

การวิเคราะห์ไอเกนโหมดของเส้นใยแสงที่มีความสมมาตรรอบแนวแกนโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์

นาย กฤษณ์ มันทาวิจักษณ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-303-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EIGENMODE ANALYSIS OF AXIALLY SYMMETRIC OPTICAL FIBERS  
BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Mr. Kit Muntavijak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic year 1996

ISBN 974-636-303-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ไอเกนโหมดของเส้นใยแสงที่มีความสมมาตรรอบแนวแกน  
โดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์

โดย

นาย กฤษณ์ มันทาวิจักษณ์

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

( ศาสตราจารย์ นพ. ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์ )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

( ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์ )

อาจารย์ที่ปรึกษา

( อาจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว )

กรรมการ

( รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน )

กรรมการ

( รองศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ )



## พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

กฤษณ์ มันทาวัจจักษณ์ : การวิเคราะห์ไอเกนโหมดของเส้นใยแสงที่มีความสมมาตรรอบแนวแกนโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ (EIGENMODE ANALYSIS OF AXIALLY SYMMETRIC OPTICAL FIBERS BY THE FINITE ELEMENT METHOD) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร. ทับทิม อ่างแก้ว ; 92 หน้า,  
ISBN 974-636-303-4.

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ซึ่งมีการนำเทคนิคการแปลงบริเวณ (mapping technique) มาใช้ในการวิเคราะห์บริเวณที่มีลักษณะเปิด (open region) ให้เป็นบริเวณที่มีขอบเขตจำกัด (bounded region) เพื่อให้การคำนวณโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์มีความละเอียดแม่นยำเพิ่มขึ้นและจำนวนอีลีเมนต์ที่ใช้ลดลง

แนวทางการวิจัยงานนี้ สมการแปรผัน (variational expression) ใช้องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันทดสอบ รูปแบบของเส้นใยแสงที่ใช้ทดสอบจำกัดเฉพาะเส้นใยแสงที่มีการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) อย่างที่มีความสมมาตรรอบแนวแกนเท่านั้น ปัญหาในรูปแบบเส้นใยแสงแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ บริเวณแกน (บริเวณจำกัด) บริเวณวัสดุหุ้ม (cladding) เป็นบริเวณจำกัด และบริเวณระยะไกล (outer domain) ซึ่งเป็นบริเวณเปิด ในบริเวณระยะไกลเทคนิคการแปลงบริเวณจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ สำหรับเทคนิคการแปลงบริเวณที่นำเสนอในงานวิจัยนี้คือ

1. ฟังก์ชันลอการิทึมธรรมชาติ
2. ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล

ในงานวิจัยนี้คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแสง (propagation characteristic) ในเส้นใยแสงเป็นสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ คำตอบที่ใช้เป็นตัวทดสอบความแม่นยำตรงของแต่ละวิธีคือค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐาน (normalize propagation constant) โดยทดสอบที่ความถี่บรรทัดฐานใดๆ (normalize frequency) ที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได (step-index) , และแบบดัชนีลาด (grad-index)

ผลการวิจัยพบว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่มีการนำเทคนิคการแปลงบริเวณด้วยฟังก์ชันลอการิทึมและเอกซ์โพเนนเชียลที่บริเวณระยะไกลเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเมื่อทดสอบคำตอบแม่นยำตรง โดยเฉพาะเมื่อทดสอบใกล้ความถี่คutoff ฟังก์ชันการแปลงบริเวณแบบลอการิทึมจะมีความแม่นยำตรงสูงกว่าแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่มีการนำเทคนิคการแปลงบริเวณด้วยฟังก์ชันลอการิทึมที่บริเวณระยะไกลจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในงานวิจัยนี้

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา ..... 2539

ลายมือชื่อนิสิต ..... กฤษณ์ มันทาวัจจักษณ์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... อ.ดร. ทับทิม อ่างแก้ว  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

## C615528 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: MAPPING TECHNIQUE / FIBER OPTICAL / FINITE ELEMENT METHOD

KIT MUNTAVIJAK: EIGENMODE ANALYSIS OF AXIALLY SYMMETRIC OPTICAL FIBERS BY THE FINITE ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR: TUPTIM ANGKAEW, D.Eng. 92 pp. ISBN 974-636-303-4.

This research has the objective to study analysis electromagnetic wave in optical fiber by finite element method. A mapping technique is proposed to transform the finite element method of the open region into bounded region. In this method, the finite element that apply mapping technique in the open region are more accurated using fewer number of elements.

A variational expression using the electric field components as the trial function is presented. This thesis is restricted for refractive index of optical fiber that axially symmetric. The problem of pattern of the optical fiber are divided into three domains: the core domain (bounded region), the cladding domain (bounded region), and the outer domain (open region). The outer domain, mapping technique are applied together with finite element method. The mapping technique function that presented are

1. natural logarithm function
2. exponential function

In this research, the propagation characteristics in optical fiber are analysed. The solution that used for solving the accuracy of mapping technique is the normalize propagation constants by trial at any normalize frequency. The refractive-index pattern are step-index fiber and grad-index fiber pattern.

The results of research found that the finite element method applied mapping technique with natural logarithm function and exponential function in outer domain is the efficiency method for testing accurated answer. Especially, testing near cutoff frequency function of mapping technique with natural logarithm is more accurated than exponential function. So that the finite element method applied mapping technique with natural logarithm function is the most efficient in this research.

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา..... 2539

ลายมือชื่อนิติ..... กฤษณ์ มีนตากุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *W d*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีของอาจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของงานวิจัยมาด้วยดีตลอด

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศ.ดร.มงคล เดชนครินทร์ รศ.ดร.ชุมพล อันตรเสน และ รศ.ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ

ขอขอบคุณ คุณน้ำจำลองและคุณน้ำบงอร เงินดี ที่ให้คำปรึกษาปัญหาต่าง ๆ และให้กำลังใจมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ น.ส. เนาวรัตน์ เต็มตระกูล ที่เป็นกำลังใจมาโดยตลอดจนสามารถสำเร็จการศึกษาดังที่ตั้งใจไว้

ขอขอบคุณ นาย ชัยรัตน์ พิณทอง บัณฑิตคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด

## บทที่

1. บทนำ.....	1
-ความเป็นมา.....	1
1. เส้นใยแสงแบบดัชนีชั้นบันได (step-index).....	2
2. เส้นใยแสงแบบดัชนีลาด (grad-index).....	3
-แนวทางการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแสงในเส้นใยแสง.....	4
1. วิธีเชิงวิเคราะห์.....	4
2. วิธีเชิงตัวเลข.....	4
-แนวความคิดพื้นฐานของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	5
-รูปแบบปัญหาเส้นใยแสง.....	6
-เทคนิคการแก้ปัญหาเส้นใยแสงด้วยไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ขอบเขตของปัญหา เป็นบริเวณเปิด.....	8
-วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้.....	10
-วิธีดำเนินงานและขอบเขตของการวิจัย.....	10
-ประโยชน์ของงานวิจัยนี้.....	11
2. หลักการวิเคราะห์เส้นใยแสงที่มีความสมมาตรรอบแนวแกนด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	12
-ความนำ.....	12
-สมการพื้นฐาน.....	13
1. สมการแมกซ์เวลล์.....	13

สารบัญ (ต่อ)

2. เงื่อนไขขอบเขต.....	15
-หลักการและขั้นตอนของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์.....	15
1. นิพจน์แปรผัน.....	15
2. นิพจน์แปรผันในระบบพิกัดทรงกระบอก.....	17
3. ฟังก์ชันรูปร่างและการจัดรูปเมตริกซ์.....	19
4. เงื่อนไขการควอนไทซ์มุมทิศ.....	24
3. เทคนิคการแปลงบริเวณแบบ $s = \ln(r)$ .....	28
-ความนำ.....	28
1. ลักษณะปัญหาของเส้นใยแสงและการนำเทคนิคการแปลงบริเวณแบบ $s = \ln(r)$ มาใช้.....	29
2. การนำเทคนิคการแปลงบริเวณแบบ $s = \ln(r)$ มาประยุกต์ใช้ในระบบสมการ.....	31
-ตัวอย่างการคำนวณ.....	36
1. การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได ด้วยเทคนิคการแปลงบริเวณแบบ $s = \ln(r)$ และวิธีที่ไม่ใช้เทคนิคการแปลงบริเวณ.....	36
2. การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มีการปรับตัวแปร 5 ค่า คือ จำนวนอีลีเมนต์ในแกน , จำนวนอีลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม , จำนวนอีลีเมนต์ในบริเวณระยะไกล , รัศมี $r_n$ และ รัศมี $r_\infty$ ที่ความถี่บรรทัดฐาน = 1.5 ไมครอน $HE_{11}$ .....	37
3. การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มีการปรับตัวแปร 5 ค่า คือ จำนวนอีลีเมนต์ในแกน , จำนวนอีลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม , จำนวนอีลีเมนต์ในบริเวณระยะไกล , รัศมี $r_n$ และ รัศมี $r_\infty$ ที่ความถี่บรรทัดฐาน = 4.0 ไมครอน $HE_{11}$ .....	40
4. การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงแบบดัชนีขั้นบันได คำนวณที่ความถี่ใดๆ.....	44



สารบัญ (ต่อ)

5. การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงแบบดัชนีลาด คำนวณที่ความถี่ใดๆ.....45

-สรุปผลการคำนวณ.....46

4. เทคนิคการแปลงบริเวณแบบ  $s = e^{(-ar)}$  .....47

-ความนำ .....47

1. ลักษณะปัญหาของเส้นใยแสงและการนำเทคนิคการแปลงบริเวณแบบ  $s = e^{(-ar)}$  มาใช้.....48

2. การนำเทคนิคการแปลงบริเวณแบบ  $s = e^{(-ar)}$  มาประยุกต์ใช้ในระบบสมการ.....50

-ตัวอย่างการคำนวณ.....55

1. การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได ด้วยเทคนิคการแปลงบริเวณแบบ  $s = e^{(-ar)}$  และวิธีที่ไม่ใช้เทคนิคการแปลงบริเวณ.....55

2. การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มีการปรับตัวแปร 5 ค่า คือ จำนวนอีลีเมนต์ในแกน , จำนวนอีลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม , จำนวนอีลีเมนต์ในบริเวณระยะไกล , รัศมี  $r_n$  และ รัศมี  $r_\infty$  ที่ความถี่บรรทัดฐาน = 1.5 ไมครอน  $HE_{11}$ .....57

3. การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มีการปรับตัวแปร 5 ค่า คือ จำนวนอีลีเมนต์ในแกน , จำนวนอีลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม , จำนวนอีลีเมนต์ในบริเวณระยะไกล , รัศมี  $r_n$  และ รัศมี  $r_\infty$  ที่ความถี่บรรทัดฐาน = 4.0 ไมครอน  $HE_{11}$ .....60

4. การคำนวณหาผลของค่า  $\alpha$  ที่ผลมีต่อการคำนวณ.....64

5. การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงแบบดัชนีขั้นบันได คำนวณที่ความถี่ใดๆ.....67

6. การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงแบบดัชนีลาด คำนวณที่ความถี่ใดๆ.....68

## สารบัญ ( ต่อ )

-สรุปผลการคำนวณ.....	69
5. บทสรุป.....	71
-ความนำ .....	71
-การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของ ค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได เปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการแปลง บริเวณแบบ $s = \ln(r)$ และ $s = e^{-ar}$ โดยที่มีการปรับตัวแปร 5 ค่า คือ จำนวนอิลีเมนต์ในแกน, จำนวนอิลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม, จำนวนอิลีเมนต์ในบริเวณ ระยะไกล, รัศมี $r_n$ และ รัศมี $r_\infty$ ที่ความถี่บรรทัดฐาน = 1.5 ไมครอน $HE_{11}$ .....	71
-การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของ ค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได เปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการแปลง บริเวณแบบ $s = \ln(r)$ และ $s = e^{-ar}$ โดยที่มีการปรับตัวแปร 5 ค่า คือ จำนวนอิลีเมนต์ในแกน, จำนวนอิลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม, จำนวนอิลีเมนต์ในบริเวณ ระยะไกล, รัศมี $r_n$ และ รัศมี $r_\infty$ ที่ความถี่บรรทัดฐาน = 4.0 ไมครอน $HE_{11}$ .....	71
-การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบการกระจายตัวของค่า ดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบ triangular profile.....	78
-สรุปผลการคำนวณ.....	79
-บทสรุป.....	80
เอกสารอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก. การเข้าสมการระบบโดยวิธีเรย์ลี-ริตซ์.....	84
ภาคผนวก ข. การจัดรูปแบบของเทอม $a$ และ $n(r)$ ให้อยู่ในรูปของเทอม $n_c$ .....	88
ประวัติผู้เขียน .....	92

## สารบัญตาราง

- ตารางที่ 3.1 การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบฟังก์ชันการแปลงบริเวณ เป็นแบบ  $s = \ln(r)$  เปรียบเทียบกับวิธีที่ไม่ใช้เทคนิคการแปลงบริเวณ จำนวนที่  $V=1.5$  โมด  $HE_{11}$  รูปแบบการการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได .....36
- ตารางที่ 3.2 การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบฟังก์ชันการแปลงบริเวณ เป็นแบบ  $s = \ln(r)$  เปรียบเทียบกับวิธีที่ไม่ใช้เทคนิคการแปลงบริเวณ จำนวนที่  $V=4.0$  โมด  $HE_{11}$  รูปแบบการการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได .....37
- ตารางที่ 3.3 การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบฟังก์ชันการแปลงบริเวณ เป็นแบบ  $s = \ln(r)$  จำนวนที่  $V=1.5$  โมด  $HE_{11}$  รูปแบบการการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มีการปรับค่าตัวแปร 5 ตัว คือ อีลีเมนต์ในแกน , อีลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม , อีลีเมนต์ในระยยะไกล ,  $r_n$  ,  $r_\infty$  .....38
- ตารางที่ 3.4 การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบฟังก์ชันการแปลงบริเวณ เป็นแบบ  $s = \ln(r)$  จำนวนที่  $V=4.0$  โมด  $HE_{11}$  รูปแบบการการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มีการปรับค่าตัวแปร 5 ตัว คือ อีลีเมนต์ในแกน , อีลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม , อีลีเมนต์ในระยยะไกล ,  $r_n$  ,  $r_\infty$  .....41
- ตารางที่ 4.1 การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบฟังก์ชันการแปลงบริเวณ เป็นแบบ  $s = e^{-ar}$  เปรียบเทียบกับวิธีที่ไม่ใช้เทคนิคการแปลงบริเวณ จำนวนที่  $V=1.5$  โมด  $HE_{11}$  รูปแบบการการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได .....56
- ตารางที่ 4.2 การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบฟังก์ชันการแปลงบริเวณ เป็นแบบ  $s = e^{-ar}$  เปรียบเทียบกับวิธีที่ไม่ใช้เทคนิคการแปลงบริเวณ จำนวนที่  $V=4.0$  โมด  $HE_{11}$  รูปแบบการการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได .....56
- ตารางที่ 4.3 การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบฟังก์ชันการแปลงบริเวณ เป็นแบบ  $s = e^{-ar}$  จำนวนที่  $V=1.5$  โมด  $HE_{11}$  รูปแบบการการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มีการปรับค่าตัวแปร 5 ตัว คือ อีลีเมนต์ในแกน , อีลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม , อีลีเมนต์ในระยยะไกล ,  $r_n$  ,  $r_\infty$  .....58

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 4.4 การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบฟังก์ชันการแปลงบริเวณ เป็นแบบ $s = e^{-\alpha r}$ จำนวนที่ $V=4.0$ โหมด $HE_{11}$ รูปแบบการกระจายตัวของค่า ดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มีการปรับค่าตัวแปร 5 ตัว คือ อีลีเมนต์ ในแกน , อีลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม , อีลีเมนต์ในระยะไกล , $r_n$ , $r_\infty$ .....	61
ตารางที่ 4.5 การคำนวณผลของค่า $\alpha$ ที่มีต่อการคำนวณที่ $V=1.5$ โหมด $HE_{11}$ .....	64
ตารางที่ 4.6 การคำนวณผลของค่า $\alpha$ ที่มีต่อการคำนวณที่ $V=4.0$ โหมด $HE_{11}$ .....	66
ตารางที่ 5.1 การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบฟังก์ชันการแปลงบริเวณ เป็นแบบ $s = \ln(r)$ , $s = e^{-\alpha r}$ จำนวนที่ $V=1.5$ โหมด $HE_{11}$ รูปแบบการกระจาย ตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มีการปรับค่าตัวแปร 5 ตัว คือ อีลีเมนต์ในแกน , อีลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม , อีลีเมนต์ในระยะไกล , $r_n$ , $r_\infty$ .....	71
ตารางที่ 5.2 การคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายบรรทัดฐานที่มีรูปแบบฟังก์ชันการแปลงบริเวณ เป็นแบบ $s = \ln(r)$ , $s = e^{-\alpha r}$ จำนวนที่ $V=4.0$ โหมด $HE_{11}$ รูปแบบการกระจาย ตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบขั้นบันได โดยที่มีการปรับค่าตัวแปร 5 ตัว คือ อีลีเมนต์ในแกน , อีลีเมนต์ในวัสดุหุ้ม , อีลีเมนต์ในระยะไกล , $r_n$ , $r_\infty$ .....	75
ตารางที่ 5.3 การคำนวณประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้เทคนิคการแปลงบริเวณด้วย ฟังก์ชัน $s = \ln(r)$ รูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบ triangular profile.....	79

สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1	โครงสร้างของเส้นใยแสงในแนวภาคตัดขวาง .....	1
รูปที่ 1.2	โครงสร้างของเส้นใยแสงในระพิกัดทรงกระบอก .....	2
รูปที่ 1.3	ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของแสงแบบขั้นบันได .....	2
รูปที่ 1.4	ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของแสงแบบดัชนีลาด .....	3
รูปที่ 1.5	ลักษณะของปัญหาเส้นใยแสงที่เป็นบริเวณเปิด .....	7
รูปที่ 1.6	ตัวอย่างแบบรูปของสนามไฟฟ้าในเส้นใยแสงแบบแผ่นคู่ขนาน .....	7
รูปที่ 1.7	ฟังก์ชันการแปลงบริเวณแบบ $s = \ln(r)$ .....	9
รูปที่ 1.10	ฟังก์ชันการแปลงบริเวณแบบ $s = e^{-ar}$ .....	10
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของเส้นใยแสงในภาคตัดขวางที่มีความสม่ำเสมอในแนวแกน z .....	13
รูปที่ 2.2	แสดงเงื่อนไขขอบเขตบนผนังเส้นใยแสง .....	15
รูปที่ 2.3 ก	ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดทรงกระบอกและระบบพิกัดมุมฉาก .....	18
รูปที่ 2.3 ข	ความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนระบบพิกัดของฟังก์ชันทดสอบ $f_r, f_\theta$ .....	18
รูปที่ 2.3 ค	ความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนระบบพิกัดของฟังก์ชันทดสอบ $g_r(r)$ .....	18
รูปที่ 2.4	ตัวอย่างการแบ่งโดเมนย่อย (element) ของเส้นใยแสง (ในภาคตัดขวาง) .....	19
รูปที่ 2.5	ฟังก์ชันที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชันขั้นบันได .....	20
รูปที่ 2.6 ก	ฟังก์ชันที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชันรูปหีบแบบ $\frac{r_m}{r} u_m(r)$ .....	20
รูปที่ 2.6 ข	ฟังก์ชันที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชันรูปหีบแบบ $u_m(r)$ .....	21
รูปที่ 3.1	ลักษณะปัญหาเส้นใยแสงที่ใช้ในการพิจารณา .....	28
รูปที่ 3.2	ตัวอย่างการแบ่งอีลีเมนต์ในเส้นใยแสง .....	30
รูปที่ 3.3	การกระจายของสนามไฟฟ้าในเส้นใยแสงแบบแผ่นคู่ขนาน .....	30
รูปที่ 3.4	ฟังก์ชันการแปลงบริเวณแบบ $s = \ln(r)$ .....	31
รูปที่ 3.5	การแบ่งโดเมนที่ใช้ในการพิจารณา .....	32
รูปที่ 3.6	ตัวอย่างรูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงแบบขั้นบันได .....	36
รูปที่ 3.7	ตัวอย่างรูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงแบบขั้นบันได .....	37
รูปที่ 3.8	ตัวอย่างรูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงแบบขั้นบันได .....	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.9	ตัวอย่างรูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงแบบชั้นบันได.....	44
รูปที่ 3.10	ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่การแพร่กระจายบรรทัดฐานคำนวณที่ความถี่ใด ๆ โดยที่เทคนิคการแปลงบริเวณแบบ $s = \ln(r)$ รูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบชั้นบันได.....	45
รูปที่ 3.11	ตัวอย่างรูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงแบบดัชนีลาด.....	45
รูปที่ 3.12	ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่การแพร่กระจายบรรทัดฐานคำนวณที่ความถี่ใด ๆ โดยที่เทคนิคการแปลงบริเวณแบบ $s = \ln(r)$ รูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบดัชนีลาด.....	46
รูปที่ 4.1	ลักษณะปัญหาเส้นใยแสงที่ใช้ในการพิจารณา.....	47
รูปที่ 4.2	ตัวอย่างการแบ่งอิมิตเนนทีในเส้นใยแสง.....	49
รูปที่ 4.3	ตัวอย่างแบบรูปของสนามไฟฟ้าในเส้นใยแสงแบบแผ่นคู่ขนาน.....	49
รูปที่ 4.4	ฟังก์ชันการแปลงบริเวณแบบ $s = e^{-ax}$ .....	50
รูปที่ 4.5	การแบ่งโดเมนที่ใช้ในการพิจารณา.....	51
รูปที่ 4.6	ตัวอย่างรูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงแบบชั้นบันได.....	55
รูปที่ 4.7	ตัวอย่างรูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงแบบชั้นบันได.....	57
รูปที่ 4.8	ตัวอย่างรูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงแบบชั้นบันได.....	60
รูปที่ 4.9	ตัวอย่างรูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงแบบชั้นบันได.....	64
รูปที่ 4.10	แสดงค่าความผิดพลาดเมื่อมีการปรับขนาดของค่า $\alpha$ .....	67
รูปที่ 4.11	ตัวอย่างรูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงแบบชั้นบันได.....	67
รูปที่ 4.12	ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่การแพร่กระจายบรรทัดฐานคำนวณที่ความถี่ใด ๆ โดยที่เทคนิคการแปลงบริเวณแบบ $s = e^{-ax}$ รูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบชั้นบันได.....	68
รูปที่ 4.13	ตัวอย่างรูปแบบการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงแบบดัชนีลาด.....	68
รูปที่ 4.14	ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่การแพร่กระจายบรรทัดฐานคำนวณที่ความถี่ใด ๆ โดยที่เทคนิคการแปลงบริเวณแบบ $s = e^{-ax}$ รูปแบบค่าดัชนีหักเหของแสงเป็นแบบดัชนีลาด.....	69

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.1	ตัวอย่างการกระจายตัวของค่าดัชนีหักเหของแสงแบบ triangular profile.....	78
รูปที่ 5.2	ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่การแพร่กระจายบรรทัดฐานทดสอบที่ความถี่ใด ๆ โดยเทคนิคการแปลงบริเวณแบบ $s = \ln(r)$ รูปแบบดัชนีหักเหของแสงเป็น แบบ triangular profile.....	79

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

## สัญลักษณ์

## ความหมาย

$a$	ความแตกต่างของค่าดัชนีหักเห (refractive index difference)
$a(f_r, f_\theta)$	ฟังก์ชันนอลที่มีองค์ประกอบเป็น $(f_r, f_\theta)$
$A_{f_r f_r}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[A]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(f_r, f_r)$
$A_{f_r f_\theta}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[A]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(f_r, f_\theta)$
$A_{f_\theta f_r}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[A]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(f_\theta, f_r)$
$A_{f_\theta f_\theta}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[A]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(f_\theta, f_\theta)$
$[A]$	เมตริกซ์จัตุรัส (square matrix)
$B$	ค่าคงที่การแพร่กระจายบรรทัดฐาน (normalize propagation constant)
$B$	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density)
$\beta$	ค่าคงที่การแพร่กระจาย (propagation constant)
$b(f_r, f_\theta, g)$	ฟังก์ชันนอลที่มีองค์ประกอบเป็น $(f_r, f_\theta, g)$
$B_{f_r f_r}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[B]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(f_r, f_r)$
$B_{f_r f_\theta}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[B]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(f_r, f_\theta)$
$B_{f_r, g}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[B]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(f_r, g)$
$B_{f_\theta f_r}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[B]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(f_\theta, f_r)$
$B_{f_\theta f_\theta}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[B]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(f_\theta, f_\theta)$
$B_{f_\theta g}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[B]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(f_\theta, g)$
$B_{g f_r}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[B]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(g, f_r)$
$B_{g f_\theta}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[B]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(g, f_\theta)$
$B_{g g}$	เมตริกซ์จัตุรัส $[B]$ ที่มีองค์ประกอบของ $(g, g)$
$[B]$	เมตริกซ์จัตุรัส (square matrix)
$[C]$	เมตริกซ์แถวที่มีองค์ประกอบเป็นสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า
$c_m$	สัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า (unknown coefficient)
$D$	ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density)



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$d_m$	สัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า (unknown coefficient)
$E$	ความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity)
$E_t$	สนามไฟฟ้าในแนวภาคตัดขวาง (transverse electric field)
$E_z$	องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกน $z$
$e_m$	สัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า (unknown coefficient)
$\epsilon$	สภาพยอม (permittivity)
$\epsilon_r$	สภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity)
$f$	ฟังก์ชันกระตุ้น (excitation function)
$f_x$	องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในทิศทาง $x$
$f_y$	องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในทิศทาง $y$
$f_r(r)$	องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในทิศทาง $r$
$f_\theta(r)$	องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในทิศทาง $\theta$
$\mathbf{f}_t$	เวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแนวตามขวาง
$F(\phi)$	ฟังก์ชันนอล (functional) ที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าคือ $\phi$
$g_z$	ปริมาณสเกลาร์ขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิศทาง $z$
$g_r$	ปริมาณสเกลาร์ขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในทิศทาง $r$
$H$	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity)
$\mathbf{i}_x$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง $x$
$\mathbf{i}_y$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง $y$
$\mathbf{i}_z$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง $z$
$\mathbf{i}_r$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง $r$
$\mathbf{i}_\theta$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง $\theta$
$k_0$	เวฟนัมเบอร์ในอวกาศว่าง (wave number of freespace)
$l$	ตัวเลขควอนไทซ์มุมทิศ (azimuthal quantization number)
$L$	ตัวดำเนินการอนุพันธ์ (differential operator)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

$\mathbf{n}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตั้งฉาก (unit vector)
$n_1$	ค่าดัชนีหักเหในตัวกลางที่ 1 (refractive index of media 1)
$n_2$	ค่าดัชนีหักเหในตัวกลางที่ 2 (refractive index of media 2)
$n_c$	ค่าดัชนีหักเหประสิทธิผลของแสง (effective refractive index)
$n(r)$	ค่าดัชนีหักเหภายในแกน (refractive index of core)
$N_i^e$	ฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วง (interpolation function)
$\phi$	ตัวแปรไม่ทราบค่า (unknown variable)
$\phi_i^e$	คำตอบทดสอบ (testing function)
$\phi_i^e$	ตัวแปรไม่ทราบค่าคิดที่แต่ละโหนด
$\{\phi_i\}$	เวกเตอร์เจาะจง (eigenvalue)
$r$	รัศมีของเส้นใยแสง (radius of fiber)
$r_0$	รัศมีของแกน (radius of core)
$r_m$	ค่าที่จุดโคออดิเนตเมื่อฟังก์ชันทดสอบ $u_m(r)$ มีค่าเท่ากับ 1
$R_e$	ค่าตกค้าง (residuals)
$\lambda$	ค่าเจาะจง (eigenvalue)
$t_m(r)$	ฟังก์ชันทดสอบแบบขั้นบันได (step function)
$u_m(r)$	ฟังก์ชันทดสอบแบบรูฟท็อป (rooftop function)
$\mu$	ความซึมได้ (permeability)
$\mu_r$	ความซึมได้สัมพัทธ์ (relative permeability)
$V$	ความถี่บรรทัดฐาน (normalize frequency)
$W_e$	ฟังก์ชันให้น้ำหนัก (weighting function)
$w_t$	ฟังก์ชันให้น้ำหนักในแนวตามขวาง
$w_z$	ฟังก์ชันให้น้ำหนักในแนวแกน z
$\omega$	ความถี่เชิงมุม (angular frequency)
$\Omega$	โดเมนทั้งหมดของปัญหา (domain)
$\Omega_e$	โดเมนย่อยของปัญหา (subdomain)