บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมา

ระบบสื่อสารโทรคมนาคมปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการแลกเปลี่ยนข้อมูลและข่าวสาร เช่น ระบบสื่อสารไมโครเวฟบนภาคพื้นดิน ระบบสื่อสารดาวเทียม ในระบบสื่อสารเหล่านี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์นำสัณญาณที่ย่านความถี่ไมโครเวฟ ท่อนำคลื่นเป็นอุปกรณ์นำสัญญาณที่มีคุณสมบัติในการส่งพลังงานคลื่นไมโครเวฟจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยมีการสูญเสียกำลังงานต่ำและส่งกำลังได้สูง ท่อนำคลื่นแบ่งได้หลายชนิด ตามลักษณะของตัวกลางที่บรรจุอยู่ภายในท่อนำคลื่นและรูปร่างของท่อนำคลื่น

ท่อนำคลื่นที่มีตัวกลางเป็นวัสดุสารแม่เหล็กแบบไจโรแมกเนติก (gyromagnetic) จะมีคุณลักษณะพิเศษ คือ โพลาไรเซชันของคลื่นไมโครเวฟที่เดินทางในท่อนำคลื่นจะหมุนไปตามระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป และคลื่นที่เดินทางย้อนกลับจะมีการหมุนของโพลาไรเซชันที่ไม่สมมาตรกัน คือ เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการหมุนฟาราเดย์ (Faraday rotation) ปรากฏการณ์นี้มีประโยชน์ในการออกแบบอุปกรณ์ไมโครเวฟที่มีหน้าที่กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นหรือการเลื่อนเฟสของคลื่น เช่น อุปกรณ์ไอโซเลเตอร์ (isolator), อุปกรณ์เลื่อนเฟส (phase shifter) และอุปกรณ์ไจเรเตอร์ (gyrator) เป็นต้น (Helszajn, 1989)

ตัวอย่างของวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นแบบไจโรแมกเนติก คือ เฟอร์ไรต์ (ferrite) ที่ได้รับการไบแอส (bias) ด้วยสนามแม่เหล็กสถิต (static magnetic field) ในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยสนามแม่เหล็กสถิตกำเนิดมาจากแม่เหล็กถาวรหรือขดโซลินอยด์ (solenoid) จากการไบแอสในลักษณะนี้ ทำให้วัสดุสารแม่เหล็กมีเทนเซอร์ความซาบซึมได้ (permeability tensor) ในรูปของเฮอร์มิเชียน (hermitian form) และมีสภาพยอม (permittivity) เป็นสเกลาร์ ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกมีการทำงานแบบไร้ภาวะย้อนกลับ (nonreciprocal) และมีปรากฏการณ์การหมุนฟาราเดย์เกิดขึ้นได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์สร้างอุปกรณ์ไมโครเวฟ ที่มีคุณสมบัติในการควบคุมทิศทางการส่งสัญญาณคลื่น เช่น อุปกรณ์ไอโซเลเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งคลื่นไมโครเวฟเพียงทิศทางเดียว กล่าวคือการส่งคลื่นจากจุดที่หนึ่งไปยังจุดที่สอง สัญญาณคลื่นในทิศทางนี้ก็จะไม่มีการลดทอน (attenuation) แต่ถ้าสัญญาณคลื่นถูกส่งจากจุดที่สองมายังจุดที่หนึ่ง สัญญาณคลื่นก็จะเกิดการลดทอน อีกตัวอย่างหนึ่ง คือ อุปกรณ์ไจเรเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเลื่อนเฟสของคลื่นไมโครเวฟ ระหว่างตำแหน่งที่หนึ่งและตำแหน่งที่สอง โดยถ้าสัญญาณเคลื่อนที่จากจุดที่หนึ่งมายังจุดที่สองความต่างเฟสจะเป็น 180 องศา แต่ถ้าสัญญาณเคลื่อนที่จากจุดที่สองมายังจุดที่หนึ่ง ความต่างเฟสจะเป็นศูนย์

การวิเคราะห์ปัญหาท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติก โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ (analytic method) ได้มีการศึกษาในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา แต่ทว่าระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์มีข้อจำกัดคือการหาผลเฉลยในท่อนำคลื่นที่มีรูปร่างซับซ้อนจะกระทำได้ยาก เช่นในกรณีที่มีตัวกลางมากกว่าหนึ่งชนิดบรรจุอยู่ในท่อนำคลื่น ตัวอย่างของงานวิจัยที่มีผู้เสนอโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ มีดังนี้

Helszajn and Gibson (1987) วิเคราะห์ปัญหาท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติก มีภาคตัดขวางเป็นรูปวงกลม (gyromagnetic circular waveguide) และมีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์หรือตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ นอกจากนี้ตัวกลางที่วิเคราะห์มีเพียงตัวกลางเดียว โดยเน้นการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นมีผนังตัวนำแม่เหล็กสมบูรณ์ ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าคงตัวเฟส (phase constant) และความถี่ตัด (cutoff frequency) ในโมดพื้นฐาน (fundamental mode) ของท่อนำคลื่นจะเกิดขึ้นสองค่า

Baden Fuller (1987) วิเคราะห์ปัญหาท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางเป็นรูปวงกลม มีผนังท่อนำคลื่นเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์เพียงอย่างเดียวและตัวกลางในท่อนำคลื่นเป็นตัวกลางไม่เอกพันธุ์ พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ คือ ค่าคงตัวเฟสที่เป็นฟังก์ชันของรัศมีท่อนำคลื่น

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าการวิเคราะห์ปัญหาท่อนำคลื่นด้วยระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์มีข้อจำกัดและกระทำได้เฉพาะปัญหาที่มีความสมมาตร ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งและนิยมใช้ในปัจจุบัน วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เป็นวิธีหนึ่งที่มีผู้วิจัยหลายท่านนำมาวิเคราะห์ปัญหาท่อนำคลื่นแบบนี้ คือ

Gibson and Helszajn (1989) เสนอวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าและความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน (axial component) สององค์ประกอบ ในการวิเคราะห์ค่าคงตัวเฟสของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี (elliptical gyromagnetic waveguide) และมีตัวกลางเอกพันธุ์ อุปสรรคของวิธีนี้คือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตระหว่างตัวกลางสองชนิด(ตัวกลางไม่เอกพันธุ์)จะกระทำได้ยากและมีผลเฉลยปลอมเทียม (spurious solution) เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นในปัจจุบันวิธีนี้ก็ไม่ได้รับการพัฒนาต่อไป

Dillon, Gibson and Webb (1993) เสนอวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กสามองค์ประกอบคือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกนและแนวตามขวาง (transverse component) ในการวิเคราะห์ค่าคงตัวเฟสของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธุ์ (inhomogeneous gyromagnetic circular waveguide) ในงานวิจัยนี้มีการแบ่งอีลีเมนต์เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่แต่ละด้านเป็นเส้นโค้งหรือเป็นอีลีเมนต์แบบควอดริเลเกอรัล (quadrilateral element) การแบ่งอีลีเมนต์แบบนี้ไม่เป็นที่นิยมเมื่อเทียบกับอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมที่นิยมใช้กันทั่วไป

Anderson and Cendes (1995) เสนอวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กสามองค์ประกอบ คือความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกนและแนวตามขวางเช่นเดียวกับ Dillon, Gibson and Webb (1993) ในการวิเคราะห์ค่าคงตัวเฟสของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยวัสดุเฟอร์ไรต์ที่ไบแอสด้วยสนามแม่เหล็กสถิต

ในแนวแกนและแนวตามขวางกับการเคลื่อนที่ของคลื่น วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ เมทริกซ์เจาะจง (eigenmatrix) ของปัญหาอยู่ในรูปของเมทริกซ์เจาะจงกำลังสอง เพื่อให้สามารถแก้สมการปัญหาค่าเจาะจง (eigenvalues problem) ได้โดยใช้วิธีมาตรฐานจึงต้องดัดแปลงให้เป็นเมทริกซ์เจาะจงเชิงเส้น ซึ่งยังผลให้มีขนาดของเมทริกซ์เจาะจงเพิ่มเป็นสองเท่า จึงต้องใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น

จากเหตุดังกล่าวในข้างต้นผู้เสนอวิทยานิพนธ์ในวิทยานิพนธ์นี้เสนอ การปรับปรุงวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง จากงานวิจัยของ Angkaew, Matsuhara and Kumagai (1987) โดยเหตุผลที่เลือกการปรับปรุงวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์แบบนี้เนื่องจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์แบบนี้มีข้อเด่น 2 ประการ ประการแรกวิธีนี้ใช้นิพจน์แปรผัน (variational expression) ซึ่งอยู่ในรูปที่สามารถหาค่าคงตัวเฟสได้โดยตรง ประการที่สองวิธีนี้ไม่มีผลเฉลยปลอมเทียมซึ่งเป็นคำตอบที่ไม่เป็นจริงทางกายภาพ แต่อย่างไรก็ตามวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์แบบนี้มีข้อด้อย คือ มีองค์ประกอบความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางจำนวน 4 องค์ประกอบ และใช้จำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสนามเท่ากับ 12 ตัวแปรต่อหนึ่งอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยม ยังผลให้ความถูกต้องของผลเฉลยไม่สูงมากนักถ้าการแบ่งอีลีเมนต์มีจำนวนไม่มากและถ้าการแบ่งอีลีเมนต์มีจำนวนมาก ขนาดเมทริกซ์เจาะจงมีขนาดใหญ่ ซึ่งต้องใช้เวลาคำนวณมาก ดังนั้นแนวทางที่สามารถปรับปรุงวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์แบบนี้ คือ ผู้เสนอวิทยานิพนธ์เสนอการนำฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบ (edge element shape function) ที่กำหนดตัวแปรไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งขอบ (edge) ของด้านทั้งสามในอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยมซึ่งทำให้มีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า 6 ตัวแปรในแบบอันดับศูนย์ (zero order) และ 16 ตัวแปรในแบบอันดับหนึ่ง (first order) เพื่อทดสอบความแม่น (accuracy) ของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่นำเสนอนี้ ผู้เสนอวิทยานิพนธ์ได้คำนวณเปรียบเทียบค่าคงตัวเฟสในกรณีของท่อนำคลื่น 2 แบบคือ ท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม (hollow circular waveguide) และท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric load waveguide) โดยแสดงการเปรียบเทียบความแม่นของโมดเจาะจง ระหว่างวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับผลเฉลยแม่นตรง (exact solution) จากนั้นนำวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่นำเสนอนี้ วิเคราะห์โมดเจาะจงและการหมุนฟาราเดย์ในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม โดยเน้นศึกษาการหมุนของสนามในท่อนำคลื่นที่เปลี่ยนแปลงตามพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความถี่ ค่าการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิต เป็นต้น เนื่องจากงานวิจัยที่วิเคราะห์พารามิเตอร์เหล่านี้มีไม่มากนักและเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบอุปกรณ์ไมโครเวฟ เช่น อุปกรณ์ไอโซเลเตอร์และอุปกรณ์เลื่อนเฟส เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อปรับปรุงวิธีวิเคราะห์โมดเจาะจงในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกรูปร่างไม่เจาะจงและไม่มีการสูญเสียด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางโดยใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบ

2. วิเคราะห์การหมุนฟาราเดย์ในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม

เป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย

1. ปรับปรุงวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางโดยใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่ (constant edge element) และฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น (linear edge element) และทดสอบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่นำเสนอนี้ โดยกำหนดท่อนำคลื่น 2 แบบคือ ท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลมแสดงการเปรียบเทียบความแม่นของผลการคำนวณค่าคงตัวเฟสของโมดเจาะจงระหว่างวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับผลเฉลยแม่นตรง และท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกแสดงการเปรียบเทียบความแม่นของผลการคำนวณค่าคงตัวเฟสของโมดเจาะจงระหว่างการใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบเวกเตอร์และอีลีเมนต์ขอบ จากนั้นตรวจสอบการเกิดผลเฉลยปลอมเทียมว่าเกิดขึ้นหรือไม่

2. วิเคราะห์โมดเจาะจงและปรากฏการณ์การหมุนฟาราเดย์ของคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติก โดยเน้นศึกษาการหมุนของสนามในท่อนำคลื่นที่เปลี่ยนแปลงตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าความถี่ ค่าการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิต เป็นต้น ซึ่งมีท่อนำคลื่นที่วิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลม
- ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงรี
- ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกมีภาคตัดขวางรูปวงกลมไม่เอกพันธุ์

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างท่อนำคลื่นคุณลักษณะของวัสดุสารแม่เหล็กที่เป็นวัสดุไจโรแมกเนติก และพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญของท่อนำคลื่น

2. ศึกษาวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่นำมาประยุกต์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและฟังก์ชันรูปร่าง

3. เสนอการใช้ฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบที่เหมาะสมในวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เพื่อวิเคราะห์โมดเจาะจงของท่อนำคลื่น

4. เขียนโปรแกรมการคำนวณหาโมดเจาะจงของท่อนำคลื่น ผู้เสนอวิทยานิพนธ์ได้เขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาคำนวณไมโครซอฟต์ฟอร์แทรน เวอร์ชัน 1.0 บนระบบปฏิบัติการ (operating system) วินโดร์ 95 และใช้โปรแกรมย่อย (subprograms) ทาง คณิตศาสตร์ แมท 77 (Math 77) ของบริษัท Language Systems และ IMSL ของไมโครซอฟร์ ทำงานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer) ที่ใช้ซีพียูเพนเทียม 233 เมกะเฮิรตซ์ หน่วยความจำหลัก 32 เมกะไบต์และมีเนื้อที่ว่างบนฮาร์ดดิสก์ 100 เมกะไบต์

5. วิเคราะห์ผลการคำนวณที่ได้ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่ผ่านมา

6. สรุปและรวบรวมผลการวิเคราะห์ที่ได้

7. จัดทำเอกสารวิทยานิพนธ์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย

1. ทราบเทคนิคการวิเคราะห์ปัญหาของท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกรูปร่างไม่เจาะจง โดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางด้วยฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบ

2. ทราบคุณลักษณะการหมุนฟาราเดย์ของคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกเมื่อเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ ค่าการไบแอสสนามแม่เหล็กสถิต เป็นต้น

3. มีโปรแกรมที่ช่วยในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติก

เนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 4 บท บทที่ 1 บทนำ, บทที่ 2 แสดงการปรับปรุงวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางด้วยฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบคงที่และฟังก์ชันรูปร่างอีลีเมนต์ขอบเชิงเส้น และผลการทดสอบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่นำเสนอ โดยแสดงการเปรียบเทียบความแม่นของผลการคำนวณค่าคงตัวเฟสของโมดเจาะจงเมื่อเทียบกับผลเฉลยแม่นตรง ในกรณีของท่อนำคลื่นกลวงมีภาคตัดขวางรูปวงกลมและท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไดอิเล็กทริก, บทที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การหมุนฟาราเดย์ของโมดพื้นฐานในท่อนำคลื่นที่บรรจุด้วยวัสดุไจโรแมกเนติกเมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์ของวัสดุไจโรแมกเนติกและรูปร่างของวัสดุไจโรแมกเนติกที่บรรจุในท่อนำคลื่นที่มีหน้าตัดรูปวงกลม และบทที่ 4 เป็นการสรุปผลและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย