}{2} \\ \text{หรือ} & |S_{12}| = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (2.128)$$

สุดท้าย ถ้าเราเลือกที่ตั้งของพื้นผิวสุดท้าย ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดเป็นจริง เราสามารถเขียนเมตริกซ์ของพารามิเตอร์ S สำหรับท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามแม่เหล็กได้

$$S = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & \sqrt{2} \\ 1 & -1 & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.129)$$

เมตริกซ์พารามิเตอร์ S คอนข้างจะมีข้อแตกต่าง คือนำเอาท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในระนาบสนามแม่เหล็ก ถ้าสมมติให้ 1 ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีการสูญเสียต่ำในแขนที่สาม คือได้รับการปรับเปลี่ยนโดย S_{11} ที่มากกว่า S_{33} จะหายไป ในกรณีนี้จะทำให้เกิด $S_{13} = 0$ ซึ่งจะได้เป็น

$$S_{\underline{}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.130)$$

ตัวอย่างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามไฟฟ้าจะเป็นแบบที่สมมาตรและมีการสูญเสียต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.21

ความสมมาตรและคุณสมบัติการลดทอนของจำนวนพารามิเตอร์จากเก้าไปสี่ ดังนี้

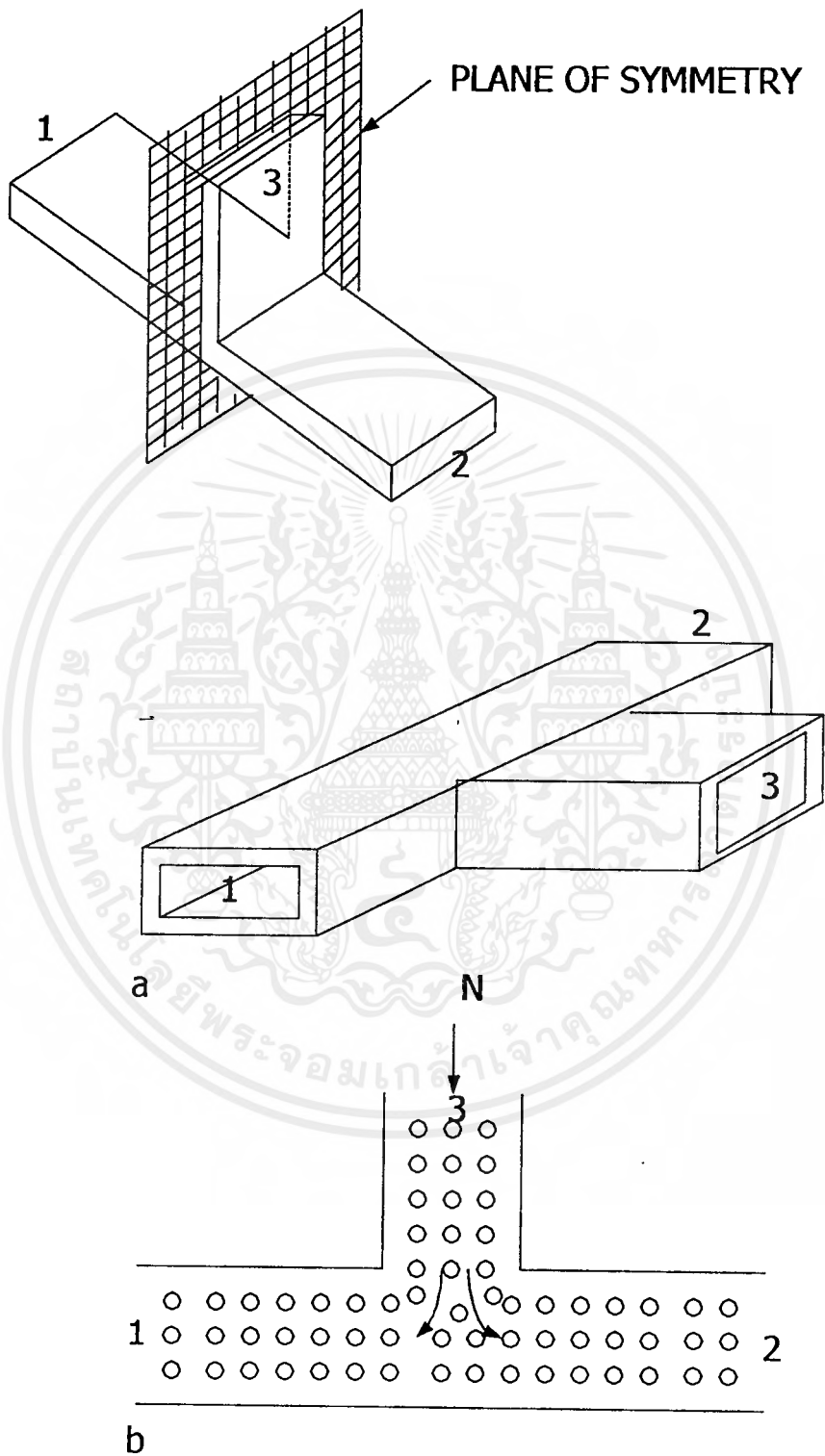
$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} \end{bmatrix}$$

- ถ้าการสูญเสียต่ำมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่ง เหมือนกับการสมมาตรของระนาบข้างบน คือกำหนดให้ $S_{33} = 0$ เงื่อนไขการสูญเสียต่ำจะเป็น

$$|S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 = 1 - |S_{33}|^2 \quad (2.131)$$

ซึ่งต้องการ $|S_{13}| = \frac{1}{2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามไฟฟ้าแบบสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเหมือนกับท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามแม่เหล็ก การ
บวกกันของเงื่อนไขการสูญเสียต่ำ จะเป็น

$$\overline{S_{11}}S_{13} + \overline{S_{21}}S_{23} + \overline{S_{31}}S_{33} = 0 \quad (2.132)$$

ซึ่งต้องการ

$$S_{11} = S_{21}$$

ดังนั้นเงื่อนไขจะเป็น

$$1 - |S_{11}|^2 = |S_{21}|^2 + |S_{31}|^2 \quad (2.133)$$

สิ่งที่ต้องการคือ

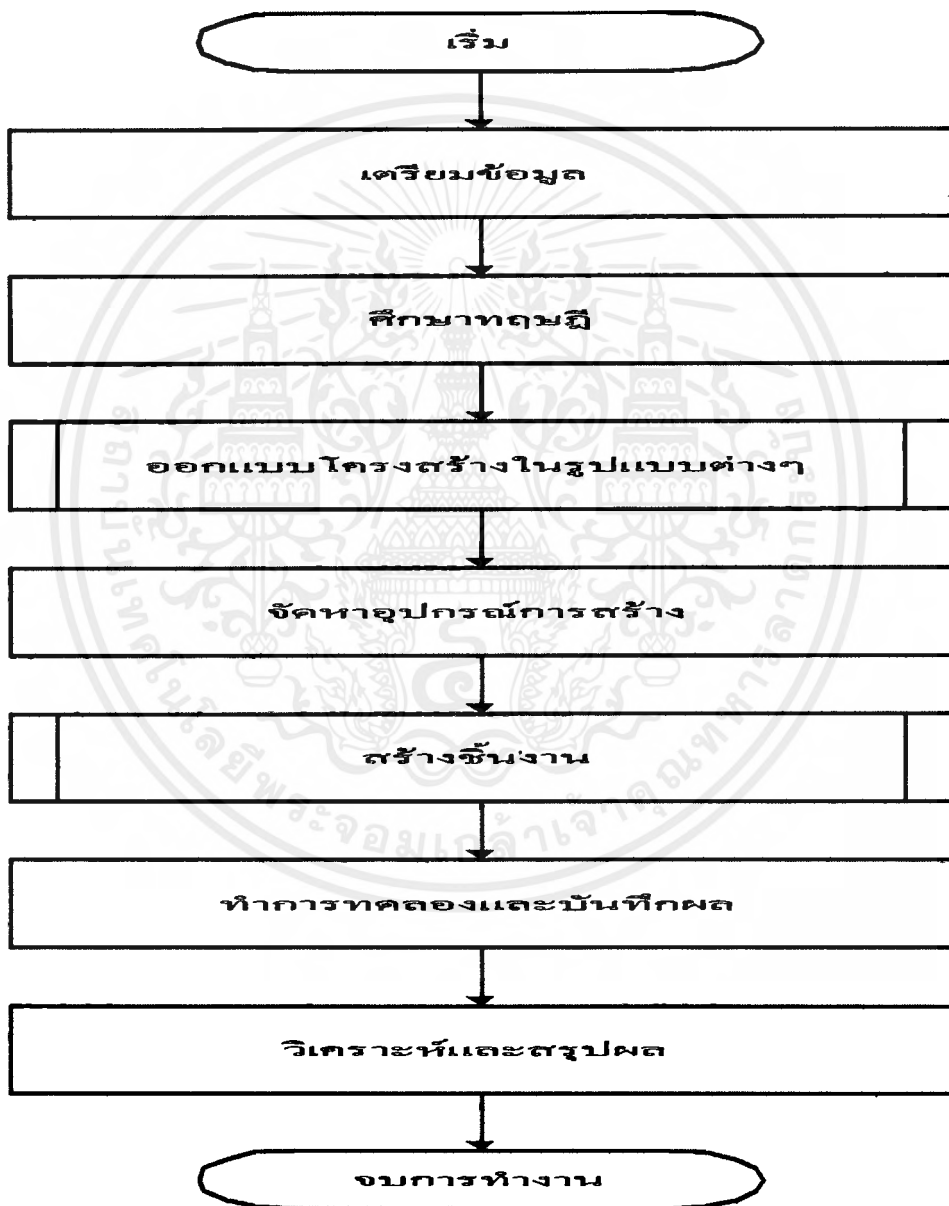
$$|S_{12}| = \frac{1}{2}$$

เช่นกัน ถ้าการเลือกพื้นผิวในแกนที่หนึ่งและสอง ดังนั้นองค์ประกอบทั้งหมดของเมตริกซ์
พารามิเตอร์ S ที่เป็นจริง คือ

$$S = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{2} \\ 1 & 2 & -\sqrt{2} \\ \sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.134)$$

บทที่ 3 การสร้างและออกแบบ

จากการทำงานหลักดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การทำงานหลักของแผนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการออกแบบโครงสร้างต่างๆ

ในการออกแบบโครงสร้าง ท่อนำคลื่นเราได้คำนึงถึงวัสดุที่เป็นตัวนำ ความถี่ที่ต้องการใช้งาน ราคาของวัสดุ นอกจากนั้นยังต้องสามารถหาวัสดุและสร้างได้จริง

การออกแบบ

1. เลือกความถี่ที่ใช้งานที่ 10 GHz
2. เลือกวัสดุที่เป็นท่อทองเหลืองแบบสี่เหลี่ยม
3. คำนวณสมการความถี่ตัดออฟ (cutoff frequency) ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากหาได้จากสมการ

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

โดยที่ m = จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นในด้านกว้างของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

n = จำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นในด้านแคบของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

a = ขนาดด้านกว้างของท่อนำคลื่น = 2.3cm

b = ขนาดด้านแคบของท่อนำคลื่น = 1.03cm

μ' = ค่าความซึมซาบ (Relative permeability) = 1

ϵ' = ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) = 1

แทนค่าในสมการ (3.1) คำนวณการทำงานที่โหมด $TE_{1,0}$

$$f_{cutoff} = \frac{3 \times 10^{10}}{2\sqrt{(1)(1)}} \sqrt{\left(\frac{1}{2.3}\right)^2 + \left(\frac{0}{1.03}\right)^2}$$

$$f_{cutoff} = 6.522 \text{GHz}$$

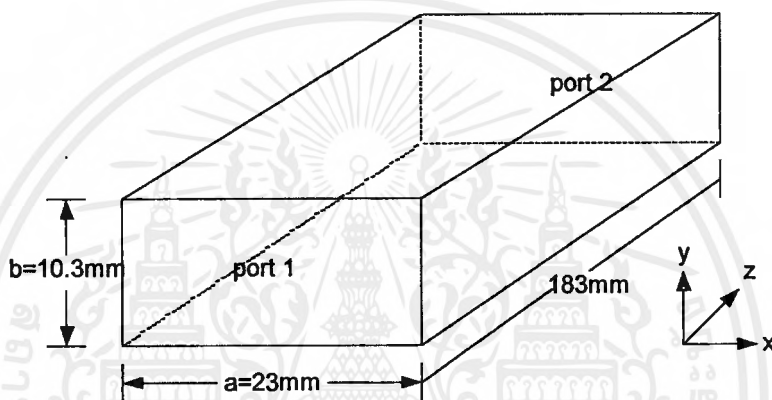
แทนค่าในสมการ (3.1) คำนวณการทำงานที่โหมด $TE_{1,1}$ ซึ่งเป็นโหมดการทำงานที่ถัดจากโหมด $TE_{1,0}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

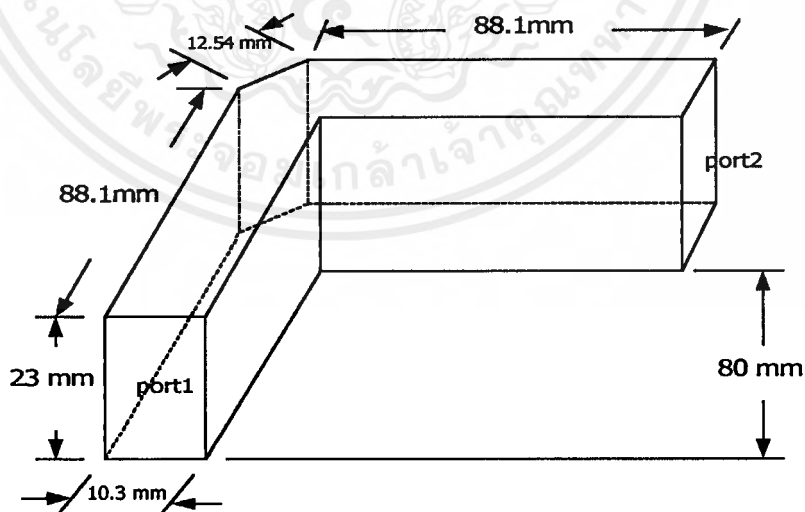
$$f_{cutoff} = \frac{3 \times 10^{10}}{2\sqrt{(1)(1)}} \sqrt{\left(\frac{1}{2.3}\right)^2 + \left(\frac{1}{1.03}\right)^2}$$

$$f_{cutoff} = 15.156 \text{ GHz}$$

4. โครงสร้างหาได้โดยใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์หาโครงสร้างที่ดีที่สุดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เป็นเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.2 แบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 3.3 และแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็กดังในรูปที่ 3.4

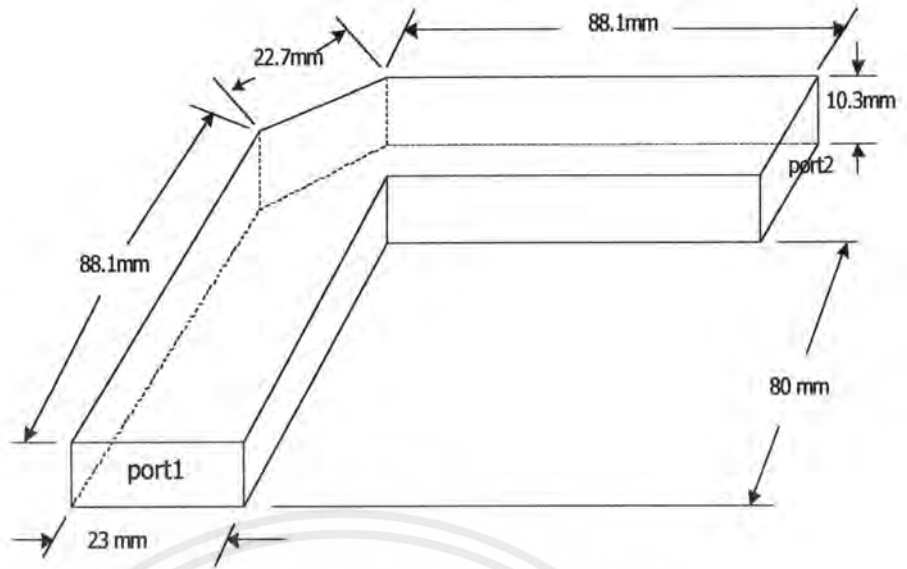


รูปที่ 3.2 รูปทรงทางเรขาคณิตและระบบพิกัดของ โครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

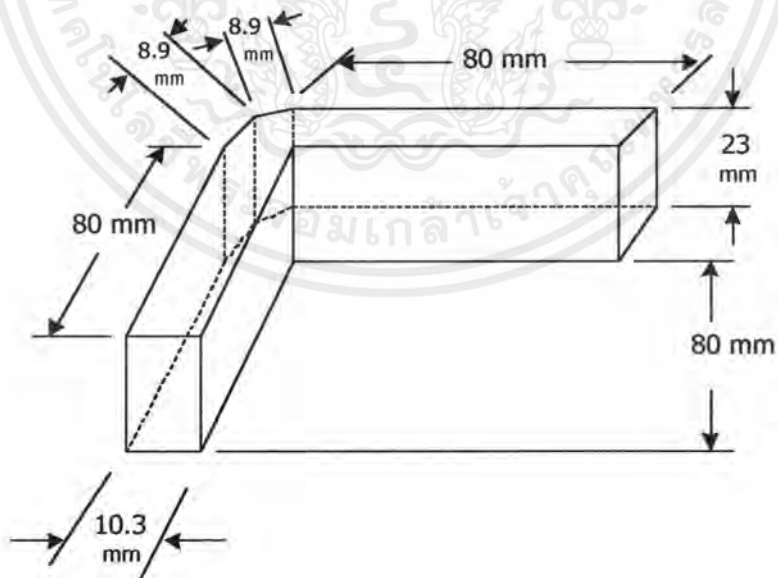


รูปที่ 3.3 โครงสร้างและขนาดท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมเดียวในรูปแบบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

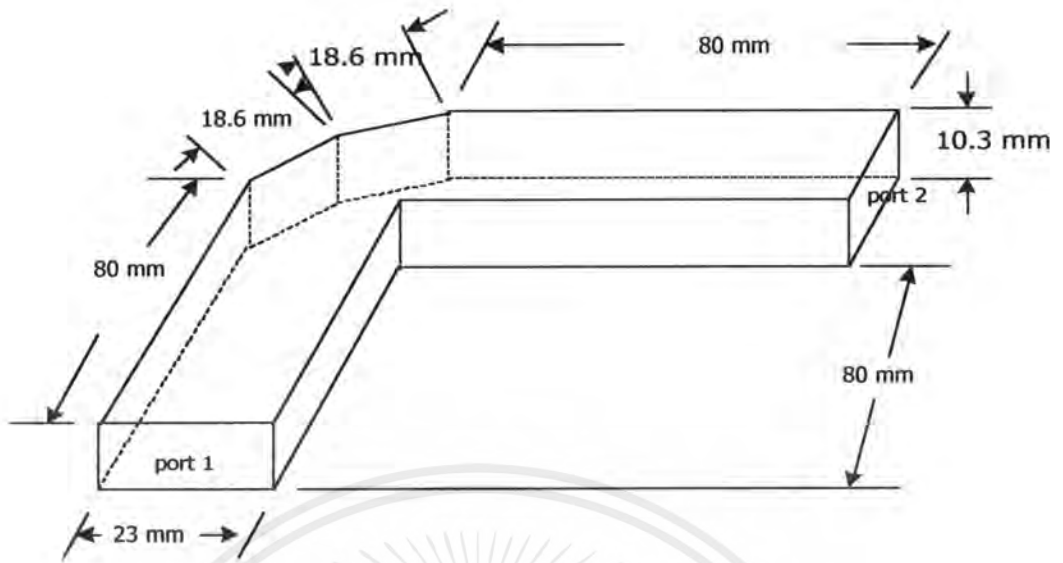


รูปที่ 3.4 โครงสร้างและขนาดที่นำคลื่นเหลี่ยมเดียวในรูปแบบสนามแม่เหล็ก

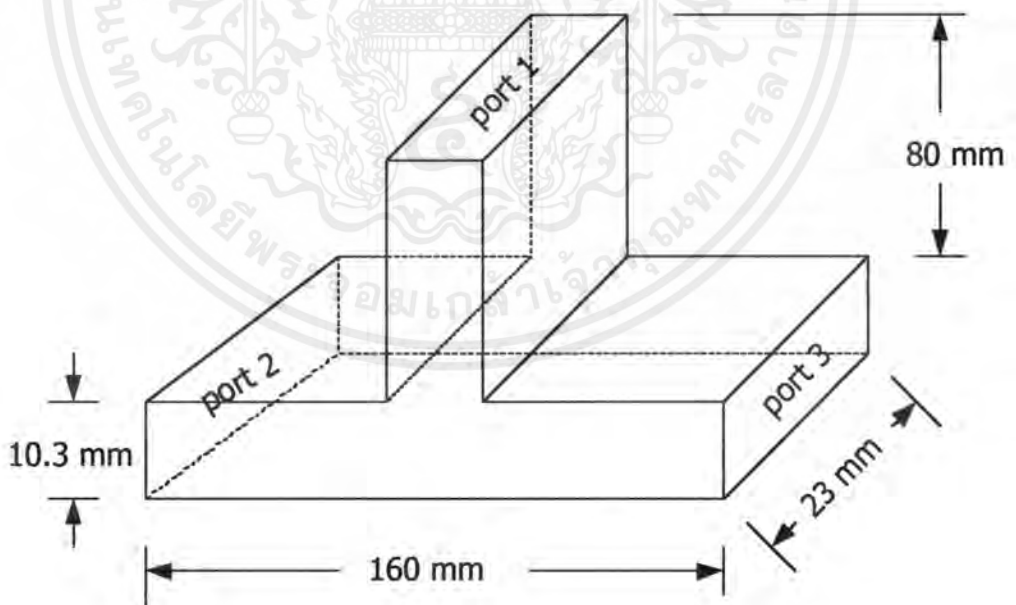


รูปที่ 3.5 โครงสร้างและขนาดที่นำคลื่นสองเหลี่ยมในรูปแบบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

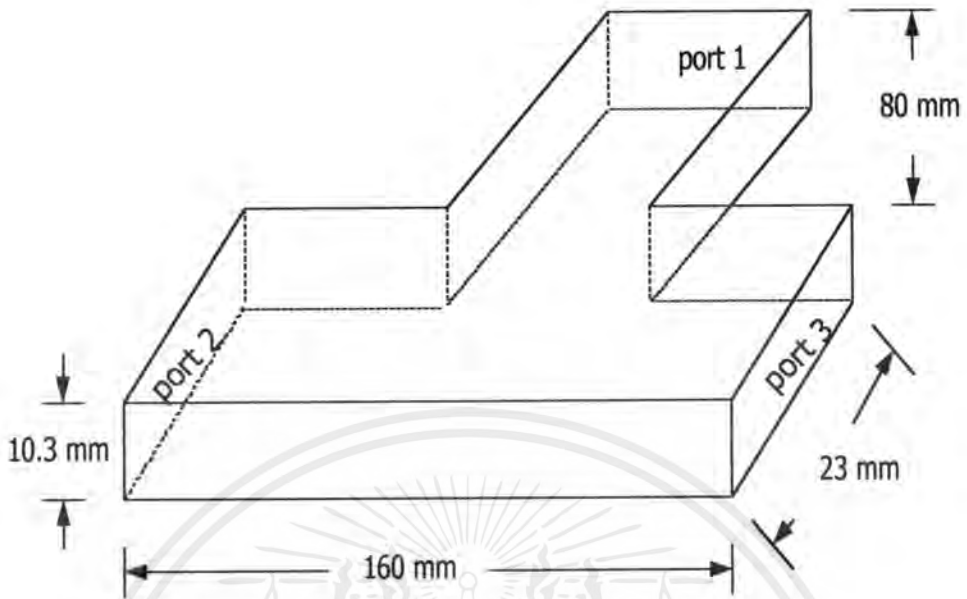


รูปที่ 3.6 โครงสร้างและขนาดที่นำคลื่นสองเหลี่ยมในรูปแบบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.7 โครงสร้างและขนาดที่นำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 โครงสร้างและขนาดที่นำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ท่อนำคลื่นเป็น โครงสร้างของอุปกรณ์การนำพาคลื่นที่สามารถทำให้เกิดแบบแผนคลื่น ได้หลายแบบ และถ้าท่อนำคลื่นเป็นแบบ ไม่ต่อเนื่องจะทำให้วิเคราะห์ได้ยาก

ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบตรงในระนาบสนามแม่เหล็ก ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียว ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมและท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อที่ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ในย่านความถี่ 8-12 GHz ซึ่งผลของการทดลองได้แสดงคุณสมบัติต่างๆของท่อนำคลื่นโดยอาศัยคุณสมบัติของพารามิเตอร์ S โดยใช้โปรแกรม แล้วนำผลจากการวิเคราะห์ที่คิดที่สุดมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัด โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์

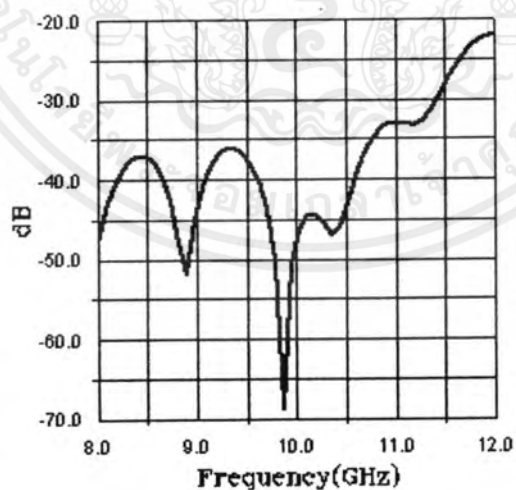
ในการใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์นั้นจะแบ่งการวิเคราะห์ตามแต่ละ โครงสร้าง โดยจะอาศัยคุณสมบัติของพารามิเตอร์ S เพื่อทำการวิเคราะห์หา โครงสร้างที่ดีที่สุดในแต่ละแบบ

การใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบตรงในระนาบสนามแม่เหล็กที่มีรูปร่างและ โครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.1



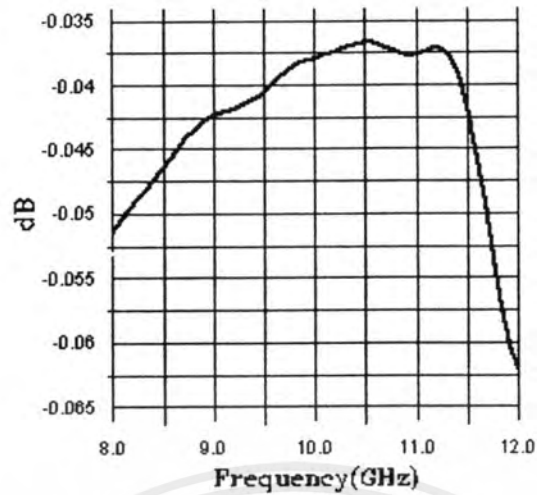
รูปที่ 4.1 รูปร่างและ โครงสร้างของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ค่าพารามิเตอร์ S จากโครงสร้างที่ดีที่สุดของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 พารามิเตอร์ S_{12} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในระนาบสนามแม่เหล็ก

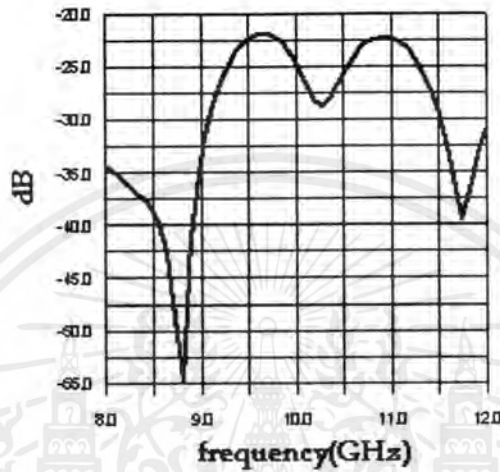
การใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบทำมุมตั้งฉากแบบเหลี่ยมเดี่ยวและแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้าที่มีรูปร่างและโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.4



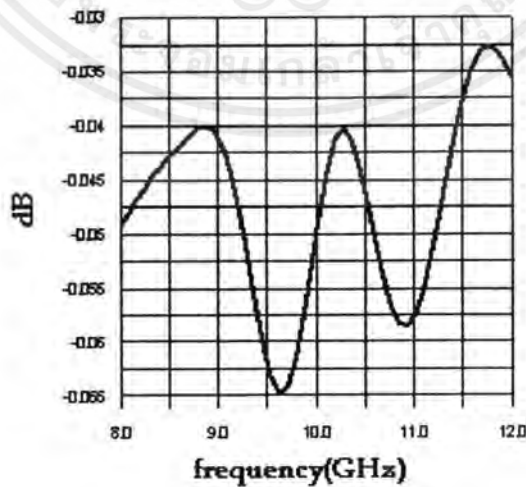
รูปที่ 4.4 รูปร่างและ โครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดี่ยวและสอง

เหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ S จากโครงสร้างที่ดีที่สุดของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์ S_{12} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบ

สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

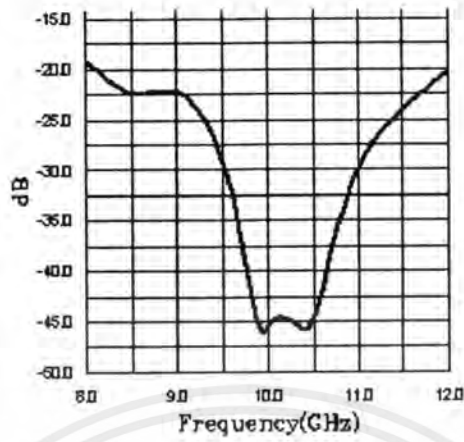
การใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ท่อนาคลื่นแบบทำมุมตั้งจากแบบเหลี่ยมเดี่ยวและสองเหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็กที่มีรูปร่างและโครงสร้างท่อนาคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.7



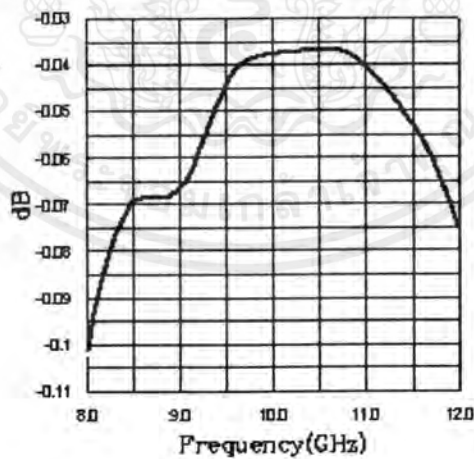
รูปที่ 4.7 รูปร่างและ โครงสร้างท่อนาคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากจากแบบเหลี่ยมเดี่ยวและสองเหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็ก

ค่าพารามิเตอร์ S จากโครงสร้างที่ดีที่สุดของท่อนาคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดี่ยวในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดี่ยวในระนาบ
สนามแม่เหล็ก

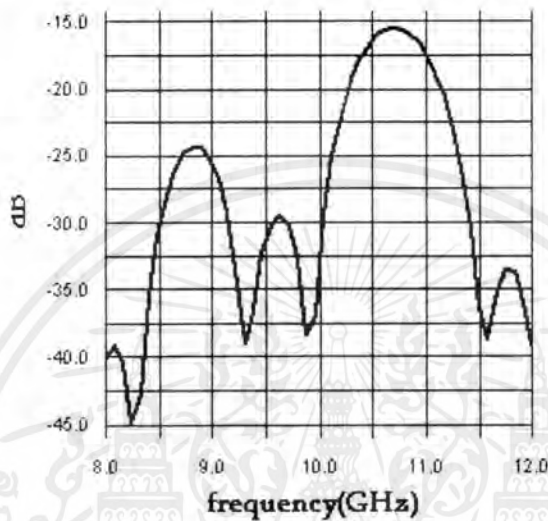


รูปที่ 4.9 พารามิเตอร์ S_{12} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดี่ยวในระนาบ
สนามแม่เหล็ก

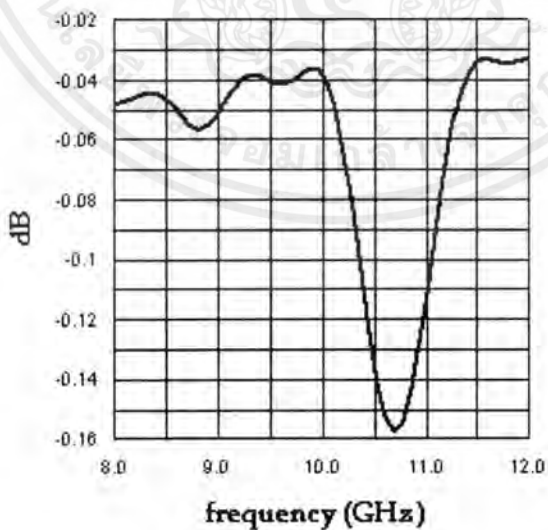
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ที่อนุญาตให้แบบทำมุมตั้งฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้าที่มีรูปร่างและโครงสร้างที่อนุญาตให้ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.4

ค่าพารามิเตอร์ S จากโครงสร้างที่ดีที่สุดของอนุญาตให้ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 พารามิเตอร์ S_{11} ของอนุญาตให้ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้า

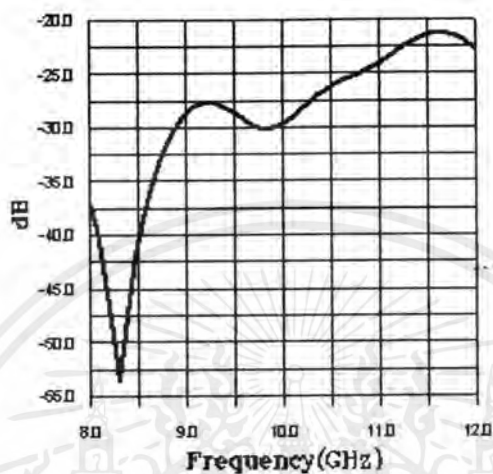


รูปที่ 4.11 พารามิเตอร์ S_{12} ของอนุญาตให้ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้า

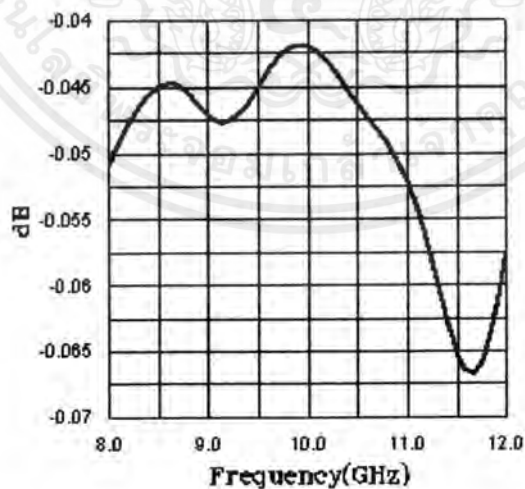
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ที่นำคลื่นแบบทำมุมตั้งฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็กที่มีร่างและ โครงสร้างที่นำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.7

ค่าพารามิเตอร์ S จากโครงสร้างที่ดีที่สุดของที่นำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 พารามิเตอร์ S_{11} ของที่นำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.13 พารามิเตอร์ S_{12} ของที่นำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็ก

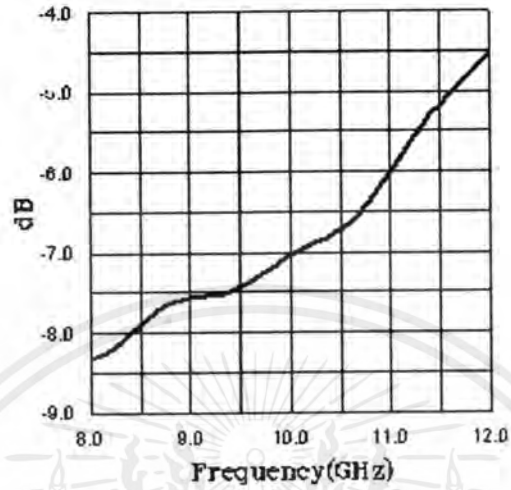
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมตั้งฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีรูปร่างและโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.14

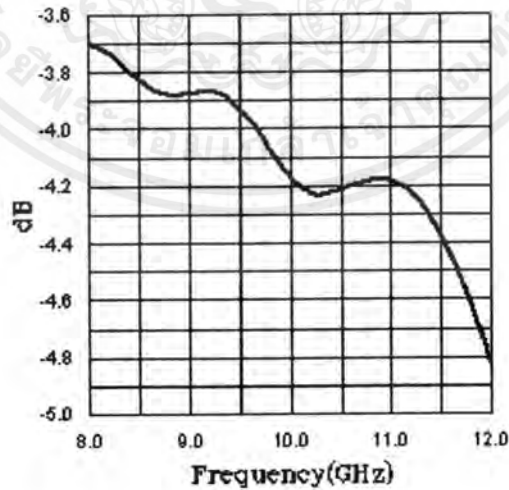


รูปที่ 4.14 รูปร่างและ โครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ค่าพารามิเตอร์ S จากโครงสร้างที่ดีที่สุดของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 4.15 รูปที่ 4.16 รูปที่ 4.17 รูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19

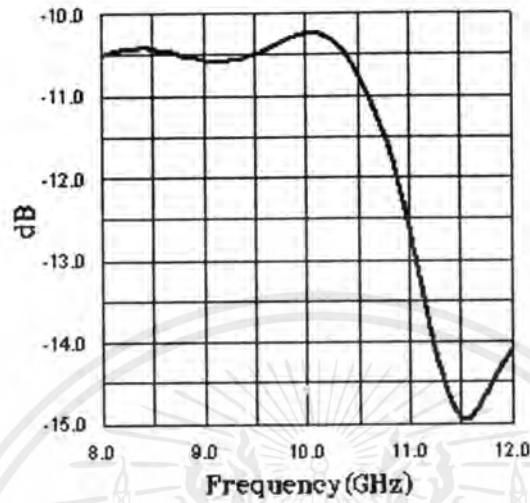


รูปที่ 4.15 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามไฟฟ้า

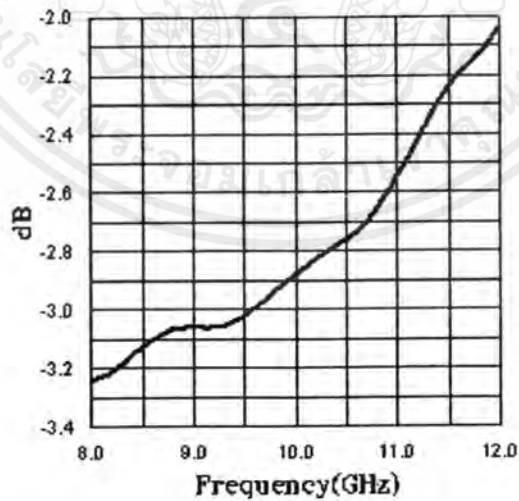


รูปที่ 4.16 พารามิเตอร์ S_{12} และ S_{21} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

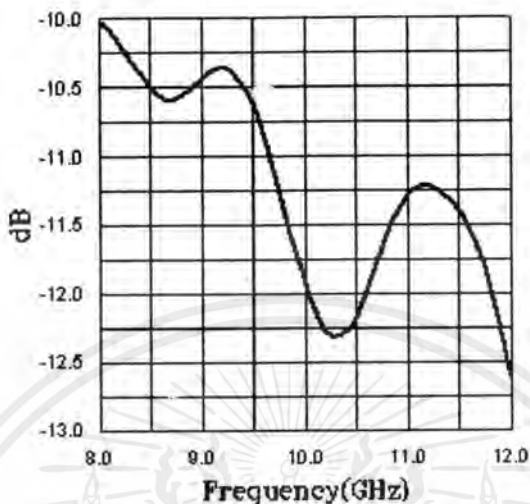


รูปที่ 4.17 พารามิเตอร์ S_{22} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.18 พารามิเตอร์ S_{23} และ S_{32} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามไฟฟ้า

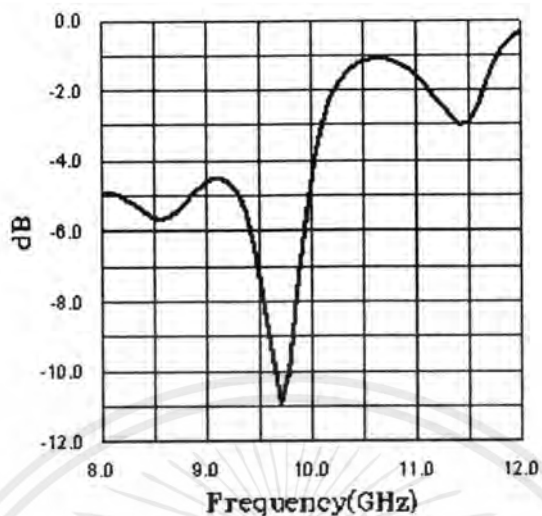
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



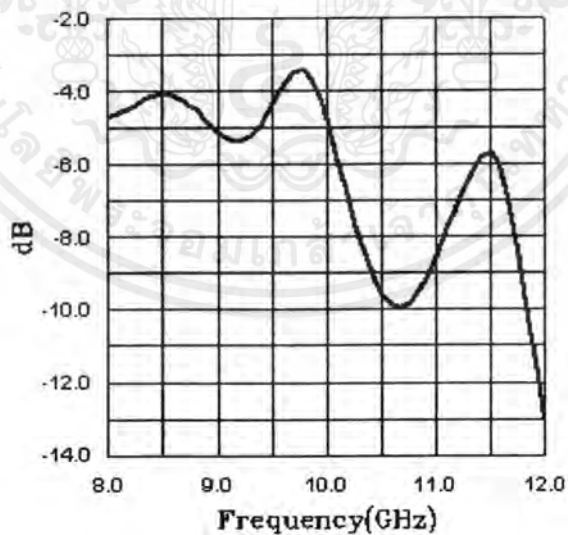
รูปที่ 4.19 พารามิเตอร์ S_{33} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวทีในระนาบสนามไฟฟ้า

การใช้โปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวทีในระนาบสนามแม่เหล็กที่มีรูปร่างและโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.14

ค่าพารามิเตอร์ S จากโครงสร้างที่ดีที่สุดของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวทีในระนาบสนามแม่เหล็กเป็นดังรูปที่ 4.20 รูปที่ 4.21 รูปที่ 4.22 และ รูปที่ 4.23

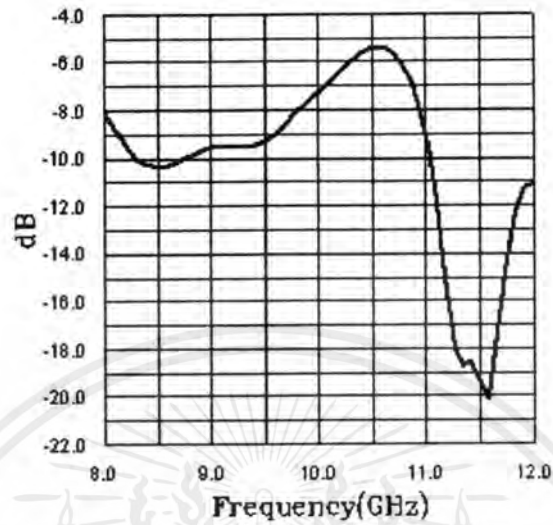


รูปที่ 4.20 พารามิเตอร์ S_{11} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อทีในระนาบ
สนามแม่เหล็ก

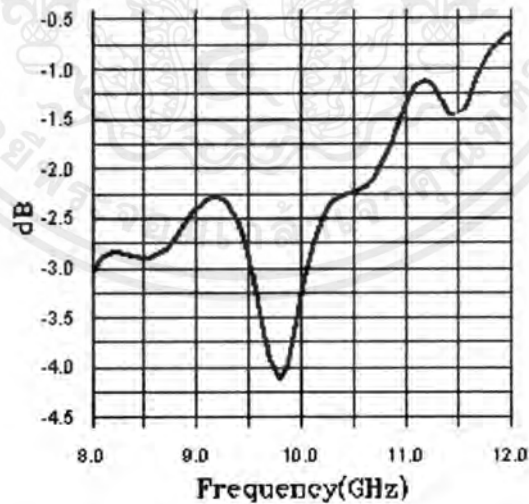


รูปที่ 4.21 พารามิเตอร์ S_{12} และ S_{21} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวทีใน
ระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

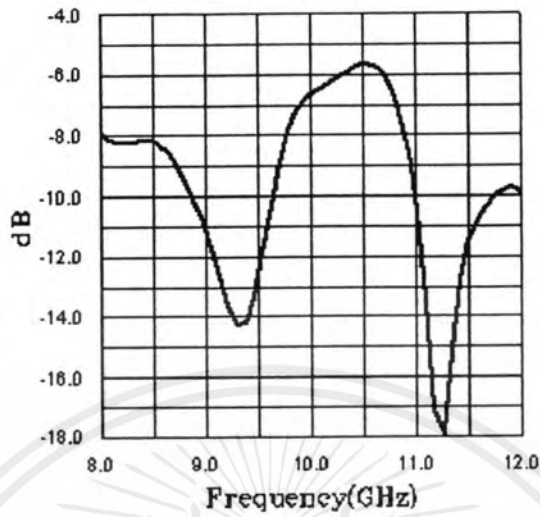


รูปที่ 4.22 พารามิเตอร์ S_{22} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบ
สนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.23 พารามิเตอร์ S_{23} และ S_{32} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่
ในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 พารามิเตอร์ S_{33} ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวทีในระนาบ
สนามแม่เหล็ก

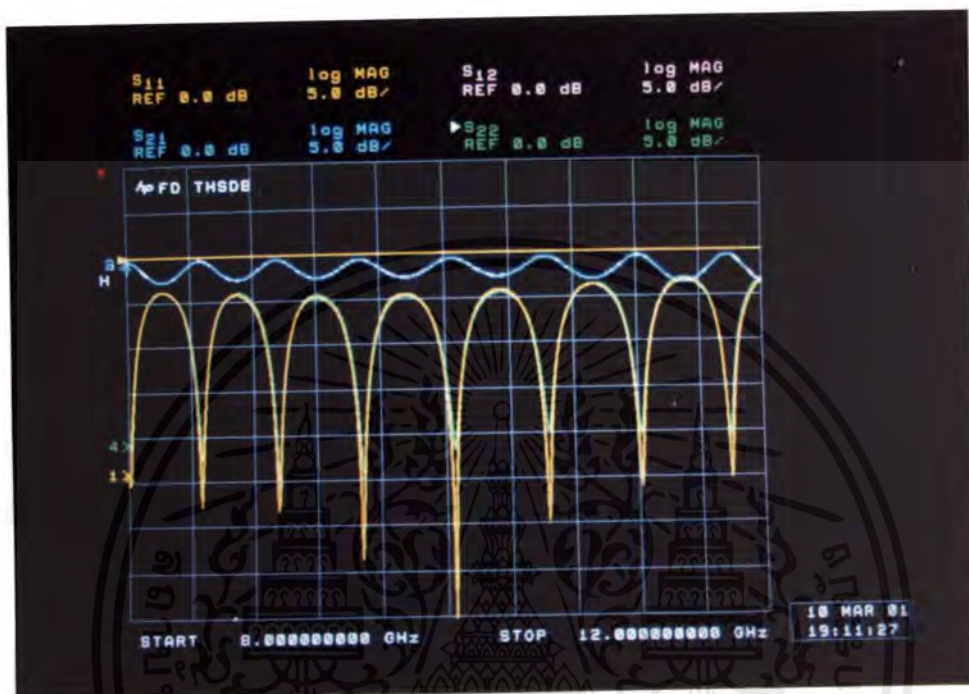
4.3 การวัดผลโดยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย



รูปที่ 4.25 การวัดผลโดยเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบตรงในระนาบสนามแม่เหล็กที่มีรูปร่างและโครงสร้าง
ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.1 จะได้ผลจากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดย
อาศัยคุณสมบัติของพารามิเตอร์ S จะได้ผลเป็นดังรูปที่ 4.26



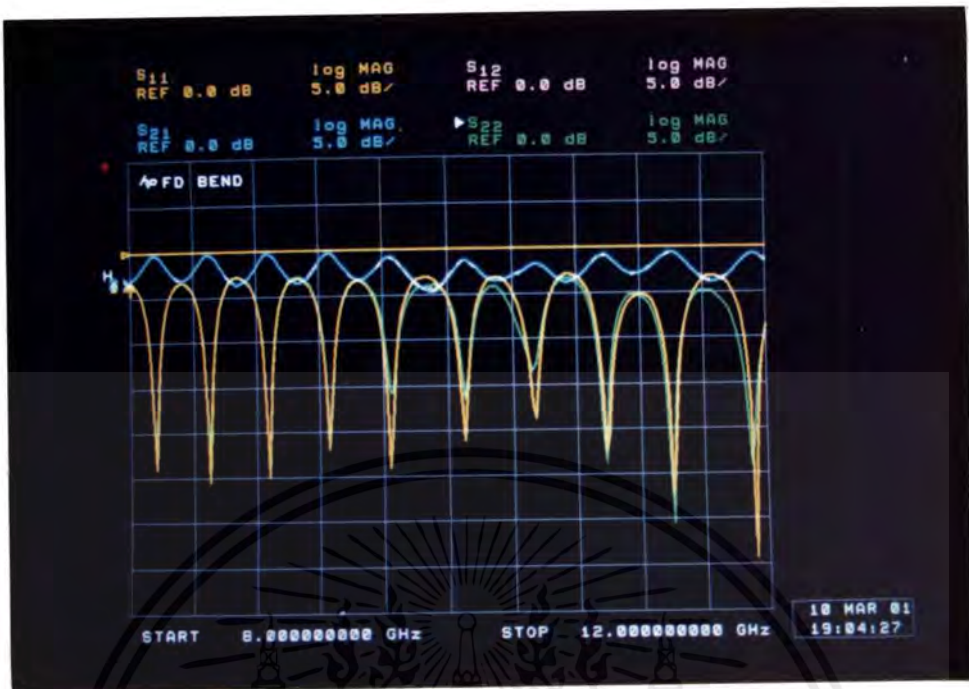
รูปที่ 4.26 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากในระนาบสนามแม่เหล็ก

ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามไฟฟ้าที่มีรูปร่างและ โครง
สร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.4 จะได้ผลจากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
โดยอาศัยคุณสมบัติของพารามิเตอร์ S จะได้ผลเป็นดังรูปที่ 4.27



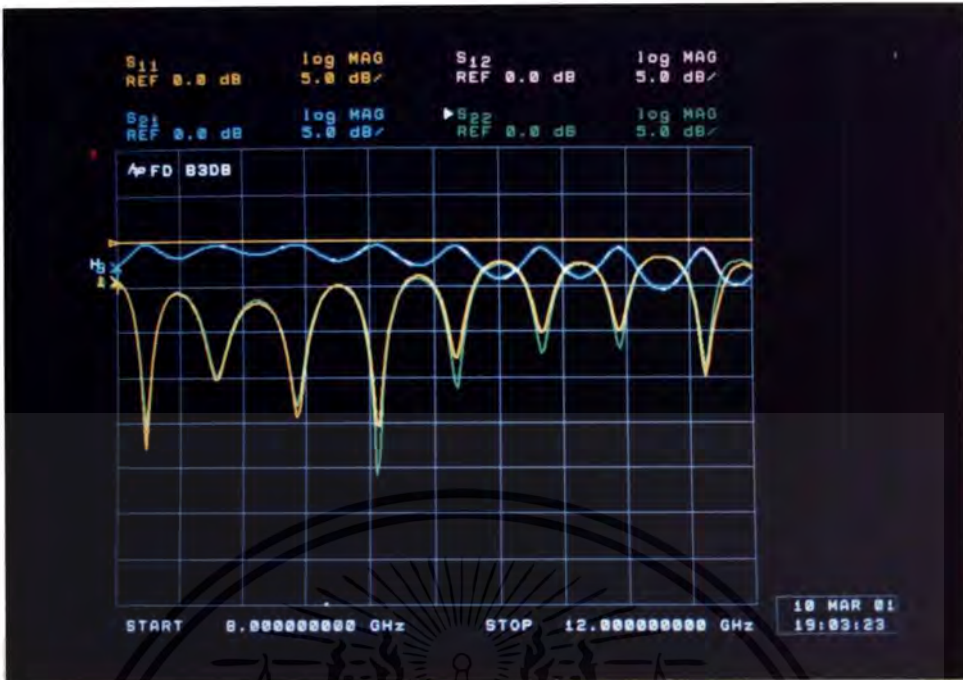
รูปที่ 4.27 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามไฟฟ้า

ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามแม่เหล็กที่มีรูปร่างและโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.7 จะได้ผลจากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยอาศัยคุณสมบัติของพารามิเตอร์ S จะได้ผลเป็นดังรูปที่ 4.28



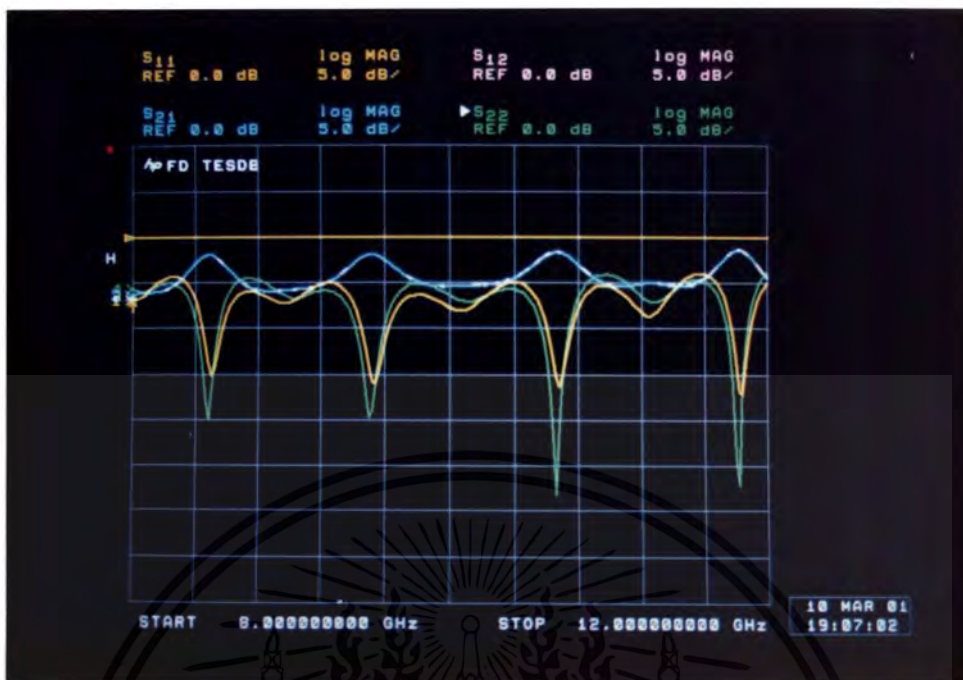
รูปที่ 4.28 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามแม่เหล็ก

ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้าที่มีรูปร่างและโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.4 จะได้ผลจากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยอาศัยคุณสมบัติของพารามิเตอร์ S จะได้ผลเป็นดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.30 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบ
สนามแม่เหล็ก

ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามไฟฟ้าที่มีรูปร่างและโครงสร้าง
สร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.14 จะได้ผลจากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
โดยอาศัยคุณสมบัติของพารามิเตอร์ S จะได้ผลจากการป้อนให้มีการดูคลื่นทางพอร์ต 1 เป็นดังรูป
ที่ 4.31 และผลจากการป้อนให้มีการดูคลื่นทางพอร์ต 2 เป็นดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.31 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามไฟฟ้า โดยทำการป้อนให้มีการคูคคลื่นทางพอร์ต 1

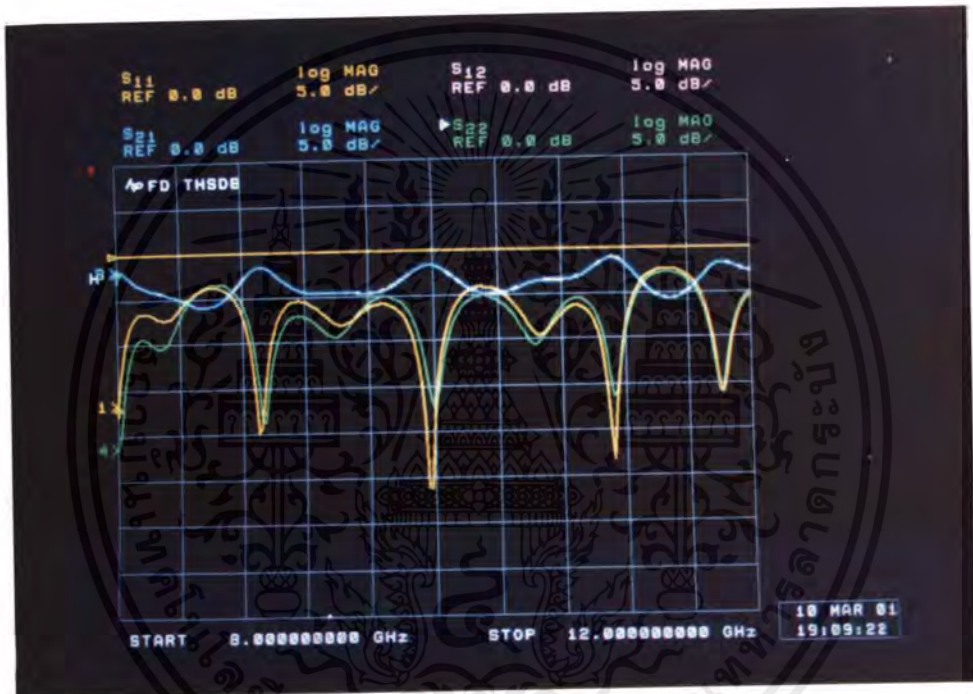


รูปที่ 4.32 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบ

สนามไฟฟ้า โดยทำการป้อนให้มีการคูคคลื่นทางพอร์ต 2

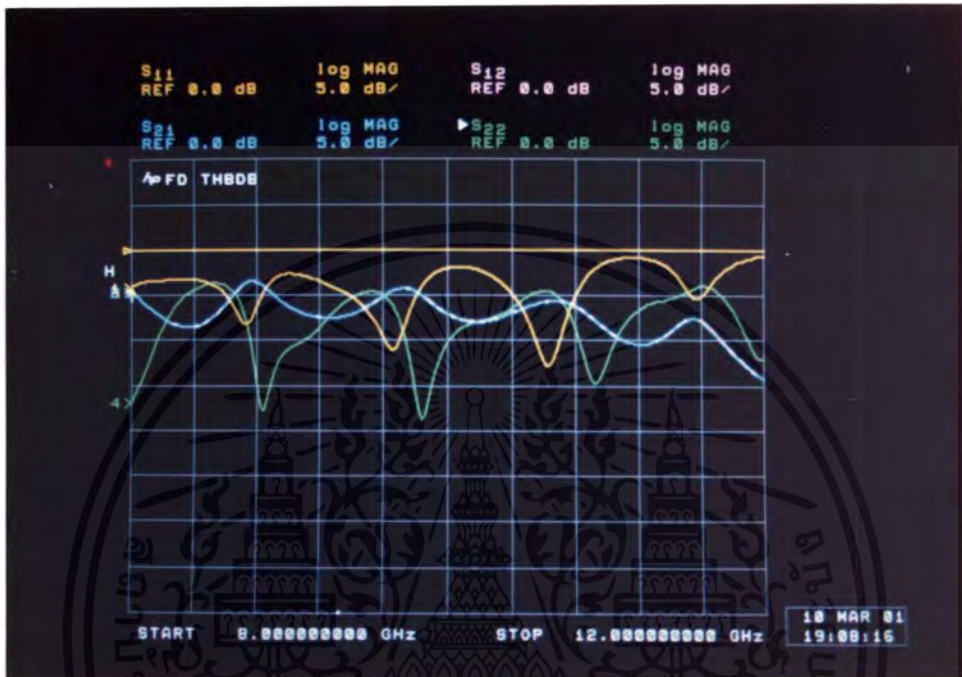
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามแม่เหล็กที่มีรูปร่างและโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากดังรูปที่ 4.14 จะได้ผลจากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายโดยอาศัยคุณสมบัติของพารามิเตอร์ S จะได้ผลจากการป้อนให้มีการดูคลื่นทางพอร์ต 1 เป็นดังรูปที่ 4.33 และผลจากการป้อนให้มีการดูคลื่นทางพอร์ต 2 เป็นดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบสนามแม่เหล็ก โดยทำการป้อนให้มีการดูคลื่นทางพอร์ต 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 พารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบข้อต่อตัวที่ในระนาบ
สนามแม่เหล็ก โดยทำการป้อนให้มีการดูคดคลื่นทางพอร์ต 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบไม่ต่อเนื่อง โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสามรูปแบบคือ รูปแบบแรกเป็นท่อนำคลื่นที่ไม่ต่อเนื่องแบบโค้งเดียว ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก รูปแบบที่สองเป็นท่อนำคลื่นที่ไม่ต่อเนื่องแบบสองโค้ง ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก รูปแบบที่สามเป็นท่อนำคลื่นที่ไม่ต่อเนื่องแบบข้อต่อที่ ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งการศึกษาคุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องจะอาศัยผลของการวิเคราะห์จาก โปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งผลที่ได้จาก โปรแกรมสำเร็จรูปจะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดผลตามรูปแบบและโครงสร้างที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3

สรุปผลการทดลอง

จากการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวัดคุณสมบัติของพารามิเตอร์ S ของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบตรง แบบเหลี่ยมเดียว แบบสองเหลี่ยม และแบบข้อต่อที่ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก เปรียบเทียบกับผลจากการจำลองโดยโปรแกรม จากผลการทดลองที่ได้ในบทที่ 4 พบว่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบตรงจะได้ผลดีที่สุด รองลงมาคือ ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียว แบบสองเหลี่ยม และแบบข้อต่อที่ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีโครงสร้างที่ยังมีการโค้งงอมากเท่าไร ก็จะทำให้มีการสูญเสียของพลังงานคลื่นที่เคลื่อนที่ไปข้างในมากขึ้นเนื่องจากมีรอยต่อมากขึ้น

จากผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบตรง จะเห็นว่าใช้งานได้ดีในหลายช่วงความถี่ แต่ความถี่ที่มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ดีที่สุดคือ 8 GHz และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยที่สุดที่ 10 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรม ซึ่งจะได้จุดที่ดีอยู่ในช่วง 10 GHz

จากผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามไฟฟ้า จะเห็นว่าใช้งานได้ดีในหลายช่วงความถี่ แต่ความถี่ที่มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ดีที่สุดคือ 8.34 GHz และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยที่สุดที่ 10.38 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรมซึ่งจะได้จุดที่ดีอยู่ในช่วง 10 - 10.5 GHz

จากผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบเหลี่ยมเดียวในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเห็นว่าใช้งานได้ดีในหลายช่วงความถี่ แต่ความถี่ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านดีที่สุดคือ 8.16 GHz และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยที่สุดที่ 11.92 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรมซึ่งจะได้จุดที่ได้อยู่ในช่วง 10.5 GHz

จากผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามไฟฟ้า จะเห็นว่าใช้งานได้ดีในหลายช่วงความถี่ แต่ความถี่ที่มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดีที่สุดคือ 8.34 GHz และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยที่สุดที่ 9.78 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรมซึ่งจะได้จุดที่ได้อยู่ในช่วง 8.3 GHz

จากผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบสองเหลี่ยมในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเห็นว่าใช้งานได้ดีในหลายช่วงความถี่ แต่ความถี่ที่มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดีที่สุดคือ 8.18 GHz และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยที่สุดที่ 8.18 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรมซึ่งจะได้จุดที่ได้อยู่ในช่วง 10.5 - 11 GHz

จากผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากข้อต่อที่ในระนาบสนามไฟฟ้าที่วัดจากการป้อนให้มีการดูคลื่นที่พอร์ต 1 จะเห็นว่าใช้งานได้ดีในหลายช่วงความถี่ แต่ความถี่ที่มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดีที่สุดคือ 8.5 GHz และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยที่สุดที่ 10.66 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรมซึ่งจะได้จุดที่ได้อยู่ในช่วง 11.5 - 12 GHz และผลการวัดจากการป้อนให้มีการดูคลื่นที่พอร์ต 2 จะเห็นว่าใช้งานได้ดีในหลายช่วงความถี่ แต่ความถี่ที่มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดีที่สุดคือ 8.44 GHz และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยที่สุดที่ 9.48 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรมซึ่งจะได้จุดที่ได้อยู่ในช่วง 8 GHz

จากผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากข้อต่อที่ในระนาบสนามแม่เหล็กที่วัดจากการป้อนให้มีการดูคลื่นที่พอร์ต 1 จะเห็นว่าใช้งานได้ดีในหลายช่วงความถี่ แต่ความถี่ที่มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดีที่สุดคือ 11.84 GHz และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยที่สุดที่ 9.98 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรมซึ่งจะได้จุดที่ได้อยู่ในช่วง 11.5 - 12 GHz และผลการวัดจากการป้อนให้มีการดูคลื่นที่พอร์ต 2 จะเห็นว่าใช้งานได้ดีในหลายช่วงความถี่ แต่ความถี่ที่มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านดีที่สุดคือ 8.78 GHz และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับน้อยที่สุดที่ 9.84 GHz เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองโปรแกรมซึ่งจะได้จุดที่ได้อยู่ในช่วง 9.7 GHz

ปัญหาจากการสร้างและทดลอง

1. ขาดเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสร้างทำให้เกิดผลกระทบต่อขั้นตอนการสร้างท่อนำคลื่นตามรูปแบบต่างๆที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งเป็นผลให้เกิดความล่าช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ท่อนำคลื่นที่สร้างเสร็จมีรอยต่อ ทั้งแบบเหลี่ยมเดียวและแบบสองเหลี่ยม ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งรอยต่อจะส่งผลโดยตรงต่อผลที่ได้จากการวัด โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและจะส่งผลกระทบมากหากมีรอยต่อมาก ดังนั้นผลของการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นจะมีผลที่ไม่ดีตามไปด้วย
3. ในขั้นตอนการวัดผลโดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายของท่อนำคลื่นบางโครงสร้างมีปัญหาในการต่อเพื่อวัดผล และได้ใช้ข้อต่อมาเพิ่มซึ่งเป็นสายแบบเซมิริจิด(semi-rigid) โดยจะเกิดผลคือลดความแม่นยำของผลการทดลองที่วัดได้อันเนื่องมาจากการที่มีข้อต่อมากขึ้นและผลของสายที่ยาวเพิ่มขึ้น
4. ผลจากตัวกระตุ้นซึ่งจากการวัดคุณสมบัติของตัวกระตุ้นพบว่า มีผลที่ยอมรับได้ในระดับหนึ่งเท่านั้นซึ่งก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อผลการทดลองที่ได้จากการวัดท่อนำคลื่น โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
5. หน้าแปลนบางฉากในการเชื่อมต่อซึ่งต้องไม่ใช่รูปแบบของการเชื่อมต่อที่มีความร้อนสูงเกินไปเช่น การเชื่อมแก๊ส เพราะจะทำให้หน้าแปลนเกิดการโค้งงอ

แนวทางการพัฒนา

จากขั้นตอนการสร้างและการวัดผล โดยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายสิ่งหนึ่งที่มีผลกระทบอย่างมากต่อผลการทดลองที่ได้ซึ่งแสดงโดยอาศัย พารามิเตอร์ S คือ การที่โครงสร้างมีรอยต่อ ทั้งแบบเหลี่ยมเดียวและแบบสองเหลี่ยม ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก แนวทางการแก้ปัญหาทางหนึ่งคือในขั้นตอนการสร้างนั้นควรสร้างให้ได้ตามโครงสร้างโดยไร้รอยต่อ ผิวเรียบ และเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ได้ผลการทดลองที่ดีขึ้น แต่ในการสร้างในลักษณะนี้จำเป็นต้องมีทุนมาก เนื่องจากเราไม่มีเครื่องมือที่จะสนับสนุนการสร้างโครงสร้างเหล่านี้ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] N.Marcuvitz. **Waveguide Handbook**. McGraww-Hill,Inc. 1994.
- [2] Samuel Y. Liao. **Microwave Devices and Circuits**. Prentice-Hill,Inc.
- [3] Nigel J Cronin. **Microwave and Optical Waveguides**. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelpia.
- [4] K.C.Gupta, Ramesh Garg, and Rakesh Chadha. **Computer-Aided Design of Microwave Circuit**. Artech House. Inc.1981.
- [5] พิษณุ สุพรรณภูต. การวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายของท่อนำคลื่นและสายไมโคร-สตริปแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้วิธี FDTD. วิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้