สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องโดยวิธี ไฟไนท์-ดิฟเฟอร์เรนซ์ไทม์-โดเมน

Discontinuous Waveguide Analysis by the Finite-Difference Time-Domain Method

T037097

โดย

นายดุษฎี แต้มคุณ

นายชาย ไพรแก่น

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 37097
วัน, เดือน, ปี - 4 ก.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องโดยวิธี FD-TD Discontinuous Waveguide Analysis by the Finite-Difference Time-Domain Method
จัดทำโดย	นายดุษฎี แต้มคุณ นายชาย ไพรแก่น
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ อาจารย์พิชญ สุพรรณกูล
ภาควิชา	เทคนิคอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2542

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมบัณฑิต

คณะกรรมการคุมสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
( )
..... กรรมการ
( )
..... กรรมการ
( )
..... กรรมการ
( )
..... กรรมการ
( )

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องโดยวิธี FD-TD

โดย	นายดุษฎี	แต้มคุณ	รหัส 40013329
	นายชาย	ไพรแก่น	รหัส 40013354

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สถาพร	พรหมวงศ์
อาจารย์พิชญ	สุพรรณกูล

ระดับการศึกษา อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

ปีการศึกษา 2542

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่อง โดยใช้วิธี FD-TD ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ท่อนำคลื่น แบบทำมุมตั้งฉาก,แบบข้อต่อ T และแบบข้อต่อตัดขวาง โดยกำหนดคลื่นให้เป็นโหมด TM และทำการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ ในการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งได้ออกแบบโปรแกรมให้สามารถเลือกชนิดท่อนำคลื่นที่ต้องการวิเคราะห์ สามารถกำหนดขนาดความถี่ขนาดต่างๆ ของท่อนำคลื่น และจำนวนชั้นเวลาได้ หลังจากนั้นจะแสดงกราฟของการแพร่กระจายของสนามโดยสามารถเลือกชนิดของสนามได้ว่าจะเป็นการแพร่กระจายของสนาม E_z, H_x และ H_y กราฟจะเป็นภาพเคลื่อนไหว 3 มิติ โดยมีแต่ละเฟรมเท่ากับ 10 ขั้นเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis of Discontinuous Waveguide Using the Finite Difference Time-Domain Method

BY	MR. DUSADEE	TAMKUN	CODE 40013329
	MR. CHAI	PRIGAN	CODE 40013354

ADVISER

	MR. SATHAPORN	PROMWONG
	MR. PICHAYA	SUPANAKOON

LEVEL OF STUDY Bachelor Degree Industrial Telecommunication

ACADEMIC YEAR 1999

ABSTRACT

This thesis tends to analysis Discontinuous Waveguide by the Finite-Difference Time-Domain Method (FD-TD) that used Cross-Junction Waveguide, T-Junction Waveguide and Bend-Junction Waveguide to setup the channel to TM Mode and analysis 2 dimension, Matlab is need to analyze a program that can be chosen to work with waveguide. This method can decide the suitable frequency size of another type of waveguide and time step. Then the method will show a graph of propagation by selecting the propagation of scatter field of E_z, H_x and H_y. The graph will demonstrate animation of 3 dimension which each frame contains 10-time step.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเกิดจากความร่วมมือร่วมใจของคณะผู้จัดทำโดยได้รับความช่วยเหลือทางด้านข้อมูลต่างๆและคำแนะนำต่างๆ จากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ คือ อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์, อาจารย์พิชญ สุพรรณกูล, อาจารย์มนต์ชัย แช่มช้อย รุ่นพี่ปริญญาโท ซึ่งได้ให้คำแนะนำ, ข้อมูล, สถานที่ในการทำโครงงานและสนับสนุนอุปกรณ์ในการทำโครงงานนี้ ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณภาควิชาเทคนิคอุตสหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคณะอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาให้ความต่างความรู้ต่างๆ จนสามารถทำโครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำที่มาและความสำคัญของการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่อง	2
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.5 รายละเอียดและขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีท่อนำคลื่น	5
2.1 กล่าวนำที่มาและความสำคัญของการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่อง	5
2.1.1 กฎของฟาราเดย์	5
2.1.2 กระแสกระจัด	8
2.1.3 สมการของแมกซ์เวลล์	10
2.2 คลื่นระนาบในตัวกลางไดอิเล็กตริก	11
2.2.1 คลื่นระนาบและสมการคลื่น	11
2.2.2 โซลูชั่นของสมการคลื่น	16
2.2.3 ตารางโซลูชั่นของสมการคลื่น	22
2.2.4 ความเร็วเฟส	21
2.2.5 ดัชนีของการหักเห	24
2.2.6 ความเร็วกรุ๊พ	25
2.3 ท่อนำคลื่นวิเคราะห์โดยสมการของแมกซ์เวลล์	28
2.3.1 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง	29
บทที่ 3 ทฤษฎีของ FD-TD	47
3.1 ทฤษฎีของยี (Yee)	47
3.2 สมการไฟไนท์-ดิฟเฟอร์เรนท์	48
3.3 ความเสถียรภาพเชิงตัวเลข	51
3.3.1 การวิเคราะห์ความเสถียรภาพเชิงตัวเลขพื้นฐานของคลื่นโหมด TM	51
3.3.2 ค่าเจาะจงของเวลา	52
3.3.3 การแก้ปัญหาค่าเจาะจงในอวกาศ	54
3.3.4 กฎของความเป็นเสถียรภาพ	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 แบบจำลองของแหล่งกำเหนิดที่มีความต้านทาน 57
3.5 การวิเคราะห์สนามด้วยวิธี PML ABC 58
3.5.1 การวิเคราะห์กรณีของคลื่นโหมด TM ใน 2 มิติ 58
3.5.2 เงื่อนไขของการสะท้อนและการแมทชิ่ง 60
3.5.3 ขั้นเวลาเอ็กโพเนนเชียล 62
บทที่ 4 การวิเคราะห์และการออกแบบ 64
4.1 เมนูหลัก 64
4.1.1 การอ่านข้อมูลในส่วนรายชื่อของการวิเคราะห์ 64
4.1.2 การอ่านในส่วนของข้อมูล 65
4.1.3 ส่วนของข้อมูล 66
4.2 ส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่า 66
4.2.1 แบบ Bends Waveguide 67
4.2.2 แบบ T-Junction Waveguide 68
4.2.3 แบบ Cross-Junction Waveguide 69
4.3 ส่วนของการวิเคราะห์ป้อนค่าและแสดงผล 70
4.3.1 แบบ Bends-Junction Waveguide 70
4.3.2 แบบ T-Junction Waveguide 71
4.3.3 แบบ Cross-Junction Waveguide 72
บทที่ 5 ผลที่ได้จากการออกแบบและการวิเคราะห์ 73
5.1 ผลที่ได้จากการป้อนค่าของ Bends Waveguide 73
5.2 ผลที่ได้จาการป้อนค่าของ T-Junction Waveguide 75
5.3 ผลที่ได้จากการป้อนค่าของ Cross-Junction Waveguide 77
บทที่ 6 สรุปผลที่ได้จากการออกแบบและการวิเคราะห์ 79
6.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ข้อ 79
6.2 สรุปผลการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องด้วยวิธี FD-TD 79
ภาคผนวก
หนังสืออ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์ 3

รูปที่ 2.1 คลื่นระนาบที่เดินทางออกจากหน้ากระดาษ 12

รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของสนามต่างๆ ของคลื่นระนาบที่สัมพันธ์กับระบบพิกัด 13

รูปที่ 2.3 เส้นกราฟสำหรับ $E_y = \sin(\beta x + \omega t)$ ที่เวลาต่างๆ กัน 3 ค่าคือ $t = 0, t = T/4$ และ $t = T/2$ จุดเฟสคงที่ ρ จะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายมือในขณะที่เวลาเพิ่มมากขึ้น 17

รูปที่ 2.4 เส้นกราฟสำหรับ $E_y = \sin(\beta x - \omega t)$ ที่เวลาต่างๆ กัน 3 ค่าคือ $t = 0, t = T/4$ และ $t = T/2$ จุดเฟสคงที่ ρ จะเคลื่อนที่ไปทางขวามือในขณะที่เวลาเพิ่มมากขึ้น 18

รูปที่ 2.5 รูปแบบต่างๆของนิพจน์ของคลื่นที่เวลา t=0 20

รูปที่ 2.6 จุดเฟสคงที่ p ของคลื่นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฟส v ในขณะที่จุด P' ของ Envelop จะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วกรุ๊พจะเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วเฟส 27

รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของสนามต่างๆ ของคลื่น TEM โหมดที่สัมพันธ์กับระบบพิกัด 28

รูปที่ 2.8 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวงและระบบพิกัดที่สัมพันธ์กัน 29

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของสายส่งและท่อนำคลื่นแบบต่างๆ 30

รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของสนามต่างๆ สำหรับคลื่น TE_{10} และ TE_{20} โหมด 40

รูปที่ 2.11 ลักษณะการกระจายของสนามต่างๆ สำหรับคลื่น TE_{10} โหมด 40

รูปที่ 2.12 อัตราส่วนของความเร็วเฟส $\frac{v}{v_o}$ หรืออัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ตามขวาง $\frac{Z_{ye}}{Z_d}$ ในรูปของฟังก์ชันของความยาวคลื่น λ_o 43

รูปที่ 2.13 คลื่น TE และ TM โหมดต่างๆ ที่มีได้ในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง ในรูปฟังก์ชันของความถี่ ที่ความถี่ 45

รูปที่ 3.1 รูปแสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามทฤษฎีของ ยี 47

รูปที่ 3.2 รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามเวลา 48

รูปที่ 3.3 แหล่งกำเนิดของ FD-TD กับแหล่งกำเนิดที่มีความต้านทาน R_s 57

รูปที่ 3.4 รูปโครงสร้างของ FD-TD กริด ใน 2 มิติ ที่มีค่าความสูญเสียของ PML ABC 61

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างและออกแบบ 64

รูปที่ 4.2 แสดงหน้าต่างของส่วนเมนูหลัก 65

รูปที่ 4.3 แสดงหน้าต่างส่วนของข้อมูล 66

รูปที่ 4.4 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ Bends Waveguide 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ T-Junction Waveguide 68
รูปที่ 4.6 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ Cross-Junction Waveguide 69
รูปที่ 4.7 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ
Bends-Junction Waveguide 70
รูปที่ 4.8 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์ ป้อนค่าและแสดงผลของ
T-Junction Waveguide 71
รูปที่ 4.9 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์ ป้อนค่าและแสดงผลของ Cross-Junction
Waveguide 72
รูปที่ 5.1 แสดงสนาม E_z ที่ความถี่ 10 GHz Bends Waveguide 73
รูปที่ 5.2 แสดงสนาม H_x ที่ความถี่ 10 GHz Bends Waveguide 74
รูปที่ 5.3 แสดงสนาม H_y ที่ความถี่ 10 GHz Bends Waveguide 74
รูปที่ 5.4 แสดงสนาม E_z ที่ความถี่ 10 GHz T-Junction Waveguide 75
รูปที่ 5.5 แสดงสนาม H_x ที่ความถี่ 10 GHz T-Junction Waveguide 76
รูปที่ 5.6 แสดงสนาม H_y ที่ความถี่ 10 GHz T-Junction Waveguide 76
รูปที่ 5.7 แสดงสนาม E_z ที่ความถี่ 10 GHz Cross-Junction Waveguide 77
รูปที่ 5.8 แสดงสนาม H_x ที่ความถี่ 10 GHz Cross-Junction Waveguide 78
รูปที่ 5.9 แสดงสนาม H_y ที่ความถี่ 10 GHz Cross-Junction Waveguide 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 กล่าวนำที่มาและความสำคัญของการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องด้วยวิธี FD-TD

ปัจจุบันตัวกลางที่ใช้ในการส่งข้อมูลข่าวสารมีคุณสมบัติความจุสูง เพื่อที่จะให้สามารถส่งข้อมูลข่าวสารได้มากขึ้น โดยตัวกลางได้ถูกพัฒนาจากสาย Coaxial Cable ท่อนำคลื่นและเส้นใยแก้วนำแสง ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมกลวงจะใช้วิธีของแมกซ์เวลล์วิเคราะห์ได้โดยตรง แต่ในปัจจุบันมีความก้าวหน้ามากขึ้น ทำให้ท่อนำคลื่นมีหลายลักษณะ ดังนั้นหากใช้วิธีของแมกซ์เวลล์วิเคราะห์ได้โดยตรง แต่ในปัจจุบันมีความก้าวหน้ามากขึ้น ทำให้ท่อนำคลื่นมีหลายลักษณะ ดังนั้นหากใช้วิธีของแมกซ์เวลล์มาวิเคราะห์จะทำให้ยุ่งยากและเสียเวลามาก ดังนั้นในปริญญานิพนธ์นี้จึงใช้วิธีการของ FD-TD ช่วยในการวิเคราะห์ เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้วิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทำการวิเคราะห์ในโดเมนของเวลา สามารถวิเคราะห์ได้ง่าย รวดเร็ว มีความเที่ยงตรงสูง

ตัวอย่างของการใช้งานของวิธี FD-TD คือนำไปใช้ในทางทหารจะใช้วิเคราะห์การแพร่กระจายของสนามที่พื้นผิวของเครื่องบินสอดแนม ช่วยในการดูการดูดกลืน (Absorb) ว่ามากน้อยเท่าใด เพื่อช่วยในการออกแบบวัสดุให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพเพื่อช่วยในการออกแบบวัสดุให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ เพื่อช่วยใช้ในการหลบหลีกการตรวจจับของเรดาร์

การนำไปใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์เพื่อทำแบบจำลองของร่างกายตรงส่วนที่มีเนื้อของมะเร็ง ซึ่งจะช่วยบอกได้ว่า การรักษาด้วยรังสีนั้นจะต้องใช้ความเข้มขนาดเท่าใด เพื่อทำลายเนื้อมะเร็ง แต่ทำลายเนื้อในส่วนที่ดีให้น้อยที่สุด

การนำไปใช้ในการคำนวณคลื่นนิ่งสนามไฟฟ้าของสายตาที่เยื่อภายในลูกตา (Retina rod) สำหรับคลื่นตามขวาง TM ให้แสงสว่างการตกของแสงบนกระจกตา มีความยาวคลื่น 475 nm เป็นสีน้ำเงิน ความยาวคลื่น 505 nm เป็นสีเขียว และความยาวคลื่น 714 nm เป็นสีแดง ค่าของสีแดงสูงสุด สีเหลืองเท่ากับระดับสายตาที่สูงกว่าการตกของแสงบนกระจก สีเขียวใกล้กับการตกของแสงบนกระจกตา สีน้ำเงินต่ำกว่า และสีขาวน้อยที่สุด

และการนำไปใช้ที่พื้นผิวของ Gysel microwave power divider จุดศูนย์กลางความถี่คือ 34 GHz การกระตุ้นสัญญาณเป็นแบบ Gaussian Voltage pulse การคำนวณจะใช้วิธีการของ ยี เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาลักษณะการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้วิธี FD-TD
2. เพื่อศึกษาลักษณะการสะท้อน และการลดทอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในท่อนำคลื่น
3. เพื่อศึกษาลักษณะของคลื่นแม่เล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายที่ความถี่แตกต่างกันตามขั้นเวลาที่กำหนดต่างกัน

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ทำการวิเคราะห์การแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแบบทำมุมตั้งฉาก, แบบข้อต่อ T และแบบข้อต่อตัดขวาง การวิเคราะห์สามารถที่จะกำหนดขนาดของความถี่ ลักษณะและขนาดของท่อนำคลื่น ขั้นเวลาในการแสดงผล สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าที่ต้องการแสดงผล โดยผลที่ได้จะเป็นภาพเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ
2. ทำการวิเคราะห์การแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นโดยใช้โปรแกรม Matlab ช่วยในการวิเคราะห์

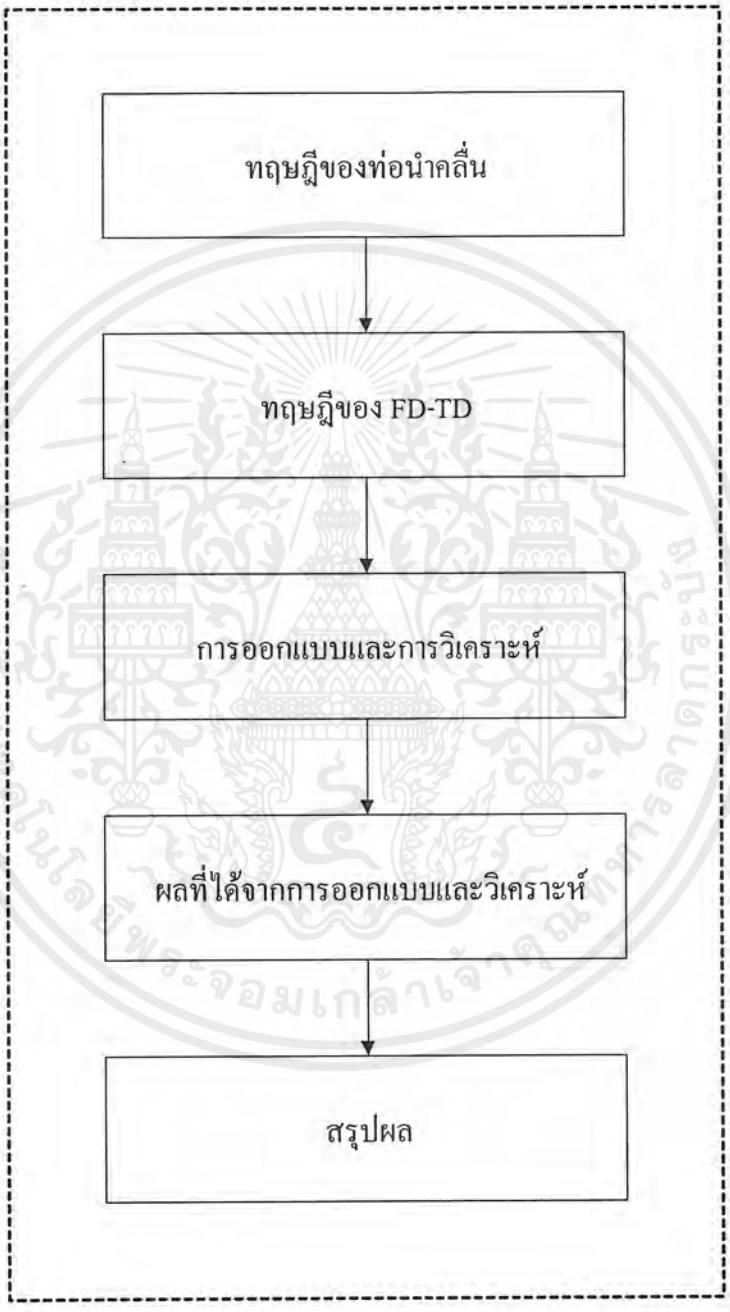
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้รับความรู้จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นแบบทำมุมตั้งฉาก, แบบข้อต่อ T และแบบข้อต่อตัดขวาง
2. ได้เข้าใจลักษณะการแพร่กระจายโดยเห็นเป็นนามธรรมเนื่องจากแสดงผลเป็นภาพเคลื่อนไหว 3 มิติ
3. ได้รับความรู้จากการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ
4. ใช้เป็นแบบจำลองในการศึกษาเรื่องของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
5. ได้รับความรู้ในการใช้งานของโปรแกรม Matlab
6. เพื่อใช้ในการพัฒนาให้ออกแบบสร้างท่อนำคลื่นเพื่อใช้ในงานจริงได้ ถ้ามีการวิเคราะห์ในแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 รายละเอียดและขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์

ในการทำปริญญานิพนธ์นี้ได้มีการศึกษา วางแผน และมีการทำงานตามขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาทฤษฎีจะมีสองส่วนคือส่วนแรกจะอยู่ในบทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีของท่อนำคลื่นพื้นฐาน สมการของแมกซ์เวลล์ การใช้สมการของแมกซ์เวลล์ เพื่อหาโหมดของคลื่น สมการของคลื่นที่เคลื่อนที่ ส่วนที่สองจะอยู่ในบทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีของการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นด้วยวิธีของ FD-TD ทฤษฎีของยี สมการ Finite และสมการ Difference ความเสถียรเชิงตัวเลข แบบจำลองแหล่งกำเหนิดที่มีความต้านทาน และการวิเคราะห์โดยวิธี ABC PML

การออกแบบและการวิเคราะห์ จะอยู่ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการใช้โปรแกรม Matlab ช่วยในการวิเคราะห์โดยจะทำเป็นลักษณะของการเลือกเป็นเมนู จะมีท่อนำคลื่นให้เลือกป้อนขนาดของท่อนำคลื่น ความถี่ใช้งาน ขั้นเวลาที่ใช้ สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าที่ต้องการให้แสดงผล

ผลที่ได้จากการออกแบบและการวิเคราะห์จะอยู่ในบทที่ 5 จะแสดงผลของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าที่ได้ตามที่ได้เลือกไว้ และวิเคราะห์ผลที่ได้

สรุปผลที่ได้จากการออกแบบ และการวิเคราะห์ จะอยู่ในบทที่ 6 จะสรุปผลของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่2
ทฤษฎีของท่อนำคลื่น

2.1 สนามที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาและสมการของแมกซ์เวลล์

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไปตามเวลา การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าต่อเวลาจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อเวลาจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น และจะเป็นเช่นนี้ต่อเนื่องไปตลอดเวลาที่คลื่นเดินทางไป แบบแรกค้นพบจากการทดลองของไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ส่วนแบบหลังเป็นผลการศึกษาทางทฤษฎีของ เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) และเป็นผู้รวมความสัมพันธ์เข้าด้วยกัน เป็นสมการพื้นฐานสำหรับทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า 4 สมการ เรียกสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation)

2.1.1 กฎของฟาราเดย์

กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) กล่าวว่า "สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force : emf) ซึ่งทำให้เกิดกระแสไหลในวงปิดที่เหมาะสมแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะเป็นศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากการที่ตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อเวลาก็ได้"

กฎของฟาราเดย์เขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$emf = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \text{(v)} \qquad (2.1)$$

สมการ (2.1) จะใช้ได้กับวงจรปิดเท่านั้น ส่วน $\frac{d\Phi}{dt}$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของฟลักซ์ (flux) หรือเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านพื้นผิวซึ่งเส้นรอบรูปจะต้องเป็นวงปิด เครื่องหมายลบ (-) สำหรับ emf ที่ทำให้เกิดกระแสซึ่งทำให้เกิดฟลักซ์ขึ้น ฟลักซ์นี้เมื่อรวมกับฟลักซ์เดิมแล้วจะทำให้ขนาดของ emf ลดลง ฟลักซ์ ที่มีทิศทางตรงข้ามนี้เป็นไปตามกฎของ เลนซ์ (Lens's Law)

ถ้าเส้นวงปิดเป็นขดลวดตัวนำที่มีจำนวนรอบ N รอบ ถือว่าทุกรอบทับกันพอดีและให้

$$emf = -N\frac{d\Phi}{dt} \qquad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Φ จะเป็นฟลักซ์ที่ตัดผ่านขดลวดแต่ละขด *emf* เป็นศักดาไฟฟ้าซึ่งเป็นค่าสเกลาร์มีหน่วยเป็นโวลท์

นิยามของ *emf* ได้จากการอินทิกรัลเชิงเส้นของสนามไฟฟ้าดังนี้

$$emf = \oint \bar{E} \cdot d\bar{L} \tag{2.3}$$

เมื่อ $\bar{E}$ เป็นความเข้มสนามไฟฟ้า *emf* ในสมการ (2.3) จะต้องเป็นศักดาไฟฟ้าในวงจรปิด แทนค่า Φ ในสมการ (2.1) ด้วยอินทิกรัลเชิงผิวของ $\bar{B}$ คือ $emf = \oint \bar{B} \cdot d\bar{S}$ เมื่อ $\bar{B}$ เป็นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะได้คือ

$$\oint \bar{E} \cdot d\bar{L} = -\frac{d}{dt} \int \bar{B} \cdot d\bar{S} \tag{2.4}$$

เราจะแบ่งการพิจารณา *emf* ออกเป็น 2 กรณีคือ

1) กรณีของ *emf* ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายในวงจรปิดที่อยู่กับที่เรียกว่า ทรานส์ฟอร์เมอร์ (transformer emf)
2) กรณีของ กรณีของ *emf* ที่เกิดจาก ที่เกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของวงจรปิดในสนามแม่เหล็กที่คงที่เรียกว่า โมชันแนล หรือเจเนอเรเตอร์ *emf* (motional or generator *emf*) ในกรณีแรกตัวที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาคือฟลักซ์เท่านั้น สามารถหาสมการได้ดังนี้คือ

$$emf = \oint \bar{E} \cdot d\bar{L} = -\int \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot d\bar{S} \tag{2.5}$$

เมื่อใช้ทฤษฎีของสโตกส์ (Stoke's theorem) จะได้

$$\oint \bar{E} \cdot d\bar{L} = \int (\nabla \times \bar{E}) \cdot d\bar{S} = -\int \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot d\bar{S}$$

นั่นคือจะได้

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \tag{2.6}$$

สมการที่ (2.6) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อเวลาจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ถ้า $\bar{B}$ ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้สมการ (2.5) และ (2.6) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\oint \bar{E} \cdot d\bar{L} = 0 \quad \text{และ} \quad \nabla \times \bar{E} = 0$$

ซึ่งจะตรงกับกรณีของไฟฟ้าสถิต

พิจารณากรณีของวงจรปิดเคลื่อนที่ในฟลักซ์ที่คงที่ด้วยความเร็ว $\bar{v}$ แนวคิดเกี่ยวกับโมชันแนล *emf* โดยพิจารณาแรงที่กระทำบนประจุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $\bar{v}$ ในสนามแม่เหล็ก $\bar{B}$ จะได้ว่า

$$\bar{F} = Q\bar{v} \times \bar{B}$$

หรือเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{\bar{F}}{Q} = \bar{v} \times \bar{B} \tag{2.7}$$

แรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยประจุในสมการ (2.7) เรียกว่าความเข้มสนามไฟฟ้าโมชันแนล (motional field intensity) ใช้ตัวย่อว่า $\bar{E}_m$ จะได้

$$\bar{E}_m = \bar{v} \times \bar{B} \tag{2.8}$$

และโมชันแนล *emf* ที่ถูกสร้างโดยตัวนำที่เคลื่อนที่จะเท่ากับ

$$emf = \oint \bar{E}_m \cdot d\bar{L} = \oint (\bar{v} \times \bar{B}) \cdot d\bar{L} \tag{2.9}$$

หาค่าจากสมการทางขวามือของสมการ (2.9) โดยการอินทิเกรตจะได้

$$\oint (\bar{v} \times \bar{B}) \cdot d\bar{L} = \int_d^0 vB dx = -Bvd$$

ซึ่งจะเท่ากับ *emf* ทั้งหมดที่เกิดขึ้นสำหรับกรณีที่ $\bar{B}$ ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา

ถ้าความหนาแน่นของฟลักซ์เปลี่ยนแปลงกับเวลา เราสามารถสรุปจากทั้งสองกรณี คือ ทรานส์ฟอร์เมอร์ *emf* จากสมการ (2.5) และโมชันแนล *emf* จากสมการ (2.9) ได้ *emf* รวมคือ

$$emf = \oint \bar{E} \cdot d\bar{L} = -\int \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot d\bar{S} + \oint (\bar{v} \times \bar{B}) \cdot d\bar{L} \tag{2.10}$$

ซึ่งมีค่าสมมูลกับสมการ (2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กระแสการกระจัด

พิจารณาสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา จากกฎของแอมแปร์ในสนามแม่เหล็กสถิตจะได้ว่า

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \tag{2.11}$$

เมื่อ $\bar{H}$ เป็นความเข้มสนามแม่เหล็ก และ $\bar{J}$ เป็นความหนาแน่นกระแส ถ้าหาไดเวอร์เจนซ์ (divergence) ของค่าทั้งสองข้างของสมการ (2.11) จะได้

$$\nabla \cdot \nabla \times \bar{H} = 0 = \nabla \bar{J}$$

จากสมการของความต่อเนื่อง (equation of continuity) คือ

$$\nabla \cdot \bar{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตร สำหรับสนามที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาต้องเพิ่มตัวแปลที่ไม่รู้ค่า (Unknown) ตัวหนึ่งคือ $\bar{G}$ เข้าไปในสมการ (2.11) คือ

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \bar{G}$$

หาไดเวอร์เจนซ์จะได้

$$\nabla \cdot \nabla \times \bar{H} = 0 = \nabla \cdot \bar{J} + \nabla \cdot \bar{G}$$

$$\nabla \cdot \bar{G} = -\nabla \cdot \bar{J}$$

แทนค่า ρ ด้วย $\nabla \cdot \bar{D}$ เมื่อ $\bar{D}$ เป็นความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า จะได้

$$\nabla \cdot \bar{G} = \frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \bar{D}) = \nabla \cdot \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

$$\bar{G} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

ดังนั้นสมการสำหรับสนามที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา กฎวงจรของแอมแปร์จะได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \qquad (2.12)$$

สมการนี้หมายความว่า สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นได้ $\partial \bar{D}/\partial t$ มีหน่วยของความหนาแน่นกระแส คือ Am^{-2} และจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้ากับเวลา แมกซ์เวลล์จึงเรียกเทอมนี้ว่าเป็นความหนาแน่นกระแสกระจัด (Displacement current density) และใช้สัญลักษณ์ว่า $\bar{J}_d$ ดังนั้น

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \bar{J}_d \text{ เมื่อ } \bar{J}_d + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

$\bar{J}_d$ เป็นความหนาแน่นกระแสชนิดที่ 3 โดยที่ชนิดแรกคือความหนาแน่นกระแสคอนดัคชัน (Conduction Current Density) มีค่าเป็น

$$\bar{J}_d = \sigma \bar{E}$$

เมื่อ σ เป็นค่าความนำไฟฟ้าและชนิดที่สองคือความหนาแน่นกระแสคอนเวคชัน (Convection Current Density) ซึ่งมีค่าเป็น

$$\bar{J} = \rho \vec{v}$$

กระแสทั้งสองเกิดจากการเคลื่อนที่ประจุเชิงปริมาตร และจะแทนด้วย $\bar{J}$ ในสมการที่ (2.12) ในตัวกลางที่ไม่ใช่ตัวนำ ความหนาแน่นประจุเชิงปริมาตรจะเป็นศูนย์ นั่นคือ $\bar{J} = 0$ ดังนั้นในกรณีนี้

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

ซึ่งจะเห็นว่ามีรูปคล้ายสมการที่ (2.6) คือ

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

โดยการอินทิเกรตสมการ (2.12) บนพื้นที่ S ดังนี้

$$\iint \left(\nabla \times \bar{H}\right) \cdot d\bar{S} = \int \bar{J} \cdot d\bar{S} + \int \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \cdot d\bar{S}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และใช้ทฤษฎีของสโตกส์ จะได้กฎวงจรของแอมแปร์ในรูปสมการอินทิกรัลเป็น

$$\oint \bar{H} \cdot d\bar{L} = I + I_d \qquad (\text{เนื่องจาก } \bar{J}_d = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}) \tag{2.13}$$

ในสมการ (2.13) I_d จะเป็นกระแสกระจัด (Displacement Current)

2.1.3 สมการของแมกซ์เวลล์

สมการของแมกซ์เวลล์สำหรับสนามที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาคือ

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \tag{2.14}$$

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \tag{2.15}$$

อีก 2 สมการจะเหมือนกับในกรณีของสนามสถิต นั่นคือ

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \tag{2.16}$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \tag{2.17}$$

สมการทั้ง 4 เป็นสมการพื้นฐานสำหรับทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก และกับแหล่งกำเนิดความหนาแน่นประจุและกับความหนาแน่นกระแส

นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ระหว่าง $\bar{D}$ กับ $\bar{E}$ และ $\bar{B}$ กับ $\bar{H}$ อีกสองสมการคือ

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} \tag{2.18}$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \tag{2.19}$$

เมื่อ ε และ μ เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และค่าเพอร์มีบิลิตี (Permeability) ของตัวกลาง ตามลำดับ สมการ (2.18) และ (2.19) เมื่อแทนค่าลงในสมการทั้งสี่ของแมกซ์เวลล์ จะช่วยให้สามารถคำนวณหาค่าสนามใดๆ ได้ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของแมกซ์เวลล์ข้างบนอยู่ในรูปสมการแบบจุด นอกจากนี้สมการของแมกซ์เวลล์สามารถเขียนในรูปของอินทิกรัล ดังนี้คือ

$$\oint \bar{E} \cdot d\bar{L} = -\int \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \cdot d\bar{S} \tag{2.20}$$

$$\oint \bar{H} \cdot d\bar{L} = I + \int \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \cdot d\bar{S} \tag{2.21}$$

$$\oint \bar{D} \cdot d\bar{S} = \int \rho dv \tag{2.22}$$

$$\oint \bar{B} \cdot d\bar{S} = 0 \tag{2.23}$$

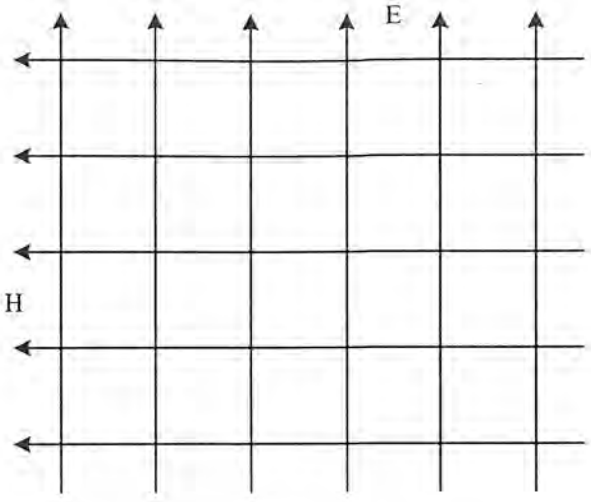
2.2 คลื่นระนาบในตัวกลางไดอิเล็กทริก

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กโดยอาศัยกรณีของการเดินทางหรือการแพร่ (Propagate) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางซึ่งเป็นสุญญากาศเป็นตัวอย่างในคลื่นชนิดนี้ การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กต่อเวลาจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาขึ้นและการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าต่อเวลานี้ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นอีกเป็นเช่นนี้ต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆ ดังนั้นพลังงานจึงสามารถแพร่ไปในสุญญากาศได้ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง

2.2.1 คลื่นระนาบและสมการคลื่น

คลื่นระนาบประกอบด้วยสนามไฟฟ้า $\bar{E}$ และสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ ซึ่งตั้งฉากกันและตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจายของคลื่น เส้นแรงของสนามจะแสดงได้ดังรูปที่ (2.2) ทิศทางของสนามไฟฟ้า $\bar{E}$ และสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ จะตั้งฉากซึ่งกันและกันทุกหนทุกแห่ง ในคลื่นระนาบที่เป็นแบบเอกรูป (uniform) สนาม $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ จะวางตัวอยู่ในระนาบเดียวกัน และมีค่าเท่ากันที่ทุกตำแหน่งในระนาบนั้น คลื่นที่มีระนาบ $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ ตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของคลื่นเรียกว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electromagnetic Wave) หรือคลื่น TEM สมการคลื่น (Wave equation) สำหรับคลื่นระนาบสามารถหาได้จากสมการของแมกซ์เวลล์ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 คลื่นระนาบที่เดินทางออกจากหน้ากระดาษ

พิจารณาจากรูปที่ (2.2) สมมติว่าระนาบคลื่นหนึ่งกำลังเดินทางไปในทิศทางของแกน x สนามไฟฟ้า $\bar{E}$ มีเพียงองค์ประกอบเดียวคือ E_y อยู่ในทิศ y และสนามแม่เหล็ก $\bar{H}$ มีองค์ประกอบเดียวคือ H_z อยู่ในทิศ z กล่าวได้ว่าคลื่นนี้ถูกโพลาไรซ์ในทิศ y

เนื่องจากพิจารณาคลื่นในตัวกลางที่ไม่เป็นตัวนำ ค่าของความหนาแน่นของกระแสคอนดัคชัน $\bar{J}$ จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการของแมกซ์เวลล์ที่ได้จากกฎของแอมแปร์จะลดรูปลงเหลือเป็น

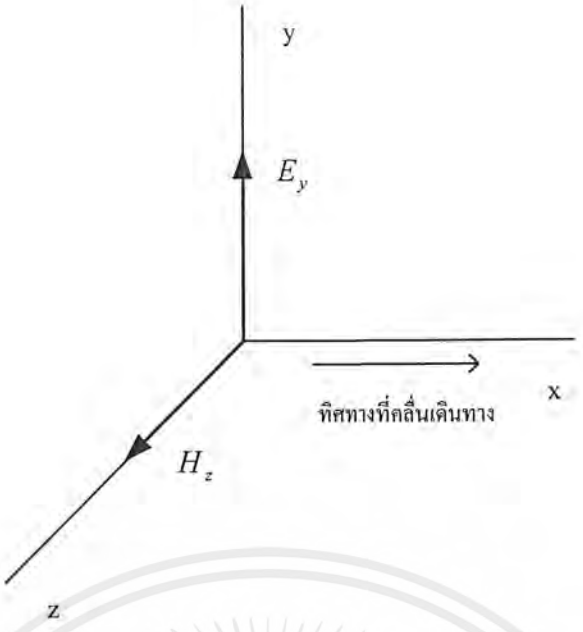
$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

หรือในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน จะได้เป็น

$$\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right)\bar{a}_x + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right)\bar{a}_y + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right)\bar{a}_z = \frac{\partial}{\partial t}\left(D_x\bar{a}_x + D_y\bar{a}_y + D_z\bar{a}_z\right)$$

(2.24)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของสนามต่างๆ ของคลื่นระนาบที่สัมพันธ์กับระบบพิกัด

สำหรับคลื่นระนาบที่เดินทางในทิศ x และไม่มีการเปลี่ยนแปลงของคลื่นในทิศ y และ z (ค่าของอนุพันธ์เทียบกับ y และ z จะเป็นศูนย์คือ $\partial/\partial y = \partial/\partial z = 0$) เราจะพบองค์ของสนามในสมการ (2.25) ที่ประกอบเป็นคลื่นคือ

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x}\bar{a}_y = \frac{\partial D_y}{\partial t}\bar{a}_y$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon\frac{\partial E_y}{\partial t} \qquad \left(\because D_y = \varepsilon E_y\right) \qquad (2.25)$$

สมการของแมกซ์เวลล์ที่ได้จากกฎของฟาราเดย์ คือ

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

หรือในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนจะได้เป็น

$$\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)\bar{a}_x + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right)\bar{a}_y + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)\bar{a}_z = -\frac{\partial}{\partial t}\left(B_x\bar{a}_x + B_y\bar{a}_y + B_z\bar{a}_z\right)$$

(2.26)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับคลื่นระนาบที่เดินทางในทิศ x เมื่อแทนค่า $\partial/\partial y = \partial/\partial z = 0$ จะมีองค์ประกอบของสนามในสมการ (2.26) ที่ประกอบเป็นคลื่นนี้ คือ

$$\frac{\partial E_y}{\partial x}\bar{a}_z = -\frac{\partial B_z}{\partial t}\bar{a}_z$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu\frac{\partial H_z}{\partial t} \qquad \left(\because B_z = \mu H_z\right) \qquad (2.27)$$

สมการที่ (2.25) จะแสดงความสัมพันธ์ของค่าอนุพันธ์ของ H_z ต่อระยะทางกับค่าอนุพันธ์ของ E_y ต่อเวลาในขณะเดียวกันสมการที่ (2.27) ก็แสดงความสัมพันธ์ของค่าอนุพันธ์ของ E_y ต่อระยะทางกับค่าอนุพันธ์ของ H_z ต่อเวลา ถ้าเราหาอนุพันธ์ของสมการที่ (2.25) เทียบกับเวลา t และอนุพันธ์ของสมการที่ (2.27) เทียบกับระยะทาง x เราสามารถกำจัดเทอมของ H_z ให้หมดไปได้ และจะได้สมการสำหรับ E_y ในเทอมของ t และ x ตามขั้นตอนข้างบน เราจะได้สมการที่ (2.25) ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial H_z}{\partial x}\right) = -\varepsilon\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \qquad (2.28)$$

และจากสมการที่ (2.27) ดังนี้

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = -\mu\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial H_z}{\partial t}\right) \qquad (2.29)$$

หารตลอดสมการที่ (2.29) ด้วย $-\mu$ จะได้

$$-\frac{1}{\mu}\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial H_z}{\partial t}\right) \qquad (2.30)$$

จะได้ว่านิพจน์ทางซ้ายมือของสมการ (2.28) จะเท่ากับนิพจน์ทางขวามือของสมการ (2.30) และจะได้ต่อไปคือ

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} \qquad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.31) แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงต่อระยะทางและเวลาของขนาดสเกลาร์ E_y ของความเข้มสนามไฟฟ้า และจะเรียกว่าเป็น " สมการคลื่น " ในเทอมของ E_y ซึ่งคือรูปแบบที่ง่ายที่สุดของสมการคลื่นแบบสเกลาร์

ถ้าหาอนุพันธ์ของสมการ (2.25) เทียบกับ x และสมการที่ (2.27) เทียบกับ t เราสามารถจะกำจัดเทอมของ E_y ให้หมดไปได้ และจะได้สมการคลื่นในรูปเทอมของ H_z ดังนี้

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} \tag{2.32}$$

ทั้งสมการที่ (2.31) และ (2.32) จะอยู่ในรูปแบบเดียวกัน เรียกสมการของ D'Alembert ถ้า E_y ในสมการ (2.31) เป็นทิศทางการเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางตามขวาง สมการนั้นสามารถแทนสมการของการเคลื่อนที่ของการกระเพื่อมบนเส้นเชือกที่ขึงตึงได้ และถ้า E_y เป็นการบีบเค้นทางกล (Mechanical Compression) สมการนั้นจะสามารถใช้เป็นสมการซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของการออสซิลเลตน้อยๆ ของอากาศภายในท่อแคบๆได้ จากที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น E_y จะแทนขนาดของสเกลาร์ของความเข้มสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบที่เดินทางไปในทิศทาง x และสมการนี้จะเป็นสมการทั่วไปที่สุดใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้านี้ในรูปของฟังก์ชันของเวลาและระยะทาง

อีกปริมาณคือ v ในสมการที่ (2.31) โดยที่

$$v^2 = \frac{1}{\mu\varepsilon} \tag{2.33}$$

สมการที่ (2.31) จะเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = v^2\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} \tag{2.34}$$

v เป็นหน่วยของความเร็ว ความเร็วนี้เป็นคุณสมบัติของตัวกลางขึ้นอยู่กับค่าคงที่ μ และ ε ของตัวกลาง สำหรับตัวกลางอิสระ (สูญญากาศ) v มีค่าประมาณ 300 Mms^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 โซลูชั่นของสมการคลื่น

สมการคลื่นในรูปของสมการ (2.34) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเชิงเส้นอันดับ 2 การที่จะประยุกต์ใช้สมการนี้ได้จะต้องโซลูชั่นสำหรับ E_y ก่อน เนื่องจากคลื่นโดยทั่วไปมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นคลื่นไซน์ (Sinusoidal) จะเลือกโซลูชั่นของสมการเป็นในรูปดังต่อไปนี้ คือ

$$E_y = \sin \beta(x + mt) \tag{2.35}$$

เมื่อ $\beta = 2\pi/\lambda =$ ค่าคงที่ของการแพร่ (Propagation constant)

$\lambda =$ ค่าความยาวคลื่น

m = ค่าคงที่ที่ต้องหา

t = เวลา

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.35) ในสมการที่ (2.34) แล้ว สมการที่ (2.35) จะเป็นโซลูชั่นได้ก็ต่อเมื่อ

$$m = \pm v \tag{2.36}$$

เมื่อ v คือความเร็ว ดังนั้นโซลูชั่นทั่วไปของสมการที่ (2.34) คือ

$$E_y = \sin \beta(x + vt) + \sin \beta(x - vt) \tag{2.37}$$

แต่เนื่องจาก $v = f\lambda$ จะได้ว่า

$$\beta v = \frac{2\pi}{\lambda} f\lambda = 2\pi f = \omega \tag{2.38}$$

เมื่อ ω คือความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) ดังสมการที่ (2.37) จะสามารถเขียนได้เป็น

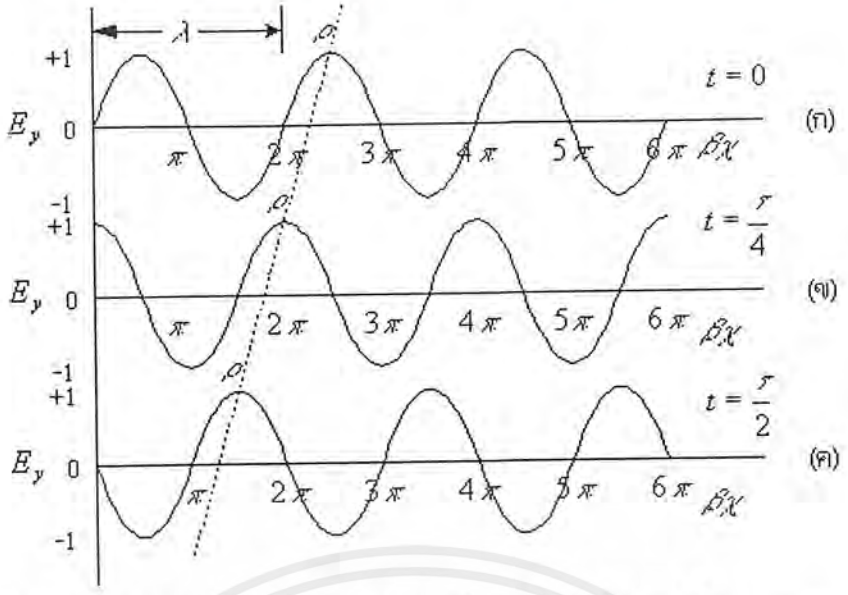
$$E_y = \sin(\beta x + vt) + \sin(\beta x - vt) \tag{2.39}$$

ถ้าเราสมมติว่านิพจน์แรกทางขวามือของสมการที่ (2.37) เพียงพจน์เดียวเป็นโซลูชั่น นั่นคือ

$$E_y = \sin(\beta x + vt) \tag{2.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.3 เส้นกราฟสำหรับ $E_y = \sin(\beta x + \omega t)$ ที่เวลาต่างๆ กัน 3 ค่าคือ $t = 0, t = T/4$ และ $t = T/2$ จุดเฟสคงที่ ρ จะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายมือในขณะที่เวลาเพิ่มมากขึ้น

ความหมายของสมการที่ (2.40) จะสามารถแสดงให้เห็นได้โดยการคำนวณหาค่าของ E_y ในรูปของฟังก์ชันของ x สำหรับค่าต่างๆ ของเวลา t แรกสุดจะให้ $t = 0$ ดังนั้น $E_y = \sin \beta x$ เส้นกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 (ก) ต่อไปพิจารณาที่เวลาผ่านไปเศษหนึ่งส่วนสี่ของคาบเวลา (period) นั่นคือเมื่อ $t = T/4$ เมื่อ T คือเวลาของหนึ่งคาบเวลาดังนั้น

$$\beta vt = \omega t = (2\pi f)t = \frac{2\pi}{T}t = \frac{2\pi}{T}\frac{T}{4} = \frac{\pi}{2}$$

เส้นกราฟสำหรับ $t = T/4$ หรือ $\omega t = \pi/2$ เรเดียน จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 (ข) ที่เวลาเศษหนึ่งส่วนสองของคาบเวลาต่อมาคือที่ $t = T/2$ และ $\omega t = \pi$ เรเดียน จะได้เส้นกราฟตามรูป 2.3 (ค) ส่วนยอดสุดของคลื่นลูกหนึ่งกำหนดด้วยจุด P เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จุด P จะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายมือ ดังนั้นจากรูปที่ 2.3 ความหมายของสมการที่ (2.40) คลื่นที่เดินทางไปทางซ้ายมือหรือในทิศทาง -x ค่าสูงสุดของ E_y สำหรับคลื่นนี้จะเท่ากับหนึ่ง

จุด P เป็นจุดเฟสคงที่ (Constant – Phasepoint) จะกำหนดลักษณะได้โดยเงื่อนไขดังนี้

$$x + vt = cons\tan t \qquad (2.41)$$

หาอนุพันธ์ของสมการที่ (2.41) เทียบกับเวลาจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
37097

$$\frac{dx}{dt} + v = 0$$

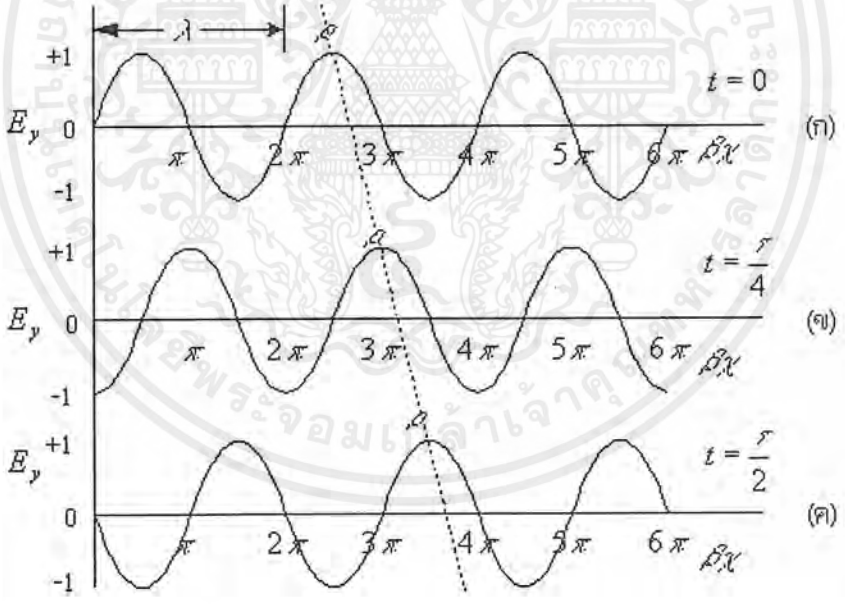
และ
$$\frac{dx}{dt} = -v \qquad (2.42)$$

สมการที่ (2.42), dx/dt เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะทางเทียบกับเวลาหรือจุดที่มีเฟสคงที่นั่นเอง ดังนั้น v จึงเป็นความเร็วของจุดเฟสคงที่ และจะเรียกว่าเป็นความเร็วเฟส (phase velocity) จากสมการข้างบน v มีค่าเป็นลบ นั่นคือคลื่นที่กำลังพิจารณาเดินทางไปในทิศทาง -x นั่นเอง

ต่อไปพิจารณานิพจน์สุดท้ายทางขวามือของสมการที่ (2.37) เป็นโซลูชันเพียงพจน์เดียวบ้าง

$$E_y = \sin(\beta x - vt) = \sin(\beta x - \omega t) \qquad (2.43)$$

แทนค่าที่เวลาต่างๆสำหรับ $t = 0$, $t = T/4$ และ $t = T/2$ ในสมการที่ (2.43) จะได้เส้นกราฟดังในรูปที่ 2.4 โดยที่จุดเฟสคงที่ P จะเคลื่อนไปทางขวามือ ในขณะที่เวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นสมการที่ (2.43) จึงแทนคลื่นที่เดินทางในทิศทาง +x



รูปที่ 2.4 เส้นกราฟสำหรับ $E_y = \sin(\beta x - \omega t)$ ที่เวลาต่างๆ กัน 3 ค่าคือ $t = 0, t = T/4$ และ $t = T/2$ จุดเฟสคงที่ ρ จะเคลื่อนที่ไปทางขวามือในขณะที่เวลาเพิ่มมากขึ้น

ถ้าให้ $x - vt$ เท่ากับค่าคงที่และทำต่อไปในลักษณะเดียวกับที่ทำในสมการที่ (2.42) จะได้สำหรับกรณีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dx}{dt} = +v \tag{2.44}$$

นั่นคือคลื่นที่ด้วยความเร็ว v ไปในทิศทาง +x

สรุปได้ว่าเครื่องหมายในนิพจน์ $x \pm vt$ หรือในนิพจน์ $\beta x \pm \omega t$ จะใช้กับคลื่นที่เดินทางไปทางขวามือเคลื่องหมายบวกจะใช้กับคลื่นที่เดินทางไปทางซ้ายมือ ดังนั้นสมการที่ (2.37) หมายถึงคลื่นสองคลื่น คลื่นหนึ่งเดินทางไปทางซ้ายมือ อีกคลื่นหนึ่งเดินไปทางขวามือ และโซลูชั่นที่สมบูรณ์ที่สุดจะต้องประกอบด้วยผลรวมของคลื่นทั้งสองนี้

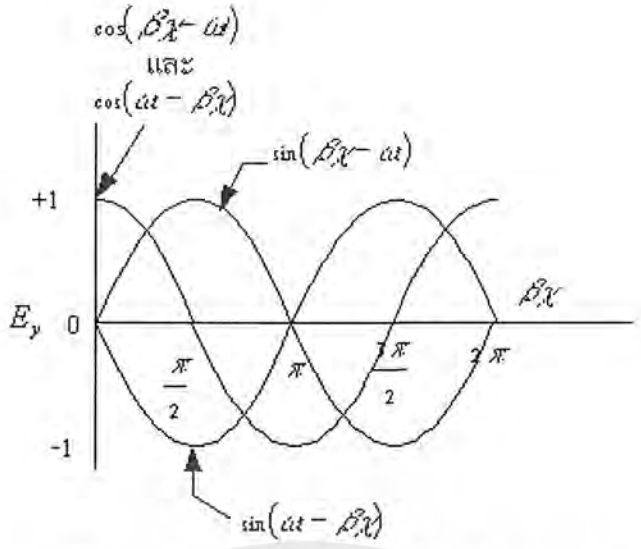
สมการของคลื่นที่เดินทางในทิศทาง +x สามารถเขียนได้หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละแบบจะเป็นแบบที่สมมูล (Equivalent) กัน นอกจากนี้มีการเลื่อนทางเฟส (Phase displacement) เท่านั้นที่ต่างกัน แบบต่างๆ สี่แบบที่เป็นได้คือ

$$\begin{aligned} E_y &= \sin(\beta x - \omega t) \\ E_y &= \sin(\omega t - \beta x) \\ E_y &= \cos(\beta x - \omega t) \\ E_y &= \cos(\omega t - \beta x) \end{aligned} \tag{2.45}$$

รูปแบบเหล่านี้สามารถเขียนให้ง่ายขึ้นโดยใช้ความสัมพันธ์คือ $\sin(-u) = -\sin(u) = \sin(u + \pi)$ และ $\cos(-u) = \cos u$ จะได้

$$\begin{aligned} E_y &= \sin(\omega t - \beta x) = \sin(\beta x - \omega t + \pi) \\ E_y &= \cos(\beta x - \omega t) = \sin(\beta x - \omega t + \frac{\pi}{2}) \\ E_y &= \cos(\omega t - \beta x) = \sin(\beta x - \omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \tag{2.46}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 รูปแบบต่างๆของนิพจน์ของคลื่นที่เวลา t=0

ความสัมพันธ์ของรูปแบบต่างๆทั้งสี่ในสมการที่ (2.45) จะแสดงให้เห็นได้ด้วยเส้นกราฟรูปที่ 2.5 ซึ่งได้เปรียบเทียบกันในกรณีที่ $t = 0$ โดยการแทนค่า t ค่าต่างๆ ลงในสมการทั้งสี่ จะเห็นได้ว่าแต่ละกรณีสมการจะแทนคลื่นที่เดินทางไปทางขวามือเหมือนกัน สิ่งที่แตกต่างกันคือการเลื่อนทางเฟสเท่านั้น ในแต่ละแบบในจำนวนสี่แบบในสมการที่ (2.45) จะสามารถแทนคลื่นในทิศทาง +x ได้ด้วยกันทั้งสิ้น ดังนั้นถ้าเลือกรูปแบบเป็น

$$E_y = \sin(\omega t - \beta x) \tag{2.47}$$

นิพจน์ของเวลาจะเป็นบวกเสมอสำหรับคลื่นที่เดินทางไปไม่ว่าจะเป็นทิศ +x หรือ -x กำหนดความสูงสุดของ E_y เป็น E_0 จะได้

$$E_y = E_0 \sin(\omega t - \beta x) \tag{2.48}$$

เนื่องจาก $f = 1/T$ และ $\beta = 2\pi/\lambda$ จะได้

$$E_y = E_0 \sin(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda}) \tag{2.49}$$

พจน์ที่แสดงในสมการ (2.48) และ (2.49) จะแทนคลื่นที่เดินทางในทิศ +x ทั้งคู่ สำหรับคลื่นที่เดินทางในทิศ -x จะมีนิพจน์ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_y = E_0 \sin(\omega t + \beta x) \tag{2.50}$$

และ

$$E_y = E_0 \sin(2\pi \frac{t}{T} + 2\pi \frac{x}{\lambda}) \tag{2.51}$$

โซลูชั่นของสมการคลื่นในสมการ (2.48) และ (2.50) สามารถเขียนในรูปของเอ็กซ์โพเนนเชียลได้คือ

$$E_y = E_0 \cdot e^{j(\omega t - \beta x)} \tag{2.52}$$

โดยสนามที่ขณะหนึ่งขณะใดของเวลาจะหาได้จากเทอม ซึ่งเป็นส่วนจินตภาพ (Imaginary part) หรือส่วนจริง (real part) ของฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลนี้ ถ้าเลือกเอาเฉพาะส่วนจินตภาพ (Im) จะได้

$$E_y = E_0 \,\mathrm{Im}\cdot e^{j(\omega t - \beta x)} = E_0 \sin(\omega t - \beta x) \tag{2.53}$$

ถ้าเอาส่วนจริง (Re) จะได้

$$E_y = E_0 \,\mathrm{Re}\cdot e^{j(\omega t - \beta x)} = E_0 \cos(\omega t - \beta x) \tag{2.54}$$

โดยการหาอนุพันธ์ที่สองของสมการที่ (2.52) เทียบกับ t และ x สามารถพิสูจน์ได้ว่าสมการที่ (2.52) เป็นโซลูชั่นของสมการคลื่นจริง

2.2.3 ตารางแสดงโซลูชั่นของสมการคลื่น

ในตารางที่ 1 ได้แสดงโซลูชั่นตรีโกณและโซลูชั่นเอ็กซ์โพเนนเชียลสำหรับคลื่นระนาบในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย ประกอบด้วยโซลูชั่นของคลื่นที่เดินทางในทางซ้ายมือ (ทิศทาง -x) และที่เดินทางไปทางขวามือ (ทิศทาง +x) โซลูชั่นเขียนในรูปผลรวมของโซลูชั่นของคลื่นทั้งสองก็ได้แสดงไว้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 โซลูชั่นของสมการคลื่น

	ในฟอร์มตรีโกณ	ในฟอร์มเอ็กซ์โพเนนเชียล
คลื่นไปทางขวา	$E_y = E_1 \sin(\omega t - \beta x)$	$E_y = E_1 \cdot e^{j(\omega t - \beta x)}$
คลื่นไปทางซ้าย	$E_y = E_0 \sin(\omega t + \beta x)$	$E_y = E_0 \cdot e^{j(\omega t + \beta x)}$
ผลรวมของคลื่นทั้งสอง	$E_y = E_0 \sin(\omega t + \beta x) + E_1 \sin(\omega t - \beta x)$	$E_y = E_0 \cdot e^{j(\omega t + \beta x)} + E_1 \cdot e^{j(\omega t - \beta x)}$

2.2.4 ความเร็วเฟส

$x - vt$ เป็นค่าคงที่สำหรับจุดที่มีค่าเฟสคงที่ในคลื่นที่เดินทาง เมื่อเป็นดังนี้ $\omega t - \beta x$ ก็ต้องเป็นค่าคงที่ด้วย นั่นคือค่าของ t และ x จะต้องเปลี่ยนไปพร้อมกันในลักษณะที่ทำให้

$$\omega t - \beta x = \text{ค่าคงที่} \tag{2.55}$$

หาอนุพันธ์ของสมการที่ (2.55) เทียบกับเวลาและหาความเร็วของจุดที่มีเฟสคงที่ ดังเช่นที่ทำแล้วในสมการที่ (2.42)จะได้

$$\omega - \beta \frac{dx}{dt} = 0$$

หรือ

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta} \tag{2.56}$$

ดังนั้นความเร็วเฟสหรือความเร็วของจุดเฟสคงที่มีค่าเท่ากับ ω/β ซึ่งจะมีหน่วยเป็นของความเร็ว

$$\frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \lambda f = \text{ความเร็ว} \tag{2.57}$$

เมื่อ λ = ความยาวคลื่น

f = ความถี่ , Hz

ผลคูณของ λf มีหน่วยเป็นระยะทางต่อเวลาหรือหน่วยของความเร็ว

จากสมการที่ (2.33) จะได้ว่าความเร็วเฟสมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\omega}{\beta} = v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \tag{2.57}$$

สมการที่ (2.58) จะเป็นความเร็วเฟสของคลื่นในตัวกลางเนื้อเดียวล้วนที่มีค่าเพอร์มีบิลิตี้ μ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ε สำหรับตัวกลางอิสระ (สูญญากาศ) ความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วแสง เขียนด้วยตัวอักษร c แทน

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = 299.79 \quad Mms^{-1} \quad \text{(จากการวัด)} \tag{2.59}$$

ในหน่วย SI ค่าเพอร์มีบิลิตี้ของสูญญากาศเท่ากับ

$$\mu_0 = 400\pi \quad nHm^{-1} \qquad \text{(ค่าเที่ยงตรงจากนิยาม)}$$

ดังนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสูญญากาศ จะเป็น

$$c = \frac{1}{\mu_0 c^2} = 8.85 \quad pFm^{-1}$$

สำหรับตัวกลางชนิดอื่นๆ ค่าความเร็วเฟสเปรียบเทียบกับความเร็วแสงหรือเรียกว่าเป็นความเร็วสัมพัทธ์ (relative velocity) จะเป็น

$$p = \frac{v}{c} = \frac{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}} \qquad \text{(ไม่มีหน่วย)} \tag{2.60}$$

เมื่อ μ_r = ค่าเพอร์มีบิลิตี้ของของตัวกลาง

ε_r = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของตัวกลาง

ความเร็วเฟสของคลื่นระนาบในตัวกลางเนื้อเดียวล้วนที่ไม่มีการสูญเสียจะเท่ากับหรือน้อยกว่าความเร็วของแสง $(p \le 1)$ แต่โดยทั่วไปแล้วความเร็วเฟสอาจจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าความเร็วแสงก็ได้ เช่นในท่อนำคลื่นโลหะแบบกลวง (Hollow metal waveguide) v จะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า c เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าคลื่นสองคลื่นที่มีความถี่เท่ากัน เดินทางด้วยความเร็วเท่ากันในทิศทางตรงข้ามกันหรือเดินทางด้วยความเร็วต่างกันในทิศทางเดียงกัน ค่าความเร็วเฟสของผลลัพธ์ของคลื่นทั้งสองจะไม่เป็นค่าคงที่อีกต่อไป แต่จะเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งแทน การหาค่าการเลื่อนเฟส (phase shift) ทางไฟฟ้า โดยวิธีการเปรียบเทียบเฟส ระหว่างจุดสองจุดอ้างอิง

สำหรับคลื่นที่เดินทางในทิศทาง $+x$ จะเกิดเฟสล้าหลัง (Phase lag) จำนวนน้อยๆ นั่นคือ $d\phi$ หรือเฟสแอดวานซ์เมนต์ (Phase advancement) $-d\phi$ ขึ้นในระยะทาง $+dx$ เวลาที่ต้องการสำหรับจุดเฟสคงที่จะเคลื่อนผ่านระยะนี้จะมีค่าเป็น

$$dt = -\frac{T}{2\pi} d\phi \quad s$$

เมื่อ T เป็นเวลาสำหรับหนึ่งคาบเวลา ดังนั้นค่าความเร็วเฟสในรูปฟังก์ชันของตำแหน่งจะเป็น

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{-dx}{(T/2\pi)d\phi} = \frac{-\omega}{d\phi/dx} \tag{2.62}$$

สำหรับคลื่นที่เดินทางในทิศทาง $+x$, $d\phi/dx$ จะเป็นลบ และทำให้ v เป็นบวกเมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.62) จะเห็นว่าค่าความเร็วเฟสคือ ω/β ในสมการที่ (2.58) จะเป็นค่าความเร็วเฟสเฉลี่ยด้วยจำนวนเต็มของความยาวคลื่น ดังนั้นหารสมการที่ (2.62) ด้วย ω/β จะได้ค่าความเร็วเฟสสัมพัทธ์ p ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งดังนี้

$$p = \frac{-\omega}{d\phi/dx} \tag{2.63}$$

เมื่อ $\beta = 2\pi/\lambda \quad (m^{-1})$

$\lambda =$ ความยาวคลื่นในตัวกลางอิสระ (m)

ทั้ง v ในสมการที่ (2.62) และ p ในสมการ (2.63) จะมีประโยชน์เมื่อความเร็วเฟสเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง

2.2.5 ดัชนีของการหักเห

ในเรื่องของแสงคำว่าดัชนีการหักเห η (Index of refraction) คือส่วนกลับของค่าความเร็วเฟสสัมพัทธ์ p นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \frac{1}{p} = \frac{1}{v/c} = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \qquad (2.64)$$

สำหรับตัวกลางที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก μ_r จะมีค่าใกล้เคียง 1 ดังนั้น

$$\eta = \sqrt{\varepsilon_r} \qquad (2.65)$$

ค่าไดอิเล็กทริก ε ไม่ได้เป็นค่าคงที่แต่จะเป็นฟังก์ชันของความถี่ ที่ความถี่เท่ากับศูนย์ $\varepsilon_r = 81$ แต่ที่ความถี่ย่านแสง $\varepsilon_r = 1.33^2 = 1.77$ ค่าดัชนีการหักเหและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารอื่นๆ ก็เช่นเดียวกันจะเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของความถี่

2.2.6 ความเร็วกรุ๊ป

พิจารณาคลื่นระนาบที่เดินทางในทิศทาง $+x$ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สมมติให้สนามไฟฟ้าทั้งหมดมีค่าเป็น

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - \beta x) \qquad (2.66)$$

และสมมติว่าคลื่นมีสองความถี่ที่มีขนาดเท่ากันคือ

$$\omega_0 + \Delta\omega$$

และ $$\omega_0 - \Delta\omega$$

เมื่อเป็นเช่นนี้ค่าของ β ที่สอดคล้องกับความถี่ทั้งสองจะมีค่าเป็น

$\beta_0 + \Delta\beta$ สอดคล้องกับ $\omega_0 + \Delta\omega$

และ $\beta_0 - \Delta\beta$ สอดคล้องกับ $\omega_0 + \Delta\omega$

สำหรับความถี่ที่ 1 $$E_y' = E_0 \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t - (\beta_0 + \Delta\beta)x] \qquad (2.67)$$

และความถี่ที่ 2 $$E_y'' = E_0 \cos[(\omega_0 - \Delta\omega)t - (\beta_0 - \Delta\beta)x] \qquad (2.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมสนามไฟฟ้าทั้งสองจะได้คือ

$$E_y = E'_y + E''_y$$

หรือ

$$E_y = E_0 \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t - (\beta_0 + \Delta\beta)x] + E_0 \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t - (\beta_0 + \Delta\beta)x] \quad (2.69)$$

คูณสมการที่ (2.69) ออกมาและใช้การแปลงทางตรีโกณมิติเข้าช่วย จะได้

$$E_y = 2E_0 \cos(\omega_0 t - \beta_0 x)\cos(\Delta\omega t - \Delta\beta x) \quad (2.70)$$

แฟคเตอร์ของโคไซน์ทั้งสองที่ปรากฏแสดงถึงว่าเกิดการผสมของสัญญาณเกิดขึ้น กล่าวคือสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงช้าจะเกาะอยู่บนสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าสำหรับจุดที่มีค่าเฟสคงที่

$$\omega_0 t + \beta_0 x = \text{ค่าคงที่}$$

และ

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega_0}{\beta_0} = v = f_0 \lambda_0 \quad (2.71)$$

เมื่อ v เป็นความเร็วเฟส โดนการกำหนดให้ค่าของมุมแฟคเตอร์โคไซน์นิพจน์ที่สองเท่ากับค่าคงที่จะได้คือ

$$\Delta\omega_0 t + \Delta\beta_0 x = \text{ค่าคงที่}$$

และ

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta\beta} = u = \Delta f \Delta\lambda \quad (2.72)$$

เมื่อ u เป็นความเร็วเฟสของคลื่นเรียกว่าเป็นความเร็วกรุ๊พ (Group velocity)

ในตัวกลางนอนดิสเพอสีพ (Nondispersive media) ความเร็วกรุ๊พจะมีค่าเท่ากับความเร็วเฟส ตัวกลางอิสระเป็นตัวอย่างหนึ่งของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย เป็นตัวกลางนอนดิสเพอสีพ และในตัวกลางอิสระนี้ $u = v = c$ อย่างไรก็ตาม ในตัวกลางดิสเพอสีพ (dispersive media) ความเร็วเฟสและความเร็วกรุ๊พมีค่าแตกต่างกัน

ตัวกลางดิสเพอสีพ หมายถึงตัวกลางที่มีความเร็วเฟสเป็นฟังก์ชันของความถี่ (และเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นในตัวกลางอิสระด้วย)

สำหรับความถี่ที่เฉพาะเจาะจง (แบนด์วิดธ์น้อยมากเข้าใกล้ศูนย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = \lim_{\Delta\omega \to 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta\beta} = \frac{d\omega}{d\beta} \tag{2.73}$$

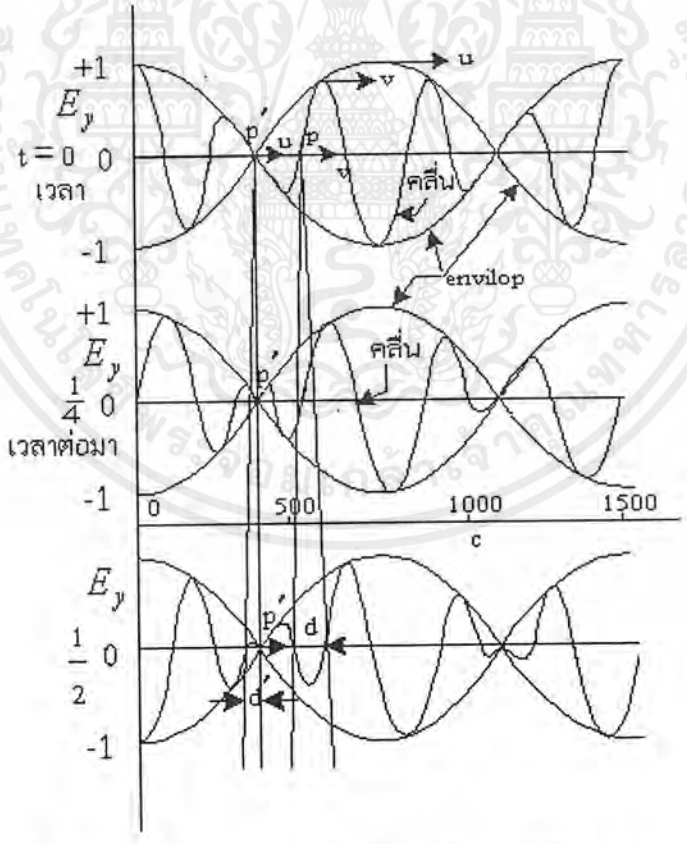
เนื่องจาก $\omega = 2\pi f = 2\lambda f / \lambda = Bv$ ดังนั้น

$$u = \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{d(Bv)}{d\beta} = \beta \frac{dv}{dB} + v$$

หรือ $$u = v + \lambda \frac{dv}{d\beta}$$

นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นได้เช่นเดียวกันอีกคือ

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\beta} \tag{2.74}$$



รูปที่ 2.6 จุดเฟสคงที่ p ของคลื่นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฟส v ในขณะที่จุด P' ของ envelop จะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วกรุ๊พจะเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

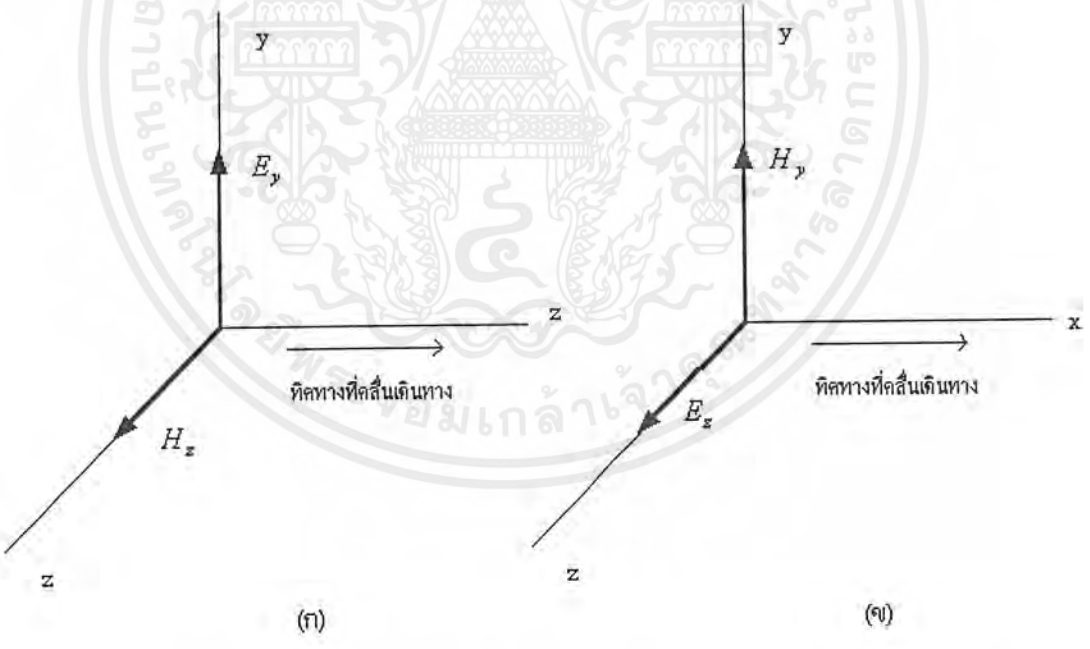
สมการที่ (2.74) และ (2.75) มีประโยชน์ในการหาค่าความเร็วกรุ๊พ จากฟังก์ชันของความเร็วเฟสที่กำหนด สำหรับคลื่นที่มีความถี่เดียวและมีขนาดคงที่จะไม่มีความเร็วกรุ๊พ อย่างไรก็ตามถ้าคลื่นประกอบด้วยสองความถี่หรือมากกว่า หรือเป็นกลุ่มของความถี่ดังเช่นในคลื่นที่ถูกมอดดูเลทแล้วจะพบว่ามีความเร็วกรุ๊พเนื่องจากขนาดของคลื่นจะไม่สม่ำเสมอ และคลื่นแต่ละคลื่นจะปรากฏเป็นกลุ่มซึ่งอาจถูกปิดล้อมด้วยเอนวิโลพ

2.3 ท่อนำคลื่นวิเคราะห์โดยสมการแมกซ์เวลล์

ท่อนำคลื่นเป็นสายส่ง (Transmission line) ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับส่งหรือเป็นตัวพาพลังงาน ในรูปคลื่นจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยที่ได้ประสิทธิภาพในการส่งสูงสุดมีค่าการสูญเสียจากความร้อนและการแพร่กระจายของคลื่น (Radiation) น้อยที่สุด

สายส่งมีหลายรูปร่างและหลายแบบ เราสามารถแยกชนิดของสายส่งได้ด้วยลักษณะการกระจายของสนามหรือโหมด (Mode) โดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

1) สายส่งที่สามารถนำได้เฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง หรือ TEM โหมด (Transverse Electromagnetic modes)



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของสนามต่างๆ ของคลื่น TEM โหมดที่สัมพันธ์กับระบบพิกัด
(ก) โพลาไรซ์ในทิศ y (ข) โพลาไรซ์ในทิศ z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

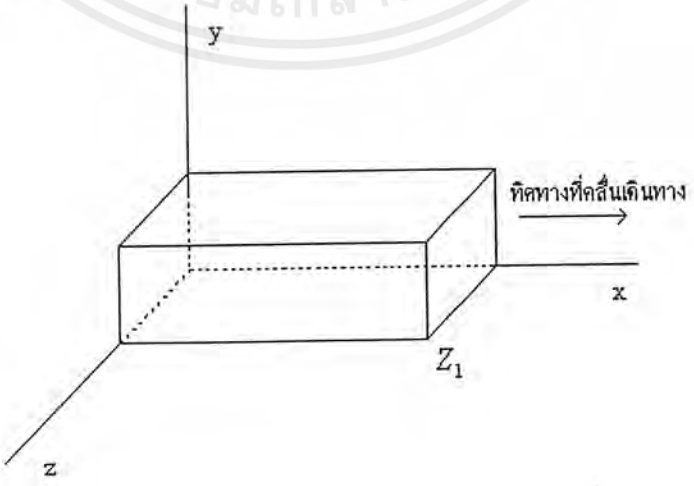
2) สายส่งที่สามารถนำได้เฉพาะคลื่นโหมดอันดับสูง (Higher-order mode) ในคลื่น *TEM* โหมด ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะอยู่ในทิศทางที่คลื่นเดินทาง นั่นคือไม่มีองค์ประกอบของทั้ง $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ ในทิศทางที่คลื่นเดินทาง สำหรับคลื่นโหมดอันดับสูงจะมีองค์ประกอบของสนาม $\bar{E}$ หรือ $\bar{H}$ หรือทั้ง $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ ในทิศทางที่คลื่นเดินทางอย่างน้อยหนึ่งองค์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.7 ตัวอย่างของสายส่งที่นำคลื่น TEM โหมด ได้แก่สายตัวนำสองเส้นทุกชนิดเช่น สายโคแอกเชียล (Coaxial line) และสายส่งคู่ขนาน เป็นต้น สำหรับตัวอย่างของสายส่งตัวนำคลื่นโหมดอันดับสูงได้แก่ ท่อนำคลื่นตัวนำเดี่ยวแบบกลวงและแท่งไดอิเล็กทริกเป็นต้น

ดังนั้นเพื่อให้ชี้เฉพาะเจาะจงได้แน่ชัดไปได้คำว่าสายหรือสายส่งจะหมายถึงอุปกรณ์ที่นำคลื่น TEM โหมด ในขณะที่คำว่าท่อนำคลื่น (waveguide) จะใช้กับอุปกรณ์ที่นำคลื่นโหมดอันดับสูงเท่านั้น ตัวอย่างของสายส่งและท่อนำคลื่นแบบต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.9

2.3.1 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง

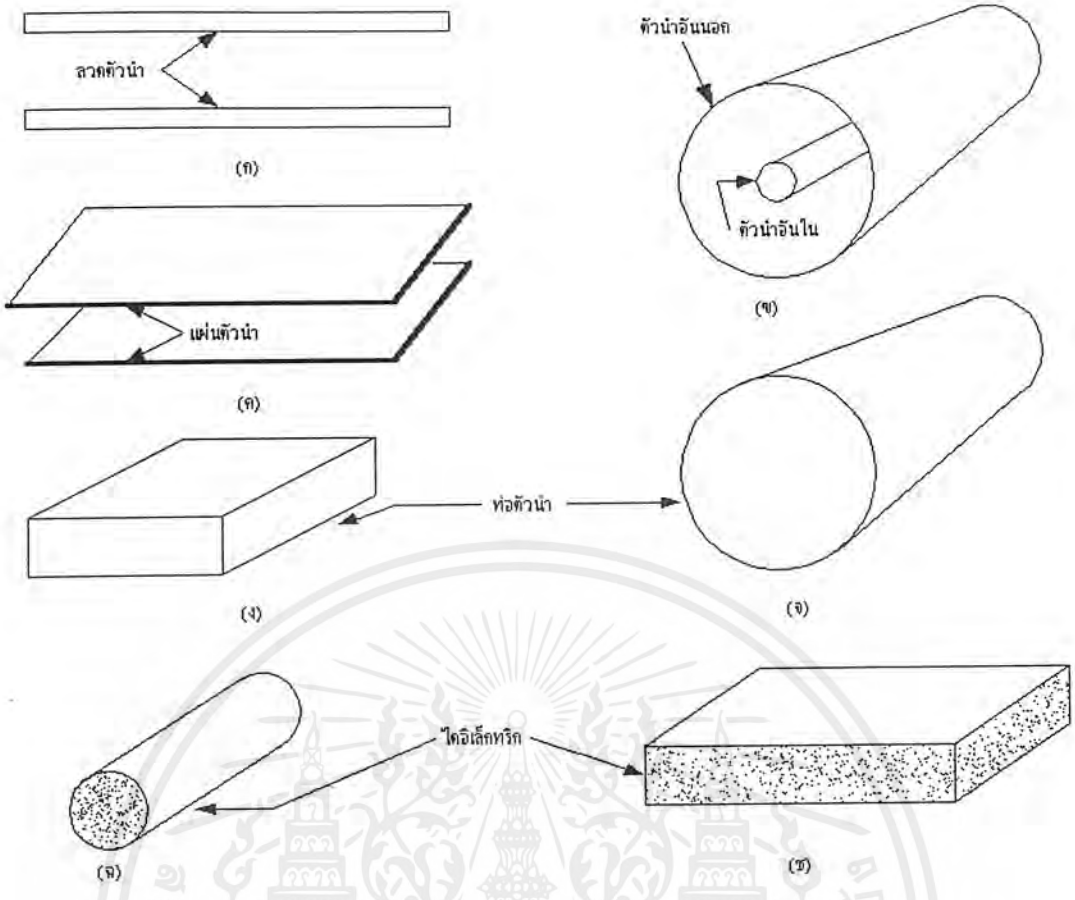
วิธีการหาคุณสมบัติของคลื่นในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวงสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ดังนี้คือ

1) เริ่มต้นจากสมการของแมกซ์เวลล์ จากนั้นหาสมการคลื่นในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน
2) กำหนดลักษณะการเปลี่ยนแปลงของคลื่นต่อเวลาเป็นแบบฮาร์มอนิก
3) กำหนดลักษณะการเปลี่ยนแปลงและการลดทอนขนาด (attenuation) ของคลื่นต่อระยะทางในทิศที่คลื่นเดินทางคือ ทิศ x ในรูปที่ 2.8
4) เลือกชนิดหรือโหมดของคลื่นที่จะทำการวิเคราะห์ เช่นเป็นคลื่น *TE* โหมด ซึ่งมี $E_x = 0$ และ H_x ไม่เป็น 0 หรือเป็นคลื่น TM โหมด ซึ่งมี $H_x = 0$ และ E_x ไม่เท่ากับ 0 เป็นต้น



รูปที่ 2.8 ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวงและระบบพิกัดที่สัมพันธ์กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของสายส่งและท่อนำคลื่นแบบต่างๆ

(ก) สายส่งคู่ขนาน
(ข) สายโคแอกเชียล
(ค) สายส่งแบบแผ่นขนาน
(ง) ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง
(จ) สายโคแอกเชียล
(ฉ) สายส่งแบบแผ่นขนาน
(ช) ท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง

5) หาสมการสำหรับองค์ประกอบของสนามอื่นๆ คือ E_y, E_z, H_y และ H_z ในเทอมของ H_x ถ้าเป็นคลื่น TE โหมด หรือ E_x ถ้าเป็นคลื่น TMโหมด
6) หาสมการคลื่นแบบสเกลาร์สำหรับ H_x ถ้าเป็นคลื่น TE โหมด หรือ E_x ถ้าเป็นคลื่น TM โหมด
7) แก้สมการคลื่นเพื่อหาโซลูชั่นของ H_x ถ้าเป็นคลื่น TE โหมด หรือ E_x ถ้าเป็นคลื่น TM โหมด ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของท่อนำคลื่น
8) แทนค่า H_x ถ้าเป็นคลื่น TE โหมด หรือ E_x ถ้าเป็นคลื่น TM โหมด กลับไปในสมการของขั้นตอนที่ 5 จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละองค์ประกอบของสนามกับระยะทางและเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการหาโซลูชั่นแบบนี้เป็นวิธีเป็นวิธีทั่วไป ในที่นี้จะเลือกพิจารณาเฉพาะคลื่น TE โหมดเท่านั้น เพื่อเป็นตัวอย่างในการหาคุณสมบัติต่างๆ ของคลื่นในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวงโดยทำตามขั้นตอนที่กล่าวข้างบน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1

จากสมการของแมกซ์เวลล์สำหรับตัวกลางอิสระ จะได้ว่า

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J}$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0$$

เมื่อ $\bar{D} = \varepsilon \bar{E}$, $\bar{J} = \sigma \bar{E} = 0$ และ $\bar{B} = \mu \bar{H}$

ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน

$$\nabla \times \bar{H} = \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \bar{a}_x + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \bar{a}_y + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \bar{a}_z$$

และ $$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(E_x \bar{a}_x + E_y \bar{a}_y + E_z \bar{a}_z \right)$$

ดังนั้นจากสมการ (1) และ (2) ของแมกซ์เวลล์จะได้ว่า

$$\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) - \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = 0 \qquad (2.75)$$

$$\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) - \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = 0 \qquad (2.76)$$

$$\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) - \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = 0 \qquad (2.77)$$

$$\left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) - \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = 0 \qquad (2.78)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{\partial E_x}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial x}\right)-\mu\frac{\partial H_y}{\partial t}=0 \tag{2.79}$$

$$\left(\frac{\partial E_y}{\partial x}-\frac{\partial E_x}{\partial y}\right)-\mu\frac{\partial H_z}{\partial t}=0 \tag{2.80}$$

เราสมมติว่าไม่มีประจุในตัวกลางอิสระ $(\rho=0)$ ดังนั้นจากสมการที่สามและสี่ของแมกซ์เวลล์จะได้ว่า

$$\left(\frac{\partial E_x}{\partial x}+\frac{\partial E_y}{\partial y}+\frac{\partial E_z}{\partial z}\right)=0 \tag{2.81}$$

$$\left(\frac{\partial H_x}{\partial x}+\frac{\partial H_y}{\partial y}+\frac{\partial H_z}{\partial z}\right)=0 \tag{2.82}$$

ขั้นตอนที่ 2 และ 3

สมมติว่าทุกๆองค์ประกอบของสนามมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบฮาร์มอนิกกับเวลาด้วยแฟคเตอร์ $e^{j\omega t}$ เมื่อ $\omega=2\pi f$ เป็นความเร็วเชิงมุม (ขั้นตอนที่ 2) และมีการเปลี่ยนแปลงกับระยะทางในทิศที่คลื่นเดินทางด้วยแฟคเตอร์ $e^{\pm\gamma x}$ เมื่อ γ เป็นค่าคงที่ของการแพร่ของคลื่น (ขั้นตอนที่ 3) ดังนั้นคลื่นที่เดินทางในทิศทาง $+x$ สามารถเขียนองค์ประกอบของสนามต่างๆ เช่น E_y ได้คือ

$$E_y=E_{xyz}e^{j(\omega t-\beta x)}$$

เมื่อ E_{xyz} = ฟังก์ชันของ x,y,z

γ = ค่าของการแพร่ของคลื่น

α = ค่าคงที่ของการลดทอน

β = ค่าคงที่เฟส

อนุพันธ์ของสนามต่อเวลา $\dfrac{\partial E_y}{\partial t}=j\omega E_{xyz}e^{j(\omega t-\beta x)}$ (2.83)

หรือ $\dfrac{\partial}{\partial t}=j\omega$

อนุพันธ์ของสนามต่อระยะทาง $\dfrac{\partial E_y}{\partial x}=-\beta E_{xyz}e^{j(\omega t-\beta x)}$ (2.84)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $$\frac{\partial}{\partial t} = -j\beta$$

ขั้นตอนที่ 4

เลือกพิจารณาเฉพาะคลื่น TM โหมด นั่นคือ $E_x = 0$ เมื่อแทน $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$ และ $\frac{\partial}{\partial t} = -j\beta$ ลงในสมการที่ (2.76)

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = 0 \tag{2.85}$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} + j\beta H_z - j\varepsilon\omega E_y = 0 \tag{2.86}$$

$$-j\beta H_y - \frac{\partial H_x}{\partial y} - j\omega\varepsilon E_z = 0 \tag{2.87}$$

$$\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right) + j\omega\mu H_x = 0 \tag{2.88}$$

$$j\beta E_z + j\omega\mu H_y = 0 \tag{2.89}$$

$$-j\beta E_y + j\omega\mu H_z = 0 \tag{2.90}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0 \tag{2.91}$$

$$-j\beta H_x + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0 \tag{2.92}$$

ขั้นตอนที่ 5 เขียนองค์ประกอบของสนามต่างๆ ในเทอมของ H_x จากสมการที่ (2.89)

$$E_z = -\frac{\omega\mu H_y}{\beta} \tag{2.93}$$

จากสมการที่ (2.90)

$$E_y = \frac{\omega\mu H_z}{\beta} \tag{2.94}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (2.93) ในสมการ (2.87)

$$H_y = \frac{1}{j\left(\frac{\omega^2 \varepsilon\mu}{\beta} - \beta\right)} \cdot \frac{\partial H_x}{\partial y} \tag{2.95}$$

แทนสมการที่ (2.94) ในสมการ (2.86)

$$H_z = \frac{1}{j\left(\frac{\omega^2 \varepsilon\mu}{\beta} - \beta\right)} \cdot \frac{\partial H_x}{\partial z} \tag{2.96}$$

แทนสมการที่ (2.96) ในสมการ (2.94)

$$E_y = \frac{\frac{\omega\mu}{\beta}}{j\left(\frac{\omega^2 \varepsilon\mu}{\beta} - \beta\right)} \cdot \frac{\partial H_x}{\partial z} \tag{2.97}$$

แทนสมการที่ (2.95) ในสมการ (2.93)

$$E_z = \frac{-\frac{\omega\mu}{\beta}}{j\left(\frac{\omega^2 \varepsilon\mu}{\beta} - \beta\right)} \cdot \frac{\partial H_x}{\partial y} \tag{2.98}$$

ขั้นตอนที่ 6 เราสามารถหาสมการคลื่นในเทอมของ H_x ได้จากสมการที่ (2.92) โดยการแทนค่า H_y และ H_z

จากสมการที่ (2.95) และสมการที่ (2.96) จะได้

$$-j\beta H_x + \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{1}{j\left(\frac{\omega^2 \varepsilon\mu}{\beta} - \beta\right)} \cdot \frac{\partial H_x}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{1}{j\left(\frac{\omega^2 \varepsilon\mu}{\beta} - \beta\right)} \cdot \frac{\partial H_x}{\partial z}\right] = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-j\beta H_x + \frac{1}{j\left(\frac{\omega^2\varepsilon\mu}{\beta} - \beta\right)} + \left(\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2}\right) = 0 \qquad (2.99)$$

$$H_x\beta\left(\frac{\omega^2\varepsilon\mu}{\beta} - \beta\right) + \left(\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2}\right) = 0 \qquad (2.100)$$

ให้ $k^2 = \omega^2\varepsilon\mu - \beta^2$ จะได้

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} + k^2 H_x = 0 \qquad (2.101)$$

สมการที่ (2.101) จะเป็นสมการคลื่นแบบสเกลาร์ในเทอมของ H_x สำหรับคลื่น TE โหมด ในท่อนำคลื่น และเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สอง (partial differential equation of the second order)

ขั้นตอนที่ 7

โซลูชั่นของสมการคลื่น (2.101) ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตสำหรับท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง
คือองค์ประกอบในทิศสัมผัสของสนามไฟฟ้าจะต้องเป็นศูนย์ที่ผิวของท่อนำคลื่น

จากสมการที่ (2.101) H_x เป็นฟังก์ชันของ y และ z ดังนั้นจะสมมติให้โซลูชั่นของสมการที่ (2.101) อยู่ในรูปของ

$$H_x = YZ \qquad (2.102)$$

เมื่อ Y เป็นฟังก์ชันของสมการ y เท่านั้น $[Y = f(y)]$
Z เป็นฟังก์ชันของสมการ z เท่านั้น $[Z = f(z)]$
แทนสมการ (2.102) ใน (2.101)

$$Z\frac{d^2 y}{dy^2} + Y\frac{\partial^2 z}{\partial z^2} + k^2 YZ = 0 \qquad (2.103)$$

หารตลอดด้วย YZ จะได้ $$\frac{1}{Y}\frac{d^2 y}{dy^2} + \frac{1}{Z}\frac{\partial^2 z}{\partial z^2} = -k^2 \qquad (2.104)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $$\frac{1}{Y}\frac{d^2y}{dy^2} = -A_1 \quad (2.105)$$

$$\frac{1}{Z}\frac{d^2y}{dy^2} = -A_2 \quad (2.106)$$

และ $$A_1 + A_2 = k^2 \quad (2.107)$$

โซลูชั่นของคลื่นมีลักษณะเป็นไซน์หรือโคไซน์เท่านั้น (Sinusoidal or Consinusodial) สมมติว่าโซลูชั่นของสมการที่ (2.105) คือ

$$Y = c_1 \sin b_1 y \quad (2.108)$$

แทนค่าสมการที่ (2.108) ในสมการที่ (2.105) จะได้

$$b_1 = \sqrt{A_1} \quad (2.109)$$

ถ้าเลือก $b_1 = \sqrt{A_1}$ โซลูชั่นของสมการ (2.105) อีกสมการคือ

$$Y = c_2 \cos b_1 y \quad (2.110)$$

สมการ (2.108) และ (2.110) ต่างเป็นโซลูชั่นสำหรับ Y ผลบวกของทั้งสองก็จะเป็นโซลูชั่นด้วย

$$Y = c_1 \cos\sqrt{A_1}y + c_2 \cos\sqrt{A_1}y \quad (2.111)$$

ในทำนองเดียวกันโซลูชั่นสำหรับ Z ของสมการ (2.106) คือ

$$Z = c_3 \sin\sqrt{A_2}z + c_4 \cos\sqrt{A_2}z \quad (2.112)$$

จากสมการที่ (2.102) คือ $H_x = YZ$ แทนค่าสมการ (2.111), (2.112) จะได้

$$H_x = c_1c_3 \sin\sqrt{A_1}y \cdot \sin\sqrt{A_2}z + c_2c_3 \cos\sqrt{A_1}y \cdot \sin\sqrt{A_2}z$$
$$+ c_1c_4 \sin\sqrt{A_1}y \cdot \cos\sqrt{A_2}z + c_2c_4 \cos\sqrt{A_1}y \cdot \cos\sqrt{A_2}z \quad (2.113)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.113) นิพจน์ใดเป็นโซลูชันที่แท้จริงต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขของท่อนำคลื่น คือ

1) $E_y = 0$ ที่ $z = 0$ และที่ $z = 1$ และที่ $z = z_1$

2) $E_z = 0$ ที่ $y = 0$ และที่ $y = y_1$

แทนค่าของสมการ (2.113) ในสมการ (2.97) จะได้สมการสำหรับ E_y คือ

$$E_y = \frac{\frac{\omega\mu\sqrt{A_2}}{\beta}}{j\left(\frac{\omega^2\varepsilon\mu}{\beta} - \beta\right)}\left(c_1c_3 \sin\sqrt{A_1}y \cdot \cos\sqrt{A_2}z + c_2c_3 \cos\sqrt{A_1}y \cdot \cos\sqrt{A_2}z\right.$$

$$\left. - c_1c_4 \sin\sqrt{A_1}y \cdot \cos\sqrt{A_2}z - c_2c_4 \cos\sqrt{A_1}y \cdot \cos\sqrt{A_2}z\right)$$

แทนค่าเงื่อนไขขอบเขต $E_y = 0$ ที่ $z = 0$ จะได้

$$E_y\big|_{z=0} = 0 = c_1c_3 \sin\sqrt{A_1}y + c_2c_3 \cos\sqrt{A_1}y$$

นั่นคือ $c_1c_3 = c_2c_3 = 0$ จึงสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต

แทนสมการ (2.113) ใน สมการ (2.98) จะได้สมการของ E_z เป็น

$$E_z = \frac{-\frac{\omega\mu}{\beta}\sqrt{A_2}}{j\left(\frac{\omega^2\varepsilon\mu}{\beta} - \beta\right)}\left(c_1c_4 \cos\sqrt{A_1}y \cdot \cos\sqrt{A_2}z - c_2c_4 \sin\sqrt{A_1}y \cdot \cos\sqrt{A_2}z\right)$$

แทนค่าเงื่อนไขขอบเขต $E_z = 0$ ที่ $y = 0$ จะได้

$$E_z\big|_{y=0} = 0 = c_1c_4 \cos\sqrt{A_2}z$$

นั่นคือ $c_1c_4 = 0$ จึงสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต

นิพจน์สุดท้ายของสมการที่ (2.113) เพียงพจน์เดียวที่เป็นโซลูชั่นที่แท้จริง พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่เหลือคือ

จาก $E_z = 0$ ที่ $y = y_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_z\Big|_{y=y_1} = \frac{-\dfrac{\omega\mu}{\beta}\sqrt{A_2}}{j\left(\dfrac{\omega^2\varepsilon\mu}{\beta}-\beta\right)}\left(-c_2c_4\sin\sqrt{A_1}y\cdot\cos\sqrt{A_2}z_1\right)=0 \quad \text{เมื่อ } \sin\sqrt{A_1}y=0$$

นั่นคือ $$\sqrt{A_1}=\frac{n\pi}{y_1} \quad \text{เมื่อ } n=0,1,2,... \tag{2.114}$$

และจาก $E_y=0$ ที่ $z=z_1$

$$E_y\Big|_{z=z_1} = \frac{\dfrac{\omega\mu\sqrt{A_2}}{\beta}}{j\left(\dfrac{\omega^2\varepsilon\mu}{\beta}-\beta\right)}\left(-c_2c_4\cos\sqrt{A_1}y\cdot\sin\sqrt{A_2}z_1\right)=0 \quad \text{เมื่อ } \sin\sqrt{A_2}y=0$$

นั่นคือ $$\sqrt{A_2}=\frac{m\pi}{z_1} \quad \text{เมื่อ } m=0,1,2,... \tag{2.115}$$

ดังนั้นโซลูชั่นสำหรับ H_x จะเป็น

$$H_x(y,z)=H_0\cos\frac{n\pi}{y_1}y\cdot\cos\frac{m\pi}{z_1}z \tag{2.116}$$

เมื่อ $H_0=c_2c_4=$ ค่าคงที่ ถ้าคูณสมการที่ (2.116) ด้วยแฟคเตอร์เอ็กซ์โพเนนเชียลในสมการที่ (2.84) จะได้โซลูชั่นที่สมบูรณ์สำหรับ H_x เป็น

$$H_x(x,y,z,t)=H_0\cos\frac{n\pi}{y_1}y\cdot\cos\frac{m\pi}{z_1}z\cdot e^{j(\omega t-\beta x)} \tag{2.117}$$

ขั้นตอนที่ 8

แทนค่าสมการที่ (2.117) ในสมการที่ (2.95) ถึงสมการที่ (2.98) จะได้โซลูชั่นสำหรับองค์ประกอบของสนามอื่นๆ คือ

$$H_y=-\frac{\beta H_0}{jk^2}\frac{n\pi}{y_1}\sin\frac{n\pi}{y_1}y\cdot\cos\frac{m\pi}{z_1}z\cdot e^{j(\omega t-\beta x)} \tag{2.118}$$

$$H_z=-\frac{\beta H_0}{jk^2}\frac{m\pi}{z_1}\cos\frac{n\pi}{y_1}y\cdot\sin\frac{m\pi}{z_1}z\cdot e^{j(\omega t-\beta x)} \tag{2.119}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_y = -\frac{\omega\mu H_0}{jk^2}\frac{m\pi}{z_1}\cos\frac{n\pi}{y_1}y\cdot\sin\frac{m\pi}{z_1}z\cdot e^{j(\omega t-\beta z)} \qquad (2.120)$$

$$E_z = \frac{\omega\mu H_0}{jk^2}\frac{n\pi}{y_1}\sin\frac{n\pi}{y_1}y\cdot\cos\frac{m\pi}{z_1}z\cdot e^{j(\omega t-\beta z)} \qquad (2.121)$$

เลขจำนวนเต็ม m และ n เป็นตัวกำหนดลักษณะการกระจายของสนาม หรือโหมดของคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่นสัญลักษณ์ตัวห้อย mn เป็นตัวกำหนดโหมดต่างๆ ของคลื่น TE โหมด เป็น TE_{mn} กรณีของคลื่น TE_{10} โหมด

สำหรับคลื่นโหมดนี้ m = 1 และ n = 0 องค์ประกอบของสนามสำหรับคลื่นโหมดนี้จะเป็น $E_x = 0$

ดังนั้นจึงเป็นคลื่น TE โหมด

$$E_y = j\frac{\omega\mu H_0}{k^2}\frac{\pi}{z_1}\cdot\sin\frac{\pi}{z_1}z\cdot e^{j(\omega t-\beta z)}$$

$$E_z = 0$$

$$H_x = H_0\cdot\cos\frac{\pi}{z_1}z\cdot e^{j(\omega t-\beta z)}$$

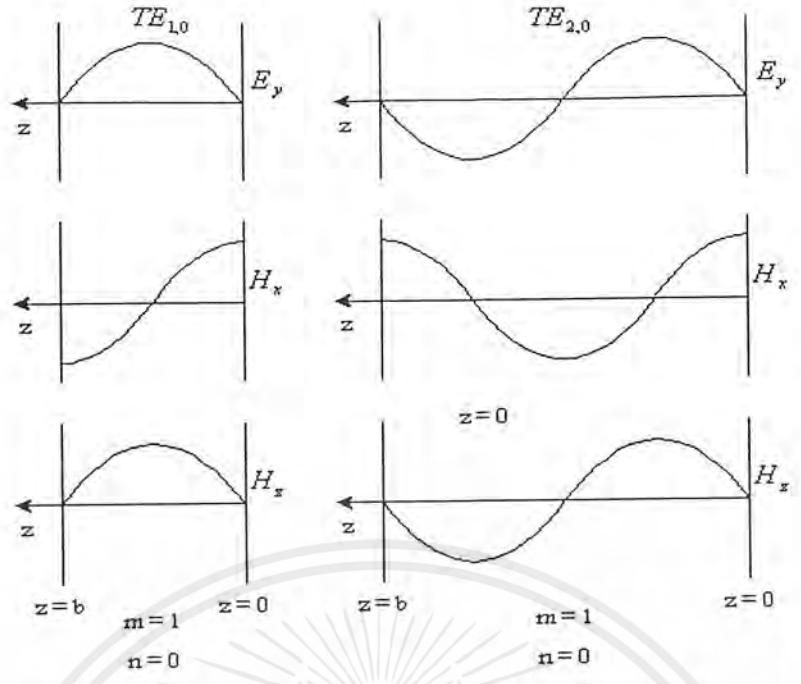
$$H_y = 0$$

$$H_z = j\frac{\beta H_0}{k^2}\frac{\pi}{z_1}\sin\frac{\pi}{z_1}z\cdot e^{j(\omega t-\beta z)}$$

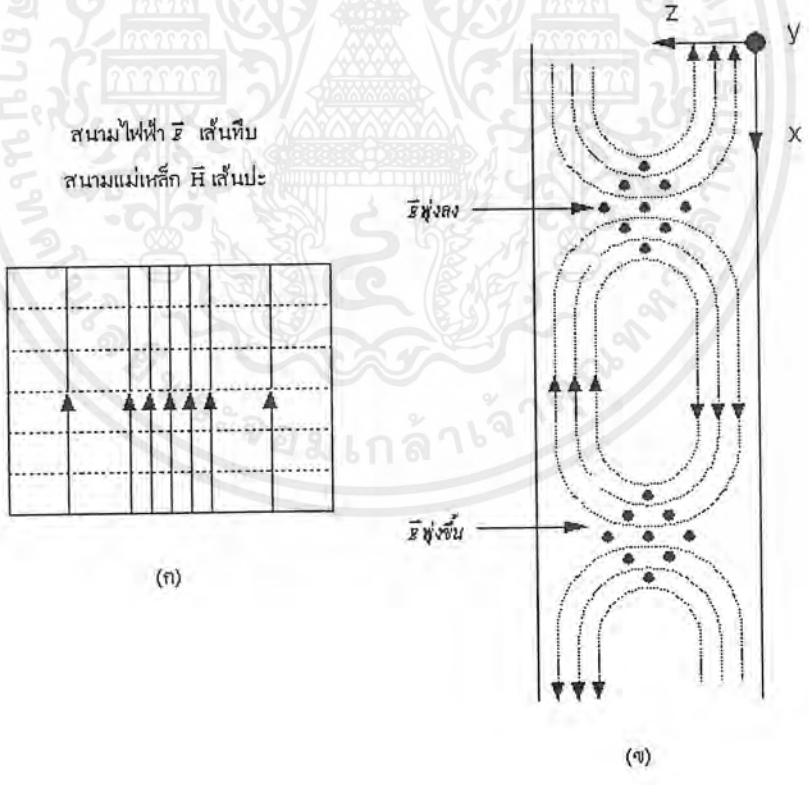
คลื่นโหมดนี้จะมีความยาวคลื่นคัทออฟ (Cutoff wavelength) ยาวที่สุดในคลื่นโหมดอันดับสูงด้วยกัน ดังนั้นคลื่น TE_{10} โหมด จะเป็นโหมดที่มีความถี่ในการส่งต่ำที่สุดในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง

ลักษณะการกระจายของสนามแสดงให้เห็นถึงว่ามีคลื่นโหมดใดบ้างที่สามารถเดินทางได้ในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง อย่างไรก็ตามโหมดของคลื่นที่มีคุณสมบัติเฉพาะ หรือโหมดของคลื่นที่เกิดเฉพาะในบางกรณีจะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อนำคลื่น วิธีการกระตุ้นให้เกิดคลื่น (Exciting) ในท่อนำคลื่นหรือขึ้นอยู่กับความไม่สม่ำเสมอหรือไม่ต่อเนื่องในท่อนำคลื่น ผลลัพธ์ของสนามในท่อนำคลื่นจะมีค่าเท่ากับผลรวมของสนามของคลื่นทุกๆ โหมดที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของสนามต่างๆ สำหรับคลื่น TE_{10} และ TE_{20} โหมดในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง (คลื่นเดินทางออกจากหน้ากระดาษ)



รูปที่ 2.11 ลักษณะการกระจายของสนามต่างๆ สำหรับคลื่น TE_{10} โหมด ในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาโซลูชั่นกันใหม่เพื่อหาคุณสมบัติอื่นๆของท่อนำคลื่นต่อไป จากสมการที่ (2.107), (2.114) และ (2.115) จะได้ว่า

$$\left(\frac{n\pi}{y_1}\right)^2+\left(\frac{m\pi}{z_1}\right)^2=k^2 \qquad (2.122)$$

จากสมการที่ (2.110) k^2 มีค่าเป็น

$$k^2=\gamma^2-j\omega\mu(\sigma+j\omega\varepsilon) \qquad (2.123)$$

สมมติว่าในท่อนำคลื่นบรรจุด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริกที่ไม่มีการสูญเสีย เราสามารถให้ $\sigma=0$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.122) และ (2.123) สามารถแก้สมการหาค่า γ ได้เป็น

$$\gamma=\sqrt{\left(\frac{n\pi}{y_1}\right)^2+\left(\frac{n\pi}{z_1}\right)^2-\omega^2\mu\varepsilon} \qquad (2.124)$$

จากสมการที่ (2.124) จะสรุปได้เป็นสามกรณีคือ

1) ที่ความถี่ต่ำ , ω มีค่าน้อย , γ เป็นค่าจริง ในกรณีนี้คลื่นจะถูกลดทอนขนาดหรือไม่สามารถเดินทางในท่อนำคลื่นได้
2) ที่ความปานกลาง , ω มีค่าปานกลาง , γ มีค่าเป็นศูนย์ ในกรณีนี้เรียกว่า คัทออฟ
3) ที่ความสูง , ω มีค่ามาก , γ มีค่าจินตภาพ ในกรณีนี้คลื่นจะเดินทางในท่อนำคลื่นได้โดยไม่ถูกลดทอนขนาด

จากสมการที่ (2.124) เขียนใหม่ได้คือ

$$\gamma=\sqrt{k^2-\omega^2\mu\varepsilon} \qquad (2.125)$$

ที่ความถี่ต่ำกว่าคัทออฟ $\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\ <\ k$ และ

$$\gamma=\sqrt{k^2-\omega^2\mu\varepsilon}=\alpha \qquad (2.126)$$

เมื่อ α เป็นค่าคงที่ของการลดทอนขนาด

ที่ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) $\omega\sqrt{\mu\varepsilon}=k$ และ $\gamma=0$ จะได้ว่าที่คัทออฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega^2 \mu\varepsilon = \left(\frac{n\pi}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{z_1}\right)^2 \qquad (2.127)$$

นั่นคือที่ความถี่คัทออฟจะเท่ากับ

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{n\pi}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{z_1}\right)^2} \quad (H_z) \qquad (2.128)$$

และความยาวคลื่นคัทออฟจะเท่ากับ

$$\lambda_{oc} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{n}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{m}{z_1}\right)^2}} \quad (m) \qquad (2.129)$$

เมื่อ λ_{oc} เป็นความยาวคลื่นคัทออฟ สมการที่ (2.128) และ (2.129) จะให้ค่าความถี่คัทออฟและความยาวคลื่นคัทออฟสำหรับคลื่น TE_{mn} โหมดในท่อทรงสี่เหลี่ยมกลวงที่ความถี่สูงกว่าคัทออฟ $\omega\sqrt{\mu\varepsilon} \rangle k$ และ

$$\gamma = \sqrt{k^2 - \omega^2 \mu\varepsilon} = j\beta \qquad (2.130)$$

เมื่อ $\beta = 2\pi/\lambda_g$ = ค่าคงที่เฟสของคลื่นในท่อนำคลื่น, rad m^{-1}

λ_g = ค่าความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น, m

จากสมการที่ (2.130) จะได้

$$\beta = \sqrt{\omega^2 \mu\varepsilon - k^2} = \sqrt{\omega^2 \mu\varepsilon - \left(\frac{n\pi}{y_1}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{z_1}\right)^2} \qquad (2.131)$$

และจะได้ความเร็วเฟสของ v_p ของคลื่นในท่อนำคลื่นจะเท่ากับ

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{v_o}{\sqrt{\omega^2 \mu\varepsilon - \left(\frac{n\pi}{y_1}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{z_1}\right)^2}} \quad (ms^{-1}) \qquad (2.132)$$

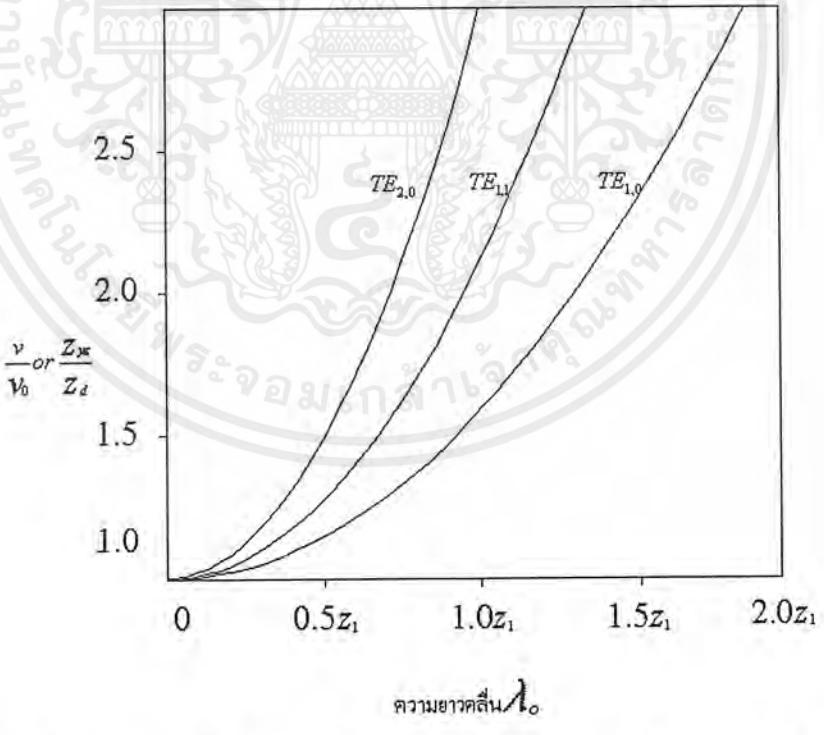
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ
$$v_p = \frac{v_o}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda_o}{\lambda_{oc}}\right)^2}} \qquad (2.133)$$

เมื่อ $v_o = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$ = ความเร็วของคลื่นในตัวกลางเนื้อเดียวล้วนที่มีค่าเพอร์มีบิลิตี μ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ε

$\lambda_o = \frac{v_o}{f}$ = ความเร็วของคลื่นในตัวกลางเนื้อเดียวล้วนที่มีค่าเพอร์มีบิลิตี μ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ε อัตราส่วนของ $\frac{v}{v_o}$ ในรูปฟังก์ชันของความยาวคลื่นจะแสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับคลื่น TE โหมดต่าง ๆ ในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง $(y_1 = z_1)$

ในการวเคราะห์ที่กล่าวข้างบนจะไม่มีการลดทอนขนาดของคลื่นที่ความถี่สูงกว่าความถี่คัตออฟเลย เนื่องจากเราได้สมมุติว่าตัวนำที่ใช้ท่อนำคลื่นเป็นตัวนำสมบูรณ์ และในท่อนำคลื่นบรรจุด้วยตัวกลางไดอิเล็กทริกที่ไม่มีการสูญเสีย อย่างไรก็ตาม ถ้าผนังของท่อนำคลื่นไม่เป็นตัวนำสมบูรณ์หรือตัวกลางไดอิเล็กทริกมีค่าการสูญเสีย หรือทั้งสองอย่าง ก็จะทำให้เกิดการลดทอนขนาดขึ้น



รูปที่ 2.12 อัตราส่วนของความเร็วเฟส $\frac{v}{v_o}$ หรืออัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ตามขวาง $\frac{Z_{TE}}{Z_d}$ ในรูปของฟังก์ชันของความยาวคลื่น λ_o สำหรับคลื่น TE โหมดต่างๆ ในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง (ความสูง y_1 เท่ากับความกว้าง z_1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายจะพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ตามขวางของท่อนำคลื่น Z_{yz} สำหรับคลื่น TE โหมด ในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวง ค่าอิมพีแดนซ์ตามขวางของคลื่นจะหาได้จากอัตราส่วนขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กตามขวาง ดังนี้

$$Z_{yz} = \frac{E_y}{H_z} = -\frac{E_z}{H_y} \qquad (\Omega)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.93) และ (2.94) จะได้

$$Z_{yz} = \frac{j\omega\mu}{\gamma} \qquad (2.134)$$

ที่ความถี่สูงกว่าคัทออฟ $\gamma = j\beta$ ดังนั้นจะได้

$$Z_{yz} = \frac{\omega\mu}{\beta} = \frac{Z_d}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda_o}{\lambda oc}\right)^2}} \qquad (\Omega) \qquad (2.135)$$

เมื่อ Z_d = อิมพิแดนซ์อินทรินสิคของตัวกลางไดอิเล็กทริกที่บรรจุในท่อนำคลื่น

$= \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = 376.7 \quad \Omega$ สำหรับอากาศ

λ_o = ความยาวคลื่นในตัวกลางเนื้อเดียวล้วน

λ_{oc} = ความยาวคลื่นคัทออฟ

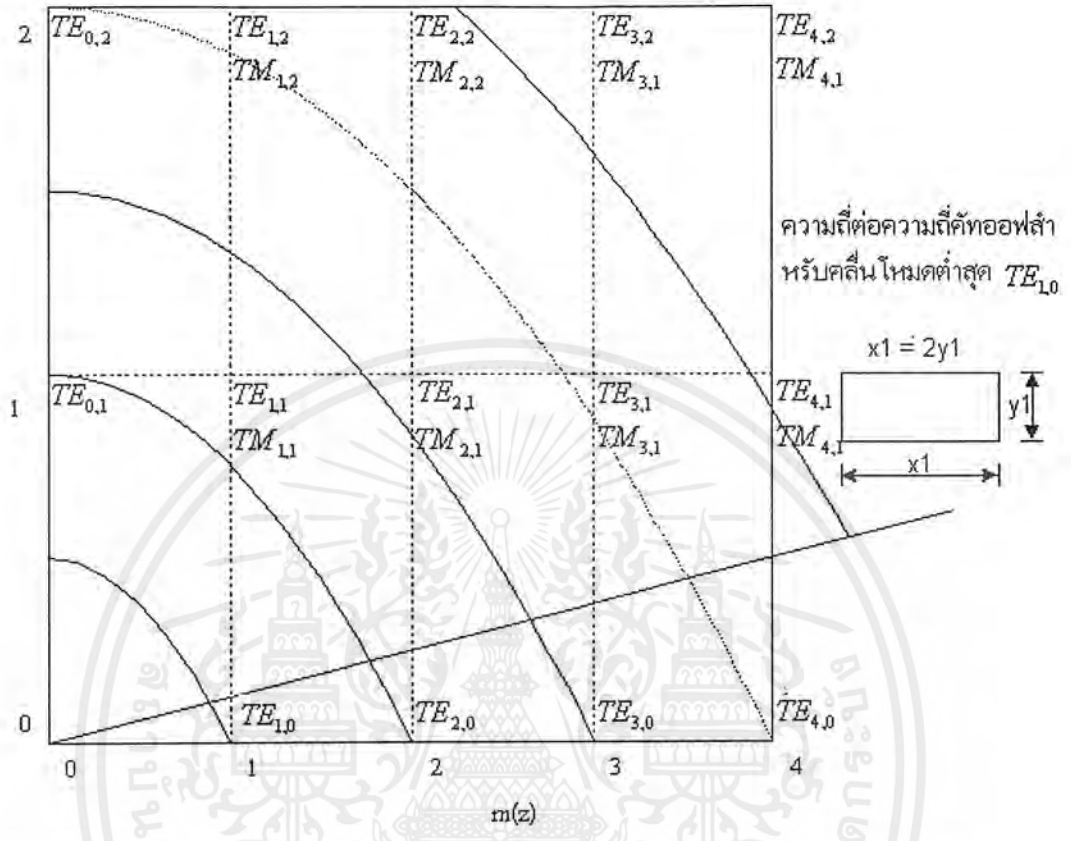
อัตราส่วนของ Z_{yz} ต่อ Z_d ในรูปฟังก์ชันของความยาวคลื่น λ_o ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 สำหรับคลื่น TM โหมดต่างๆ ในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวง $(y_1 = z_1)$

ที่กล่าวมาแล้วพิจารณาเพียงคลื่น TE โหมดเท่านั้น ในการหาความสัมพันธ์ของสนามต่างๆ สำหรับคลื่น TM โหมด ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน โดยทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 8 ในคลื่น TM โหมด $H_x = 0$ และองค์ประกอบของสนามในทิศตามแนวความยาวของท่อนำคลื่นจะเป็น E_x ซึ่งการวิเคราะห์จะไม่แสดงในที่นี้ สำหรับคลื่น TM โหมด จะเขียนแทนด้วย TM_{mn} เมื่อ m และ n เป็นเลขจำนวนเต็ม (1,2,3,...) คลื่นโหมดต่ำสุดของคลื่น TM ที่สามารถเดินทางไปในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมจะเป็นคลื่น TM_{11} โหมด

เราได้เห็นแล้วว่าคลื่นแต่ละโหมดที่เดินทางในท่อนำคลื่นจะมีค่าความยาวคลื่นคัทออฟ ค่าความเร็ว และค่าอิมพิแดนซ์เฉพาะเจาะจง เมื่อความถี่มีค่าสูงมากเพียงพอที่ทำให้คลื่นเดินทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าหนึ่งโหมด สนามผลลัพธ์จะเป็นผลรวมของสนามต่างๆ ของคลื่นแต่ละโหมดในท่อนำคลื่นนั้น



รูปที่ 2.13 คลื่น TE และ TM โหมดต่างๆ ที่มีได้ในท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมกลวงในรูปฟังก์ชันของความถี่ ที่ความถี่

มีค่าเป็นสามเท่าของความถี่คัทออฟของคลื่น TE_{10} โหมด จะมีคลื่นโหมดต่างๆ 7 โหมดที่สามารถเดินทางในท่อนำคลื่นนี้ได้ และคลื่นอีกโหมดหนึ่ง (TE_{30} โหมด) จะอยู่ที่คัพออฟ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดคลื่นที่เดินทางหลายๆ โหมด (Multiple-mode transmission) ท่อนำคลื่นโดยทั่วไปจะใช้งานในลักษณะที่จะมีเพียงคลื่นโหมดเดียวเท่านั้นที่สามารถเดินทางไปได้ ตัวอย่างเช่น เพื่อให้เกิดการนำคลื่นเฉพาะคลื่น TE_{10} โหมด z_1 และ y_1 จะต้องมีค่าน้อยกว่า $\frac{\lambda}{2}$ แต่เพื่อให้สามารถนำคลื่น TE_{10} โหมด ได้ z_1 จะต้องมีค่าในระหว่าง $\frac{\lambda}{2}$ และ 1λ และค่า 0.7λ เป็นค่าที่ใช้กันมาก ทำให้ค่าความเร็วและอิมพิแดนซ์ตามขวางจะไม่เปลี่ยนแปลงกับความถี่อย่างรวดเร็วนัก รูปที่ 2.13 สเกลเอียงจะแสดงค่าความถี่ที่เปรียบเทียบกับความถี่ คัทออฟของคลื่นโหมดต่ำสุด (TE_{10}) นั่นคือถ้าความถี่มีค่าเป็น 3 เท่า ของค่านี้ เราจะได้จากรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าคลื่นโหมดต่างๆ เหล่านี้คือ TE_{10} , TE_{01} , TE_{20} , TE_{11} , TM_{11} , TE_{21} และ TM_{21} จะสามารถเดินทางไปได้ คลื่นอีกโหมดหนึ่งคือ TE_{30} จะอยู่ที่ความถี่คัทออฟพอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

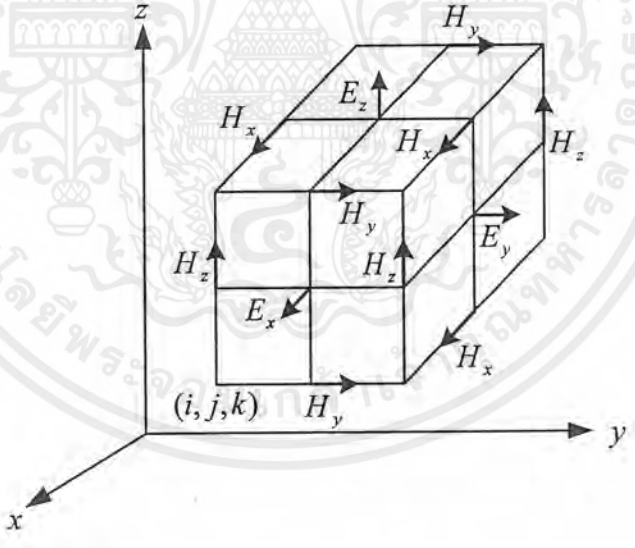
บทที่ 3
ทฤษฎีของ FD-TD

3.1 ทฤษฎีของ ยี (Yee)

ยี เป็นผู้ใช้ความสัมพันธ์ของสมการของแมกซ์เวลล์สองสมการคือ $\mu\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla x\mathrm{E}$ และ $\varepsilon\frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla xH$ สำหรับการสูญเสียของวัสดุในกรณีนี้คือ

1. ทฤษฎีของ ยี จะใช้ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กควบคู่กัน ในเวลาและสเปช (Space) เมื่อเทียบกับสมการของแมกซ์เวลล์ ซึ่งใช้เพียงสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กเพียงลำพัง กับการเคลื่อนที่ของคลื่น

2. จากรูปที่ 3.1 เป็นหัวใจที่สำคัญของทฤษฎีของยี คือทิศทางของ $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ สามมิติในสเปชทุกๆทิศทางของ $\bar{E}$ จะถูกล้อมรอบด้วยสนาม $\bar{H}$ และทุกๆสนาม $\bar{H}$ จะประกอบด้วยสนาม $\bar{E}$ สี่สนามอยู่รอบๆ

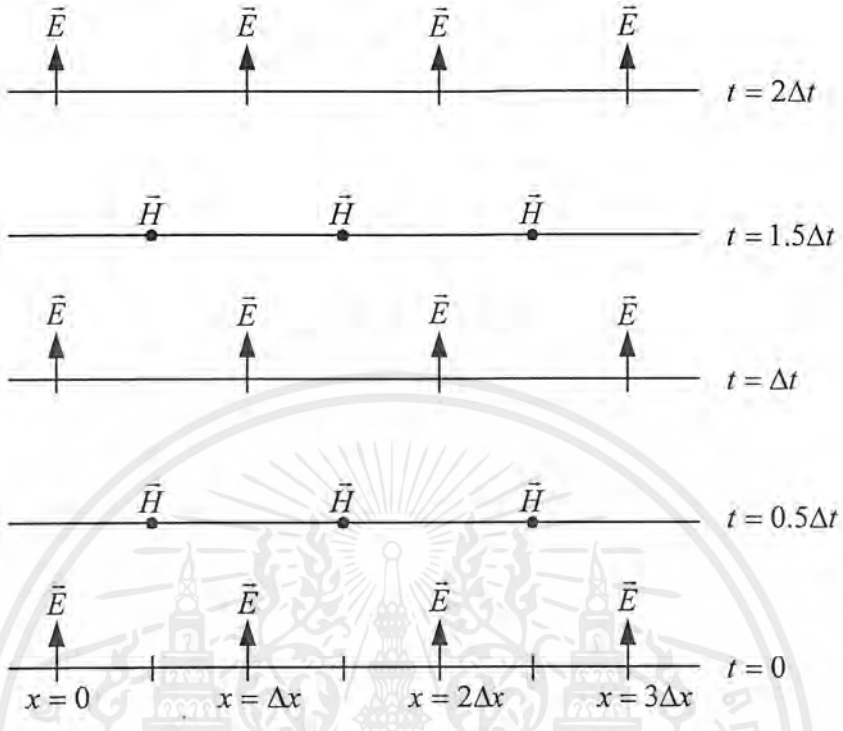


รูปที่ 3.1 รูปแสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามทฤษฎีของ ยี

3. รูปที่ 3.2 เป็นแนวความคิดของยี เน้นไปที่ส่วนประกอบของ $\bar{E}$ และ $\bar{H}$ ในเวลา แต่อยู่ในเทอมของการจัดแบบ Leapfrog คือ คำนวณ $\bar{E}$ ทั้งหมดในสเปชสามมิติที่สนใจ แล้วเก็บไปในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ คำนวณ $\bar{H}$ โดยใช้ข้อมูลของ $\bar{E}$ ที่คำนวณไปแล้วโดยคิดทีละครึ่งของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณ $\bar{E}$ ใหม่ โดยใช้ข้อมูล $\bar{H}$ ที่คำนวณมาแล้ว ขบวนการนี้จะต่อเนื่องไปจนถึงขั้นเวลาสุดท้าย



รูปที่ 3.2 รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามเวลา

3.2 สมการไฟไนท์-ดิฟเฟอร์เรนซ์ (Finite-Difference Equation)

จากสมการในบทที่ 2 คือ สมการที่ (2.75) ถึง (2.80) ทำการย้ายข้างสมการหาค่าของสนาม H_x, H_y, H_z, E_x, E_y และ E_z เทียบกับเวลาเราจะได้สมการของสนามคือ

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} - \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} - \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} - \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} - \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} - \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} - \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right)$$

จากคลื่น TM โหมด จะประกอบด้วย E_z, H_x และ H_y ดังนั้น คลื่น TM โหมดจะมีสมการคือ

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} - \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} - \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \tag{3.2}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} - \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \tag{3.3}$$

สำหรับสมการที่ (3.1) สามารถเขียนในรูปของผลต่างสืบเนื่องแบบตรงกลาง สำหรับ Space และที่ขั้นเวลาที่ n ที่จุด (i, j) ดังนั้นจะได้สมการของ H_x คือ

$$\frac{H_x\big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - H_x\big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu}\left[- \frac{E_z\big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n} - E_z\big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta y} \right] \tag{3.4}$$

$\Delta z \to \infty$ ทำให้ $E_y = 0$ ขั้นเวลาที่ $n - \frac{1}{2}$ คือขั้นเวลาที่เกิดขึ้นก่อนขั้นเวลา n ซึ่งจะมีเก็บไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ ส่วนขั้นเวลาที่ $n + \frac{1}{2}$ คือขั้นเวลาที่เราต้องการจะหา ดังนั้นจากสมการที่ (3.4) หาค่าของ H_x ที่ขั้นเวลา $n + \frac{1}{2}$ ที่ตำแหน่ง (i, j) จะได้คือ

$$H_x\big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - H_x\big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} = -\frac{\Delta t}{\mu \Delta y}\left[E_z\big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n} - E_z\big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n} \right]$$

$$H_x\big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = H_x\big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu \Delta y}\left[E_z\big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n} - E_z\big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n} \right] \tag{3.5}$$

ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่าของสมการ H_y และ E_z ได้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_y\Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = H_y\Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta y}\left[E_z\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n} - E_z\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n}\right] \tag{3.6}$$

$$E_z\Big|_{i,j}^{n+1} = E_z\Big|_{i,j}^{n} + \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x}\left[H_y\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right] - \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta y}\left[H_x\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\right] \tag{3.7}$$

จากคลื่น TE โหมด จะประกอบด้วย สนาม E_x, E_y และ H_z ดังนั้นคลื่น TE โหมด จะมีสมการ คือ

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right) \tag{3.8}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right) \tag{3.9}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right) \tag{3.10}$$

ทำเช่นเดียวกับการหาสมการที่ (3.5) จะได้สมการของคลื่น TE โหมด คือ

$$E_x\Big|_{i,j}^{n+1} = E_x\Big|_{i,j}^{n} - \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta y}\left[H_y\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}}\right] \tag{3.11}$$

$$E_y\Big|_{i,j}^{n+1} = E_y\Big|_{i,j}^{n} - \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x}\left[H_z\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_z\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right] \tag{3.12}$$

$$H_z\Big|_{i,j}^{n+1} = H_z\Big|_{i,j}^{n} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta y}\left[E_x\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n} - E_x\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n}\right] - \frac{\Delta t}{\mu \Delta x}\left[E_y\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n} - E_y\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n}\right] \tag{3.13}$$

สรุปได้ว่าสมการที่ (3.5) ถึง (3.7) และสมการ (3.11) ถึง (3.13) คือสมการไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนซ์ของคลื่น TM โหมด และ TE โหมด ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ความเสถียรภาพเชิงตัวเลข

3.3.1 การวิเคราะห์ความเสถียรภาพเชิงตัวเลขพื้นฐานของคลื่นโหมด TM

สมการของสนามในสองมิติของคลื่นโหมด TM สมมุติว่าไม่มีการสูญเสียของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial E_z}{\partial y} \tag{3.14}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\frac{\partial E_z}{\partial x} \tag{3.15}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right) \tag{3.16}$$

สามารถแก้ปัญหาโดยใช้วิธีของ FD-TD แทนในสมการแต่ละสมการแต่ไม่เปลี่ยนค่าของ μ และ ε กับตำแหน่งใน grid จะสามารถเขียนสมการของคลื่นโหมด TM ได้คือ

$$\frac{H_x\Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - H_x\Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu}\left[\frac{E_z\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n} - E_z\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n}}{\Delta y}\right] \tag{3.17}$$

$$\frac{H_y\Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y\Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu}\left[\frac{E_z\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n} - E_z\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n}}{\Delta x}\right] \tag{3.18}$$

$$\frac{E_z\Big|_{i,j}^{n+1} - E_z\Big|_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon}\left[\frac{H_y\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} - \frac{H_x\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y}\right] \tag{3.19}$$

ระนาบของคลื่น ไอเกนโหมด (Eigenmode) จะสมมุติให้มีการแพร่กระจายใน Space แบบตัวเลขสเปกตรัม (Spectrum) ของค่าเจาะจงสำหรับโหมดนี้จะเกี่ยวเนื่องกับการ Differentiation ของ Space เชิงตัวเลข จะคำนวณเทียบกับ Spectrum ที่เสถียรภาพของไอเกนวาลู (Eginvalues) คำนวณโยวิธีการดิฟเฟอรเรนติเอชัน (Differentiation) ของเวลาเชิงตัวเลข โดยจะได้สเปกตรัมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสถียรภาพของไอเกนวาลู คำนวณโยวิธีการดิฟเฟอรเรนติเอชันทางเวลาเชิงตัวเลข โดยจะได้สเปคตรัมที่สมบูรณ์ของค่าเจาะจงในอวกาศที่อยู่ในขอบเขตที่เสถียรภาพ เราจะสมมุติได้ว่าคลื่นโหมดนี้ในกริดเสถียรภาพ (ไม่สามารถมากเกินขอบเขตที่จำกัดไว้) โดยให้ขั้นเวลาที่คงที่

3.3.2 ค่าเจาะจงของเวลา

คำนวณหาขอบเขตของความเสถียรภาพของค่าเจาะจง โดยทำการแยกสมการอนุพันธ์ของเวลาไว้ทางซ้ายมือของสมการ (3.14) ถึง (3.16) จะได้

$$\frac{H_x\big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - H_x\big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -\Lambda H_x\big|_{i,j}^{n} \tag{3.20}$$

$$\frac{H_y\big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y\big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \Lambda H_y\big|_{i,j}^{n} \tag{3.21}$$

$$\frac{E_z\big|_{i,j}^{n+1} - E_z\big|_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \Lambda E_z\big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \tag{3.22}$$

สมการทั้งหมดนี้จะใช้ $\pm\frac{1}{2}$ ของขั้นเวลา สามารถเขียนสมการในรูปของ V คือทิศทางของสนามเวกเตอร์รูปทั่วไป

$$\frac{V\big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - V\big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -\Lambda V\big|_{i,j}^{n} \tag{3.23}$$

จาก $q_{i,j} = \dfrac{U\big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{U\big|_{i,j}^{n}} = \dfrac{U\big|_{i,j}^{n}}{U\big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}$ เราสามารถเขียนได้เป็น

$$q_{i,j} = \frac{V\big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{V\big|_{i,j}^{n}} = \frac{V\big|_{i,j}^{n}}{V\big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}} \tag{3.24}$$

สำหรับทุกๆ n เราต้องการ $|q_{i,j}| \le 1$ ใน FD-TD grid และทั้งหมดของกริดที่จุด (i , j) โดยเลี่ยงโหมดที่ออกนอกขีดจำกัดระหว่างขั้นของเวลาทั่วไป นี่คือจุดสำคัญที่ต้องการในเรื่องความเสถียรภาพ เราแทนแทน $q_{i,j}$ ในสมการ (3.23) จะได้ $q_{i,j}$ ในสมการ(3.23)ของยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{q_{i,j}V\big|_{i,j}^{n} - \left(V\big|_{i,j}^{n} / q_{i,j}\right)}{\Delta t} = -\Lambda V\big|_{i,j}^{n} \tag{3.25}$$

$$\left(q_{i,j}\right)^2 - \Lambda\Delta t q_{i,j} - 1 = 0 \tag{3.26}$$

ใช้สูตรการแยกตัวประกอบจะได้

$$q_{i,j} = \frac{\Lambda\Delta t \pm \sqrt{\left(\Lambda\Delta t\right)^2 + 4}}{2} = \underbrace{\frac{\Lambda\Delta t}{2}}_{ma} \pm \underbrace{\sqrt{\left(\Lambda\Delta t\right)^2 + 1}}_{m\sqrt{a^2+1}} \tag{3.27}$$

จะได้ $\left|q_{i,j}\right| = 1$ เสมอ (เป็นไปตามเงื่อนไขของความเสถียรภาพ ซึ่งคือ $\left|q_{i,j}\right| \le 1$) ถ้า a เป็นจำนวนจินตภาพและอยู่ในช่วง $\pm j$ สิ่งที่ได้ตามมาคือ

$$\mathrm{Re}(a) = 0 \;\rightarrow\; a = j\,\mathrm{Im}(a) \tag{3.28}$$

ซึ่ง $-1 \le \mathrm{Im}(a) \le 1$ ภายใต้รากที่สองจะได้

$$\sqrt{a^2+1} = \sqrt{\left[j\,\mathrm{Im}(a)\right]^2 + 1} = \sqrt{1 - \left[j\,\mathrm{Im}(a)\right]^2} \;=\; \text{จำนวนจริง} \tag{3.29}$$

เราสามารถเขียนได้เป็น $$q_{i,j} = \underbrace{j\,\mathrm{Im}(a)}_{imaginary} \pm \underbrace{\sqrt{a^2+1}}_{real} \tag{3.30}$$

$$\left|q_{i,j}\right| = \sqrt{1 - \left[\mathrm{Im}(a)\right]^2 + \left[\mathrm{Im}(a)\right]^2} = 1 \tag{3.31}$$

จากสมการ (3.27) $a = \Lambda\dfrac{\Delta t}{2}$ และ a คือจำนวนจินตภาพ จาก (3.28) ถ้าไม่คิด Λ จะได้แต่จำนวนจินตภาพ $\left(\Lambda = j\,\mathrm{Im}(\Lambda)\right)$ และอยู่ในเงื่อนไข

$$-1 \le \frac{\Delta t}{2}\mathrm{Im}(a) \le 1 \;\rightarrow\; -\frac{1}{\Delta t} \le \mathrm{Im}(a) \le \frac{1}{\Delta t} \tag{3.32}$$

นี้คือโหมดในอวกาศว่างที่เป็นได้ ที่มีค่าเจาะจงในช่วงที่เสถียรภาพบนแกนของจำนวนจินตภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การแก้ปัญหาค่าเจาะจงในอวกาศ

ทำการแยกสมการ (3.14) ถึง (3.16) เพื่อแก้ปัญหาของค่าเจาะจงคือ

$$-\frac{1}{\mu}\left[-\frac{E_z\big|_{i,j+\frac{1}{2}}-E_z\big|_{i,j-\frac{1}{2}}}{\Delta y}\right]=\Lambda H_x\big|_{i,j} \tag{3.33}$$

$$\frac{1}{\mu}\left[\frac{E_z\big|_{i+\frac{1}{2},j}-E_z\big|_{i-\frac{1}{2},j}}{\Delta x}\right]=H_y\big|_{i,j} \tag{3.34}$$

$$\frac{1}{\varepsilon}\left[\frac{H_y\big|_{i+\frac{1}{2},j}-H_y\big|_{i-\frac{1}{2},j}}{\Delta x}-\frac{H_x\big|_{i,j+\frac{1}{2}}-H_x\big|_{i,j-\frac{1}{2}}}{\Delta y}\right]=\Lambda E_z\big|_{i,j} \tag{3.35}$$

ที่ขั้นเวลา n ปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่แพร่กระจายในอวกาศผ่านกริด สามารถใช้อนุกรมของฟูเรีย กับส่วนของพิกัดกริด i และ j เป็นเงื่อนไขสเปคตรัมของความถี่ในอวกาศ ใน 2 มิติ หรือคลื่นระนาบไอเกนโหมดของกริด ซึ่งจะบอกชนิดของโหมดของสเปคตรัมความถี่ของคลื่น มี $\bar{k}_x$ และ $\bar{k}_y$ ทิศทางตามแนวแกน x และ y คือคลื่นเวกเตอร์เชิงตัวเลข

$$E_z\big|_{I,J}=E_{z_0}e^{j\left(\bar{k}_x I\Delta x+\bar{k}_y J\Delta y\right)} \tag{3.36}$$

$$H_x\big|_{I,J}=H_{x_0}e^{j\left(\bar{k}_x I\Delta x+\bar{k}_y J\Delta y\right)} \tag{3.37}$$

$$H_y\big|_{I,J}=H_{y_0}e^{j\left(\bar{k}_x I\Delta x+\bar{k}_y J\Delta y\right)} \tag{3.38}$$

แทนลงในสมการไอเกนโหมด ที่แสดงโดยสมการ (3.36) ถึง (3.38) จะได้

$$-\frac{1}{\mu}\left\{\frac{E_{Z_0}e^{j\left[\bar{k}_x I\Delta x+\bar{k}_y\left(J+\frac{1}{2}\right)\Delta y\right]}-E_{Z_0}e^{j\left[\bar{k}_x I\Delta x+\bar{k}_y\left(J-\frac{1}{2}\right)\Delta y\right]}}{\Delta y}\right\}=\Lambda H_{Z_0}e^{j\left(\bar{k}_x I\Delta x+\bar{k}_y J\Delta y\right)} \tag{3.39}$$

หารทั้งสองข้างของสมการทั้งสองด้วย $e^{j\left(\bar{k}_x I\Delta x+\bar{k}_y J\Delta y\right)}$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{E_{Z_0}}{\mu\Delta y}\left\{e^{j\left[\bar{k}_x(\Delta y/2)\right]}-e^{j\left[\bar{k}_x(\Delta y/2)\right]}\right\}=\Lambda H_{x_0} \tag{3.40}$$

ประยุกต์ใช้ทฤษฎีของอูเลน (Euler) ใช้ทฤษฎีของยี ในเรื่องของ sin อธิบายจะได้

$$-\frac{2jE_{z_0}}{\Delta y\mu}\sin\left[\frac{\bar{k}_y}{2}\right]=\Lambda H_x \Rightarrow H_x=-\frac{2jE_{z_0}}{\Lambda\mu\Delta y}\sin\frac{\bar{k}_y\Delta y}{2}$$

ในทำนองเดียวกัน แทนลงในอิเกนโหมดของสมการ(3.36) ถึง(3.38) ใน (3.34) และ (3.35) ของยี จากกนั้นจะได้สมการเหมือนกัน

$$H_{y_0}=\frac{2j\bar{E}_{z_0}}{\Lambda\mu\Delta x}\sin\left(\frac{\bar{k}_x\Delta x}{2}\right) \tag{3.41}$$

$$E_{z_0}=\frac{2j}{\Lambda\varepsilon}\left[\frac{H_{y_0}}{\Delta x}\sin\left(\frac{\bar{k}_x\Delta x}{2}\right)-\frac{H_{x_0}}{\Delta y}\sin\left(\frac{\bar{k}_y\Delta y}{2}\right)\right] \tag{3.42}$$

แทน H_{x_0} ของสมการ (4.12a) และ H_{y_0} ของสมการ (4.1b) ใน (4.12c) ของยี จะได้

$$E_{z_0}=\frac{2j}{\Lambda\varepsilon}\left[\frac{1}{\Delta x}\cdot\frac{2jE_{z_0}}{\Lambda\mu\Delta x}\sin\left(\frac{\bar{k}_x\Delta x}{2}\right)\cdot\sin\left(\frac{\bar{k}_x\Delta x}{2}\right)\right.$$

$$\left.-\frac{1}{\Delta y}\cdot\frac{-2jE_{z_0}}{\Lambda\mu\Delta y}\sin\left(\frac{\bar{k}_x\Delta y}{2}\right)\cdot\sin\left(\frac{\bar{k}_x\Delta y}{2}\right)\right] \tag{3.43}$$

หารทั้งสองข้างของสมการด้วย E_{z_0} จะได้ Λ^2 คือ

$$E_{z_0}=\frac{4}{\mu\varepsilon}\left[\frac{1}{(\Delta x)^2}\sin^2\left(\frac{\bar{k}_x\Delta x}{2}\right)+\frac{1}{(\Delta y)^2}\sin\left(\frac{\bar{k}_y\Delta y}{2}\right)\right] \tag{3.44}$$

จากพื้นฐานของฟังก์ชัน sin จะได้

$$-1\le\sin\left[\frac{\bar{k}_x\Delta x}{2}\right]\le 1\,,\ -1\le\sin\left[\frac{\bar{k}_y\Delta y}{2}\right]\le 1 \tag{3.45}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ $\bar{k}_x$ และ $\bar{k}_y$ รู้ค่าส่วน $\sin^2$ ในสมการ (3.44) เป็นบวก และมีค่าระหว่าง 0 และ 1 ค่า Λ^2 มีค่าเป็นลบ ดังนั้น Λ เป็นจำนวนจินตภาพ จากเงื่อนไขของ $\sin^2$ จะได้เงื่อนไขของ Λ ของเวกเตอร์ $\bar{k}$ นั่นคือ

$$R_e(\Lambda) = 0 \tag{3.46}$$

$$-2c\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}} \le I_m(\Lambda) \le 2c\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}} \tag{3.47}$$

ซึ่ง $c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$ เป็นความเร็วของแสงในวัสดุที่ทรงแบน

3.3.4 กฎของความเป็นเสถียรภาพ

ตัวเลขเชิงเสถียรภาพสำหรับสปาเชียลโหมด (Spatial mode) จะอยู่ในขอบเขตของไอเกนวาลู แสดงโดยใช้สมการ (4.15) ซึ่งจำเป็นต้องขึ้นกับขอบเขตช่วงเสถียรภาพของขั้นเวลาไอเกนวาลูโดยใช้สมการ (4.8) ข้อสังเกตจากเวลาและสเปซไอเกนวาลู จะอยู่ในแกนจินตภาพมีขนาดที่เท่ากัน มันเป็นตัวกำหนดขอบเขตบนในสมการ (4.15)

$$2c\left(\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}}\right) \le \frac{2}{\Delta t} \rightarrow \Delta t \le \frac{1}{c\left(\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}}\right)} \tag{3.48}$$

ถ้า $\Delta x = \Delta y = \Delta$ จะได้สมการคือ

$$\Delta t \le \frac{1}{c\left(\sqrt{\frac{1}{\Delta^2}+\frac{1}{\Delta^2}}\right)} = \frac{1}{c\left(\sqrt{\frac{2}{\Delta^2}}\right)} = \frac{\Delta}{c\sqrt{2}} \tag{3.49}$$

เมื่อเราให้ Δ_y เพิ่มขึ้นมากๆเทียบกับ Δ_x จะได้สมการของความเสถียรภาพคือ

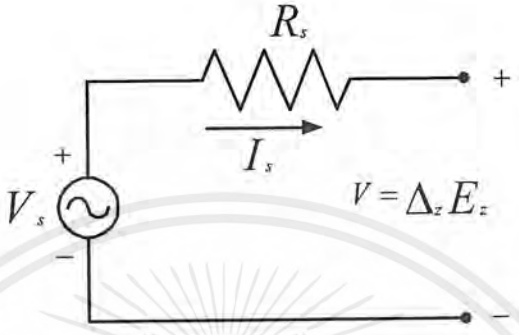
$$\Delta t \le \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}}} = \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}}} = \frac{\Delta x}{c} \tag{3.50}$$

นี่คือข้อสรุปของรูปแบบทั่วไปของการแพร่กระจายคลื่น TM โหมด แบบ 2 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 แบบจำลองของแหล่งกำเนิดที่มีความต้านทาน

แหล่งกำเนิดของสัญญาณในเรื่องของ FD-TD จะให้กำเนิดสนามไฟฟ้า E ในทิศทางของ z โดยจะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งคือ $i_s\Delta x$, $i_s\Delta y$ และ $k_s\Delta z$ โดยการเขียนวงจรเทียบเคียง จะได้เป็นแหล่งกำเนิดแรงดัน (voltage source) และมีความต้านทานภายใน R_s ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แหล่งกำเนิดของ FD-TD กับแหล่งกำเนิดที่มีความต้านทาน R_s

ถ้าแหล่งกำเนิดมีความต้านทานภายในเป็นศูนย์ $(R_s = 0)$ จะได้สนามไฟฟ้าของ FD-TD ที่แหล่งกำเนิดดังสมการคือ

$$E_s^n(i_s, j_s, k_s) = \frac{V_s(n\Delta t)}{\Delta z} \tag{3.51}$$

โดย V_s คือแรงดันที่ฟังก์ชันของเวลาต่างๆ (เป็นไปตามหลักการของ Gaussian pulse คือ แหล่งกำเนิดที่มีความต้านทานภายในเป็นศูนย์โอห์ม) ค่าของ $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ และ $E_s^n(i_s, j_s, k_s)$ ก็คือแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าของ FD-TD ซึ่งจะมีกระแสไหลจากแหล่งกำเนิด สามารถทำการคำนวณโดยใช้กฎของแอมแปร์ (Ampere 's circuit law) คือใช้การอินทิกรัลเชิงเส้นของสนามแม่เหล็กรอบที่ตั้งของแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า ดังนั้นจะได้สมการของกระแสคือ

$$i_s^{n-\frac{1}{2}} = \left[H_x^{n-\frac{1}{2}}(i_s \cdot j_s - 1 \cdot k_s) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i_s \cdot j_s \cdot k_s) \right] \Delta x$$

$$+ \left[H_y^{n-\frac{1}{2}}(i_s \cdot j_s \cdot k_s) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(i_s - 1 \cdot j_s \cdot k_s) \right] \Delta y \tag{3.52}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเราสามารถที่จะประยุกต์ใช้กฎของโอห์ม (Ohm's low) จากวงจรในรูปที่ 3.3 นั้นแหล่งกำเนิดของสนามไฟฟ้ามีสมการคือ

$$E_s^n(i_s, j_s, k_s) = \frac{V_s(n\Delta t)}{\Delta z} + \frac{I_s^{n-\frac{1}{2}} R_s}{\Delta z} \tag{3.53}$$

ในสมการถ้า $R_s = 0$ ผลที่ได้ก็คือ hard – voltage source

3.5 การวิเคราะห์สนามด้วยวิธี PML ABC

วิธีการของ PML ABC เป็นการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่ใช้ใน FD-TD โดยการประยุกต์ใช้สมการของแมกซ์เวลล์ แต่จะแยกสนามที่คิดออกเป็นสองทิศทางประกอบกัน วิธีการวิเคราะห์แบบนี้จะใช้ประโยชน์ตอนที่สนามของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านในส่วนของผนังของท่อนำคลื่น

3.5.1 การวิเคราะห์กรณีของคลื่นโหมด TM ใน 2 มิติ

คลื่นโหมด TM จะมีสนามที่ต้องพิจารณา 3 สนามคือ E_z, H_x และ H_y ในวิธีการของ PML ABC สนาม E_z จะเคลื่อนที่ในสองทิศทางคือ E_{zx} และ E_{zy} และจะต้องมีการแก้ไขสมการของแมกซ์เวลล์ ให้เป็นตามสมการของ PML ABC ในกรณีของคลื่นโหมด TM จะได้ สมการของสนามคือ

$$\varepsilon_o \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \tag{3.54}$$

$$\varepsilon_o \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} = -\frac{\partial H_x}{\partial y} \tag{3.55}$$

$$\mu_o \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_y^* H_x = -\frac{\partial E_z}{\partial y} \tag{3.56}$$

$$\mu_o \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_x^* H_y = \frac{\partial E_z}{\partial x} \tag{3.57}$$

เมื่อ $E_z = E_{zx} + E_{zy}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.54) ซึ่งเป็นสมการแบบ PML สามารถเขียนในรูปของสมการของแมกซ์เวลล์คือ

$$\varepsilon_o\left[\frac{E_{zx}\Big|_{i,j}^{n+1}-E_{zx}\Big|_{i,j}^{n}}{\Delta t}\right]+\sigma_x\left[\frac{E_{zx}\Big|_{i,j}^{n+1}-E_{zx}\Big|_{i,j}^{n}}{2}\right]=\frac{H_y\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}-H_y\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \qquad (3.58)$$

นำ $2\Delta t$ คูณตลอดสมการ

$$2\varepsilon_o\left[E_{zx}\Big|_{i,j}^{n+1}-E_{zx}\Big|_{i,j}^{n}\right]+\Delta t\sigma_x\left[E_{zx}\Big|_{i,j}^{n+1}-E_{zx}\Big|_{i,j}^{n}\right]=\frac{2\Delta t}{\Delta x}\left[H_y\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}-H_y\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right]$$

$$\left[2\varepsilon_o+\Delta t\sigma_x\right]E_{zx}\Big|_{i,j}^{n+1}-\left[2\varepsilon_o-\Delta t\sigma_x\right]E_{zx}\Big|_{i,j}^{n}=\frac{2\Delta t}{\Delta x}\left[H_y\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}-H_y\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right]$$

$$E_{zx}\Big|_{i,j}^{n+1}=\frac{\left[2\varepsilon_o-\Delta t\sigma_x\right]}{\left[2\varepsilon_o+\Delta t\sigma_x\right]}E_{zx}\Big|_{i,j}^{n}+\frac{2\Delta t}{\Delta x\left[2\varepsilon_o+\Delta t\sigma_x\right]}\left[H_y\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}-H_y\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right] \qquad (3.59)$$

ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาสมการของ E_{zy} จากสมการที่ (3.55) คือ

$$E_{zy}\Big|_{i,j}^{n+1}=\frac{\left[2\varepsilon_o-\Delta t\sigma_y\right]}{\left[2\varepsilon_o+\Delta t\sigma_y\right]}E_{zy}\Big|_{i,j}^{n}-\frac{2\Delta t}{\Delta y\left[2\varepsilon_o+\Delta t\sigma_y\right]}\left[H_y\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}-H_y\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\right] \qquad (3.60)$$

จากสมการที่ (3.56) ซึ่งเป็นสมการแบบ PML สามารถเขียนในรูปของสมการของแมกซ์เวลล์คือ

$$\mu_o\left[\frac{H_x\Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-H_x\Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t}\right]+\sigma_y^*\left[\frac{H_x\Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+H_x\Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{2}\right]=-\frac{1}{\Delta y}\left[E_z\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n}-E_z\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n}\right]$$

$$\left[2\mu_o+\sigma_y^*\Delta t\right]H_x\Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-\left[2\mu_o+\sigma_y^*\Delta t\right]H_x\Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}=-\frac{2\Delta t}{\Delta y}\left[E_z\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n}-E_z\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n}\right]$$

$$H_x\Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}=\frac{\left[2\mu_o+\sigma_y^*\Delta t\right]}{\left[2\mu_o+\sigma_y^*\Delta t\right]}H_x\Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}-\frac{2\Delta t}{\Delta y\left[2\mu_o+\sigma_y^*\Delta t\right]}\left[E_z\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n}-E_z\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n}\right] \qquad (3.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาสมการของ H_y ได้คือ

$$H_y\Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\left[2\mu_o + \sigma_x^*\Delta t\right]}{\left[2\mu_o + \sigma_x^*\Delta t\right]} H_y\Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{2\Delta t}{\Delta x\left[2\mu_o + \sigma_x^*\Delta t\right]}\left[E_z\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n} - E_z\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n}\right] \tag{3.62}$$

เมื่อ σ_x และ σ_y คือสภาพนำทางไฟฟ้า (Electric conductivity) ส่วน σ_x^* และ σ_y^* คือค่าความสูญเสียทางแม่เหล็ก ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ตามสมการคือ

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_o} = \frac{\sigma^*}{\mu_o} \tag{3.63}$$

สำหรับคลื่นโหมด TE สามารถแก้ไขสมการของแมกซ์เวลล์ให้เป็นแบบ PML ABC โดยจะมีสมการคือ

$$\varepsilon_o \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma_y E_x = \frac{\partial\left(H_{zx} + H_{zy}\right)}{\partial y} \tag{3.64}$$

$$\varepsilon_o \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma_x E_y = -\frac{\partial\left(H_{zx} + H_{zy}\right)}{\partial x} \tag{3.65}$$

$$\mu_o \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_x^* H_{zx} = -\frac{\partial E_y}{\partial x} \tag{3.66}$$

$$\mu_o \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_y^* H_{zy} = -\frac{\partial E_x}{\partial y} \tag{3.67}$$

3.5.2 เงื่อนไขของการสะท้อนและการแมทชิง (Matching)

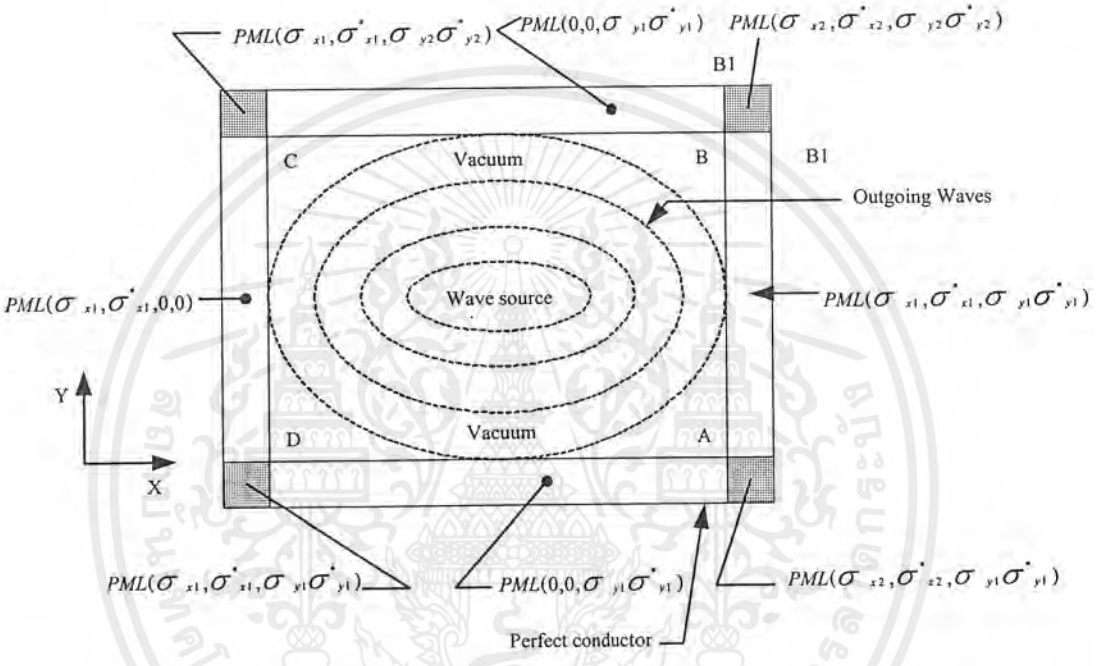
สัญญาณที่ไปกระทบกับผนังของท่อนำคลื่น ของค่าอิมพีแดนซ์จะต้องเป็นค่าที่แมทชิงกันเพราะทำให้ไม่เกิดการสะท้อนของสัญญาณค่าของอิมพีแดนซ์หาได้จากสมการคือ

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_o}{\varepsilon_o}} \tag{3.68}$$

จากสมการค่าของ Z คือค่าของอิมพีแดนซ์ที่แมทชิงกันของ FD-TD ที่ใช้การวิเคราะห์แบบ PML ABC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากรูปที่ 3.4 เป็นรูป 2 มิติของ TE FD-TD กริด (แกน x และแกน y) โดยมีส่วนที่เป็นอวกาศว่างและส่วนที่ผนังทั้งสี่ด้าน ผนังทางด้านซ้ายและทางด้านขวา ($x_{\max}$ และ $x_{\min}$) ของกริด PML จะมี σ_x และ σ_x^* ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (3.63) แต่จะมี $\sigma_y = \sigma_y^* = 0$ ที่ผนังส่วนบนและส่วนล่าง ($y_{\max}$ และ $y_{\min}$) ของกริด PML จะมี σ_y และ σ_y^* เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ (3.63) เช่นเดียวกัน แต่ตามความยาวจะมีค่า $\sigma_x = \sigma_x^* = 0$ และที่มุมทั้งสี่ จะมีการชนกันของ 2 PML หรือมีความสูญเสีย 4 ค่าคือ σ_x , σ_x^* , σ_y และ σ_y^* ซึ่งจะไม่มีค่าใดที่เป็นศูนย์



รูปที่ 3.4 รูปโครงสร้างของ FD-TD กริด ใน 2 มิติ ที่มีค่าความสูญเสียของ PML ABC

ค่าความสูญเสียต่างๆเหล่านี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้น สัมพันธ์กับสมการ คือ

$$\sigma(\rho) = \sigma_{\max}\left(\frac{\rho}{\delta}\right)^n \tag{3.69}$$

ซึ่ง δ ก็คือความหนาของ PML และ σ คือ σ_x หรือ σ_y สามารถเขียนในรูปของสมการสะท้อนได้คือ

$$R(0) = e^{-2\sigma_{\max}(\delta\cos\theta/(n+1)\varepsilon_o c)} \tag{3.70}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปจะใช้มุมที่ $R(0)=e^{-2\sigma_{\max}(\delta/(n+1)\varepsilon_o c)}$ เพราะเป็นมุมที่เกิดการสะท้อนน้อยที่สุด เราจะได้ $R\approx 1$

3.5.3 ขั้นเวลาเอ็กซ์ โพเนนเชียล

เป็นขั้นเวลาที่ใช้ในการวิเคราห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ PML ABC โดยประยุกต์มาจากสมการของแมกซ์เวลล์ คือ

$$\frac{\partial E_y}{\partial t}+\frac{\sigma}{\varepsilon_o}E_y=-\frac{1}{\varepsilon_o}\frac{\partial H_z}{\partial x} \tag{3.71}$$

เรากำหนดให้ โซลูชันของสมการ $E_y(t)$ มีค่าคือ

$$E_{y_{homog}}=Ce^{-\sigma t/\varepsilon_o} \tag{3.72}$$

ที่ขั้นเวลาต่อมาให้มีสมการคือ

$$E\big|^{n+1}{}_{y_{homog}}=Ce^{-\sigma t/\varepsilon_o}E\big|^{n}{}_{y_{homog}} \tag{3.73}$$

แทนสมการ (3.72) และ (3.73) ในสมการ อนุพันธ์ของ $E_y(t)$ จะได้คือ

$$E_{y_{par}}\left(t'\right)=-\frac{1}{\sigma}\frac{\partial H_z}{\partial x}+Ke^{-\sigma t'/\varepsilon_o} \tag{3.74}$$

จากสมการที่ (3.74) แทนค่า $t'=0$ เราจะได้ค่าคือ $K=\frac{1}{\sigma}\frac{\partial H_z}{\partial x}$ และแทนค่า K ในสมการที่ (3.74) จะได้สมการคือ

$$E_{y_{par}}\left(t'\right)=-\frac{1}{\sigma}\frac{\partial H_z}{\partial x}+\left(e^{-\sigma t'/\varepsilon_o}-1\right) \tag{3.75}$$

โดยให้ขั้นเวลาสุดท้ายคือ $t'=\Delta t$ ทนในสมการที่ (3.75) จะได้คือ

$$E_{y_{par}}\left(t'=\Delta t\right)=-\frac{1}{\sigma}\frac{\partial H_z}{\partial x}+\left(e^{-\sigma\Delta t/\varepsilon_o}-1\right) \tag{3.76}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการรวมผลที่ได้ทั้งหมดโดยให้ขั้นเวลาสุดท้ายคือ $(n+1)$ และรวมสมการที่ (3.73) และ (3.74) ค่าเฉลี่ยของ $\frac{\partial H_z}{\partial x}$ อยู่ที่ขั้นเวลาที่ $\left(n+\frac{1}{2}\right)$ จะได้สมการคือ

$$E_y\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} = e^{-\sigma\Delta t/\varepsilon_o} E_y\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n} + \frac{1}{\sigma\Delta x}\left(e^{-\sigma\Delta t/\varepsilon_o} - 1\right)\left(H_z\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} - H_z\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1}\right) \tag{3.77}$$

สมการที่ (3.77) ใช้กับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ PML ABC การทำขั้นเวลาของเอ็กซ์โพเนนเชียลของคลื่นโหมด TM จะได้สมการคือ

$$H_x\Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = e^{\sigma^*\Delta t/\mu_o} H_x\Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{1}{\sigma\Delta y}\left(1 - e^{-\sigma^*\Delta t/\mu_o}\right)\left[E_z\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n} - E_z\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n}\right] \tag{3.78}$$

$$H_y\Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = e^{\sigma^*\Delta t/\mu_o} H_y\Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{\sigma\Delta x}\left(1 - e^{-\sigma^*\Delta t/\mu_o}\right)\left[E_z\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n} - E_z\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n}\right] \tag{3.79}$$

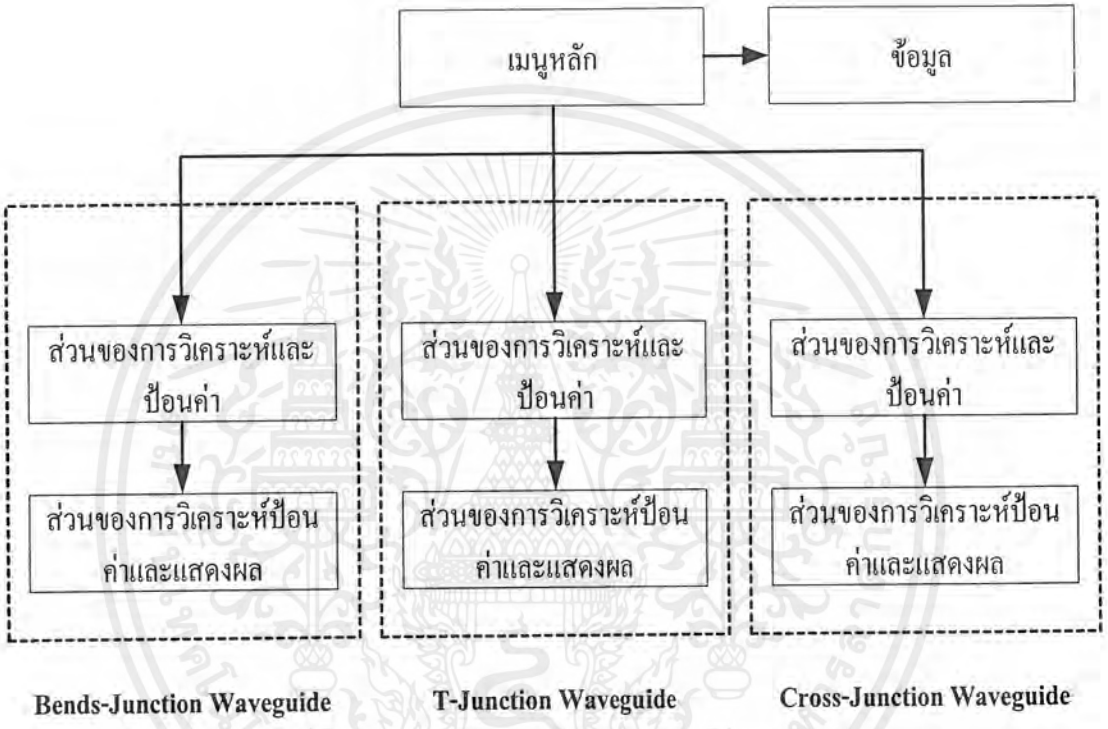
$$E_{zx}\Big|_{i,j}^{n+1} = e^{-\sigma^*\Delta t/\varepsilon_o} E_x\Big|_{i,j}^{n} - \frac{1}{\sigma\Delta x}\left(1 - e^{-\sigma^*\Delta t/\varepsilon_o}\right)\left[H_y\Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y\Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}\right] \tag{3.80}$$

$$E_{zy}\Big|_{i,j}^{n+1} = e^{-\sigma^*\Delta t/\varepsilon_o} E_y\Big|_{i,j}^{n} + \frac{1}{\sigma\Delta y}\left(1 - e^{-\sigma^*\Delta t/\varepsilon_o}\right)\left[H_x\Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x\Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\right] \tag{3.81}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่4
การออกแบบและการวิเคราะห์

ในการออกแบบและการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องด้วยวิธี FD-TD จะใช้โปรแกรม Matlab ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์โดยจะมีโครงสร้างของโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างและออกแบบ

4.1 เมนูหลัก

ส่วนของเมนูหลักจะทำหน้าที่ในการอ่านรายละเอียดโดยอ่านจาก 2 ส่วนใหญ่ๆคือ

4.1.1 การอ่านข้อมูลในส่วนรายชื่อของการวิเคราะห์

ข้อมูลในส่วนรายชื่อของการวิเคราะห์ จะแสดงรายชื่อของท่อนำคลื่น 3 ชนิดคือ

1. ท่อนำคลื่นแบบทำมุมตั้งฉาก (Bends Waveguide)
2. ท่อนำคลื่นแบบข้อต่อ T (T-Junction Waveguide)
3. ท่อนำคลื่นแบบข้อต่อตัดขวาง (Cross - Junction Waveguide)

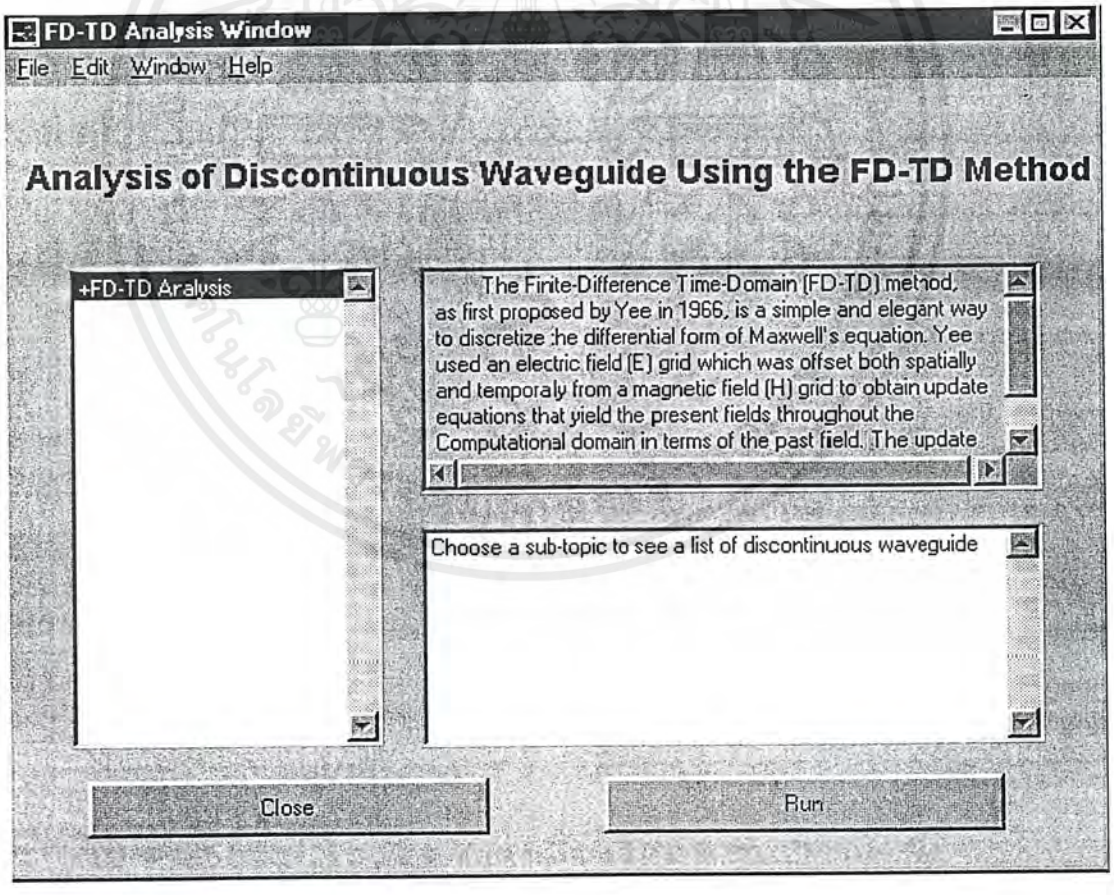
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการอ่านข้อมูลจากส่วนนี้ก็คือ การเลือกไปที่ท่อนำคลื่นที่ต้องการ จะมีแถบสีขึ้นในส่วนของท่อนำคลื่นที่ได้เลือกไว้ หลังจากนั้นให้เลือกไปที่หน้าต่างที่มีคำว่า Run เช่นถ้าเลือกท่อนำคลื่นแบบ Bends Waveguide และจะมีแถบสีที่ชื่อที่ได้เลือกไว้หลังจากนั้นให้เลือกไปที่หน้าต่าง Run Bends Waveguide ผลที่ได้คือจะไปยังส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ Bends Waveguide

หากต้องการจะเลิกใช้งาน ให้เลือกไปที่หน้าต่าง Close หน้าจอของส่วนเมนูหลักจะปิดไป

4.1.2 การอ่านในส่วนของข้อมูล

เป็นการอ่านข้อมูลสองส่วนคือส่วนแรกเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดของของทฤษฎีของ FD-TD โดยย่อ ส่วนที่สองเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดของท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องทั้ง 3 แบบ โดยย่อ การจะอ่านข้อมูลของทั้งสองส่วนนี้ ทำได้โดยเลือกที่ FD-TD Analysis จะแสดงรายละเอียดของทฤษฎี FD-TD โดยย่อ หากเลือกไปที่ Discontinuous Waveguide จะแสดงรายละเอียดของท่อนำคลื่นทั้ง 3 แบบ พร้อมกับแสดงในส่วนของรายชื่อของการวิเคราะห์



รูปที่ 4.2 แสดงหน้าต่างของส่วนเมนูหลัก

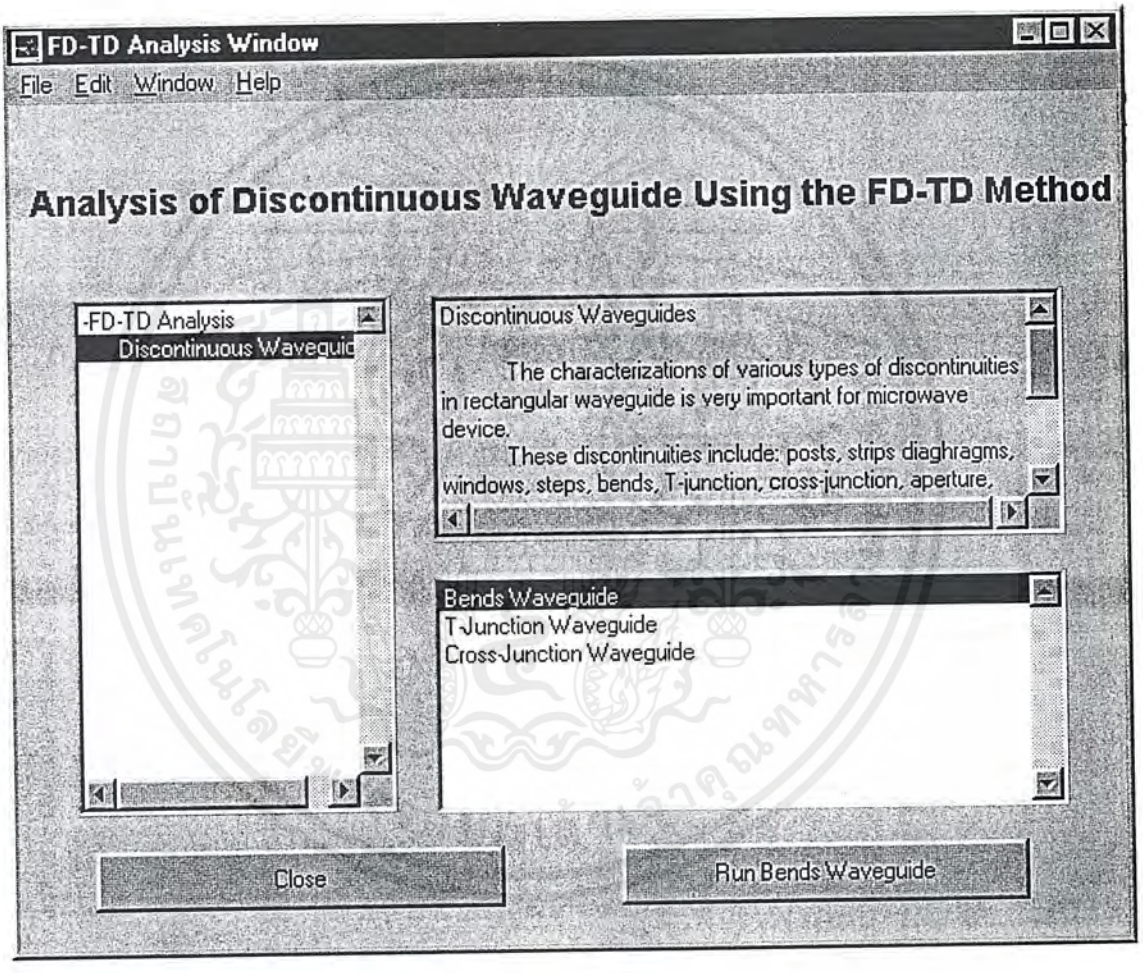
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมในส่วนของเมนูหลักคือ โปรแกรมชื่อ fdtds.m ซึ่งจะอยู่ภาคผนวกของปริญญานิพนธ์

4.1.3 ส่วนของข้อมูล

คือส่วนที่แสดงรายละเอียดของข้อมูลโดยย่อคือละเอียดของของทฤษฎี FD-TD และรายละเอียดของข้อมูลท่อนำคลื่นทั้ง 3 แบบ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ในหัวข้อที่ (4.1.2)

โปรแกรมในส่วนของข้อมูลคือ โปรแกรมจะอยู่ในชื่อ guideinfo.m ซึ่งจะอยู่ภาคผนวกของปริญญานิพนธ์



รูปที่ 4.3 แสดงหน้าต่างส่วนของข้อมูล

4.2 ส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่า

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่สามารถป้อนข้อมูลเพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ให้ได้ตามค่าของข้อมูลที่ทำการป้อน โดยส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าจะมี 3 แบบตามรายชื่อของท่อนำคลื่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

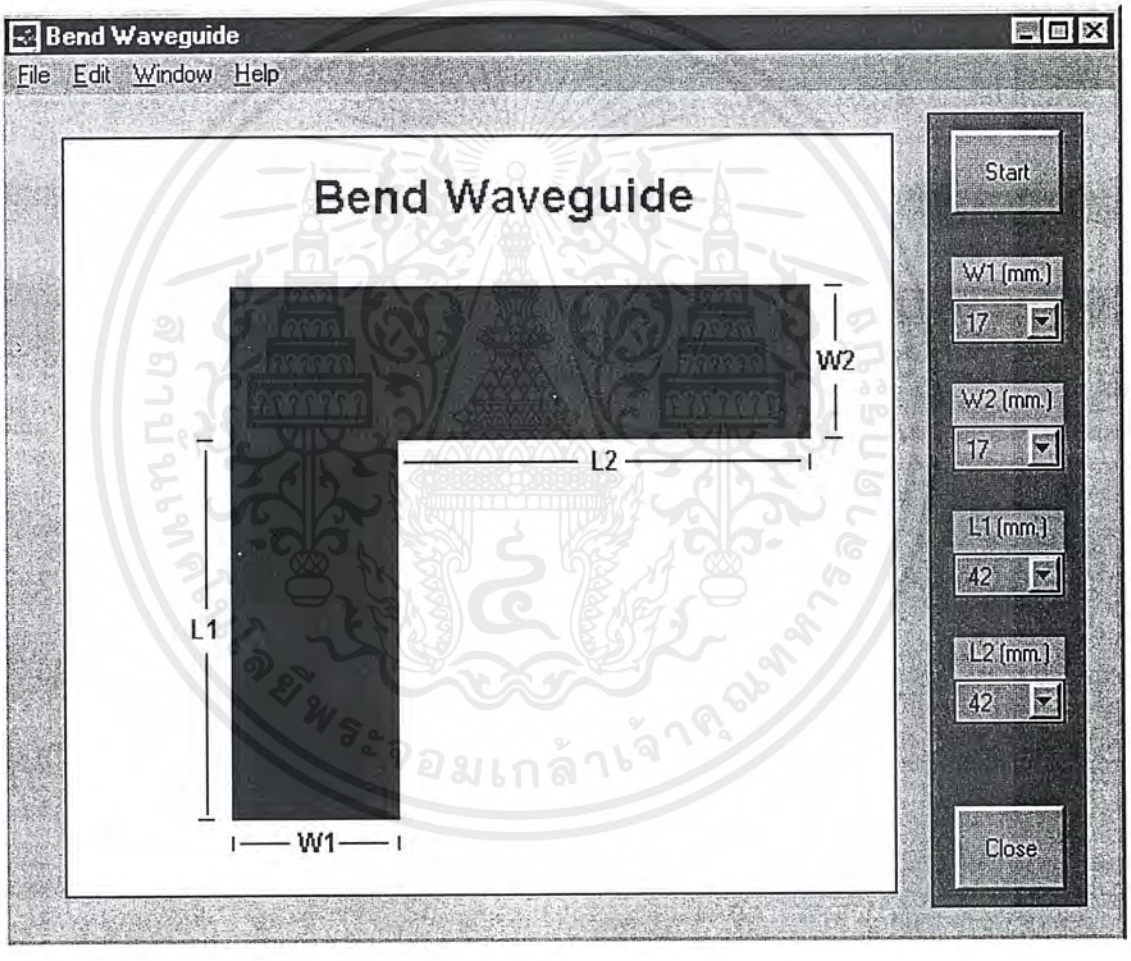
4.2.1 แบบ Bends Waveguide

ส่วนแรกเป็นรูปของท่อนำคลื่น ที่มีตัวแปร W1 , W2 , L1 และ L2 เป็นตัวบอกตำแหน่งว่าอยู่ตรงส่วนใดของท่อนำคลื่นส่วนที่สอง จะเป็นส่วนที่ให้เลือกป้อนค่าต่างๆคือ

W1 และ W2 ป้อนค่าได้ตั้งแต่ 17 mm. ถึง 25 mm.

L1 และ L2 ป้อนค่าได้ตั้งแต่ 42 mm. ถึง 50 mm.

และจะมีหน้าต่าง Start คือเมื่อป้อนค่าเสร็จแล้วเลือกไปที่ Start จะไปยังส่วนของการวิเคราะห์ป้อนค่าและแสดงผลของ Bends Waveguide ส่วนหน้าต่าง Close ใช้สำหรับปิดหน้าต่างของส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่า



รูปที่ 4.4 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ Bends Waveguide

โปรแกรมในส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ Bends Waveguide คือ โปรแกรมชื่อ bend.m ซึ่งจะอยู่ภาคผนวกของปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 แบบ T-Junction Waveguide

ส่วนแรกเป็นรูปของท่อนำคลื่น ที่มีตัวแปร W1 , W2 , L1 , L2 และ L3 เป็นตัวบอกตำแหน่งว่าอยู่ตรงส่วนใดของท่อนำคลื่น

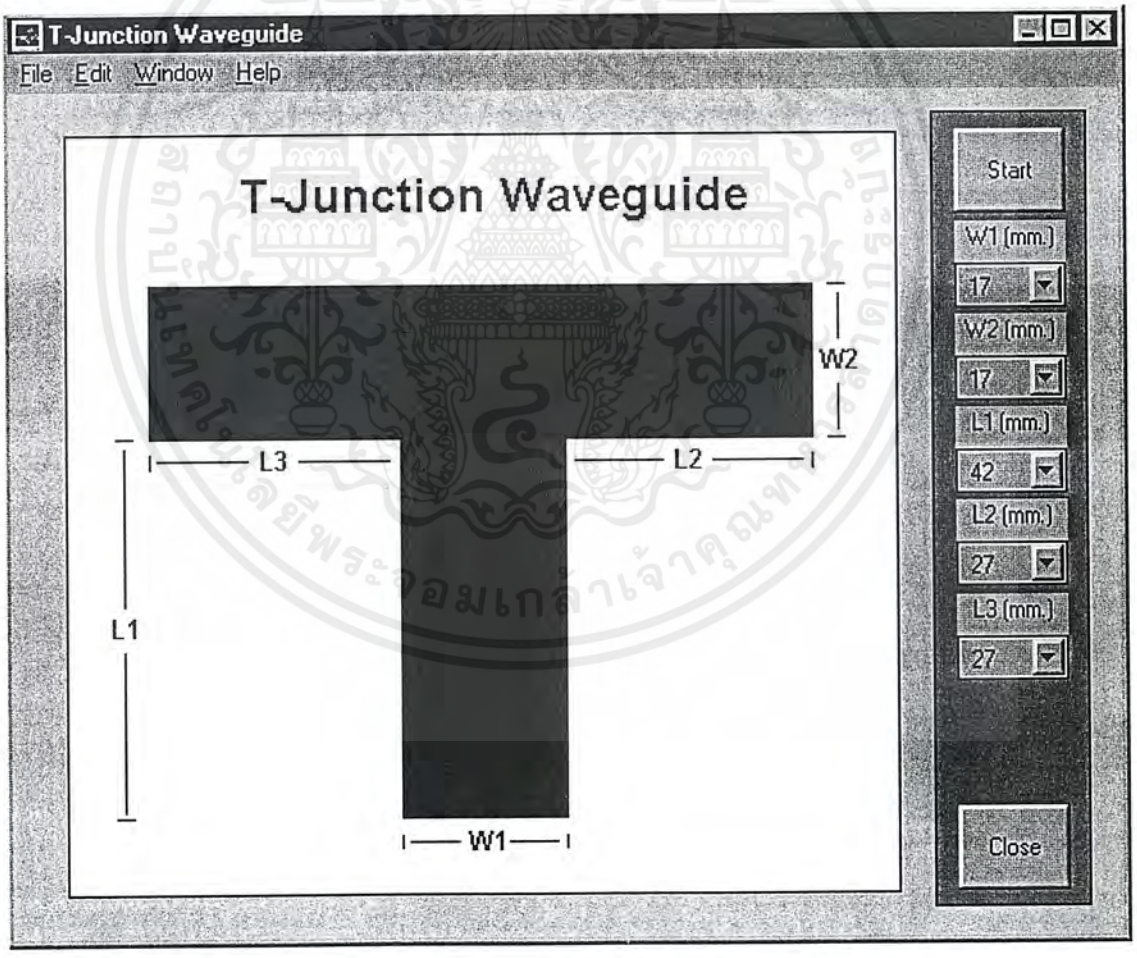
ส่วนที่สอง จะเป็นส่วนที่ให้เลือกป้อนค่าต่างๆคือ

W1 และ W2 ป้อนค่าได้ตั้งแต่ 17 mm. ถึง 25 mm.

L1 ป้อนค่าได้ตั้งแต่ 42 mm. ถึง 50 mm

L2 และ L3 ป้อนค่าได้ตั้งแต่ 27 mm. ถึง 35 mm.

และจะมีหน้าต่าง Start คือเมื่อป้อนค่าเสร็จแล้วเลือกไปที่ Start จะไปยังส่วนของการวิเคราะห์ป้อนค่าและแสดงผลของ T-Junction Waveguide ส่วนหน้าต่าง Close ใช้สำหรับปิดหน้าต่างของส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่า



รูปที่ 4.5 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ T-Junction Waveguide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมในส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ T-Junction Waveguide คือ โปรแกรมชื่อ tjunc.m ซึ่งจะอยู่ภาคผนวกของปริญญานิพนธ์

4.2.3 แบบ Cross-Junction Waveguide

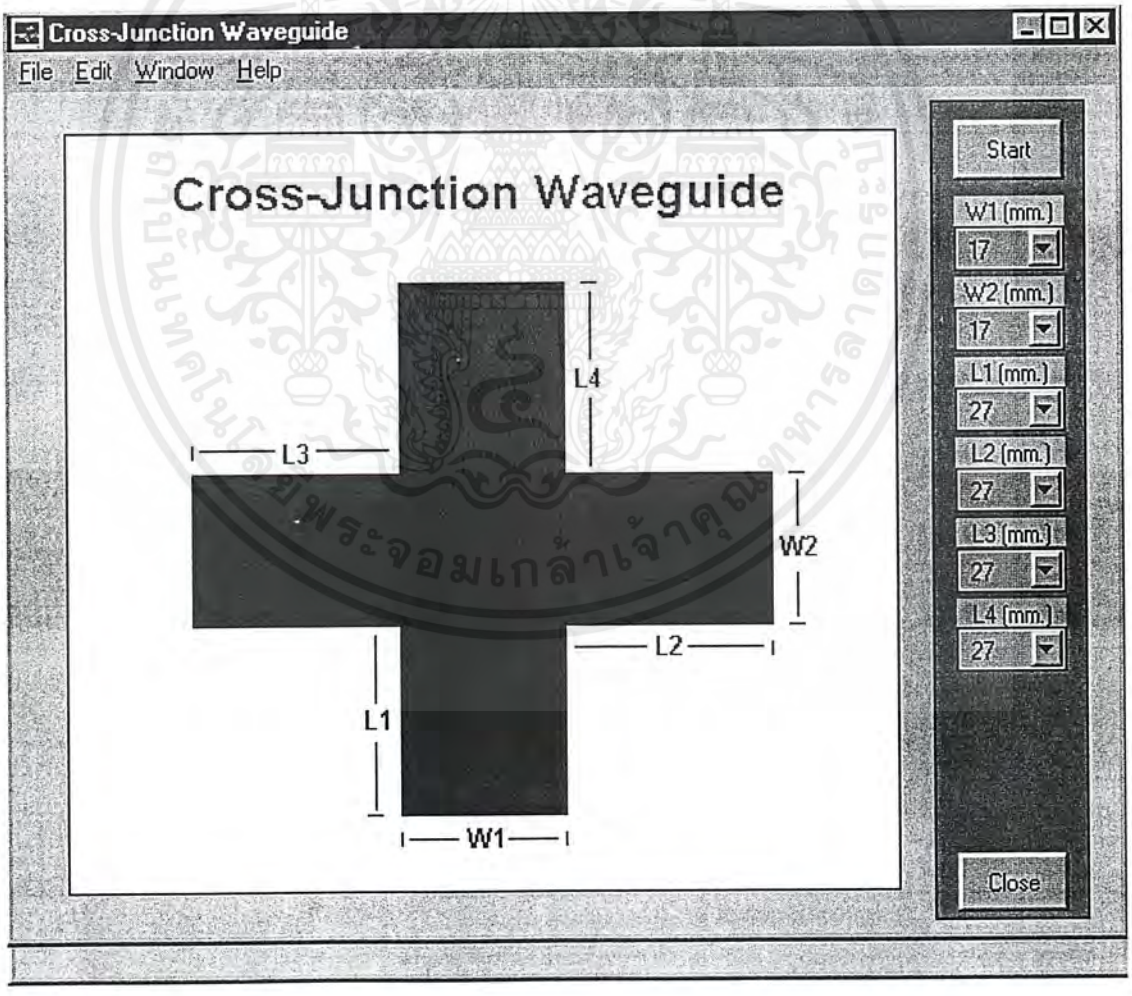
ส่วนแรกเป็นรูปของท่อนำคลื่น ที่มีตัวแปร W1 , W2 , L1 , L2 , L3 และ L4 เป็นตัวบอกตำแหน่งว่าอยู่ตรงส่วนใดของท่อนำคลื่น

ส่วนที่สอง จะเป็นส่วนที่ให้เลือกป้อนค่าต่างๆคือ

W1 และ W2 ป้อนค่าได้ตั้งแต่ 17 mm. ถึง 25 mm.

L1 ถึง L4 ป้อนค่าได้ตั้งแต่ 27 mm. ถึง 35 mm.

และจะมีหน้าต่าง Start คือเมื่อป้อนค่าเสร็จแล้วเลือกไปที่ Start จะไปยังส่วนของการวิเคราะห์ป้อนค่าและแสดงผลของ Cross-Junction Waveguide ส่วนหน้าต่าง Close ใช้สำหรับปิดหน้าต่างของส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่า



รูปที่ 4.6 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ Cross-Junction Waveguide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมในส่วนของการวิเคราะห์และป้อนค่าของ Cross-Junction Waveguide คือ โปรแกรมชื่อ cross.m ซึ่งจะอยู่ภาคผนวกของปริญญานิพนธ์

4.3 ส่วนของการวิเคราะห์ ป้อนค่าและแสดงผล

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่สามารถป้อนข้อมูลเพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ให้ได้ตามค่าของข้อมูลที่ทำการป้อน โดยส่วนของการวิเคราะห์ป้อนค่า และประมวลผลจะมี 3 แบบ ตามรายชื่อของท่อนำคลื่น และทำการแสดงผลเป็นภาพเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ

4.3.1 แบบ Bends Waveguide

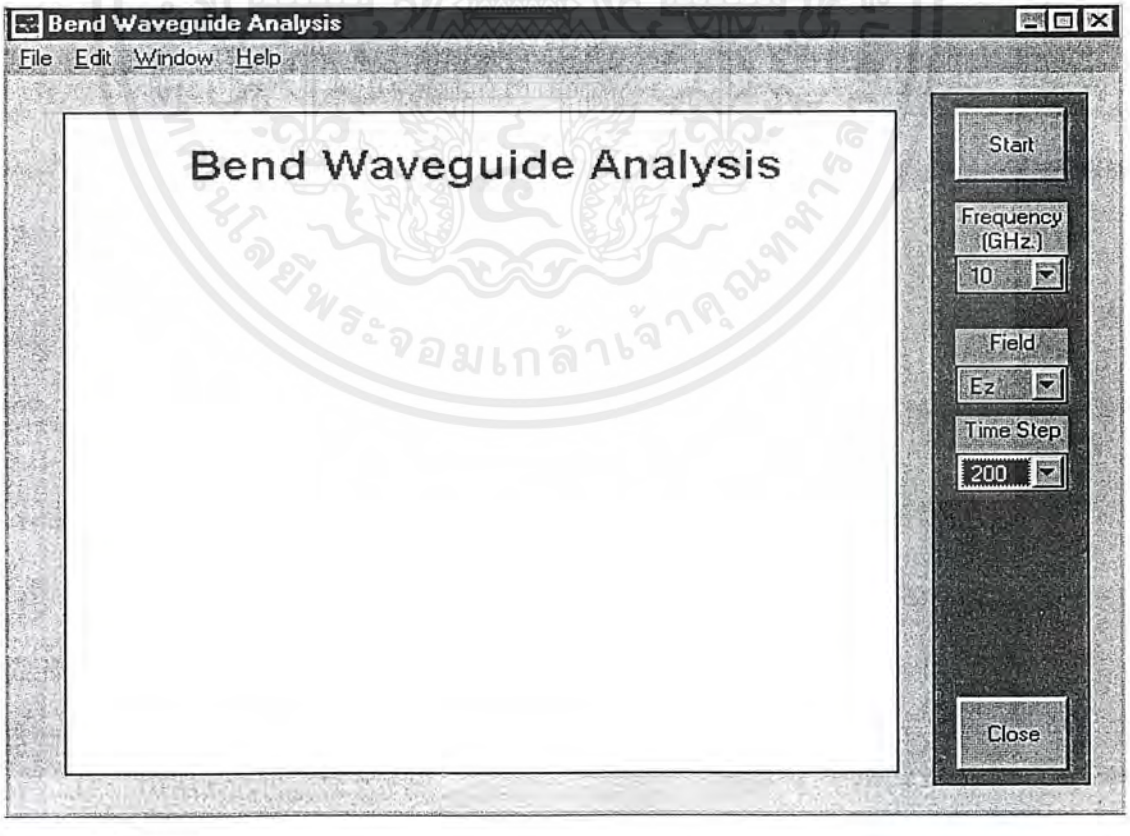
ในตอนแรกทางซ้ายมือ จะเป็นส่วนที่ให้เลือกป้อนค่าต่างๆ ดังนี้คือ

Frequency ป้อนค่าได้ตั้งแต่ 1 ถึง 15 GH_z

Field เลือกได้คือ E_z , H_x หรือ H_y

Time Step ป้อนค่าได้ตั้งแต่ 100 ถึง 500 ขั้นเวลา

เมื่อป้อนค่าต่างๆเสร็จ ให้เลือกที่ หน้าต่าง Start โปรแกรมจะแสดงภาพเคลื่อนไหวเป็นแบบ 3 มิติ ตามค่าต่างๆที่ได้ป้อนไว้



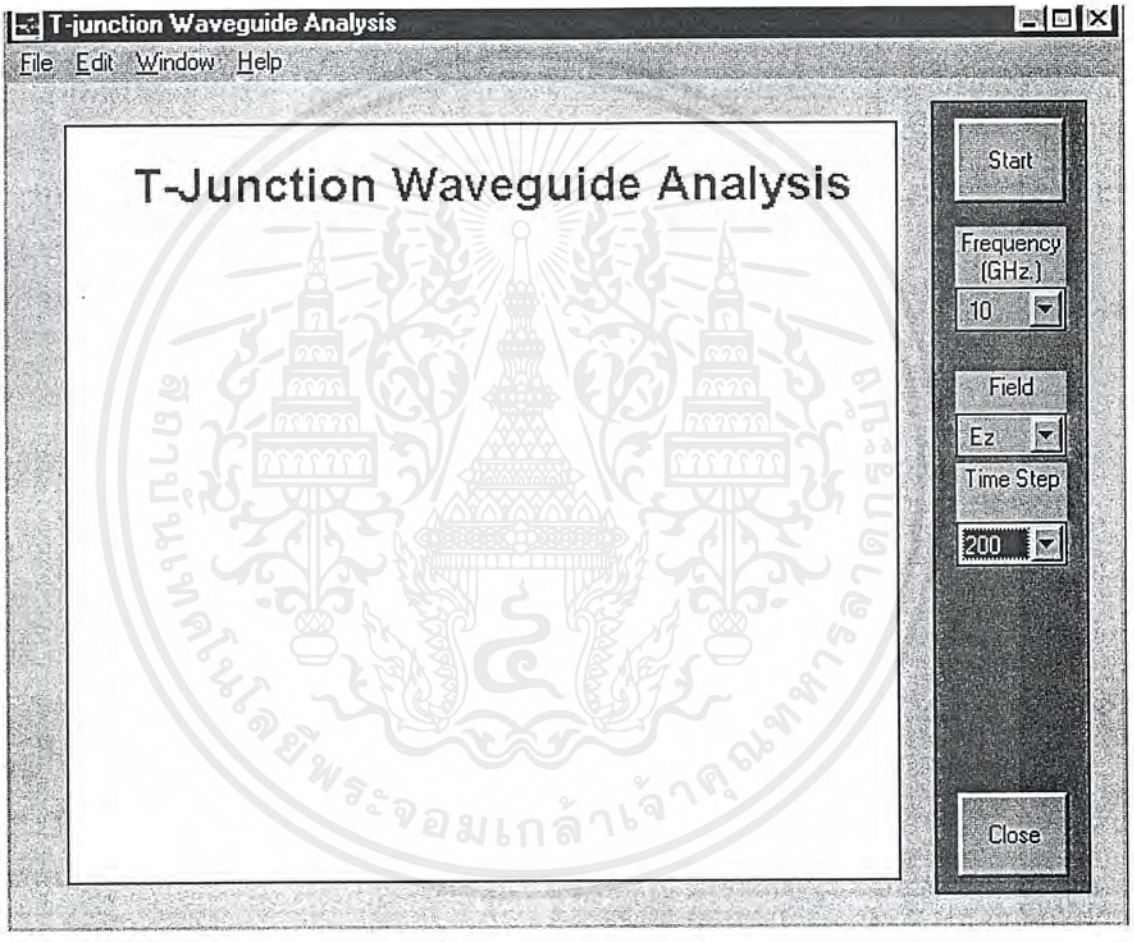
รูปที่ 4.7 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์ ป้อนค่าและแสดงผลของ Bends Waveguide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมในส่วนของการวิเคราะห์ ป้อนค่าและแสดงผลของ Bends Waveguide คือ โปรแกรมชื่อ bend2.m ซึ่งจะอยู่ภาคผนวกของปริญญานิพนธ์

4.3.2 แบบ T-Junction Waveguide

การป้อนค่าจะเหมือนกันกับ แบบ Bends Waveguide จะต่างตรงที่เวลาเลือกที่ Start จะแสดงเคลื่อนไหวเป็นแบบ 3 มิติตามค่าต่างๆที่ได้ป้อนไว้แต่ต่างกันตรงที่ ภาพที่แสดงเป็นภาพของ T-Junction Waveguide เท่านั้น



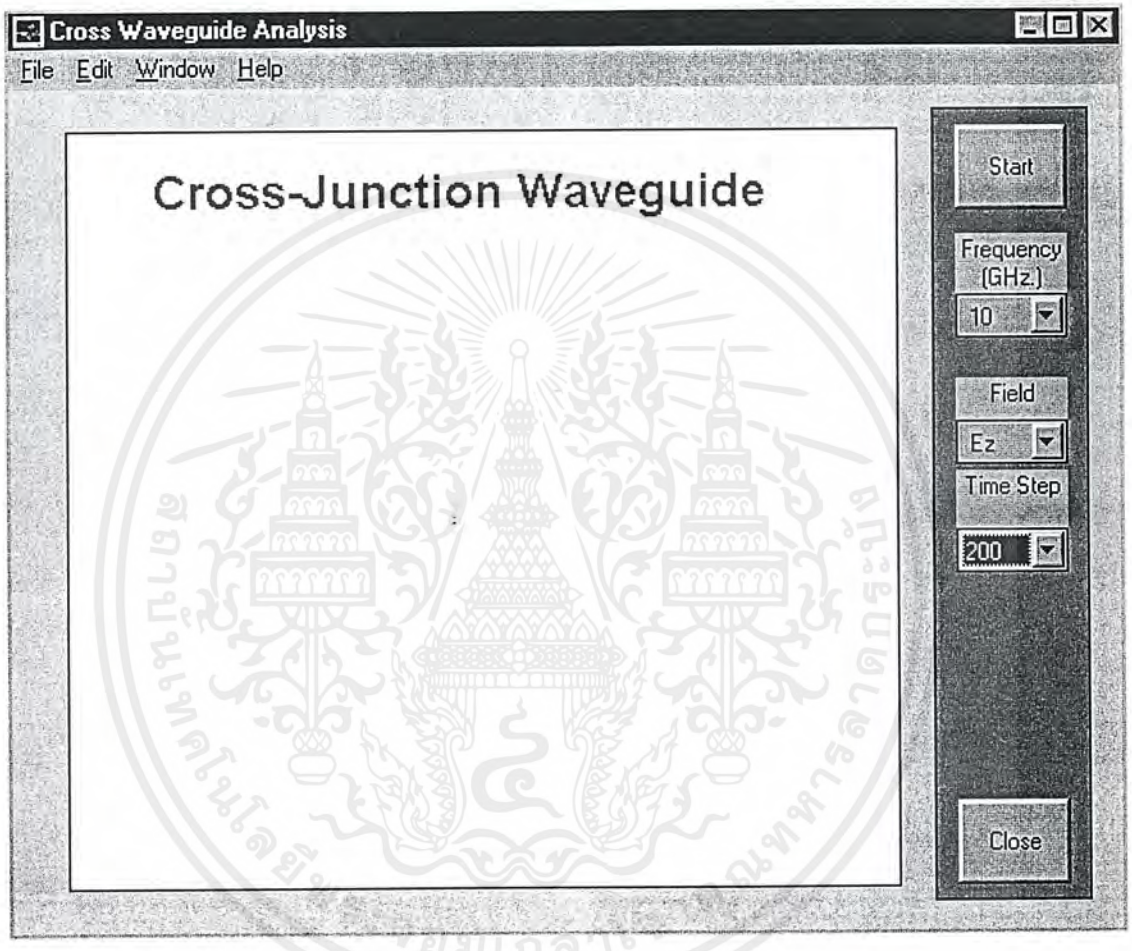
รูปที่ 4.8 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์ ป้อนค่าและแสดงผลของ T-Junction aveguide

โปรแกรมในส่วนของการวิเคราะห์ ป้อนค่าและแสดงผลของ T-Junction Waveguide คือ โปรแกรมชื่อ tjunc2.m ซึ่งจะอยู่ภาคผนวกของปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 แบบ Cross-Junction Waveguide

การป้อนค่าจะเหมือนกันกับ แบบ Bends Waveguide จะต่างตรงที่เวลาเลือกที่ Start จะแสดงเคลื่อนไหวเป็นแบบ 3 มิติตามค่าต่างๆที่ได้ป้อนไว้แต่ต่างกันตรงที่ ภาพที่แสดงเป็นภาพของ Cross-Junction Waveguide เท่านั้น



รูปที่ 4.9 แสดงหน้าต่างในส่วนของการวิเคราะห์ ป้อนค่าและแสดงผลของ Cross-Junction Waveguide

โปรแกรมในส่วนของการวิเคราะห์ ป้อนค่าและแสดงผลของ Cross-Junction Waveguide คือ โปรแกรมชื่อ cross2.m ซึ่งจะอยู่ภาคผนวกของปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่5
ผลที่ได้จากการออกแบบและการวิเคราะห์

5.1 ผลที่ได้จากการป้อนค่าของ Bends Waveguide

การทดลองที่ 1 เมื่อทำการป้อนค่าต่างๆดังต่อไปนี้คือ

W1=17 mm.

W2=17 mm.

L1=42 mm.

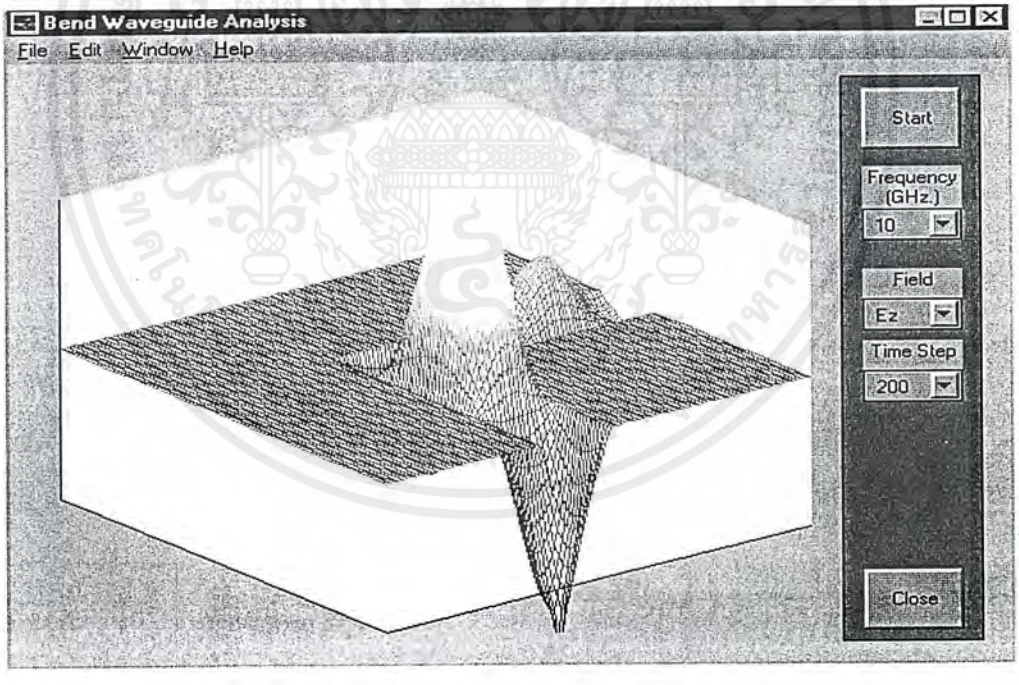
L2=42 mm.

Time Step=200

ผลการทดลองของสนาม E_z แสดงดังรูปที่ 5.1

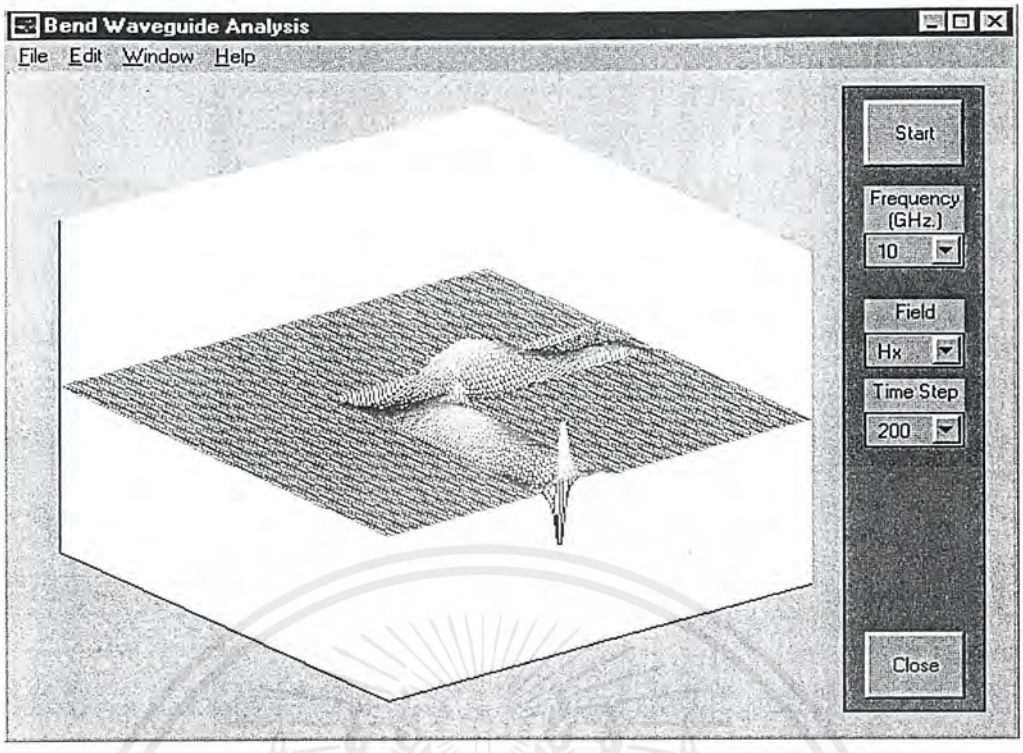
ผลการทดลองของสนาม H_x แสดงดังรูปที่ 5.2

ผลการทดลองของสนาม H_y แสดงดังรูปที่ 5.3

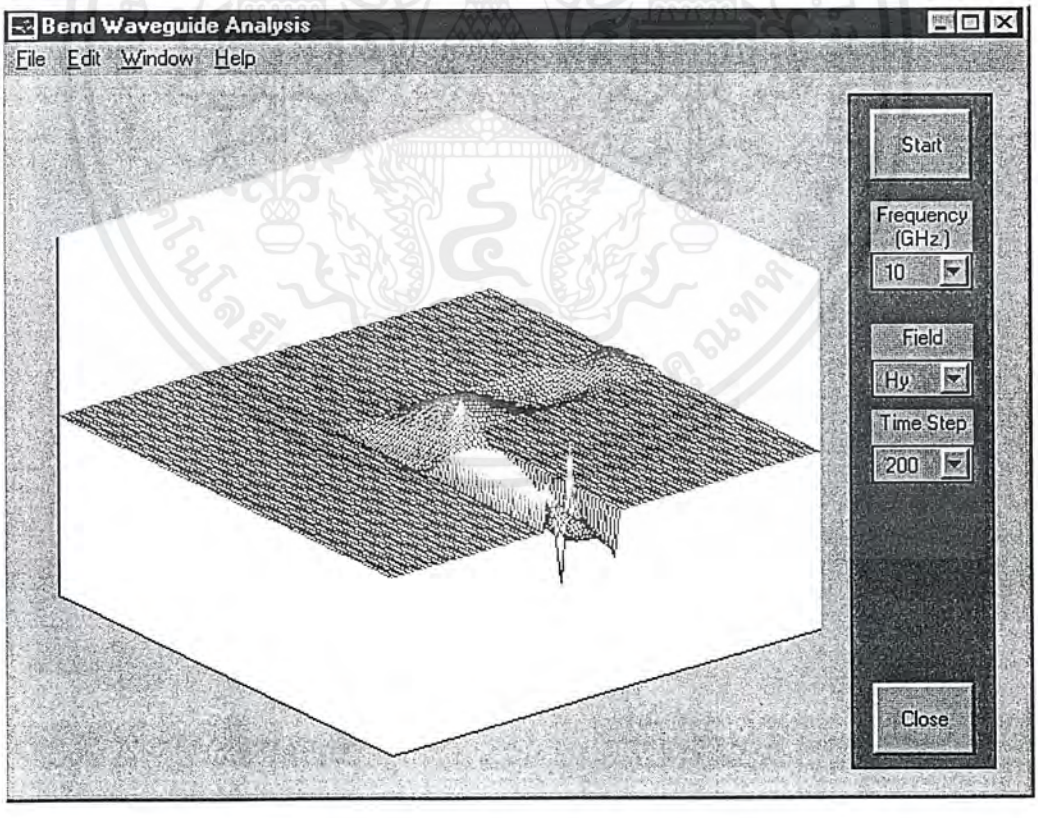


รูปที่ 5.1 แสดงสนาม E_z ที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงสนาม H_x ที่ความถี่ 10 GHz



รูปที่ 5.3 แสดงสนาม H_y ที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลที่ได้จากการป้อนค่าของ T-Junction Waveguide

การทดลองที่ 2 เมื่อทำการป้อนค่าต่างๆดังต่อไปนี้คือ

W1=17 mm.

W2=17 mm.

L1=42 mm.

L2=27 mm.

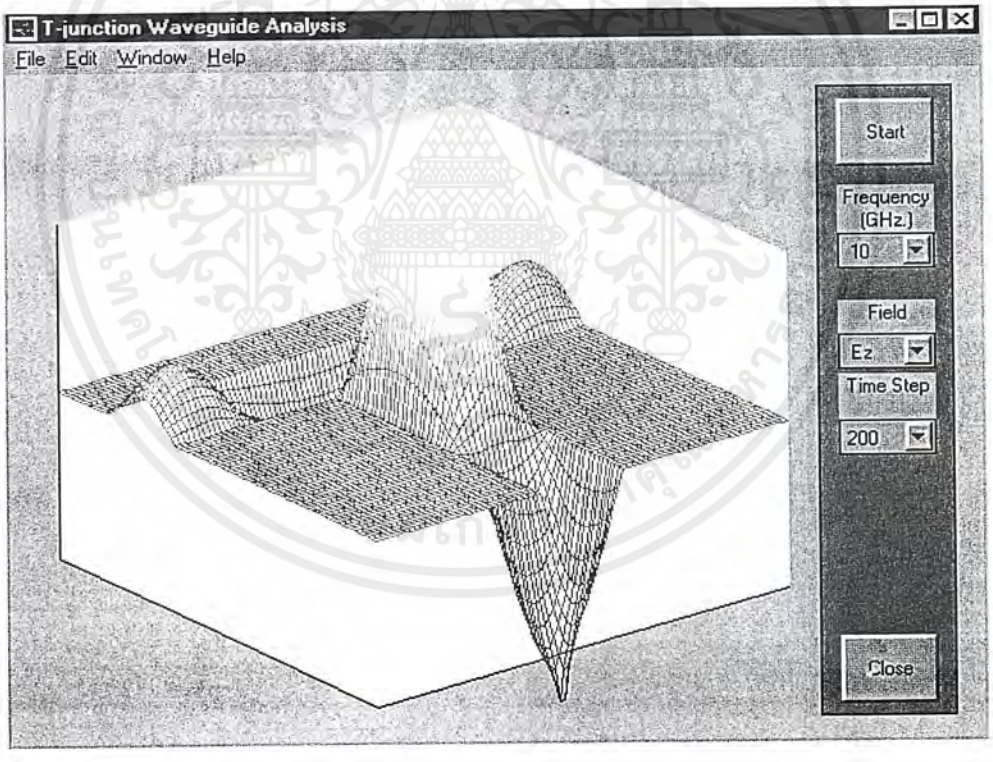
L3=27 mm.

Time Step=200

ผลการทดลองของสนาม E_z แสดงดังรูปที่ 5.4

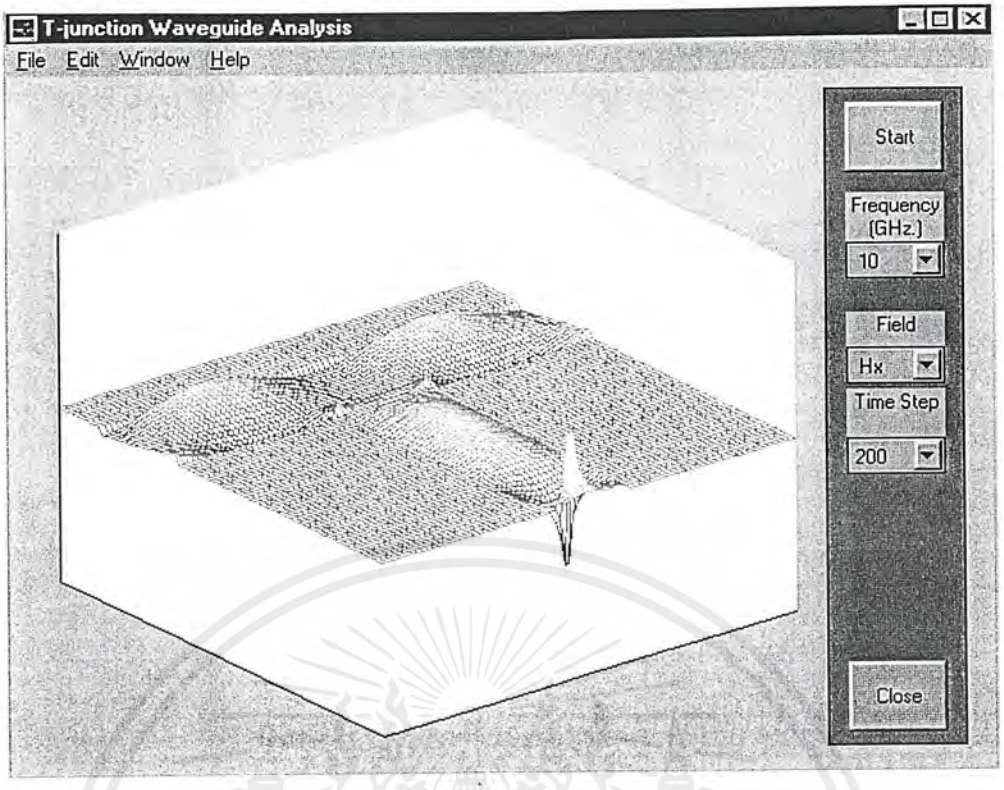
ผลการทดลองของสนาม H_x แสดงดังรูปที่ 5.5

ผลการทดลองของสนาม H_y แสดงดังรูปที่ 5.6

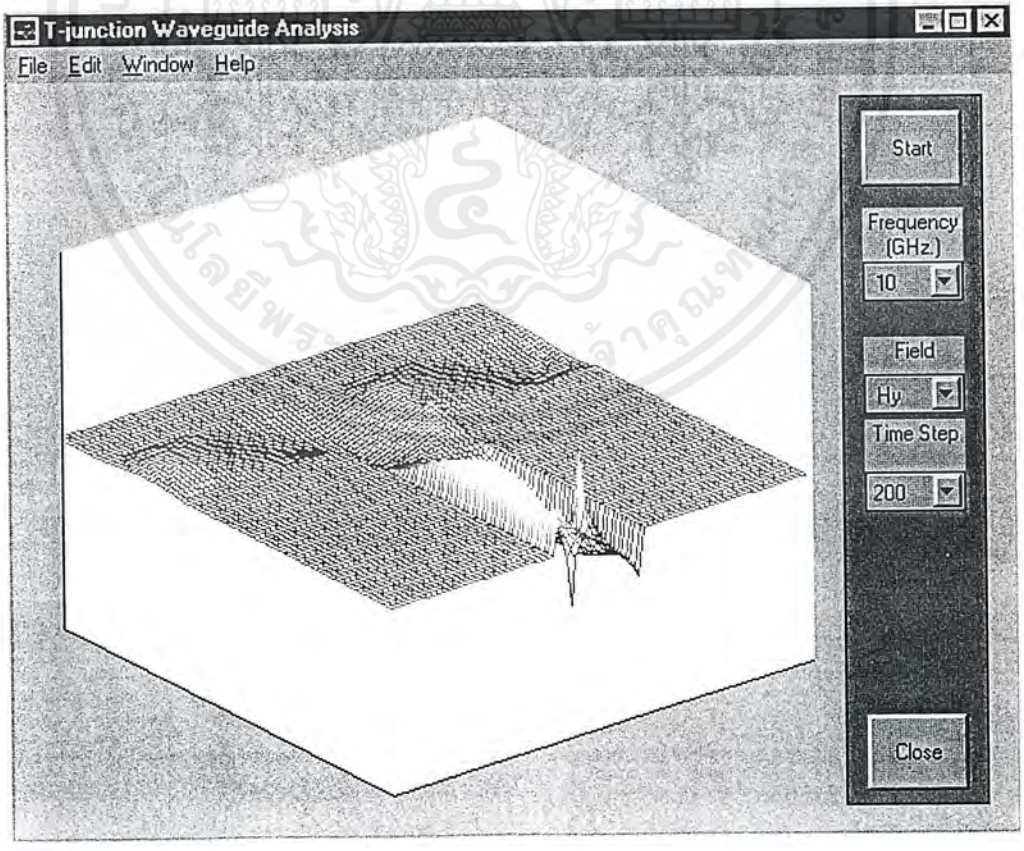


รูปที่ 5.4 แสดงสนาม E_z ที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แสดงสนาม H_x ที่ความถี่ 10 GHz



รูปที่ 5.6 แสดงสนาม Hy ที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลที่ได้จากการป้อนค่าของ Cross-Junction Waveguide

การทดลองที่ 3 เมื่อทำการป้อนค่าต่างๆดังต่อไปนี้คือ

W1=17 mm.

W2=17 mm.

L1=42 mm.

L2=27 mm.

L3=27 mm.

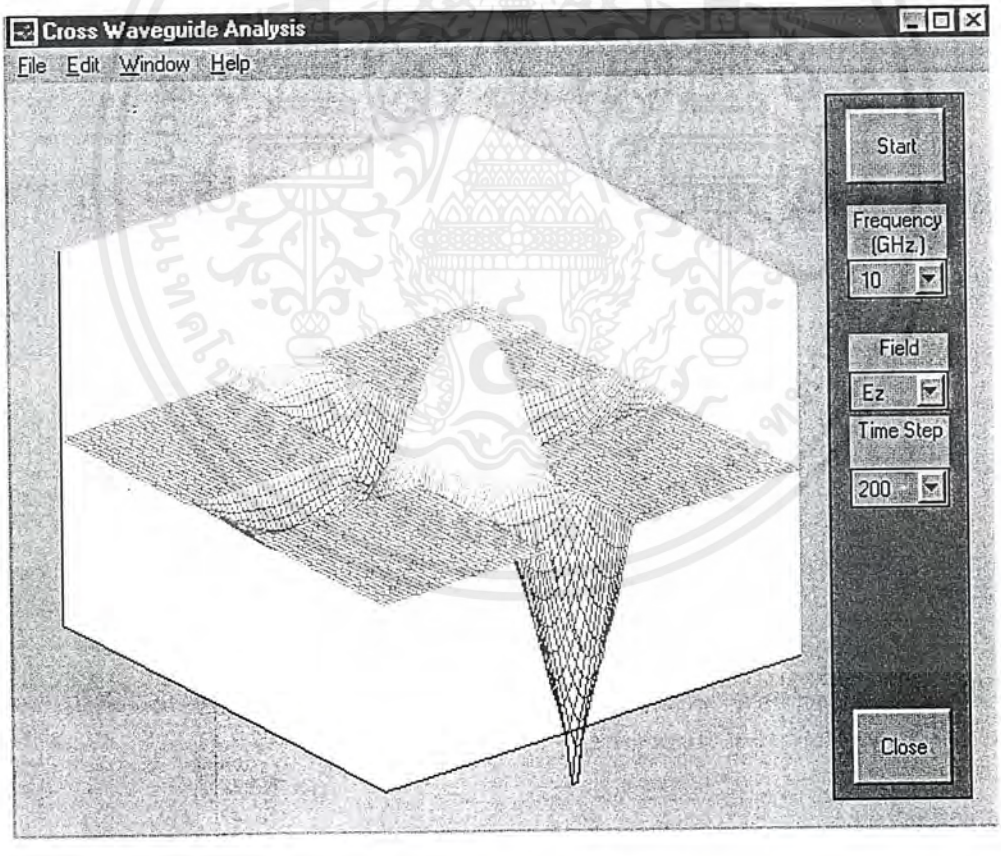
L4=27 mm.

Time Step=200

ผลการทดลองของสนาม E_z แสดงดังรูปที่ 5.7

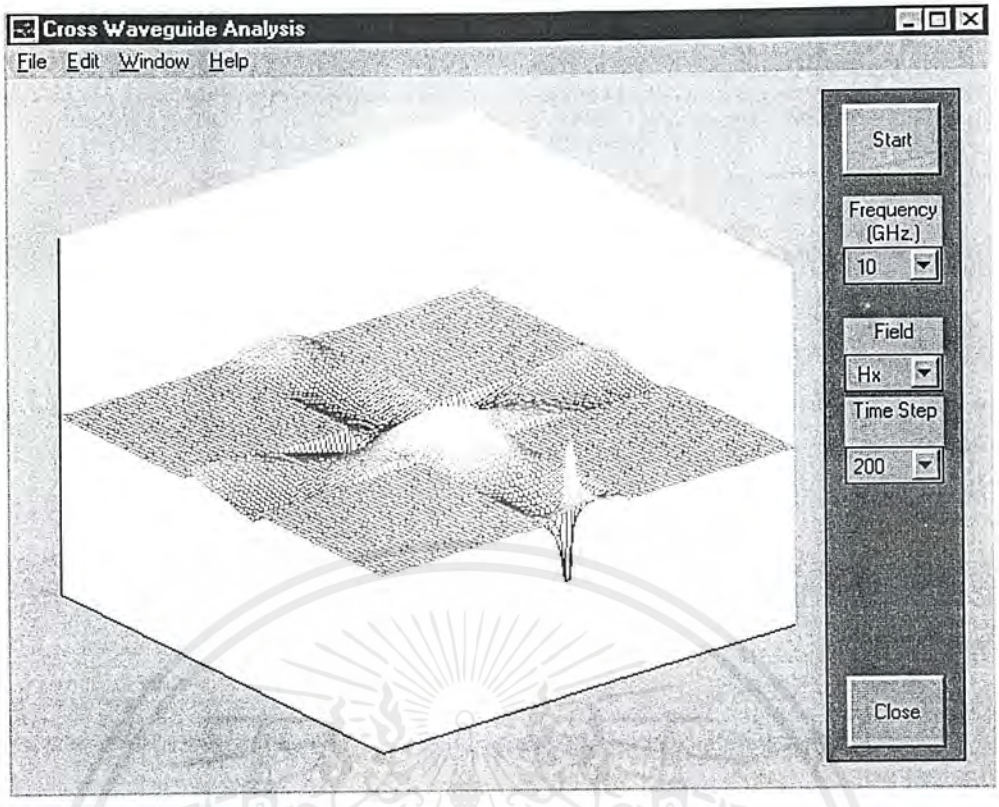
ผลการทดลองของสนาม H_x แสดงดังรูปที่ 5.8

ผลการทดลองของสนาม H_y แสดงดังรูปที่ 5.9

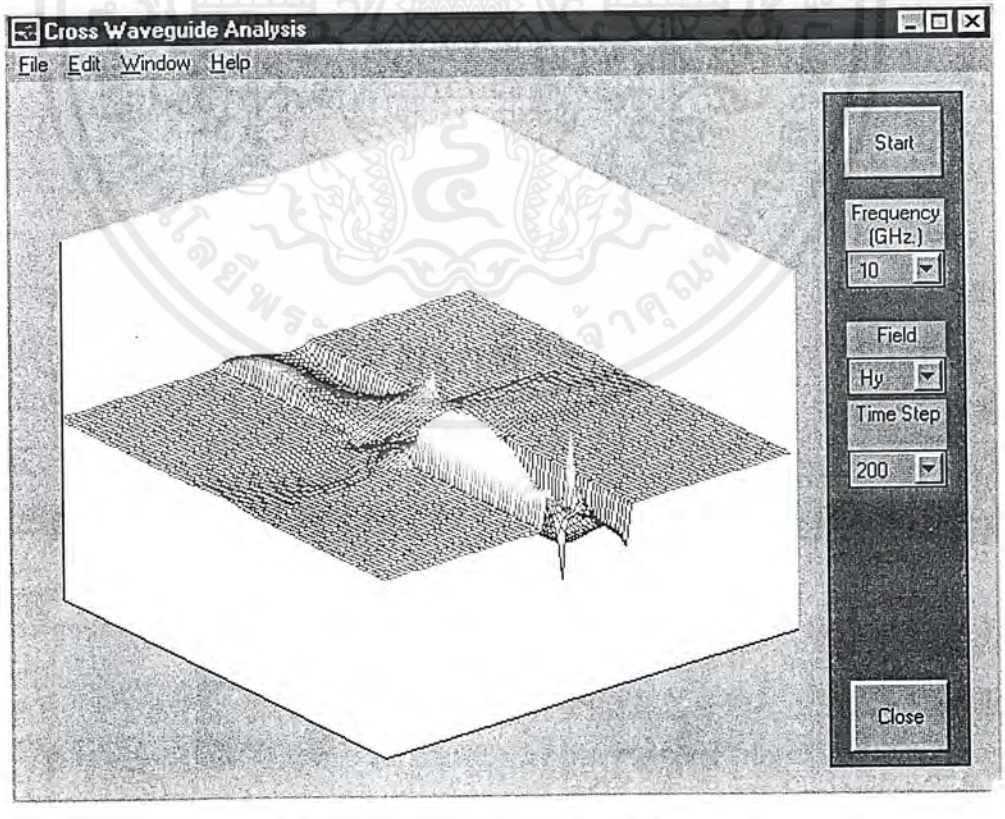


รูปที่ 5.7 แสดงสนาม E_z ที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงสนาม H_x ที่ความถี่ 10 GHz



รูปที่ 5.9 แสดงสนาม H_y ที่ความถี่ 10 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่6
สรุปผลที่ได้จากการออกแบบและการวิเคราะห์

6.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลองท่อนำคลื่นทั้ง 3 แบบ

1. สามารถเห็นลักษณะการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้า E_z และสนามแม่เหล็ก H_x และ H_y ในท่อนำคลื่นทำให้เข้าใจเรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าง่ายขึ้น
2. สามารถเลือกขนาดของท่อนำคลื่นที่เหมาะสมมาใช้กับความถี่ได้ง่าย
3. สามารถเห็นความถี่คัทออฟของท่อนำคลื่นได้
4. การลดทอนเกิดจากการสะท้อนของคลื่นที่กระทบผนังของท่อนำคลื่นแล้วทำให้เกิดการหักล้างกันขึ้นโดยดูจากแอมพิจูดคือ แอมพิจูดของสัญญาณที่ออกจากท่อนำคลื่นมีแอมพิจูดที่ต่ำกว่าตอนเริ่มต้นแสดงว่าเกิดการลดทอนขึ้น
5. การกำหนดขนาดของท่อนำคลื่นที่แตกต่างกันย่อมทำให้สัญญาณมีความแตกต่าง กันด้วย

6.2 สรุปผลการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไม่ต่อเนื่องด้วยวิธี FD-TD

วิธีของ FD-TD เป็นการวิเคราะห์การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโดเมนของเวลา ลักษณะของสมการจะไม่ยุ่งยากซ้ำซ้อนและมีการคำนวณที่เป็นแบบแผนต่อเนื่องกันไป ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์จึงมีความเที่ยงตรงสูงมาก เมื่อเทียบกับการใช้สมการของแมกซ์เวลล์หาโดยตรง ซึ่งขั้นตอนการหาสมการจะยุ่งยากมีโอกาสผิดพลาดสูง การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์สามารถแสดงผลการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นภาพเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติได้ ซึ่งสามารถมองเห็นได้เป็นนามธรรมมีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาเรื่องของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น

การวิเคราะห์ด้วยวิธีของ FD-TD นั้นในปริญญานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ คือ ในระนาบของแกน x และ y ส่วนของแกน z ไม่ได้มีการกำหนดค่าของความสูงไว้ ซึ่งในการแสดงผลแบบ 3 มิติ อาจทำให้มีค่าที่ผิดพลาดบ้างแต่ก็สามารถใช้ในการศึกษาการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

ในอนาคตหากได้รับการพัฒนาให้สามารถวิเคราะห์เป็นแบบ 3 มิติได้ ก็จะสามารถช่วยในการออกแบบสร้างท่อนำคลื่นเพื่อใช้ในงานจริง ใช้เป็นแบบจำลองก่อนจะลงมือสร้างจริงซึ่งเป็นการประหยัดวัสดุที่อาจผิดพลาดจากการสร้างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

1. โปรแกรม fdtds.m

```
function fdtds(action)

if nargin<1,
  action='showwaveguide';
else
  action = lower(action);
end;

indent = '     ';

categoryNames = {'waveguide'};

if (nargin == 1)
  if isempty(action)
    action = 'showwaveguide';
  else
    catMatch = strmatch(action, categoryNames);
    if ~isempty(catMatch)
      action = ['show' categoryNames{catMatch(1)}];
    end
  end

end

helpMsg = 'Choose a sub-topic to see a list of discontinuous waveguide';

set(0, 'ShowHiddenHandles', 'on');
figHandles = findobj('Type', 'figure');
figH=findobj(figHandles, 'flat', 'Name', 'FD-TD Analysis Window', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  'Tag', 'fdtds');
set(0, 'ShowHiddenHandles', 'off');

if (length(action)>=4)

  if strcmp(action(1:4),'show')
    watchon;

    if isempty(figH),
      watchon;
      fdtds('initialize');
      figHandles = findobj('Type', 'figure');
      figH=findobj(figHandles, 'flat', 'Name', 'FD-TD Analysis Window', ...
        'Tag', 'fdtds');
      set(figH, 'Visible','on');
      set(figH, 'HandleVisibility', 'callback');
    end;

    param=get(figH,'UserData');

    categoryListH = findobj(figH, ...
      'Type', 'uicontrol', 'Tag', 'CategoryListbox');
    index = get(categoryListH, 'UserData');
    fdtdsListH = findobj(figH, 'Type','uicontrol','Tag','FdtdsListbox');
    aboutListH = findobj(figH,'Type','uicontrol','Tag','AboutListbox');
    aboutTopics = get(aboutListH, 'UserData');

    runBtn=findobj(figH, 'Type', 'uicontrol', 'Tag', 'RunFdtds');
    closeBtn=findobj(figH, 'Type', 'uicontrol', 'Tag','return');

    catValue = get(categoryListH, 'Value');
    theTopic = index.topic(catValue);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
theCategory = index.category(catValue);

topicList = param.topicList;

if (strcmp(action, 'showwaveguide')),
  theTopic = 1;

  set(categoryListH, 'Value', theTopic);
  index.expanded = [0 0 0 0];
  incremListUpdate = 0;
  action = 'showlist';
  theCategory = 0;
else
  incremListUpdate = 1;
end

if (strcmp(action, 'showlist')),
  if (theCategory == 0),
    index.expanded(theTopic) = not(index.expanded(theTopic));

    if incremListUpdate
      theCategoryList = get(categoryListH, 'String');
      currentLength = length(theCategoryList);
      insertPt = 1;
      while index.topic(insertPt) ~= theTopic
        insertPt = insertPt + 1;
      end
      if (index.expanded(theTopic))
        prefix = '-';
      else
        prefix = '+';
      end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
theCategoryList(insertPt) = ...
  {[prefix param.topicList{theTopic}]};
if index.expanded(theTopic)
  nCategories =length({param.pageList{theTopic}.Name});
  index.topic = LocalSplice(insertPt,...
    theTopic*ones(1,nCategories), index.topic);
  index.category = LocalSplice(insertPt,...
    [1:nCategories], index.category);

  for iCategory = 1:nCategories
    theCategoryList = LocalSplice(insertPt,...
      {param.pageList{theTopic}(iCategory).Name},...
      theCategoryList);
    insertPt = insertPt+1;
  end
  set(categoryListH, 'String', theCategoryList);
else
  insertPt = insertPt + 1;
  while (index.topic(insertPt) == theTopic)
    index.topic(insertPt) = [];
    index.category(insertPt) = [];
    theCategoryList(insertPt) = [];

    if (insertPt > length(index.topic))
      break;
    end
  end
  set(categoryListH, 'String', theCategoryList);
end

else
  theCategoryList = {};
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
nTopics = length(param.topicList);
index.topic = [];
index.category = [];

for iTopic = 1:nTopics,

  if (index.expanded(iTopic))
    prefix = '-';
  else
    prefix = '+';
  end
  theCategoryList = cat(2, theCategoryList, ...
    {[prefix param.topicList{iTopic}]});
  index.topic = cat(2, index.topic, [iTopic]);
  index.category = cat(2, index.category, [0]);
  if (index.expanded(iTopic)),
    nCategories = length({param.pageList{iTopic}.Name});
    theCategoryList = cat(2, theCategoryList, ...
      {param.pageList{iTopic}.Name});
    index.topic = cat(2, index.topic, iTopic*ones(1,nCategories));
    index.category = cat(2, index.category, [1:nCategories]);
  end
 end
 set(categoryListH, 'String', theCategoryList);
 fdtdsList=char(param.pageList{theTopic}(1).FdtdsList);
end

set(categoryListH, 'UserData', index);

set(runBtn, 'String', 'Run', 'Enable', 'off');
set(fdtdsListH, 'String', helpMsg, ...
  'Max', 2, ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    'Value', [], ...
    'Enable', 'inactive');
  set(aboutListH, 'String', aboutTopics{theTopic});
  set(aboutListH, 'Value', []);

else
  theCategoryName = param.pageList{theTopic}(theCategory).Name;
  fdtdsLabel=[theCategoryName ' Fdtds'];

  fdtdsList=char(param.pageList{theTopic}(theCategory).FdtdsList);

  fcnList=char(param.pageList{theTopic}(theCategory).FcnList);
  theFdtds = 1;
  fdtdsFcn = fcnList(theFdtds,:);

  set(fdtdsListH, 'Enable', 'on', 'Max', 1, 'Value', 1);
  set(fdtdsListH, 'String', fdtdsList);
  LocalSetRunBtn(runBtn, fdtdsList(1,:), fdtdsFcn);

  hlpStr=param.pageList{theTopic}(theCategory).Help;
  namestr=param.pageList{theTopic}(theCategory).Name;
  namestr(1:length(indent)) = [];

  if (theTopic == 1) %
    spacestr = ' ';
  else
    spacestr = [];
  end
  set(aboutListH, 'String', [{namestr}; {spacestr}; hlpStr; ...
      {' '}; {' '}]);
  set(aboutListH, 'Value', []);
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
elseif strcmp(action, 'showfdtds')

theFdtds = get(fdtdsListH, 'Value');
fdtdsList=char(param.pageList{theTopic}(theCategory).FdtdsList);

fcnList=char(param.pageList{theTopic}(theCategory).FcnList);
fdtdsFcn = fcnList(theFdtds,:);

LocalSetRunBtn(runBtn, fdtdsList(theFdtds,:), fdtdsFcn);

else
  if (theCategory ==0)
    set(aboutListH, 'String', aboutTopics{theTopic});
    set(aboutListH, 'Value', []);
  end
end

watchoff(figH);

elseif strcmp(action,'initialize'),

oldRootUnits = get(0,'Units');
set(0, 'Units', 'points');

figurePos=get(0,'DefaultFigurePosition');
figurePos(3:4)=[420 315];
figurePos(1:2) = figurePos(1:2)*72/96;

rootScreenSize = get(0,'ScreenSize');

if ((figurePos(1) < 1) ...
    | (figurePos(1)+figurePos(3) > rootScreenSize(3)))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  figurePos(1) = 30;
end

set(0, 'Units', oldRootUnits);

if ((figurePos(2)+figurePos(4)+60 > rootScreenSize(4)) ...
    | (figurePos(2) < 1))
  figurePos(2) = rootScreenSize(4) - figurePos(4) - 60;
end

figH=figure( ...
  'Name','FD-TD Analysis Window', ...
  'Units', 'points', ...
  'NumberTitle','off', ...
  'Visible','off', ...
  'Resize','on', ...
  'Position',figurePos, ...
  'Pointer','watch', ...
  'Tag', 'fdtds');

watchon;

titleStr = 'Analysis of Discontinuous Waveguide Using the FD-TD Method';

titleH = text(.49, .95, titleStr);
set(titleH, ...
  'HorizontalAlignment', 'center', ...
  'Color', [0 0 .5], ...
  'FontSize', 14, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Tag', 'titletext');
axis off
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
boxesNButtons = Localbuildpage(figH, helpMsg);

set(figH, 'Visible', 'on');

drawnow;
watchon;


guideList = guideinfo;

nTopics=1;
topicList{1}='FD-TD Analysis';
pageList{1} = guideList;

param.pageList = pageList;
param.topicList = topicList;

for iTopic = 1:nTopics
  nCategories = length({param.pageList{iTopic}.Name});
  topicList{iTopic} = ['+' topicList{iTopic}];
  for iCategory = 1:nCategories
    param.pageList{iTopic}(iCategory).Name ...
      = [indent param.pageList{iTopic}(iCategory).Name];
  end
end

set(figH,'UserData',param);

categoryListH = findobj(figH, ...
  'Type', 'uicontrol', 'Tag', 'CategoryListbox');

index.topic = [1:nTopics];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    index.category = zeros(1,nTopics);
    index.expanded = zeros(1,nTopics);

    set(categoryListH, ...
      'UserData', index, ...
      'String', topicList, ...
      'Value', 1);


    aboutTopics = loadTopics;

    set(boxesNButtons, 'Units', 'normalized');

    set(boxesNButtons, 'Visible', 'on');
    drawnow;
    refresh;
    watchoff;

  end;
end;

function handleArray = Localbuildpage(figH, helpMsg)

figureColor = get(figH, 'Color');

labelHt=16.8;

aboutListPos = [157.5 149.25 240 92.25];

fdtdslstPos= [157.5  47.75 240  88.5];
catlistPos=[22.5 48.75 120 192.75];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
btnHt = 22.5;
closeBtnPos = [28.5 13.5 154.5 btnHt];
runBtnPos = [227.25 13.5 154.5 btnHt];

fdtdsList=helpMsg;
fdtdsListH= ...
  LocalBuildUi(fdtdslstPos, 'List', ...
  'fdtds("showfdtds")', fdtdsList, 'FdtdsListbox');
set(fdtdsListH, 'Max', 2, 'Value', [], 'Enable', 'inactive');

tbxList=' ';
tbxListH=LocalBuildUi(catlistPos, 'List', ...
  'fdtds("showlist")', tbxList, 'CategoryListbox');
set(tbxListH, 'Max', 1, 'Value', 1);

aboutList = ' ';
aboutListH=LocalBuildUi(aboutListPos, 'List', '', aboutList, 'AboutListbox');
set(aboutListH, 'Min', 0, 'Max', 2, 'Value', []);
set(aboutListH, 'BackgroundColor', figureColor);
set(aboutListH, 'UserData', loadTopics);

labelStr='Close';
callbackStr='eval("close")';
backH=LocalBuildBtn(2, closeBtnPos, labelStr, callbackStr, 'return');

callbackStr='fdtds("run")';
runH=LocalBuildBtn(2, runBtnPos, 'Run Fdtds', callbackStr,'RunFdtds');

handleArray = [runH backH aboutListH tbxListH fdtdsListH];

function uiHandle=LocalBuildUi(uiPos, uiStyle, uiCallback, promptStr, uitag)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
uiHandle=uicontrol( ...
  'Style',uiStyle, ...
  'HorizontalAlignment','left', ...
  'Units','points', ...
  'Visible','off',...
  'Max',10, ...
  'BackgroundColor',[1 1 1], ...
  'Position',uiPos, ...
  'Callback',uiCallback, ...
'Tag', uitag, ...
  'String',promptStr);


function btHandle=LocalBuildBtn(btnNumber, btnPos, labelStr, callbackStr, uitag)

labelColor=[0.8 0.8 0.8];

btHandle=uicontrol( ...
  'Style','pushbutton', ...
  'Units','points', ...
  'Position',btnPos, ...
  'String',labelStr, ...
  'Visible', 'off', ...
  'Tag', uitag, ...
  'Callback',callbackStr);


function aboutTopicArray = loadTopics

about1 ={'      The Finite-Difference Time-Domain (FD-TD) method, '
  ' as first proposed by Yee in 1966, is a simple and elegant way  '
  ' to discretize the differential form of Maxwell''s equation. Yee '
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  ' used an electric field (E) grid which was offset both spatially '
  ' and temporally from a magnetic field (H) grid to obtain update '
  ' equations that yield the present fields throughout the '
  ' Computational domain in terms of the past field. The update '
  ' equations are used in a leap-frog scheme to incrementally '
  ' march the E and H fields forward in time. '};

aboutTopicArray = {about1};


function together = LocalSplice(insertPt, piece, target)
[sizeOne sizeTwo] = size(target);

if sizeOne > 1
  dim = 1;
  nItems = sizeOne;
  if sizeTwo > 1
  end
else
  dim = 2;
  nItems = sizeTwo;
end

if (insertPt<1)
  together =  cat(dim, piece, target);
elseif (insertPt>nItems)
  together =  cat(dim, target, piece);
else
  together = cat(dim, target(1:insertPt), ...
    piece,...
    target(insertPt+1:nItems));
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
function theTopic = LocalGetTopic(topicList, targetString)

nTopics = length(topicList);
theTopic = 1;
if nTopics > 0
  for (iTopic = 1:nTopics)
    if (strcmp(topicList{iTopic}, targetString))
      theTopic = iTopic;
      return;
    end
  end
else
end



function LocalSetRunBtn(runBtn, labelStr, fdtdsFcn)

nMax = 20;

labelStr = deblank(labelStr);

if (length(labelStr)>nMax)
  labelStr = labelStr(1:nMax);
  spaces = findstr(' ', labelStr);

  if (isempty(spaces))
    labelStr = [labelStr '...'];
  else
    lastSpace = spaces(length(spaces));
    labelStr = [labelStr(1:lastSpace) '...'];
  end
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
cbstring = ['watchon; ' fdtdsFcn '; watchoff(gcbf);'];
set(runBtn, ...
  'String', ['Run ' labelStr], ...
  'Enable','on', ...
  'Callback', cbstring);
```


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โปรแกรม bend.m

```
function bend(action)

play= 1;
stop=-1;

if nargin<1,
  action='initialize';
end;

if strcmp(action,'initialize'),
  oldFigNumber=watchon;

  figNumber=figure( ...
    'Name','Bend Waveguide', ...
    'NumberTitle','off', ...
    'Visible','off', ...
    'BackingStore','off', ...
    'Colormap',[]);
  axes( ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90], ...
    'Visible','off', ...
    'NextPlot','add');

  labelColor=[0.8 0.8 0.8];
  yInitPos=0.90;
  xPos=0.85;
  btnWid=0.10;
  btnHt=0.10;
  spacing=0.05;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%=========================================
% The CONSOLE frame
frmBorder=0.02;
yPos=0.05-frmBorder;
frmPos=[xPos-frmBorder yPos btnWid+2*frmBorder 0.9+2*frmBorder];
h=uicontrol( ...
  'Style','frame', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',frmPos, ...
  'BackgroundColor',[0.5 0.5 0.5]);

%=========================================
% The START button
btnNumber=1;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
labelStr='Start';
cmdStr='start';
callbackStr='bend("start");';

% Generic button information
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt];
startHndl=uicontrol( ...
  'Style','pushbutton', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos, ...
  'String',labelStr, ...
  'Interruptible','on', ...
  'Callback',callbackStr);

%=========================================
% The W1 popup button
btnNumber=2;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr1='W1 (mm.)';
popupStr1=reshape(' 17  18  19  20  21  22  23  24  25 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr1);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr1);

%=========================================
% The W2 popup button
btnNumber=3;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr2='W2 (mm.)';
popupStr2=reshape(' 17  18  19  20  21  22  23  24  25 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd2=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr2);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd2=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr2);

%=============================================
% The L1 popup button
btnNumber=4;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr3='L1 (mm.)';
popupStr3=reshape(' 42  43  44  45  46  47  48  49  50 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd3=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr3);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd3=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr3);

%=============================================
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% The L2 popup button
btnNumber=5;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr4='L2 (mm.)';
popupStr4=reshape(' 42  43  44  45  46  47  48  49  50 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd4=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr4);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd4=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr4);

%=========================================
% The CLOSE button
labelStr='Close';
callbackStr='close(gcf)';
closeHndl=uicontrol( ...
  'Style','push', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',[xPos 0.05 btnWid 0.10], ...
  'String',labelStr, ...
  'Callback',callbackStr);
axHndl=gca;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
axis([0 100 0 100])
set(axHndl, ...
  'Box', 'on', ...
  'Color', [1 1 1], ...
  'XTick', [], ...
  'YTick', [], ...
  'Visible', 'on');
patch([20 40 40 90 90 20], [10 10 60 60 80 80], [0 0.2 0.5]);
h=text(30, 92, 'Bend Waveguide');
set(h, ...
  'FontSize',18, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [.7 0 0]);

h=text(28, 7, 'W1');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

h=text(91, 70, 'W2');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

h=text(15, 35, 'L1');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);
h=text(63.5, 57, 'L2');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

line([21 27], [7 7], 'Color', [0 0 0]);
line([33 39], [7 7], 'Color', [0 0 0]);
line([20 20], [6 8], 'Color', [0 0 0]);
line([40 40], [6 8], 'Color', [0 0 0]);

line([93 93], [61 67], 'Color', [0 0 0]);
line([93 93], [73 79], 'Color', [0 0 0]);
line([92 94], [60 60], 'Color', [0 0 0]);
line([92 94], [80 80], 'Color', [0 0 0]);

line([17 17], [11 32], 'Color', [0 0 0]);
line([17 17], [38 59], 'Color', [0 0 0]);
line([16 18], [10 10], 'Color', [0 0 0]);
line([16 18], [60 60], 'Color', [0 0 0]);

line([41 62], [57 57], 'Color', [0 0 0]);
line([68 89], [57 57], 'Color', [0 0 0]);
line([90 90], [56 58], 'Color', [0 0 0]);

hndlList=[startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd3 popupHnd4 closeHndl];
set(figNumber,'Visible','on', ...
  'UserData',hndlList);

watchoff(oldFigNumber);
figure(figNumber);

elseif strcmp(action,'start')
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
figNumber=gcf;
hndList=get(figNumber, 'UserData');

popupHnd1=hndList(2);
popupHnd2=hndList(3);
popupHnd3=hndList(4);
popupHnd4=hndList(5);
W1=get(popupHnd1, 'Value')+16;
W2=get(popupHnd2, 'Value')+16;
L1=get(popupHnd3, 'Value')+41;
L2=get(popupHnd4, 'Value')+41;

bend2(0,W1,W2,L1,L2);

end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โปรแกรม bend2.m

```
function bend2(C,W1,W2,L1,L2)

if C==0
  oldFigNumber=watchon;

  figNumber=figure( ...
    'Name','Bend Waveguide Analysis', ...
    'NextPlot','add', ...
    'NumberTitle','off', ...
    'Visible','off');

  axes( ...
     'XLim', [1 101], ...
     'YLim', [1 101], ...
     'ZLim', [-500 500], ...
     'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

  labelColor=[0.8 0.8 0.8];
  yInitPos=0.90;
  xPos=0.85;
  btnWid=0.10;
  btnHt=0.10;
  spacing=0.05;

  %==========================================
  % The CONSOLE frame
  frmBorder=0.02;
  yPos=0.05-frmBorder;
  frmPos=[xPos-frmBorder yPos btnWid+2*frmBorder 0.9+2*frmBorder];
  h=uicontrol( ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  'Style','frame', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',frmPos, ...
  'BackgroundColor',[0.5 0.5 0.5]);

%==========================================
% The START button
btnNumber=1;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
labelStr='Start';
cmdStr='start';
callbackStr='bend2(1);';

% Generic button information
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt];
startHndl=uicontrol( ...
  'Style','pushbutton', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos, ...
  'String',labelStr, ...
  'Interruptible','on', ...
  'Callback',callbackStr);

%==========================================
% The Frequency popup button
btnNumber=2;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr1='Frequency (GHz.)';
popupStr1=reshape(' 1  2  3  4  5  6  7  8  9 10 11 12 13 14 15 ',4,15)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2+0.02];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr1);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr1);

%=========================================
% The Field popup button
btnNumber=3;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr2='Field';
popupStr2=reshape(' Ez  Hx  Hy ',4,3)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd2=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr2);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd2=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr2);

%==========================================
% The Time Step popup button
btnNumber=4;
yPos=0.93-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr3='Time Step';
popupStr3=reshape(' 100 200 300 400 500',4,5)';


  % Generic button information
  btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
  btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
  popupHnd3=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr3);
  btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
  popupHnd3=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr3);

% The CLOSE button
labelStr='Close';
callbackStr='close(gcf)';
closeHndl=uicontrol( ...
  'Style','push', ...
  'Units','normalized', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  'Position',[xPos 0.05 btnWid 0.10], ...
  'String',labelStr, ...
  'Callback',callbackStr);

axHndl=gca;
axis([0 100 0 100])
set(axHndl, ...
  'Box', 'on', ...
  'Color', [1 1 1], ...
  'XTick', [], ...
  'YTick', [], ...
  'Visible', 'on');
h=text(15, 92, 'Bend Waveguide Analysis');
set(h, ...
  'FontSize',18, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [.7 0 0]);
%hndlList=[startHndl popupHndl popupHnd2 closeHndl W1 W2 L1 L2];

hndlList=[startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd3 closeHndl W1 W2 L1 L2];
set(figNumber,'Visible','on', ...
  'UserData',hndlList);

watchoff(oldFigNumber);
figure(figNumber);

else
  wnumber=watchon;
  axHndl=gca;
  figNumber=gcf;
  hndlList=get(figNumber,'UserData');
  startHndl=hndlList(1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
popupHndl=hndlList(2);
popupHnd2=hndlList(3);
popupHnd3=hndlList(4);
closeHndl=hndlList(5);

W1=hndlList(6);
W2=hndlList(7);
L1=hndlList(8);
L2=hndlList(9);

set([startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd3 closeHndl], 'Enable', 'off');

num = 7;
pml = 8;
ref = 1*10^(-7);

it=100;
jt=100;

rs=50;

pi=4.0*atan(1.0);
muo=4.0*pi*1.0e-7;
epso=8.854e-12;
co=1.0/sqrt(muo*epso);
freq=get(popupHndl,'Value')*1e9
field=get(popupHnd2,'Value');
nmax=get(popupHnd3,'Value')*100;
dx = 1.0e-3;
dt = dx/co/sqrt(2);

caezx=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
caezy=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
cbezx=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml)*dt/epso/dx;
cbezy=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml)*dt/epso/dx;
dahx=ones(jt+2*pml,it+1+2*pml);
dahy=ones(jt+1+2*pml,it+2*pml);
dbhx=ones(jt+2*pml,it+1+2*pml)*dt/muo/dx;
dbhy=ones(jt+1+2*pml,it+2*pml)*dt/muo/dx;
ezx=zeros(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
ezy=zeros(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
ez=zeros(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
hx=zeros(jt+2*pml,it+1+2*pml);
hy=zeros(jt+1+2*pml,it+2*pml);

%********************
% Bondary Condition *
%********************
for i=1+pml:it-4-W1-L2+pml
  for j=1+pml:jt+1+pml
    caezx(j,i)=-1;
    caezy(j,i)=-1;
    cbezx(j,i)=0;
    cbezy(j,i)=0;
  end
end

for i=it-4-L2+pml:it+1+pml
  for j=1+pml:6+L1+pml
    caezx(j,i)=-1;
    caezy(j,i)=-1;
    cbezx(j,i)=0;
    cbezy(j,i)=0;
  end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end

for i=1+pml:it+1+pml
  for j=6+L1+W2+pml:jt+1+pml
    caezx(j,i)=-1;
    caezy(j,i)=-1;
    cbezx(j,i)=0;
    cbezy(j,i)=0;
  end
end

maxsigma = -(num+1)*epso*co*log(ref)/(2*pml*dx);

for i=1:pml
  sigma1(i)=maxsigma*((i-0.5)/pml)^num;
  sigma2(i)=maxsigma*(i/pml)^num;
  sigmas1(i)=sigma1(i)*muo/epso;
  ca2(i)=exp(-sigma2(i)*dt/epso);
  cb2(i)=-(ca2(i)-1)/sigma2(i)/dx;
  da1(i)=exp(-sigmas1(i)*dt/muo);
  db1(i)=-(da1(i)-1)/sigmas1(i)/dx;
end

for i=1:pml
  for j=1:jt+1+2*pml
    caezx(j,pml-i+1)=ca2(i);
    cbezx(j,pml-i+1)=cb2(i);
    caezx(j,it+1+i+pml)=ca2(i);
    cbezx(j,it+1+i+pml)=cb2(i);

    dahy(j,pml-i+1)=da1(i);
    dbhy(j,pml-i+1)=db1(i);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    dahy(j,it+i+pml)=da1(i);
    dbhy(j,it+i+pml)=db1(i);
  end;
end;

for j=1:pml
  for i=1:it+1+2*pml
    caezy(pml-j+1,i)=ca2(j);
    cbezy(pml-j+1,i)=cb2(j);
    caezy(jt+1+j+pml,i)=ca2(j);
    cbezy(jt+1+j+pml,i)=cb2(j);

    dahx(pml-j+1,i)=da1(j);
    dbhx(pml-j+1,i)=db1(j);
    dahx(jt+j+pml,i)=da1(j);
    dbhx(jt+j+pml,i)=db1(j);
  end
end

for n=1:nmax;
  hx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1)=dahx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1).*...
    hx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1)+dbhx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1).*...
    (ez(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1)-ez(2:jt+2*pml+1,1:it+2*pml+1));

  hy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml)=dahy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml).*...
    hy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml)+dbhy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml).*...
    (ez(1:jt+2*pml+1,2:it+1+2*pml)-ez(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml));

  ezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)=caezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*...
    ezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)+cbezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*...
    (hy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)-hy(2:jt+2*pml,1:it+2*pml-1));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)=caezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*...
  ezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)+cbezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*...
  (hx(1:jt-1+2*pml,2:it+2*pml)-hx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml));

ez=ezx+ezy;

vs=sin(2*pi*freq*n*dt);

if rem(W1,2)==0
  is=(hy(6+pml,it-4-W1/2-L2+pml)-hy(6+pml,it-5-W1/2-L2+pml)+...
    hx(5+pml,it-4-W1/2-L2+pml)-hx(6+pml,it-4-W1/2-L2+pml))*dx;
  ez(6+pml,it-4-W1/2-L2+pml)=vs/dx+is*rs/dx;
else
  is=(hy(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)-hy(6+pml,it-5.5-W1/2-L2+pml)+...
    hx(5+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)-hx(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml))*dx;
  ez(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)=vs/dx+is*rs/dx;
  is=(hy(6+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml)-hy(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)+...
    hx(5+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml)-hx(6+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml))*dx;
  ez(6+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml)=vs/dx+is*rs/dx;
end

if rem(n,20)==0;
  n2=nmax/20;

 if field == 1
    for i =1:it+1
      for j = 1:jt+1
        out(j,i)=ez(j+pml,i+pml);
      end
    end

    graph=mesh(out);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    set(axHndl, ...
      'XTick', [], ...
      'YTick', [], ...
      'ZTick', [], ...
      'XLim', [1 it+1], ...
      'YLim', [1 jt+1], ...
      'ZLim', [-500 500], ...
      'Xgrid', 'off', ...
      'Ygrid', 'off', ...
      'Zgrid', 'off', ...
      'Drawmode', 'fast', ...
      'NextPlot','add',...
      'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

    shading interp;
    colormap(hot);

elseif field ==2
    for i =1:it+1
      for j = 1:jt
        out(j,i)=hx(j+pml,i+pml);
      end
    end

    graph=mesh(out);

    set(axHndl, ...
      'XTick', [], ...
      'YTick', [], ...
      'ZTick', [], ...
      'XLim', [1 it+1], ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    'YLim', [1 jt], ...
    'ZLim', [-5 5], ...
    'Xgrid', 'off', ...
    'Ygrid', 'off', ...
    'Zgrid', 'off', ...
    'Drawmode', 'fast', ...
    'NextPlot','add',...
    'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

  shading interp;
  colormap(hot);
else

  for i =1:it
    for j = 1:jt+1
      out(j,i)=hy(j+pml,i+pml);
    end
  end

  graph=mesh(out);

  set(axHndl, ...
    'XTick', [], ...
    'YTick', [], ...
    'ZTick', [], ...
    'XLim', [1 it], ...
    'YLim', [1 jt+1], ...
    'ZLim', [-5 5], ...
    'Xgrid', 'off', ...
    'Ygrid', 'off', ...
    'Zgrid', 'off', ...
    'Drawmode', 'fast', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        'NextPlot','add',...
        'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

      shading interp;
      colormap(hot);

    end

    if n==20;
      M=moviein(nmax/20);
    end;

    hold;
    M(:,n2)=getframe;
  end;

end

set([startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd3 closeHndl], 'Enable', 'on');
watchoff;

end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โปรแกรม tjunc.m

```
function tjunc(action)

play= 1;
stop=-1;

if nargin<1,
  action='initialize';
end;

if strcmp(action,'initialize'),
  oldFigNumber=watchon;

  figNumber=figure( ...
    'Name','T-Junction Waveguide', ...
    'NumberTitle','off', ...
    'Visible','off', ...
    'BackingStore','off', ...
    'Colormap',[]);
  axes( ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90], ...
    'Visible','off', ...
    'NextPlot','add');

  labelColor=[0.8 0.8 0.8];
  yInitPos=0.90;
  xPos=0.85;
  btnWid=0.10;
  btnHt=0.10;
  spacing=0.01;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%=========================================
% The CONSOLE frame
frmBorder=0.02;
yPos=0.05-frmBorder;
frmPos=[xPos-frmBorder yPos btnWid+2*frmBorder 0.9+2*frmBorder];
h=uicontrol( ...
  'Style','frame', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',frmPos, ...
  'BackgroundColor',[0.5 0.5 0.5]);

%=========================================
% The START button
btnNumber=1;
yPos=0.86-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
labelStr='Start';
cmdStr='start';
callbackStr='tjunc("start");';

% Generic button information
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt];
startHndl=uicontrol( ...
  'Style','pushbutton', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos, ...
  'String',labelStr, ...
  'Interruptible','on', ...
  'Callback',callbackStr);

%=========================================
% The W1 popup button
btnNumber=2;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
yPos=0.86-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr1='W1 (mm.)';
popupStr1=reshape(' 17  18  19  20  21  22  23  24  25 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr1);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr1);

%=========================================
% The W2 popup button
btnNumber=3;
yPos=0.86-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr2='W2 (mm.)';
popupStr2=reshape(' 17  18  19  20  21  22  23  24  25 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd2=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    'Position',btnPos1, ...
    'String',textStr2);
  btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
  popupHnd2=uicontrol( ...
    'Style','popup', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',btnPos2, ...
    'String',popupStr2);

  %==========================================
  % The W3 popup button
%  btnNumber=4;
%  yPos=0.86-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
%  textStr3='W3 (mm.)';
%  popupStr3=reshape(' 17  18  19  20  21  22  23  24  25 ',4,9)';

  % Generic button information
%  btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
%  btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
%  popupHnd3=uicontrol( ...
%    'Style','text', ...
%    'Units','normalized', ...
%    'Position',btnPos1, ...
%    'String',textStr3);
%  btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
%  popupHnd3=uicontrol( ...
%    'Style','popup', ...
%    'Units','normalized', ...
%    'Position',btnPos2, ...
%    'String',popupStr3);

  %==========================================
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% The L1 popup button
btnNumber=4;
yPos=0.86-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr4='L1 (mm.)';
popupStr4=reshape(' 42  43  44  45  46  47  48  49  50 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd4=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr4);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd4=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr4);

%=========================================
% The L2 popup button
btnNumber=5;
yPos=0.86-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr5='L2 (mm.)';
popupStr5=reshape(' 27  28  29  30  31  32  33  34  35 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd5=uicontrol( ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr5);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd5=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr5);

%=============================================
% The L3 popup button
btnNumber=6;
yPos=0.86-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr6='L3 (mm.)';
popupStr6=reshape(' 27  28  29  30  31  32  33  34  35 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd6=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr6);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd6=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr6);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%=============================================
% The CLOSE button
labelStr='Close';
callbackStr='close(gcf)';
closeHndl=uicontrol( ...
  'Style','push', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',[xPos 0.05 btnWid 0.10], ...
  'String',labelStr, ...
  'Callback',callbackStr);

axHndl=gca;
axis([0 100 0 100])
set(axHndl, ...
   'Box', 'on', ...
   'Color', [1 1 1], ...
   'XTick', [], ...
   'YTick', [], ...
   'Visible', 'on');
patch([40 60 60 90 90 10 10 40], [10 10 60 60 80 80 60 60], [0 0.2 0.5]);
h=text(21, 92, 'T-Junction Waveguide');
set(h, ...
   'FontSize',18, ...
   'FontWeight', 'bold', ...
   'Color', [.7 0 0]);

h=text(48, 7, 'W1');
set(h, ...
   'FontSize',10, ...
   'FontWeight', 'bold', ...
   'Color', [0 .7 0]);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
h=text(91, 70, 'W2');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

% h=text(4.5, 70, 'W3');
% set(h, ...
%   'FontSize',10, ...
%   'FontWeight', 'bold', ...
%   'Color', [0 .7 0]);

h=text(5.2, 35, 'L1');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

h=text(73.2, 57, 'L2');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

h=text(23.2, 57, 'L3');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

line([41 47], [7 7], 'Color', [0 0 0]);
line([53 59], [7 7], 'Color', [0 0 0]);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
line([40 40], [6 8], 'Color', [0 0 0]);
line([60 60], [6 8], 'Color', [0 0 0]);

line([93 93], [61 67], 'Color', [0 0 0]);
line([93 93], [73 79], 'Color', [0 0 0]);
line([92 94], [60 60], 'Color', [0 0 0]);
line([92 94], [80 80], 'Color', [0 0 0]);

%  line([7 7], [61 67], 'Color', [0 0 0]);
%  line([7 7], [73 79], 'Color', [0 0 0]);
line([6 8], [60 60], 'Color', [0 0 0]);
%  line([6 8], [80 80], 'Color', [0 0 0]);

line([7 7], [11 32], 'Color', [0 0 0]);
line([7 7], [38 59], 'Color', [0 0 0]);
line([6 8], [10 10], 'Color', [0 0 0]);

line([61 72], [57 57], 'Color', [0 0 0]);
line([78 89], [57 57], 'Color', [0 0 0]);
line([90 90], [56 58], 'Color', [0 0 0]);

line([11 22], [57 57], 'Color', [0 0 0]);
line([28 39], [57 57], 'Color', [0 0 0]);
line([10 10], [56 58], 'Color', [0 0 0]);

hndlList=[startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd4 popupHnd5 popupHnd6 closeHndl];
set(figNumber,'Visible','on', ...
  'UserData',hndlList);

watchoff(oldFigNumber);
figure(figNumber);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
elseif strcmp(action,'start')
  figNumber=gcf;
  hndList=get(figNumber, 'UserData');

  popupHnd1=hndList(2);
  popupHnd2=hndList(3);
  popupHnd4=hndList(4);
  popupHnd5=hndList(5);
  popupHnd6=hndList(6);

  W1=get(popupHnd1, 'Value')+16;
  W2=get(popupHnd2, 'Value')+16;
  L1=get(popupHnd4, 'Value')+41;
  L2=get(popupHnd5, 'Value')+26;
  L3=get(popupHnd6, 'Value')+26;
  C=0;
  tjunc2(C,W1,W2,L1,L2,L3);

end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. โปรแกรม tjunc2.m

```
function tjunc2(C,W1,W2,L1,L2,L3)

if C==0
  oldFigNumber=watchon;

  figNumber=figure( ...
    'Name','T-junction Waveguide Analysis', ...
    'NextPlot','add', ...
    'NumberTitle','off', ...
    'Visible','off');

  axes( ...
     'XLim', [1 101], ...
     'YLim', [1 101], ...
     'ZLim', [-500 500], ...
     'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

  labelColor=[0.8 0.8 0.8];
  yInitPos=0.90;
  xPos=0.85;
  btnWid=0.10;
  btnHt=0.10;
  spacing=0.05;

  %==================================
  % The CONSOLE frame
  frmBorder=0.02;
  yPos=0.05-frmBorder;
  frmPos=[xPos-frmBorder yPos btnWid+2*frmBorder 0.9+2*frmBorder];
  h=uicontrol( ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'Style','frame', ...
'Units','normalized', ...
'Position',frmPos, ...
'BackgroundColor',[0.5 0.5 0.5]);

%==========================================
% The START button
btnNumber=1;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
labelStr='Start';
cmdStr='start';
callbackStr='tjunc2(1);';

% Generic button information
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt];
startHndl=uicontrol( ...
  'Style','pushbutton', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos, ...
  'String',labelStr, ...
  'Interruptible','on', ...
  'Callback',callbackStr);

%==========================================
% The Frequency popup button
   btnNumber=2;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr1='Frequency (GHz.)';
popupStr1=reshape(' 1  2  3  4  5  6  7  8  9 10 11 12 13 14 15 ',4,15)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2+0.02];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr1);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr1);

%=============================================
% The Field popup button
btnNumber=3;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr2='Field';
popupStr2=reshape(' Ez  Hx  Hy ',4,3)';

 % Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd2=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr2);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd2=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 'Position',btnPos2, ...
 'String',popupStr2);

%==========================================
% Time Step popup button
btnNumber=4;
yPos=0.92-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr3='Time Step';
popupStr3=reshape('100 200 300 400 500 ',4,5)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2+0.02];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd3=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr3);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd3=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr3);

% The CLOSE button
labelStr='Close';
callbackStr='close(gcf)';
closeHndl=uicontrol( ...
  'Style','push', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',[xPos 0.05 btnWid 0.10], ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  'String',labelStr, ...
  'Callback',callbackStr);

axHndl=gca;
axis([0 100 0 100])
set(axHndl, ...
  'Box', 'on', ...
  'Color', [1 1 1], ...
  'XTick', [], ...
  'YTick', [], ...
  'Visible', 'on');
   h=text(8.0, 92, 'T-Junction Waveguide Analysis');
set(h, ...
  'FontSize',18, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [.7 0 0]);
hndlList=[startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd3 closeHndl W1 W2 L1 L2 L3];

set(figNumber,'Visible','on', ...
  'UserData',hndlList);

watchoff(oldFigNumber);
figure(figNumber);

else
  wnumber=watchon;
  axHndl=gca;
  figNumber=gcf;
  hndlList=get(figNumber,'UserData');
  startHndl=hndlList(1);
  popupHndl=hndlList(2);
  popupHnd2=hndlList(3);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
popupHnd3=hndlList(4);
closeHndl=hndlList(5);

W1=hndlList(6);
W2=hndlList(7);
L1=hndlList(8);
L2=hndlList(9);
L3=hndlList(10);

set([startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd3 closeHndl], 'Enable', 'off');

num = 7;
pml = 8;
ref = 1*10^(-10);

it=10+W1+L2+L3;
jt=15+W2+L1;

rs=50;

pi=4.0*atan(1.0);
muo=4.0*pi*1.0e-7;
epso=8.854e-12;
co=1.0/sqrt(muo*epso);
freq=get(popupHndl,'Value')*1e9;
field=get(popupHnd2,'Value');
nmax=get(popupHnd3,'Value')*100;
dx=1.0e-3;
dt=dx/co/sqrt(2);

caezx=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
caezy=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
cbezx=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml)*dt/epso/dx;
cbezy=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml)*dt/epso/dx;
dahx=ones(jt+2*pml,it+1+2*pml);
dahy=ones(jt+1+2*pml,it+2*pml);
dbhx=ones(jt+2*pml,it+1+2*pml)*dt/muo/dx;
dbhy=ones(jt+1+2*pml,it+2*pml)*dt/muo/dx;
ezx=zeros(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
ezy=zeros(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
ez=zeros(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
hx=zeros(jt+2*pml,it+1+2*pml);
hy=zeros(jt+1+2*pml,it+2*pml);
  %*********************
  % Bondary Condition *
  %*********************

for i=1+pml:it-4-L2-W1+pml
  for j=1+pml:6+L1+pml
    caezy(j,i)=-1;
    caezx(j,i)=-1;
    cbezy(j,i)=0;
    cbezx(j,i)=0;
  end
end

for i=it-4-L2+pml:it+1+pml
  for j=1+pml:6+L1+pml
    caezy(j,i)=-1;
    caezx(j,i)=-1;
    cbezy(j,i)=0;
    cbezx(j,i)=0;
  end
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
for i=1+pml:it+1+pml
  for j=6+L1+W2+pml:jt+1+pml
    caezy(j,i)=-1;
    caezx(j,i)=-1;
    cbezy(j,i)=0;
    cbezx(j,i)=0;
  end
end

maxsigma = -(num+1)*epso*co*log(ref)/(2*pml*dx);

for i=1:pml
    sigma1(i)=maxsigma*((i-0.5)/pml)^num;
    sigma2(i)=maxsigma*(i/pml)^num;
    sigmas1(i)=sigma1(i)*muo/epso;
  ca2(i)=exp(-sigma2(i)*dt/epso);
  cb2(i)=-(ca2(i)-1)/sigma2(i)/dx;
  da1(i)=exp(-sigmas1(i)*dt/muo);
  db1(i)=-(da1(i)-1)/sigmas1(i)/dx;
end

for i=1:pml
  for j=1:jt+1+2*pml
    caezx(j,pml-i+1)=ca2(i);
    cbezx(j,pml-i+1)=cb2(i);
    caezx(j,it+1+i+pml)=ca2(i);
    cbezx(j,it+1+i+pml)=cb2(i);

    dahy(j,pml-i+1)=da1(i);
    dbhy(j,pml-i+1)=db1(i);
    dahy(j,it+i+pml)=da1(i);
    dbhy(j,it+i+pml)=db1(i);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  end;
end;

for j=1:pml
  for i=1:it+1+2*pml
    caezy(pml-j+1,i)=ca2(j);
    cbezy(pml-j+1,i)=cb2(j);
    caezy(jt+1+j+pml,i)=ca2(j);
    cbezy(jt+1+j+pml,i)=cb2(j);

    dahx(pml-j+1,i)=da1(j);
    dbhx(pml-j+1,i)=db1(j);
    dahx(jt+j+pml,i)=da1(j);
    dbhx(jt+j+pml,i)=db1(j);
  end
end

for n=1:nmax;

hx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1)=dahx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1).*hx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1)+...
    dbhx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1).*(ez(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1)-
ez(2:jt+2*pml+1,1:it+2*pml+1));

hy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml)=dahy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml).*hy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml)+...
    dbhy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml).*(ez(1:jt+2*pml+1,2:it+1+2*pml)-
ez(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml));

  ezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)=caezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*ezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)+...
    cbezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*(hy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)-hy(2:jt+2*pml,1:it+2*pml-1));
  ezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)=caezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*ezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)+...
        cbezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*(hx(1:jt-1+2*pml,2:it+2*pml)-
hx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml));
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ez=ezx+ezy;

vs=sin(2*pi*freq*n*dt);

if rem(W1,2)==0
   is=(hy(6+pml,it-4-W1/2-L2+pml)-hy(6+pml,it-5-W1/2-L2+pml)+...
     hx(5+pml,it-4-W1/2-L2+pml)-hx(6+pml,it-4-W1/2-L2+pml))*dx;
   ez(6+pml,it-4-W1/2-L2+pml)=vs/dx+is*rs/dx;
 else
   is=(hy(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)-hy(6+pml,it-5.5-W1/2-L2+pml)+...
     hx(5+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)-hx(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml))*dx;
   ez(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)=vs/dx+is*rs/dx;
   is=(hy(6+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml)-hy(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)+...
     hx(5+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml)-hx(6+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml))*dx;
   ez(6+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml)=vs/dx+is*rs/dx;
 end

if rem(n,20)==0;
 n2=nmax/20;
 if field == 1
     for i =1:it+1
       for j = 1:jt+1
         out(j,i)=ez(j+pml,i+pml);
       end
     end

   graph=mesh(out);

     set(axHndl, ...
       'XTick', [], ...
       'YTick', [], ...
       'ZTick', [], ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        'XLim', [1 it+1], ...
        'YLim', [1 jt+1], ...
        'ZLim', [-500 500], ...
        'Xgrid', 'off', ...
        'Ygrid', 'off', ...
        'Zgrid', 'off', ...
        'Drawmode', 'fast', ...
        'NextPlot','add',...
        'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

    shading interp;
    colormap(hot);

elseif field ==2

 for i=1:it+1
   for j=1:jt
     out(j,i)=hx(j+pml,i+pml);
   end
 end

 graph=mesh(out);

     set(axHndl, ...
       'XTick', [], ...
       'YTick', [], ...
       'ZTick', [], ...
       'XLim', [1 it+1], ...
       'YLim', [1 jt], ...
       'ZLim', [-5 5], ...
       'Xgrid', 'off', ...
       'Ygrid', 'off', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        'Zgrid', 'off', ...
        'Drawmode', 'fast', ...
        'NextPlot','add',...
        'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

    shading interp;
    colormap(hot);
else

 for i =1:it
        for j = 1:jt+1
          out(j,i)=hy(j+pml,i+pml);
        end
    end

    graph=mesh(out);

    set(axHndl, ...
      'XTick', [], ...
      'YTick', [], ...
      'ZTick', [], ...
      'XLim', [1 it+1], ...
      'YLim', [1 jt], ...
      'ZLim', [-5 5], ...
      'Xgrid', 'off', ...
      'Ygrid', 'off', ...
      'Zgrid', 'off', ...
      'Drawmode', 'fast', ...
      'NextPlot','add',...
      'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

    shading interp;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    colormap(hot);

  end

 if n==20;
   M=moviein(nmax/20);
 end;

 hold;
 M(:,n2)=getframe;
end;

end
set([startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd3 closeHndl], 'Enable', 'on');
watchoff;
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. โปรแกรม cross.m

```
function cross(action)

play= 1;
stop=-1;

if nargin<1,
  action='initialize';
end;

if strcmp(action,'initialize'),
  oldFigNumber=watchon;

  figNumber=figure( ...
    'Name','Cross-Junction Waveguide', ...
    'NumberTitle','off', ...
    'Visible','off', ...
    'BackingStore','off', ...
    'Colormap',[]);
  axes( ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90], ...
    'Visible','off', ...
    'NextPlot','add');

  labelColor=[0.8 0.8 0.8];
  yInitPos=0.90;
  xPos=0.85;
  btnWid=0.10;
  btnHt=0.07;
  spacing=0.025;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%=========================================

% The CONSOLE frame

frmBorder=0.02;

yPos=0.05-frmBorder;

frmPos=[xPos-frmBorder yPos-0.02 btnWid+2*frmBorder 0.9+2*frmBorder+0.03];

h=uicontrol( ...

  'Style','frame', ...

  'Units','normalized', ...

  'Position',frmPos, ...

  'BackgroundColor',[0.5 0.5 0.5]);


%=========================================

% The START button

btnNumber=1;

yPos=0.91-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);

labelStr='Start';

cmdStr='start';

callbackStr='cross("start");';


% Generic button information

btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt];

startHndl=uicontrol( ...

  'Style','pushbutton', ...

  'Units','normalized', ...

  'Position',btnPos, ...

  'String',labelStr, ...

  'Interruptible','on', ...

  'Callback',callbackStr);


%=========================================

% The W1 popup button

btnNumber=2;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
yPos=0.915-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr1='W1 (mm.)';
popupStr1=reshape(' 17  18  19  20  21  22  23  24  25 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr1);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr1);

%=========================================
% The W2 popup button
btnNumber=3;
yPos=0.915-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr2='W2 (mm.)';
popupStr2=reshape(' 17  18  19  20  21  22  23  24  25 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd2=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    'Position',btnPos1, ...
    'String',textStr2);
  btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
  popupHnd2=uicontrol( ...
    'Style','popup', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',btnPos2, ...
    'String',popupStr2);

  %=======================================
  % The W3 popup button
%  btnNumber=4;
%  yPos=0.915-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
%  textStr3='W3 (mm.)';
%  popupStr3=reshape(' 17  18  19  20  21  22  23  24  25 ',4,9)';

  % Generic button information
%  btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
%  btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
%  popupHnd3=uicontrol( ...
%    'Style','text', ...
%    'Units','normalized', ...
%    'Position',btnPos1, ...
%    'String',textStr3);
%  btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
%  popupHnd3=uicontrol( ...
%    'Style','popup', ...
%    'Units','normalized', ...
%    'Position',btnPos2, ...
%    'String',popupStr3);

  %=======================================
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% The W4 popup button
%  btnNumber=5;
%  yPos=0.915-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
%  textStr4='W4 (mm.)';
%  popupStr4=reshape(' 17  18  19  20  21  22  23  24  25 ',4,9)';

% Generic button information
%  btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
%  btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
%  popupHnd4=uicontrol( ...
%    'Style','text', ...
%    'Units','normalized', ...
%    'Position',btnPos1, ...
%    'String',textStr4);
%  btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
%  popupHnd4=uicontrol( ...
%    'Style','popup', ...
%    'Units','normalized', ...
%    'Position',btnPos2, ...
%    'String',popupStr4);

%==========================================
% The L1 popup button
btnNumber=4;
yPos=0.915-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr5='L1 (mm.)';
popupStr5=reshape(' 27  28  29  30  31  32  33  34  35 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd5=uicontrol( ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr5);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd5=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr5);

%==========================================
% The L2 popup button
btnNumber=5;
yPos=0.915-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr6='L2 (mm.)';
popupStr6=reshape(' 27  28  29  30  31  32  33  34  35 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd6=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr6);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd6=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr6);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%==========================================
% The L3 popup button
btnNumber=6;
yPos=0.915-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr7='L3 (mm.)';
popupStr7=reshape(' 27  28  29  30  31  32  33  34  35 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd7=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr7);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd7=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr7);

%==========================================
% The L4 popup button
btnNumber=7;
yPos=0.915-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr8='L4 (mm.)';
popupStr8=reshape(' 27  28  29  30  31  32  33  34  35 ',4,9)';

% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
popupHnd8=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr8);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd8=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr8);

%=============================================
% The CLOSE button
labelStr='Close';
callbackStr='close(gcf)';
closeHndl=uicontrol( ...
  'Style','push', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',[xPos 0.02 btnWid 0.07], ...
  'String',labelStr, ...
  'Callback',callbackStr);

axHndl=gca;
axis([0 100 0 100])
set(axHndl, ...
  'Box', 'on', ...
  'Color', [1 1 1], ...
  'XTick', [], ...
  'YTick', [], ...
  'Visible', 'on');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
patch([40 60 60 85 85 60 60 40 40 15 15 40], [10 10 35 35 55 55 80 80 55 55 35 35],...
  [0 0.2 0.5]);

h=text(13, 92, 'Cross-Junction Waveguide');
set(h, ...
  'FontSize',18, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [.7 0 0]);

h=text(48, 7, 'W1');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

h=text(86, 45, 'W2');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

%  h=text(10, 45, 'W3');
%  set(h, ...
%    'FontSize',10, ...
%    'FontWeight', 'bold', ...
%    'Color', [0 .7 0]);

%  h=text(48, 83, 'W4');
%  set(h, ...
%    'FontSize',10, ...
%    'FontWeight', 'bold', ...
%    'Color', [0 .7 0]);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
h=text(35.5, 22.5, 'L1');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

h=text(71, 32, 'L2');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

h=text(25.7, 57.5, 'L3');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

h=text(61, 67.5, 'L4');
set(h, ...
  'FontSize',10, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [0 .7 0]);

line([41 47], [7 7], 'Color', [0 0 0]);
line([53 59], [7 7], 'Color', [0 0 0]);
line([40 40], [6 8], 'Color', [0 0 0]);
line([60 60], [6 8], 'Color', [0 0 0]);

line([88 88], [36 42], 'Color', [0 0 0]);
line([88 88], [48 54], 'Color', [0 0 0]);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
line([87 89], [35 35], 'Color', [0 0 0]);
line([87 89], [55 55], 'Color', [0 0 0]);

% line([13 13], [36 42], 'Color', [0 0 0]);
% line([13 13], [48 54], 'Color', [0 0 0]);
% line([12 14], [35 35], 'Color', [0 0 0]);
% line([12 14], [55 55], 'Color', [0 0 0]);

% line([41 47], [83 83], 'Color', [0 0 0]);
% line([53 59], [83 83], 'Color', [0 0 0]);
% line([40 40], [82 84], 'Color', [0 0 0]);
% line([60 60], [82 84], 'Color', [0 0 0]);

line([37 37], [11 20], 'Color', [0 0 0]);
line([37 37], [25 34], 'Color', [0 0 0]);
line([36 38], [10 10], 'Color', [0 0 0]);

line([61 70], [32 32], 'Color', [0 0 0]);
line([75 84], [32 32], 'Color', [0 0 0]);
line([85 85], [31 33], 'Color', [0 0 0]);

line([16 25], [58 58], 'Color', [0 0 0]);
line([30 39], [58 58], 'Color', [0 0 0]);
line([15 15], [57 59], 'Color', [0 0 0]);

line([63 63], [56 65], 'Color', [0 0 0]);
line([63 63], [70 79], 'Color', [0 0 0]);
line([62 64], [80 80], 'Color', [0 0 0]);

hndlList=[startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd5 popupHnd6 ...
    popupHnd7 popupHnd8 closeHndl];
set(figNumber,'Visible','on', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    'UserData',hndlList);

  watchoff(oldFigNumber);
  figure(figNumber);

elseif strcmp(action,'start')
  figNumber=gcf;
  hndList=get(figNumber, 'UserData');

  popupHnd1=hndList(2);
  popupHnd2=hndList(3);
  popupHnd5=hndList(4);
  popupHnd6=hndList(5);
  popupHnd7=hndList(6);
  popupHnd8=hndList(7);

  W1=get(popupHnd1, 'Value')+16;
  W2=get(popupHnd2, 'Value')+16;
  L1=get(popupHnd5, 'Value')+26;
  L2=get(popupHnd6, 'Value')+26;
  L3=get(popupHnd7, 'Value')+26;
  L4=get(popupHnd8, 'Value')+26;

  C=0;
  cross2(C,W1,W2,L1,L2,L3,L4);

end;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. โปรแกรม cross2.m

```
function cross2(C,W1,W2,L1,L2,L3,L4)

if C==0
  oldFigNumber=watchon;

  figNumber=figure( ...
    'Name','Cross Waveguide Analysis', ...
    'NextPlot','add', ...
    'NumberTitle','off', ...
    'Visible','off');

  axes( ...
     'XLim', [1 101], ...
     'YLim', [1 101], ...
     'ZLim', [-500 500], ...
     'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

  labelColor=[0.8 0.8 0.8];
  yInitPos=0.90;
  xPos=0.85;
  btnWid=0.10;
  btnHt=0.10;
  spacing=0.05;

  %=================================
  % The CONSOLE frame
  frmBorder=0.02;
  yPos=0.05-frmBorder;
  frmPos=[xPos-frmBorder yPos btnWid+2*frmBorder 0.9+2*frmBorder];
  h=uicontrol( ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  'Style','frame', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',frmPos, ...
  'BackgroundColor',[0.5 0.5 0.5]);

%==========================================
% The START button
btnNumber=1;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
labelStr='Start';
cmdStr='start';
callbackStr='cross2(1);';

% Generic button information
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt];
startHndl=uicontrol( ...
  'Style','pushbutton', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos, ...
  'String',labelStr, ...
  'Interruptible','on', ...
  'Callback',callbackStr);

%==========================================
% The Frequency popup button
   btnNumber=2;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr1='Frequency (GHz.)';
popupStr1=reshape('  1   2   3   4   5   6   7   8   9  10  11  12  13  14  15 ',4,15)';

 % Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2+0.02];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr1);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHndl=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr1);

%=============================================
% The Field popup button
btnNumber=3;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr2='Field';
popupStr2=reshape(' Ez  Hx  Hy ',4,3)';

 % Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd2=uicontrol( ...
   'Style','text', ...
   'Units','normalized', ...
   'Position',btnPos1, ...
   'String',textStr2);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd2=uicontrol( ...
   'Style','popup', ...
   'Units','normalized', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 'Position',btnPos2, ...
 'String',popupStr2);

%==========================================

% Time Step popup button
btnNumber=4;
yPos=0.92-(btnNumber-1)*(btnHt+spacing);
textStr3='Time Step';
popupStr3=reshape('100 200 300 400 500 ',4,5)';


% Generic button information
btnPos1=[xPos yPos-spacing+btnHt/2 btnWid btnHt/2+0.02];
btnPos2=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd3=uicontrol( ...
  'Style','text', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos1, ...
  'String',textStr3);
btnPos=[xPos yPos-spacing btnWid btnHt/2];
popupHnd3=uicontrol( ...
  'Style','popup', ...
  'Units','normalized', ...
  'Position',btnPos2, ...
  'String',popupStr3);


 % The CLOSE button
 labelStr='Close';
 callbackStr='close(gcf)';
 closeHndl=uicontrol( ...
   'Style','push', ...
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  'Units','normalized', ...
  'Position',[xPos 0.05 btnWid 0.10], ...
  'String',labelStr, ...
  'Callback',callbackStr);

axHndl=gca;
axis([0 100 0 100])
set(axHndl, ...
  'Box', 'on', ...
  'Color', [1 1 1], ...
  'XTick', [], ...
  'YTick', [], ...
  'Visible', 'on');
   h=text(10.5, 92, 'Cross-Junction Waveguide');
set(h, ...
  'FontSize',18, ...
  'FontWeight', 'bold', ...
  'Color', [.7 0 0]);
hndlList=[startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd3 closeHndl W1 W2 L1 L2 L3 L4];

set(figNumber,'Visible','on', ...
  'UserData',hndlList);

watchoff(oldFigNumber);
figure(figNumber);

else
 wnumber=watchon;
 axHndl=gca;
 figNumber=gcf;
 hndlList=get(figNumber,'UserData');
 startHndl=hndlList(1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
popupHndl=hndlList(2);
popupHnd2=hndlList(3);
popupHnd3=hndlList(4);
closeHndl=hndlList(5);

W1=hndlList(6);
W2=hndlList(7);
L1=hndlList(8);
L2=hndlList(9);
L3=hndlList(10);
L4=hndlList(11);

set([startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd3 closeHndl], 'Enable', 'off');

num = 7;
pml = 8;

ref = 1*10^(-10);

it=10+W1+L2+L3;
jt=10+W2+L1+L4;

rs=50;

pi=4.0*atan(1.0);
muo=4.0*pi*1.0e-7;
epso=8.854e-12;
co=1.0/sqrt(muo*epso);
freq=get(popupHndl,'Value')*1e9;
field=get(popupHnd2,'Value');
nmax=get(popupHnd3,'Value')*100;
dx=1.0e-3;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
dt=dx/co/sqrt(2);

caezx=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
caezy=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
cbezx=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml)*dt/epso/dx;
cbezy=ones(jt+1+2*pml,it+1+2*pml)*dt/epso/dx;
dahx=ones(jt+2*pml,it+1+2*pml);
dahy=ones(jt+1+2*pml,it+2*pml);
dbhx=ones(jt+2*pml,it+1+2*pml)*dt/muo/dx;
dbhy=ones(jt+1+2*pml,it+2*pml)*dt/muo/dx;
ezx=zeros(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
ezy=zeros(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
ez=zeros(jt+1+2*pml,it+1+2*pml);
hx=zeros(jt+2*pml,it+1+2*pml);
hy=zeros(jt+1+2*pml,it+2*pml);

  %**********************
  % Bondary Condition *
  %**********************

 for i=1+pml:it-4-L2-W1+pml
   for j=1+pml:6+L1+pml
     caezy(j,i)=-1;
     caezx(j,i)=-1;
     cbezy(j,i)=0;
     cbezx(j,i)=0;
   end
 end

 for i=it-4-L2+pml:it+1+pml
   for j=1+pml:6+L1+pml
     caezy(j,i)=-1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    caezx(j,i)=-1;
    cbezy(j,i)=0;
    cbezx(j,i)=0;
  end
end

for i=1+pml:it-4-L2-W1+pml
  for j=6+L1+W2+pml:jt+1+pml
    caezy(j,i)=-1;
    caezx(j,i)=-1;
    cbezy(j,i)=0;
    cbezx(j,i)=0;
  end
end

for i=it-4-L2+pml:it+1+pml
  for j=6+L1+W2+pml:jt+1+pml
    caezy(j,i)=-1;
    caezx(j,i)=-1;
    cbezy(j,i)=0;
    cbezx(j,i)=0;
  end
end

maxsigma = -(num+1)*epso*co*log(ref)/(2*pml*dx);

for i=1:pml
    sigma1(i)=maxsigma*((i-0.5)/pml)^num;
    sigma2(i)=maxsigma*(i/pml)^num;
    sigmas1(i)=sigma1(i)*muo/epso;
  ca2(i)=exp(-sigma2(i)*dt/epso);
  cb2(i)=-(ca2(i)-1)/sigma2(i)/dx;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  da1(i)=exp(-sigmas1(i)*dt/muo);
  db1(i)=-(da1(i)-1)/sigmas1(i)/dx;
end

for i=1:pml
  for j=1:jt+1+2*pml
    caezx(j,pml-i+1)=ca2(i);
    cbezx(j,pml-i+1)=cb2(i);
    caezx(j,it+1+i+pml)=ca2(i);
    cbezx(j,it+1+i+pml)=cb2(i);

    dahy(j,pml-i+1)=da1(i);
    dbhy(j,pml-i+1)=db1(i);
    dahy(j,it+i+pml)=da1(i);
    dbhy(j,it+i+pml)=db1(i);
  end;
end;

for j=1:pml
  for i=1:it+1+2*pml
    caezy(pml-j+1,i)=ca2(j);
    cbezy(pml-j+1,i)=cb2(j);
    caezy(jt+1+j+pml,i)=ca2(j);
    cbezy(jt+1+j+pml,i)=cb2(j);

    dahx(pml-j+1,i)=da1(j);
    dbhx(pml-j+1,i)=db1(j);
    dahx(jt+j+pml,i)=da1(j);
    dbhx(jt+j+pml,i)=db1(j);
  end
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
for n=1:nmax;

hx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1)=dahx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1).*hx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1)+...
    dbhx(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1).*(ez(1:jt+2*pml,1:it+2*pml+1)-
ez(2:jt+2*pml+1,1:it+2*pml+1));


hy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml)=dahy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml).*hy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml)+...
    dbhy(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml).*(ez(1:jt+2*pml+1,2:it+1+2*pml)-
ez(1:jt+2*pml+1,1:it+2*pml));

  ezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)=caezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*ezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)+...
    cbezx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*(hy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)-hy(2:jt+2*pml,1:it+2*pml-1));
  ezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)=caezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*ezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml)+...
        cbezy(2:jt+2*pml,2:it+2*pml).*(hx(1:jt-1+2*pml,2:it+2*pml)-
hx(2:jt+2*pml,2:it+2*pml));
  ez=ezx+ezy;

  vs=sin(2*pi*freq*n*dt);

  if rem(W1,2)==0
     is=(hy(6+pml,it-4-W1/2-L2+pml)-hy(6+pml,it-5-W1/2-L2+pml)+...
       hx(5+pml,it-4-W1/2-L2+pml)-hx(6+pml,it-4-W1/2-L2+pml))*dx;
     ez(6+pml,it-4-W1/2-L2+pml)=vs/dx+is*rs/dx;
    else
     is=(hy(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)-hy(6+pml,it-5.5-W1/2-L2+pml)+...
       hx(5+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)-hx(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml))*dx;
     ez(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)=vs/dx+is*rs/dx;
     is=(hy(6+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml)-hy(6+pml,it-4.5-W1/2-L2+pml)+...
       hx(5+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml)-hx(6+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml))*dx;
     ez(6+pml,it-3.5-W1/2-L2+pml)=vs/dx+is*rs/dx;
    end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if rem(n,20)==0;
    n2=nmax/20;
    if field == 1
        for i =1:it+1
          for j = 1:jt+1
            out(j,i)=ez(j+pml,i+pml);
          end
        end

      graph=mesh(out);

        set(axHndl, ...
          'XTick', [], ...
          'YTick', [], ...
          'ZTick', [], ...
          'XLim', [1 it+1], ...
          'YLim', [1 jt+1], ...
          'ZLim', [-500 500], ...
          'Xgrid', 'off', ...
          'Ygrid', 'off', ...
          'Zgrid', 'off', ...
          'Drawmode', 'fast', ...
          'NextPlot','add',...
          'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

        shading interp;
        colormap(hot);

      elseif field ==2

       for i=1:it+1
         for j=1:jt
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    out(j,i)=hx(j+pml,i+pml);
  end
end

graph=mesh(out);

    set(axHndl, ...
      'XTick', [], ...
      'YTick', [], ...
      'ZTick', [], ...
      'XLim', [1 it+1], ...
      'YLim', [1 jt], ...
      'ZLim', [-5 5], ...
      'Xgrid', 'off', ...
      'Ygrid', 'off', ...
      'Zgrid', 'off', ...
      'Drawmode', 'fast', ...
      'NextPlot','add',...
      'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

    shading interp;
    colormap(hot);
else

 for i =1:it
      for j = 1:jt+1
        out(j,i)=hy(j+pml,i+pml);
      end
    end

    graph=mesh(out);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    set(axHndl, ...
      'XTick', [], ...
      'YTick', [], ...
      'ZTick', [], ...
      'XLim', [1 it+1], ...
      'YLim', [1 jt], ...
      'ZLim', [-5 5], ...
      'Xgrid', 'off', ...
      'Ygrid', 'off', ...
      'Zgrid', 'off', ...
      'Drawmode', 'fast', ...
      'NextPlot','add',...
      'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90]);

    shading interp;
    colormap(hot);

  end

 if n==20;
   M=moviein(nmax/20);
 end;

 hold;
 M(:,n2)=getframe;
end;

end
set([startHndl popupHndl popupHnd2 popupHnd3 closeHndl], 'Enable', 'on');
watchoff;
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. โปรแกรม guideinfo.m

```
function outInfo=guideinfo

n=0;

n=n+1;
guideList(n).Name='Discontinuous Waveguides';
guideList(n).Type='FD-TD Analysis';
guideList(n).Help= {...
  '        The characterizations of various types of discontinuities'
  'in rectangular waveguide is very important for microwave'
  'device.                                                          '
  '        These discontinuities include: posts, strips diaghragms,'
  'windows, steps, bends, T-junction, cross-junction, aperture,'
  'etc. '
  '        In this program, bends, T-junction and cross-junction are'
  'analyzed by using the FD-TD method. S-parameter, VSWR,'
  'Impedance of these discontinuous are presented.'};
guideList(n).FdtdsList={
  'Bends Waveguide',
  'T-Junction Waveguide',
  'Cross-Junction Waveguide'};
guideList(n).FcnList={
  'bend',
  'tjunc',
  'cross'};

outInfo=guideList;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. Naomi Goldmaan, User's Guide, "The student Education of MATLAB the Ultimate Computing Environment for Technical Education" USA, 1995
2. Allen Taflove., "Computational Electrodynamics, The Finite-Difference Time-Domain Method" Artech House Boston London. pp.1-200,1995
3. ผศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา, "วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้า", ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กทม., หน้า 1-36, 60-65, 153-180, 2532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้