



( - )  
1/1/2541

การออกแบบอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบโดยใช้โครงสร้างแบบหลายชั้น

**THE DESIGN OF PLANAR MICROWAVE COMPONENTS  
USING MULTILAYER STRUCTURES**



โดย

นายณยศ

คุณกิจโกศล

37014104

นายอนุชา

พงศ์ศรุต

37014553

วัน เดือน ปี.....	18.คค.2541
เลขทะเบียน.....	039071
เลขเรียกหนังสือ.....	110391 261111

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

039071

การออกแบบอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบโดยใช้โครงสร้างแบบหลายชั้น

THE DESIGN OF PLANAR MICROWAVE COMPONENTS

USING MULTILAYER STRUCTURES

โดย

นายณยศ      กุรุกิจโกศล      37014104

นายอนุชา      พงศ์ศรุต      37014553

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.จเร      สุรวัดน์ปัญญา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบโดยใช้โครงสร้างแบบหลายชั้น

**THE DESIGN OF PLANAR MICROWAVE COMPONENTS USING MULTILAYER  
STRUCTURES**

ผู้จัดทำ

1. นายณยศ      ครูกิจโกศล      37014104

2. นายอนุชา      พงศ์ศรุต      37014553

๑๖ 

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.จเร สุรวัดณ์ปัญญา)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบ

โดยใช้โครงสร้างแบบหลายชั้น

THE DESIGN OF PLANAR MICROWAVE  
COMPONENTS USING MULTILAYER  
STRUCTURES

โดย 1.นายณยศ กุรุกิจ โภทศ 37014104  
2.นายอนุชา พงศ์ศรุต 37014553

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้รายงานการศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบ (Planar Microwave Component) ที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น (multilayer structure) โดยใช้วิธีอิมมิแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม (Spectral Domain Immittance Approach) รวมทั้งนำทฤษฎีดังกล่าว มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ และออกแบบสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียวและหลายชั้น เปรียบเทียบกับการออกแบบโดยวิธีใช้สูตรเชิงประสบการณ์ (empirical formula) และโปรแกรมสำเร็จรูป ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดลอง

ABSTRACT

This thesis concerns the studying about the Spectral Domain Immittance Approach in order to analyze the characteristics of Planar Microwave Components with multi-layer configuration. Some of microstrip transmission line with both single-layer and multi-layer are analyzed and designed numerically by using that method. In addition, the other methods, empirical formula and transmission line calculator software, are also used to design for comparing the results. The experiment has shown a good agreement between theory and measurement.

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วิธีโคเมนเชิงสเปกตรัม	2
บทที่ 3 การออกแบบและผลการคำนวณ	25
บทที่ 4 ผลการทดลอง	44
บทที่ 5 บทสรุป	51
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป	52
ภาคผนวก ข. การใช้งานโปรแกรมย่อยมาตรฐาน	69
ภาคผนวก ค. สายส่งไมโครสตริปและการออกแบบโดยใช้สูตรเชิงประสพการณ์ กิตติกรรมประกาศ	105
หนังสืออ้างอิง	

## สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 2.2-1 ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริป	4
รูปที่ 2.2-2 ลักษณะของฟังก์ชันฐาน	12
รูปที่ 2.3-1 องค์ประกอบของคลื่นในโดเมนเชิงสเปกตรัมในระบบพิกัด $(u, v)$	14
รูปที่ 2.3-2 วงจรสายส่งสมมูลสำหรับคลื่นในโหมด TM และ TE	15
รูปที่ 2.3-3 วงจรสายส่งสมมูลสำหรับสายส่งไมโครสตริปที่มีสัปดาห์ 3 ชั้น	18
รูปที่ 2.4-1 โครงสร้างของสายส่งชนิดสลิตไลน์	18
รูปที่ 2.4-2 ลักษณะของฟังก์ชันฐาน	19
รูปที่ 2.5-1 ความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการคัปปลิงระหว่างไมโครสตริปกับสลิตไลน์	20
รูปที่ 2.7-1 โครงสร้างแบบมีผนังด้านข้างของสายส่ง	23
รูปที่ 3-1 สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น	25
รูปที่ 3.1-1 วงจรสายส่งที่ใช้ในการวัดคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป	31
รูปที่ 3.1-2 ฝั่งงานของโปรแกรมในส่วนของกรคำนวณแนวโน้มของค่าดีเทอร์มิแนนท์	33
รูปที่ 3.1-3 ฝั่งงานของโปรแกรมในส่วนของกรคำนวณหาค่า $\beta$	34
รูปที่ 3.1-4 ฝั่งงานของโปรแกรมในส่วนของกรหาคุณลักษณะเมื่อทราบค่า $\beta$	35
รูปที่ 3.1-5 ขั้นตอนโดยสรุปของการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป	36
รูปที่ 3.1-6 โปรแกรมย่อมาตรฐานที่เรียกใช้ในโปรแกรม	37
รูปที่ 3.1-7 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมคำนวณ	37
รูปที่ 3.2-1 พฤติกรรมการลู่เข้าของ $Z_0$ เมื่อเพิ่มจำนวนเทอมของผลรวม	38
รูปที่ 3.2-2 พฤติกรรมการลู่เข้าของ $Z_0$ เมื่อเพิ่มจำนวนเทอมของฟังก์ชันฐาน	39
รูปที่ 3.3-1 สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว	39
รูปที่ 3.3-2 ผลการคำนวณ ออกแบบสายส่งไมโครสตริปแบบชั้นเดียวโดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม	40
รูปที่ 3.3-3 ขนาดของ $\mathcal{H}$ ที่มีผลต่ออิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	40
รูปที่ 3.3-4 ผลการเปรียบเทียบการออกแบบโดยวิธีต่างๆ	41
รูปที่ 3.3-5 โปรแกรมสำเร็จรูป TxLine™ ที่ใช้ในการออกแบบสายส่งไมโครสตริป	41
รูปที่ 3.4-1 สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น	42
รูปที่ 3.4-2 คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้นที่ได้ออกแบบ	42
รูปที่ 3.4-3 คุณลักษณะทางความถี่ของสายส่งไมโครสตริปที่ได้ออกแบบ	43
รูปที่ 4-1 วงจรสายส่งที่ใช้ในการวัดคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป	44
รูปที่ 4-2 การทดลองวัดคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป	44

## สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 4.1-1 สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว	45
รูปที่ 4.1-2 ผลการวัด $ S_{11} $ ของวงจรสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว	47
รูปที่ 4.1-3 ผลการทดลองวัดหาคูณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว	47
รูปที่ 4.2-1 สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น	48
รูปที่ 4.2-2 ผลการทดลองวัดหาคูณลักษณะ ของสายส่งไมโครสตริปแบบหลายชั้น	48
รูปที่ 4.2-3 ผลการวัดหาค่า $ S_{11} $ ในช่วงความถี่ 2-6 GHz	49
รูปที่ 4.2-4 คูณลักษณะทางความถี่ของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น	49
รูปที่ 5-1 การคัปปลิงระหว่างสายส่งไมโครสตริปและท่อนำคลื่นเชิงระนาบร่วม	51
รูปที่ ก-1 ลักษณะของไมโครสตริปไลน์	105
รูปที่ ก-2 ลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในไมโครสตริป	105
รูปที่ ก-3 หลักการของค่าคงตัวสภาพยอม	106
รูปที่ ก-4 ผลของความหนาของแผ่นสตริปต่อสนามไฟฟ้า	109

## บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันการออกแบบวงจรรวมไมโครเวฟ (Microwave Integrated Circuits :MICs) มีการพัฒนาให้สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงขึ้นไปเป็นลำดับ นอกจากนั้นความซับซ้อนของวงจรก็เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรรวมมักมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของชิพ (chip) ที่ต้องการ อาทิเช่น สายส่ง (transmission line) วงจรกรอง (filter) คัปเปิลเลอร์แบบมีทิศทาง (directional coupler) และ วงจรมิกเซอร์ (mixer) เป็นต้น ดังนั้นการนำเอาโครงสร้างแบบหลายชั้น (multilayer structure) มาใช้ในการออกแบบจะทำให้สามารถประหยัดเนื้อที่ในการสร้างได้มาก นอกจากนั้น เนื่องจากความถี่ใช้งานที่สูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่สามารถออกแบบวงจรรวมที่มีความเร็วสูง สามารถทำงานที่ความถี่สูงกว่า 100 GHz การวิเคราะห์และออกแบบส่วนประกอบของวงจรรวมดังกล่าว เช่น สายส่งหรือสายนำสัญญาณ และอุปกรณ์อื่นๆ จะต้องตระหนักในเรื่องความละเอียดถูกต้องมากขึ้นด้วย [1]-[3]

วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม [4] เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ หากคุณลักษณะของสายส่ง หรือ อุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบ (planar microwave component) ให้ผลการคำนวณที่มีความแม่นยำสูง เหมาะสำหรับการวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบโหมดผสม (hybrid mode) เนื่องจากการวิเคราะห์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม สามารถพิจารณาผลของคลื่นได้ครอบคลุมเกือบทุกโหมด

นอกจากจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หากคุณลักษณะอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบแล้ว วิธีการดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์หรือระบบไมโครเวฟอื่นๆ ที่มีโครงสร้างเชิงระนาบ และมีชั้น ไดอิเล็กตริกหลายชั้นได้อีกด้วย

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รายงานการศึกษาทฤษฎีในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายส่งและอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบ โดยใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ 1.วิธีทั่วไป และ 2.วิธีอิมมิตแดนซ์ (immittance approach) และได้ทำการประยุกต์ใช้ทฤษฎีดังกล่าวในการวิเคราะห์หากคุณลักษณะและออกแบบสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียวและหลายชั้น นอกจากนั้นยังได้ทำการออกแบบการทดลองวัดคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่ได้ทำการออกแบบเพื่อทดสอบการคำนวณ พบว่าผลการคำนวณและการทดลองใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน

## บทที่ 2

### วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม (Spectral Domain Approach)

การวิเคราะห์ และออกแบบสายส่งเชิงระนาบ(planar transmission line) หรืออุปกรณ์ไมโครเวฟ เชิงระนาบ (planar microwave component) ที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น(multilayer) ซึ่งจะต้องคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบของคลื่นที่เดินทาง และคลื่นนิ่ง (standing wave) ในสายส่งหรืออุปกรณ์ดังกล่าว สามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การใช้เทคนิคสมการเชิงอินทิกรัล(integral equation technique) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สำหรับความถี่ใช้งานที่สูงมากๆ คุณสมบัติการกระจายตามความถี่ (dispersion characteristic) ของคลื่นในสายส่งหรืออุปกรณ์เชิงระนาบ จะมีผลต่อความถูกต้องของการออกแบบมากขึ้น ดังนั้นการคำนวณที่ต้องการความถูกต้อง แม่นยำ จึงจำเป็นต้องเลือกใช้วิธีการ ที่มีคุณสมบัติในการพิจารณาผลดังกล่าวด้วย [1]

วิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปวิธีหนึ่งก็คือ วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม (Spectral Domain Approach :SDA) เสนอโดย Itoh และ Mittra [4] ซึ่งใช้การคำนวณใน โดเมนเชิง Fourier หรือโดเมนเชิงสเปกตรัม วิธีการดังกล่าวทำให้สามารถใช้วิธีการของ Galerkin (Galerkin's method) ในการหาผลเฉลยของระบบสมการเอกพันธ์ (homogenous system of equations) เพื่อคำนวณหาค่าคงตัวการแพร่กระจาย (propagation constant) และแอมพลิจูดการกระจายของกระแส (current distribution) ในสายส่งหรืออุปกรณ์เชิงระนาบ หรือประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์เชิงระนาบต่างๆ ต่อไป [2]

#### 2.1 การใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการคำนวณลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เดินทางในสายส่งหรืออุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบ ซึ่งพิจารณาได้ว่าเป็นคลื่นถูกนำทาง(guided wave) ด้วยการหาผลเฉลยของสมการของ Helmholtz (Helmholtz's equation) ที่กำกับด้วยเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) พบว่า คลื่นที่เดินทางหรือคลื่นนิ่งนั้น ประกอบไปด้วยคลื่นในโหมด (mode) ต่างๆ มากมาย ที่มีแอมพลิจูด แตกต่างกัน[5] ซึ่งสามารถอธิบาย ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

จากสมการของ Helmholtz

$$\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0 \quad (2.1-1)$$

พิจารณาสมการดังกล่าวในระบบพิกัดฉาก (rectangular coordinate system) จะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k^2 \psi = 0 \quad (2.1-2)$$

โดยวิธีการแยกตัวแปร จะได้คำตอบในรูปแบบทั่วไป (general solution) ของสมการดังกล่าว คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\psi_{k_x, k_y, k_z} = h(k_x x) \cdot h(k_y y) \cdot h(k_z z) \quad (2.1-3)$$

โดยที่

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (2.1-4)$$

และ

$$h(k_x x) \rightarrow \sin(k_x x), \cos(k_x x), e^{jk_x x}, e^{-jk_x x} \quad (2.1-5)$$

ซึ่งผลเฉลยดังกล่าวเรียกว่า สมการองค์ประกอบของคลื่น(elementary wave function)

สำหรับคลื่นถูกนำทางจะประกอบด้วยคลื่นหลายโหมดที่มีแอมพลิจูดแตกต่างกัน ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการที่ใช้ในการอธิบายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกนำทางโดยทั่วไป ที่เดินทางในทิศ  $z$  ได้คือ

$$\begin{aligned} \psi &= \sum_{k_x} \sum_{k_y} B_{k_x, k_y} \psi_{k_x, k_y, k_z} \\ &= \sum_{k_x} \sum_{k_y} B_{k_x, k_y} h(k_x x) h(k_y y) h(k_z z) \end{aligned} \quad (2.1-6)$$

จากสมการดังกล่าว อาจเขียนในรูปแบบทั่วไป ซึ่งอยู่ในรูปของการอินทิเกรตได้คือ

$$\begin{aligned} \psi &= \iint_{k_x, k_y} f(k_x, k_y) \psi_{k_x, k_y, k_z} dk_x dk_y \\ &= \iint_{k_x, k_y} f(k_x, k_y) h(k_x x) h(k_y y) h(k_z z) dk_x dk_y \end{aligned} \quad (2.1-7)$$

จะพบว่าสำหรับปัญหาที่มีขอบเขต อาทิเช่น โครงสร้างที่มีการรีโซแนนซ์ (resonance) จะมีค่าไอเกน(Eigen value) เป็นช่วงๆ หรือไม่ต่อเนื่อง(discrete) ส่วนโครงสร้างที่ไม่มีขอบเขต เช่น สายอากาศ นั้นจะให้ค่าเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous spectra)

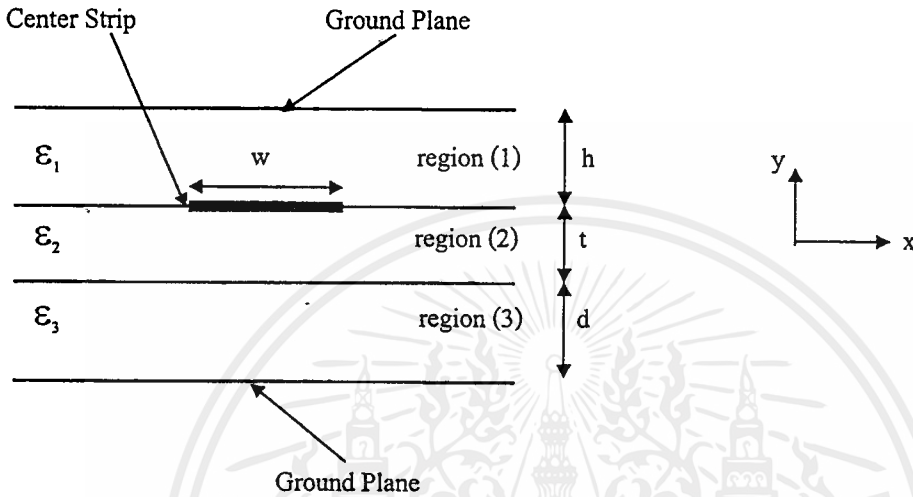
จากสมการ (2.1-7) จะเห็นได้ว่าคลื่นใดๆ จะประกอบด้วยผลรวมของคลื่นระนาบ (plane wave) จำนวนมาก ดังนั้นการพิจารณาหาคำตอบของสมการคลื่นในโดเมนเชิงสเปกตรัมจะมีความถูกต้องมากกว่า เนื่องจากสามารถพิจารณาครอบคลุมคลื่นได้เกือบทุกโหมด ดังนั้นจึงเหมาะกับการคำนวณหาคำตอบของโครงสร้างที่มีคลื่นในโหมดผสม (hybrid mode) เช่น ไมโครสตริป(microstrip) สายส่งแบบร่อง(slot-line) ฯลฯ ในงานหรือโครงสร้างที่ต้องการความถูกต้องในการคำนวณสูง เช่น วิธีการโดเมนเชิงสเปกตรัม เป็นต้น

สำหรับวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ 1.วิธีทั่วไป (general approach) และ 2.วิธีอิมมิตแดนซ์ (immittance approach) ในบทนี้ จะกล่าวถึงทั้งสองวิธี โดยวิธีทั่วไปจะใช้ในการศึกษารายละเอียดของวิธีการในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมเนื่องจากสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย ส่วนวิธีอิมมิตแดนซ์นั้น จะใช้ในการคำนวณ ออกแบบจริง เนื่องจากการสร้างสมการทำได้ง่ายกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วิธีทั่วไปสำหรับสายส่งไมโครสตริป[1]

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณหาค่าคงตัวการแพร่กระจายของคลื่นในสายส่งไมโครสตริป โดยใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมวิธีทั่วไป พร้อมทั้งยกตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาของสายส่งไมโครสตริป ชนิดที่มีโครงสร้างแบบเปิดด้านข้างรวมทั้งใช้สับสเตรต(substrate) จำนวน 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2-1 สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบอื่นๆ นั้น สามารถนำวิธีการที่จะได้กล่าวนี้ไปประยุกต์ต่อไป



รูปที่ 2.2-1 ภาพตัดขวาง แสดงโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริป

ในการวิเคราะห์โดยวิธีธรรมดาในโดเมนเชิงตำแหน่ง (space domain) สำหรับโครงสร้างดังกล่าว ทำได้โดยการแก้สมการเชิงอินทิกรัลต่อไปนี้ เพื่อหาค่าคงตัวการแพร่กระจาย  $\beta$

$$\begin{aligned} \int [Z_{zz}(x-x', y)J_z(x') + Z_{zx}(x-x', y)J_x(x')] dx' &= E_z(x) \\ \int [Z_{zx}(x-x', y)J_z(x') + Z_{xx}(x-x', y)J_x(x')] dx' &= E_x(x) \end{aligned} \quad (2.2-1)$$

เมื่อ  $E_z$  และ  $E_x$  คือสนามที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งขอบเขตที่  $y = d + t$ ,  $J_z$  และ  $J_x$  ก็องค์ประกอบของกระแสบนสตริป ( $y = d + t$ ) ฟังก์ชันของ Green (Green's function)  $Z_{zz}$  และอื่นๆ เป็นฟังก์ชันของ  $\beta$  จากสมการดังกล่าว จะได้ว่ากรอินทิเกรตตลอดสตริป ซึ่งจะเห็นว่าสนามไฟฟ้า  $E_z(x)$  และ  $E_x(x)$  มีค่าเป็นศูนย์ โดยที่พิจารณาให้สตริปเป็นตัวนำสมบูรณ์ (perfectly conductor) ด้านซ้ายของสมการจะต้องมีค่าเป็นศูนย์บนสตริปด้วย ดังนั้นสมการดังกล่าวสามารถหาคำตอบได้ โดยการกำหนด  $Z_{zz}$  และตัวอื่นๆ ใดๆก็ได้สำหรับโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เช่น โครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปแบบมีสับสเตรตหลายชั้นนั้น ฟังก์ชันของ Green ดังกล่าวหาได้ยาก ดังนั้นการวิเคราะห์โดยการแปลงสมการดังกล่าว มาคำนวณในโดเมนเชิงสเปกตรัมจะทำให้การคำนวณทำได้ง่ายขึ้น สำหรับในโดเมนเชิงสเปกตรัมจะได้สมการเป็น

$$\begin{aligned}\tilde{Z}_{zz}(\alpha, d+t)\tilde{J}_z(\alpha) + \tilde{Z}_{zx}(\alpha, d+t)\tilde{J}_x(\alpha) &= \tilde{E}_z(\alpha, d+t) \\ \tilde{Z}_{xz}(\alpha, d+t)\tilde{J}_z(\alpha) + \tilde{Z}_{xx}(\alpha, d+t)\tilde{J}_x(\alpha) &= \tilde{E}_x(\alpha, d+t)\end{aligned}\quad (2.2-2)$$

โดยเครื่องหมายทิลด์ (tilde) ที่ปรากฏบนฟังก์ชันใดๆ หมายถึง การแปลง Fourier ของฟังก์ชันนั้นๆ กล่าวคือ

$$\tilde{\phi}(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) e^{j\alpha x} dx \quad (2.2-3)$$

สำหรับข้างขวาของสมการ (2.2-2) จะไม่เป็นศูนย์อีกต่อไปเนื่องจาก ในการแปลง Fourier นั้น จะต้องทำการอินทิเกรตตลอดช่วงของ  $x$  ไม่เพียงแต่บนสคริปเท่านั้น ดังนั้นสมการจะประกอบด้วยฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า 4 ตัวด้วยกันคือ  $J_z, J_x, E_z, E_x$  และตัวไม่ทราบค่า  $\beta$  อย่างไรก็ตาม  $E_z$  และ  $E_x$  จะถูกทำให้หายไปได้ในการหาผลเฉลยด้วยวิธีของ Galerkin

### 2.2.1 สมการคลื่น

จากหัวข้อ 2.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นในโหมดคสมที่เดินทางในสายส่งไมโครสคริปนี้ จะสามารถพิจารณาให้เป็นการทับซ้อน (super position) ของคลื่นในโหมด TE-to-y และ TM-to-y เพื่อใช้ในการคำนวณหาฟังก์ชันอิมพีแดนซ์ (impedance) ของ Green ซึ่งได้แก่  $Z_{zz}, Z_{zx}, Z_{xz}, Z_{xx}$  และจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดดังกล่าวกับฟังก์ชันสเกลาร์ (scalar potential) ที่ถูกแปลงไปพิจารณาในโดเมนเชิงสเปกตรัม  $\tilde{\psi}^h$  และ  $\tilde{\psi}^e$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันสเกลาร์ของคลื่นในโหมด TE-to-y และ TM-to-y ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\tilde{E}_x &= -j \frac{\alpha}{\hat{y}} \frac{\partial \tilde{\psi}^e}{\partial y} - j\beta \tilde{\psi}^h & \tilde{H}_x &= j\beta \tilde{\psi}^e - j \frac{\alpha}{\hat{z}} \frac{\partial \tilde{\psi}^h}{\partial y} \\ \tilde{E}_y &= \frac{1}{\hat{y}} \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k^2 \right) \tilde{\psi}^e & \tilde{H}_y &= \frac{1}{\hat{z}} \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k^2 \right) \tilde{\psi}^h \\ \tilde{E}_z &= -j \frac{\beta}{\hat{y}} \frac{\partial \tilde{\psi}^e}{\partial y} + j\alpha \beta \tilde{\psi}^h & \tilde{H}_z &= -j\alpha \tilde{\psi}^e - j \frac{\beta}{\hat{z}} \frac{\partial \tilde{\psi}^h}{\partial y} \\ \hat{y} &= j\omega\epsilon & \hat{z} &= j\omega\mu & k^2 &= \omega^2\mu\epsilon\end{aligned}\quad (2.2-4)$$

เมื่อ  $\epsilon$  คือ ค่าคงตัวสภาพยอม (permittivity constant) และ  $\mu$  คือ ค่าคงตัวความซึมซาบได้ (permeability) ของตัวกลาง (media) สำหรับสมการดังกล่าวสมมติให้คลื่นมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาแบบฮาร์โมนิก (harmonic variation) ซึ่งจะสามารถละแפקเตอร์ที่แสดงความสัมพันธ์กับเวลา  $e^{j\alpha x}$  ไว้ในฐานที่เข้าใจได้ ดังนั้นจากการแปลงของสมการของ Helmholtz ไปพิจารณาใน โดเมนเชิงสเปกตรัมจะได้ว่า

$$\left( -\alpha^2 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \beta^2 \right) \tilde{\psi} + k^2 \tilde{\psi} = 0 \quad (2.2-5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า สมการดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นสมการเอกพันธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ (homogenous differential equation) โดยที่  $\alpha$  และ  $\beta$  จะเป็นตัวแปรของ Fourier (Fourier variable) และจะได้ผลเฉลยทั่วไปของสมการเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวคือ

$$\tilde{\psi} = c_1 \cosh \gamma y + c_2 \sinh \gamma y, \quad \gamma^2 = \alpha^2 + \beta^2 - k^2 \quad (2.2-6)$$

เมื่อทำการแก้ปัญหาเงื่อนไขขอบเขต ทางด้านบนและทางด้านล่างของโครงสร้างที่เป็นระนาบกราวด์ (ground plane) จะได้ฟังก์ชันศักย์สเกลาร์ในแต่ละบริเวณ (region) ดังต่อไปนี้

บริเวณที่ 1 (region 1)

$$\tilde{\psi}_1^e = A^e \cosh \gamma_1 (c - y) \quad \tilde{\psi}_1^h = A^h \sinh \gamma_1 (c - y) \quad (2.2-7)$$

บริเวณที่ 2 (region 2)

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_2^e &= B^e \sinh \gamma_2 (y - d) + C^e \cosh \gamma_2 (y - d) \\ \tilde{\psi}_2^h &= B^h \cosh \gamma_2 (y - d) + C^h \sinh \gamma_2 (y - d) \end{aligned} \quad (2.2-8)$$

บริเวณที่ 3 (region 3)

$$\tilde{\psi}_3^e = D^e \cosh \gamma_3 y \quad \tilde{\psi}_3^h = D^h \sinh \gamma_3 y \quad (2.2-9)$$

เมื่อ  $A^e, A^h, \dots, D^h$  เป็นสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า  $\gamma$  เป็นค่าคงตัวการแพร่กระจายในทิศ  $y$  ซึ่งอาจเขียนได้ว่า  $\gamma = jk_y$  ซึ่งในกรณีของโครงสร้างแบบเปิด (open structure) สมการ (2.2-7) อาจสามารถเขียนได้ในรูป

$$\tilde{\psi}_1^e = A^e e^{-\gamma_1 y} \quad \tilde{\psi}_1^h = A^h e^{-\gamma_1 y} \quad (2.2-10)$$

จากสมการ (2.2-5) และ (2.2-6) ความสัมพันธ์ของการกระจายความถี่ (dispersion relation) ของแต่ละบริเวณ คือ

$$k_i^2 = \alpha^2 + \beta^2 - \gamma_i^2, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.2-11)$$

แทนสมการที่ (2.2-7) - (2.2-9) ใน สมการ (2.2-4) จะได้สมการที่อธิบายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณทั้งสาม ดังนี้

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{x1} &= j\alpha\gamma_{y1} A^e \sinh \gamma_1 (c - y) - j\beta A^h \sinh \gamma_1 (c - y) \\ \tilde{E}_{x2} &= -j\alpha\gamma_{y2} [B^e \cosh \gamma_2 (y - d) + C^e \sinh \gamma_2 (y - d)] \\ &\quad - j\beta [B^h \cosh \gamma_2 (y - d) + C^h \sinh \gamma_2 (y - d)] \\ \tilde{E}_{x3} &= -j\alpha\gamma_{y3} D^e \sinh \gamma_3 y - j\beta D^h \sinh \gamma_3 y \\ \tilde{E}_{y1} &= \frac{1}{\gamma_1} [\gamma_1^2 + k_1^2] A^h \cosh \gamma_1 (c - y) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\tilde{E}_{y_2} &= \frac{1}{\hat{y}_2} [\gamma_2^2 + k_2^2] [B^e \sinh \gamma_2 (y-d) + C^e \cosh \gamma_2 (y-d)] \\
\tilde{E}_{y_3} &= \frac{1}{\hat{y}_3} [\gamma_3^2 + k_3^2] D^e \cosh \gamma_3 y \\
\tilde{E}_{z_1} &= j\beta \gamma_{y_1} A^e \sinh \gamma_1 (c-y) + j\alpha A^h \sinh \gamma_1 (c-y) \\
\tilde{E}_{z_2} &= -j\beta \gamma_{y_2} [B^e \cosh \gamma_2 (y-d) + C^e \sinh \gamma_2 (y-d)] \\
&\quad + j\alpha [B^h \cosh \gamma_2 (y-d) + C^h \sinh \gamma_2 (y-d)] \\
\tilde{E}_{z_3} &= -j\beta \gamma_{y_3} D^e \sinh \gamma_3 y + j\alpha D^h \sinh \gamma_3 y \\
\tilde{H}_{x_1} &= j\beta A^e \cosh \gamma_1 (c-y) + j\alpha \gamma_{z_1} A^h \cosh \gamma_1 (c-y) \\
\tilde{H}_{x_2} &= j\beta [B^e \sinh \gamma_2 (y-d) + C^e \cosh \gamma_2 (y-d)] \\
&\quad - j\alpha \gamma_{z_2} [B^h \sinh \gamma_2 (y-d) + C^h \cosh \gamma_2 (y-d)] \\
\tilde{H}_{x_3} &= j\beta D^e \cosh \gamma_3 y - j\alpha \gamma_{z_3} D^h \cosh \gamma_3 y \\
\tilde{H}_{y_1} &= \frac{1}{\hat{z}_1} [\gamma_1^2 + k_1^2] A^h \sinh \gamma_1 (c-y) \\
\tilde{H}_{y_2} &= \frac{1}{\hat{z}_2} [\gamma_2^2 + k_2^2] [B^h \cosh \gamma_2 (y-d) + C^h \sinh \gamma_2 (y-d)] \\
\tilde{H}_{y_3} &= \frac{1}{\hat{z}_3} [\gamma_3^2 + k_3^2] D^h \sinh \gamma_3 y \\
\tilde{H}_{z_1} &= -j\alpha A^e \cosh \gamma_1 (c-y) + j\beta \gamma_{z_1} A^h \cosh \gamma_1 (c-y) \\
\tilde{H}_{z_2} &= -j\alpha [B^e \sinh \gamma_2 (y-d) + C^e \cosh \gamma_2 (y-d)] \\
&\quad - j\beta \gamma_{z_2} [B^h \sinh \gamma_2 (y-d) + C^h \cosh \gamma_2 (y-d)] \\
\tilde{H}_{z_3} &= -j\alpha D^e \cosh \gamma_3 y - j\beta \gamma_{z_3} D^h \cosh \gamma_3 y \\
\gamma_{y_i} &= \frac{\gamma_i}{\hat{y}_i} \quad \gamma_{z_i} = \frac{\gamma_i}{\hat{z}_i} \quad i=1,2,3
\end{aligned} \tag{2.2-12}$$

โดยที่ตัวห้อย (subscript) ที่ตัวแปรหรือค่าคงที่แต่ละตัวแสดงถึงบริเวณที่พิจารณา สำหรับ  $A^e, A^h, \dots, D^h$  จะสามารถคำนวณได้ โดยการวิเคราะห์เงื่อนไขขอบเขต ในโดเมนเชิงสเปกตรัมที่รอยต่อของแต่ละบริเวณ ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวได้จากการแปลงเงื่อนไขขอบเขตจากโดเมนเชิงตำแหน่ง เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวแสดงดังต่อไปนี้

$$\text{ที่ } y = d + t$$

$$E_{x1} = E_{x2} \text{ for all } x$$

$$E_{z1} = E_{z2} \text{ for all } x$$

$$H_{x2} - H_{x1} = J_z \quad |x| < w/2$$

$$= 0 \quad |x| > w/2$$

$$H_{z2} - H_{z1} = -J_x \quad |x| < w/2$$

$$= 0 \quad |x| > w/2$$

ที่  $y = d$

$$E_{x2} = E_{x3} \text{ for all } x$$

$$E_{z2} = E_{z3} \text{ for all } x$$

$$H_{x2} = H_{x3} \text{ for all } x.$$

$$H_{z2} = H_{z3} \text{ for all } x$$

เมื่อ  $J_x(x)$  และ  $J_z(x)$  คือ ฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่าของการกระจายของกระแสบนสตริป ณ ตำแหน่ง  $y = d + t$  สังเกตว่าเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าว มีการกำหนดช่วงของ  $x$  ที่ใช้ ดังนั้นจะไม่สามารถทำการแปลง Fourier ได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถทำการแปลง Fourier ของเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าว จึงจะไม่กำหนดช่วงของ  $x$  ในการพิจารณา จะได้ว่า

ที่  $y = d + t$

$$\tilde{E}_{x1} = \tilde{E}_{x2} \tag{2.2-13}$$

$$\tilde{E}_{z1} = \tilde{E}_{z2} \tag{2.2-14}$$

$$\tilde{H}_{x2} - \tilde{H}_{x1} = \tilde{J}_z \tag{2.2-15}$$

$$\tilde{H}_{z2} - \tilde{H}_{z1} = -\tilde{J}_x \tag{2.2-16}$$

ที่  $y = d$

$$\tilde{E}_{x2} = \tilde{E}_{x3} \tag{2.2-17}$$

$$\tilde{E}_{z2} = \tilde{E}_{z3} \tag{2.2-18}$$

$$\tilde{H}_{x3} - \tilde{H}_{x2} = 0 \tag{2.2-19}$$

$$\tilde{H}_{z3} - \tilde{H}_{z2} = 0 \tag{2.2-20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\tilde{J}_z$  และ  $\tilde{J}_x$  คือ การแปลง Fourier ขององค์ประกอบที่ไม่ทราบค่าของกระแส  $J_z(x)$  และ  $J_x(x)$  บนสตริป ณ ตำแหน่ง  $y = d + t$  ตามลำดับ

สุดท้าย เมื่อแก้ปัญหาเงื่อนไขขอบเขตแล้ว จะได้ระบบสมการที่อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์ (matrix equation) ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tilde{E}_{z1} \\ \tilde{E}_{x1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \tilde{Z}_{zz} & \tilde{Z}_{zx} \\ \tilde{Z}_{zx} & \tilde{Z}_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{J}_z \\ \tilde{J}_x \end{bmatrix} \\ \tilde{Z}_{zz} &= -\frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} [\beta^2 \tilde{Z}_e + \alpha^2 \tilde{Z}_h] \\ \tilde{Z}_{zx} &= -\frac{\alpha\beta}{\alpha^2 + \beta^2} [\tilde{Z}_e - \tilde{Z}_h] \\ \tilde{Z}_{xz} &= \tilde{Z}_{zx} \\ \tilde{Z}_{xx} &= -\frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} [\alpha^2 \tilde{Z}_e + \beta^2 \tilde{Z}_h] \\ \tilde{Z}_e &= \frac{\gamma_{y2} Ct_3 + \gamma_{y3} Ct_2}{Ct_2 Ct_3 + Ct_1 Ct_3 \frac{\gamma_{y2}}{\gamma_{y1}} + Ct_1 Ct_2 \frac{\gamma_{y3}}{\gamma_{y1}} + \frac{\gamma_{y3}}{\gamma_{y2}}} \\ \tilde{Z}_h &= \frac{\gamma_{z2} Ct_2 + \gamma_{z3} Ct_3}{\gamma_{z1} \gamma_{z2} Ct_1 Ct_2 + \gamma_{z1} \gamma_{z3} Ct_1 Ct_3 + \gamma_{z2} \gamma_{z3} Ct_2 Ct_3 + \gamma_{z2}^2} \\ Ct_1 &= \coth \gamma_1^* h \quad Ct_2 = \coth \gamma_2 t \quad Ct_3 = \coth \gamma_3 d \end{aligned} \quad (2.2-21)$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่ได้ละไปเพื่อจุดประสงค์ในการแปลง Fourier ซึ่งได้แก่

$$E_z = E_x = 0 \quad \text{for } |x| < w/2 \text{ at } y = d + t$$

จะได้ใช้ในขั้นตอนของการหาผลเฉลย ในหัวข้อต่อไป

## 2.2.2 วิธีการหาผลเฉลย

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการหาผลเฉลยของสมการ (2.2-21) สมการทั้งสองใน (2.2-21) ประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่า 4 ตัวด้วยกัน คือ  $\tilde{J}_z$ ,  $\tilde{J}_x$ ,  $\tilde{E}_z$  และ  $\tilde{E}_x$  อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวไม่ทราบค่าสองตัวสุดท้าย ได้แก่  $\tilde{E}_z$  และ  $\tilde{E}_x$  จะสามารถตัดออกไปได้ โดยการใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยวิธีการของ Galerkin ในโดเมนเชิงสเปกตรัม ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปนี้ ในขั้นแรก จะแทนค่าของฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า  $\tilde{J}_z$  และ  $\tilde{J}_x$  ในเทอมของฟังก์ชันฐาน (basis function) ที่ทราบค่า  $\tilde{J}_{zm}$  และ  $\tilde{J}_{xm}$

$$\tilde{J}_z = \sum_{m=1}^M c_m \tilde{J}_{zm}(\alpha) \quad \tilde{J}_x = \sum_{m=1}^M d_m \tilde{J}_{xm}(\alpha) \quad (2.2-22)$$

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $c_m$  และ  $d_m$  เป็นสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า ฟังก์ชันฐานดังกล่าวจะต้องเลือกให้เหมาะสม กับลักษณะของ กระแสกระจายบนสตริป ซึ่งกระแสดังกล่าวจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะบนสตริปเท่านั้น ดังนั้นในการเลือกใช้ ฟังก์ชันฐาน ก็จะต้องเลือกฟังก์ชันที่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวด้วย หลังจากนั้น แทนสมการ (2.2-22) ใน (2.2-21) แล้วทำการหาผลคูณภายใน (inner product) ด้วย ฟังก์ชันฐานที่ทราบค่า  $\tilde{J}_{zk}$  และ  $\tilde{J}_{xl}$  ตามลำดับ ดังนั้น สำหรับค่าต่างๆ ของ  $k$  และ  $l$  ในขั้นตอนดังกล่าวจะได้สมการในรูปเมตริกซ์ ดังนี้

$$\int_{\alpha} \left[ \tilde{J}_{zk} \tilde{Z}_{zz} \sum_{m=1}^N c_m \tilde{J}_{zm} + \tilde{J}_{zk} \tilde{Z}_{zx} \sum_{m=1}^N d_m \tilde{J}_{xm} \right] d\alpha = 0, \quad k=1,2,\dots,N$$

$$\int_{\alpha} \left[ \tilde{J}_{xl} \tilde{Z}_{zz} \sum_{m=1}^N c_m \tilde{J}_{zm} + \tilde{J}_{xl} \tilde{Z}_{zx} \sum_{m=1}^N d_m \tilde{J}_{xm} \right] d\alpha = 0, \quad l=1,2,\dots,N$$
(2.2-23)

ทางด้านขวาของสมการ (2.2-23) เป็นศูนย์ โดยการพิจารณาด้วย ทฤษฎีของ Parseval เนื่องจากกระแส  $J_{zk}$  และ  $J_{xl}$  จะมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณภายนอกสตริปและไม่เป็นศูนย์บนสตริป ในทางกลับกัน องค์ประกอบของสนาม ไฟฟ้า  $E_z(x, d + t)$  และ  $E_x(x, d + t)$  จะมีค่าไม่เป็นศูนย์บริเวณภายนอกสตริป และจะมีค่าเป็นศูนย์บนสตริป ยกตัวอย่างเช่น การหาผลคูณภายในของ  $\tilde{E}_{zi}$  ทางด้านซ้ายของสมการ (2.2-23) และ  $\tilde{J}_{zk}(\alpha)$  จะได้

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{zk}(\alpha) \tilde{E}_{zi}(\alpha) d\alpha = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} J_{zk}(x) E_{zi}(-x) dx = 0$$

จากขั้นตอนดังกล่าว จะได้ใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ละไปในหัวข้อที่แล้ว สมการ (2.2-23) จะสามารถเขียนในรูป แบบของเมตริกซ์ ได้ดังนี้

$$\sum_{m=1}^N K_{km}^{(1,1)} c_m + \sum_{m=1}^N K_{km}^{(1,2)} d_m = 0, \quad k=1,2,\dots,N$$

$$\sum_{m=1}^N K_{lm}^{(2,1)} c_m + \sum_{m=1}^N K_{lm}^{(2,2)} d_m = 0, \quad l=1,2,\dots,N$$
(2.2-24)

เมื่อ

$$K_{km}^{(1,1)} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{zk}(\alpha) \tilde{Z}_{zz}(\alpha, \beta) \tilde{J}_{zm}(\alpha) d\alpha$$

$$K_{km}^{(1,2)} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{zk}(\alpha) \tilde{Z}_{zx}(\alpha, \beta) \tilde{J}_{xm}(\alpha) d\alpha$$

$$K_{lm}^{(2,1)} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{xl}(\alpha) \tilde{Z}_{zz}(\alpha, \beta) \tilde{J}_{zm}(\alpha) d\alpha$$

$$K_{lm}^{(2,2)} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{xl}(\alpha) \tilde{Z}_{zx}(\alpha, \beta) \tilde{J}_{xm}(\alpha) d\alpha$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเมทริกซ์ดังกล่าว จะสามารถหาผลเฉลยของระบบสมการเอกพันธ์ ซึ่งมีตัวไม่ทราบค่า  $c_m$  และ  $d_m$  โดยที่ตัวไม่ทราบค่าดังกล่าวมีผลเฉลยที่มีสาระ (nontrivial solution) ดังนั้นจะสามารถแก้สมการได้โดยการหาค่า  $\beta$  ที่ทำให้ดีเทอร์มิแนนต์ (determinant) ของเมทริกซ์ดังกล่าวเป็นศูนย์ ที่ความถี่ต่างๆ ที่ต้องการ

### 2.2.3 การกำหนดฟังก์ชันฐาน

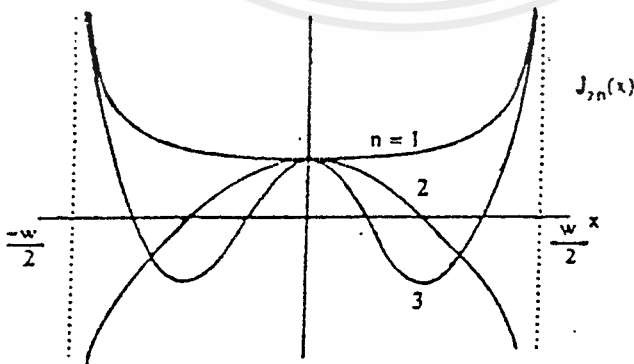
การเลือกฟังก์ชันฐาน เพื่อใช้ในการคำนวณตามวิธีของ Galerkin นี้มีผลอย่างมากต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ ดังนั้นจะต้องเลือกฟังก์ชันฐานที่เหมาะสม กล่าวคือ จะต้องมิลักษณะที่คล้ายกับสนามหรือกระแสจริงที่ประมาณว่าจะเกิดขึ้น นอกจากนั้นยังต้องเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตของบริเวณที่จะทำการวิเคราะห์ด้วย

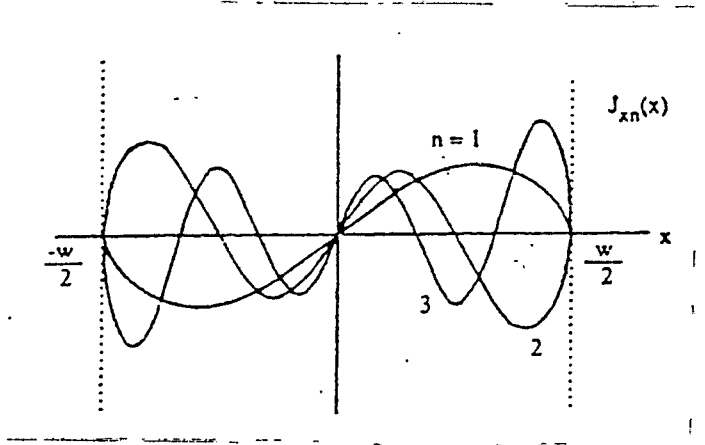
ในที่นี้ เราทราบว่า องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับขอบของสตริป ที่บริเวณขอบ จะมีค่าเป็นจุดเอกฐาน (singular) ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไข และพฤติกรรมดังกล่าว จึงได้เลือกฟังก์ชันฐานดังต่อไปนี้

$$J_m(x) = \frac{\cos[2(n-1)\pi x / w]}{\sqrt{1-(2x/w)^2}}, \quad n=1,2,\dots \quad (2.2-25)$$

$$J_m(x) = \frac{\sin[2n\pi x / w]}{\sqrt{1-(2x/w)^2}}, \quad n=1,2,\dots \quad (2.2-26)$$

เมื่อ  $w$  คือ ความกว้างของสตริป ซึ่งจะเห็นว่าค่าของฟังก์ชัน จะมีค่าไม่เป็นศูนย์ เฉพาะบนสตริปเท่านั้น โดยที่สมการ (2.2-25) จะให้ค่าเอกฐานที่บริเวณขอบของสตริป ลักษณะของฟังก์ชันฐานทั้งสองแสดงได้ดังรูปที่ 2.2-2





รูปที่ 2.2-2 ลักษณะของฟังก์ชันฐาน

และจะได้รับการแปลงของฟังก์ชันฐานดังกล่าว ในโดเมนเชิงสเปกตรัมได้ คือ

$$\tilde{J}_m(\alpha) = \frac{\pi w}{4} \left[ J_0 \left( \frac{w\alpha}{2} + (n-1)\pi \right) + J_0 \left( \frac{w\alpha}{2} - (n-1)\pi \right) \right] \quad (2.2-27)$$

$$\tilde{J}_m(\alpha) = \frac{\pi w}{4j} \left[ J_0 \left( \frac{w\alpha}{2} + n\pi \right) - J_0 \left( \frac{w\alpha}{2} - n\pi \right) \right] \quad (2.2-28)$$

โดยที่  $J_0$  คือ ฟังก์ชัน Bessel ชนิดที่ 1 ลำดับศูนย์ (zeroth-order Bessel function of the first kind) ข้อดีของการเลือกใช้ฟังก์ชันฐานดังกล่าว คือ การแปลงของฟังก์ชันจะมีเพียงฟังก์ชันชนิดเดียว ทำให้ง่ายในการเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณ ด้วยเพียงแต่เขียนโปรแกรมย่อย (sub-routine) ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณเท่านั้น

เนื่องจากลักษณะของฟังก์ชันฐานดังกล่าวใกล้เคียงกับ ลักษณะของการกระจายของกระแสจริงๆ ในสายส่งไมโครสตริปต่างๆ ไปมาก ดังนั้น ในการพิจารณาปัญหาลักษณะนี้ สามารถใช้จำนวนฟังก์ชันฐาน เพียง 1-2 เทอม ก็เพียงพอสำหรับการคำนวณหาค่า  $\beta$  ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันฐานเพียงเทอมเดียว  $N=M=1$  จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \int_{\alpha} \tilde{J}_{z1} \tilde{Z}_{zz} \tilde{J}_{z1} & \int_{\alpha} \tilde{J}_{z1} \tilde{Z}_{zx} \tilde{J}_{z1} \\ \int_{\alpha} \tilde{J}_{z1} \tilde{Z}_{xz} \tilde{J}_{z1} & \int_{\alpha} \tilde{J}_{z1} \tilde{Z}_{xx} \tilde{J}_{z1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ d_1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.2-29)$$

จากเมทริกซ์ดังกล่าว การคำนวณหาค่า  $\beta$  ทำได้โดยการสมมติค่า  $\beta$  แล้วแทนค่าจนได้คิเทอร์มิแนนต์ ของเมทริกซ์เป็นศูนย์ก็จะได้ค่า  $\beta$  ที่ถูกต้อง หลังจากนั้น ทำการแทนค่า  $\beta$  ที่ได้ในระบบสมการ เพื่อหาค่าของ  $c_1$  และ  $d_1$  ก็จะสามารถหาลักษณะของการกระจายกระแสของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้นได้ตามต้องการ นอกจากนั้นยังสามารถนำผลการคำนวณที่ได้ในขั้นนี้ ไปใช้ในการหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance) ได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของฟังก์ชันฐาน

จากหัวข้อ 2.2.2 และ 2.2.3 โดยการใช้วิธีการของ Galerkin จะพบว่าระบบสมการดังกล่าวมีผลเฉลยที่มีสาระ (non trivial solution) เมื่อสามารถหาค่า  $\beta$  ที่ทำให้ดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์เป็นศูนย์ จากค่า  $\beta$  ดังกล่าว จะสามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของฟังก์ชันฐาน  $c_n$  และ  $d_n$  ที่สมมติขึ้นได้ โดยมีวิธีการดังนี้ แทนค่า  $\beta$  ในเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1} & K_{N2} & \dots & K_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} = 0 \quad (2.2-25)$$

จากสมการข้างต้น เนื่องจากในการนำค่าของฟังก์ชันฐานไปใช้งานต่อไปนั้น เช่นการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ จะอยู่ในรูปของอัตราส่วนของกระแสหรือค่าของฟังก์ชันฐาน จึงสามารถสมมติให้สมมติให้  $c_1 = 1.0$  และจะจัดรูปสมการ (2.2-25) ใหม่ได้

$$N \begin{bmatrix} K_{12} & \dots & K_{1N} \\ K_{22} & \dots & K_{2N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N2} & \dots & K_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{21} \\ \vdots \\ K_{N1} \end{bmatrix} \quad (2.2-26)$$

จะเห็นว่าเมทริกซ์ที่ได้จากการจัดรูปแล้วไม่เป็นเมทริกซ์เชิงสี่เหลี่ยมจัตุรัส (square matrix) การหาผลเฉลยสามารถทำได้โดยการใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ก็จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของฟังก์ชันฐานได้ตามต้องการ

## 2.3 วิธีอิมิตแดนซ์[1],[6]

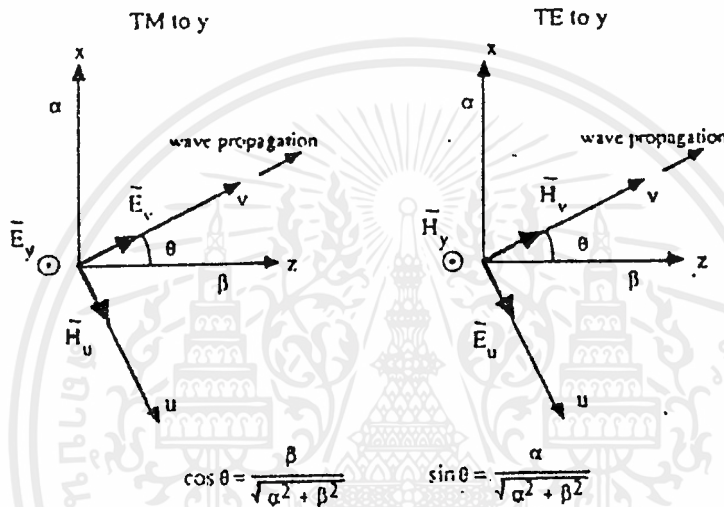
ในวิธีการทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว ซึ่งได้แก่การวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริป แบบมีไดอิเล็กตริก 2 ชั้นสามารถทำได้โดยการแก้สมการ จำนวน 8 สมการ เพื่อหาผลเฉลยของสมการจำนวน 8 ตัว ซึ่งในการนี้จำเป็นต้องแก้ปัญหาเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งจะมีความยุ่งยากมาก ถ้าโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์มีความซับซ้อนขึ้น วิธีการอิมิตแดนซ์ เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาฟังก์ชันของ Green ได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทีละตัว ดังวิธีที่ผ่านมา ดังนั้นจึงทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อนทำได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการโดยสังเขปของวิธีอิมิตแดนซ์ สามารถอธิบายได้โดยการสังเกตการแปลงกลับของ Fourier (inverse Fourier transform) ของสนามดังนี้

$$\phi(x, y)e^{-j\beta z} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\phi}(\alpha, y)e^{-j(\alpha x + \beta z)} d\alpha$$

จากสมการดังกล่าว จะสังเกตได้ว่า องค์ประกอบของสนามทุกตัว สามารถพิจารณาได้เป็นการทับซ้อนกันของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศ  $\theta$  ทำกับแกน  $z$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3-1 โดย  $\theta = \cos^{-1}[\beta / (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}]$



รูปที่ 2.3-1 องค์ประกอบของคลื่นในโดเมนเชิงสเปกตรัม ในระบบพิกัด  $(u, v)$   
(ก) คลื่นโหมด TM-to-y (ข) คลื่นโหมด TE-to-y

สำหรับแต่ละค่าของ  $\theta$  คลื่นจะสามารถแบ่งออกได้เป็นคลื่นระนาบ ในโหมด TM-to-y  $(\vec{E}_v, \vec{E}_v, \vec{H}_u)$  และ TE-to-y  $(\vec{H}_v, \vec{E}_u, \vec{H}_v)$  ในระบบพิกัด  $(u, v)$  ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัด  $(u, v)$  และ  $(x, y)$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u = z \sin \theta - x \cos \theta \quad v = z \cos \theta + x \sin \theta \tag{2.3-1}$$

เราทราบว่ากระแส  $\vec{J}_s$  จะสร้างเฉพาะคลื่นในโหมด TM เท่านั้น เนื่องจากเป็นกระแสเชิงพื้นผิว (surface current) ที่มีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็ก  $\vec{H}_u$  ในทำนองเดียวกัน กระแส  $\vec{J}_s$  จะสร้างเฉพาะคลื่นในโหมด TE สำหรับวิธีการนี้จะพิจารณาวงจรสมมูล (equivalent circuit) ที่ใช้อธิบายการเดินทางของคลื่นในโดเมนเชิงสเปกตรัม โดยใช้วงจรสมมูลของสายส่งทั่วไป ที่มีทิศทางการส่งคลื่นในทิศ  $y$  ดังรูป 2.3-2 โดยในขั้นตอนนี้เพื่อความสะดวกเราจะพิจารณากรณีที่มีชั้นไดอิเล็กตริกเพียงชั้นเดียวเท่านั้น คือ ในบริเวณที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับคลื่น โหมด TM-to-y จากวงจรสมมูลจะได้ว่า

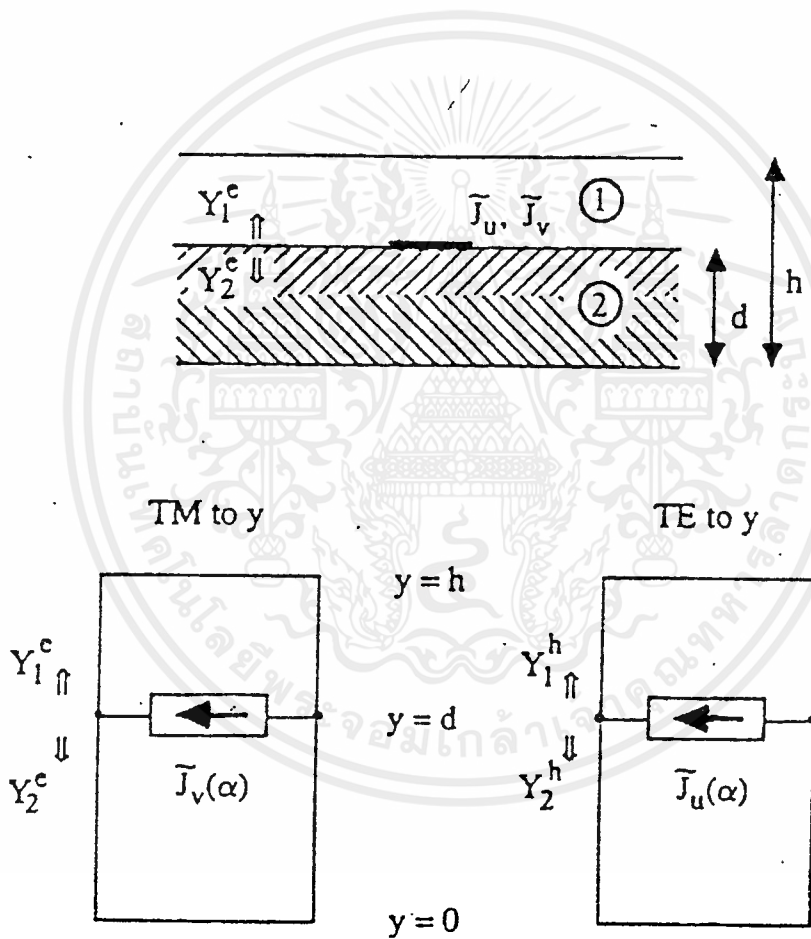
$$\tilde{H}_{u1} - \tilde{H}_{u2} = \tilde{J}_v \quad \frac{-\tilde{H}_{u1}}{\tilde{E}_{v1}} = Y_1^e \quad \frac{\tilde{H}_{u2}}{\tilde{E}_{v2}} = Y_2^e \quad (2.3-2)$$

ดังนั้น

$$\tilde{E}_v = -\tilde{Z}_e \tilde{J}_v \quad \tilde{E}_{v1} = \tilde{E}_{v2} = \tilde{E}_v$$

เมื่อ

$$\tilde{Z}_e = \frac{1}{Y_1^e + Y_2^e} \quad (2.3-3)$$



รูปที่ 2.3-2 วงจรสายส่งสมมูล สำหรับคลื่นในโหมด TM และ TE

โดยที่  $Y_1^e$  และ  $Y_2^e$  คือ แอดมิตแตนซ์ของคลื่น (wave admittance) ซึ่งมองจากตำแหน่งที่กระแสดู และสามารถพิจารณาได้จากวงจรสมมูลของสายส่ง ในทำนองเดียวกัน สมการวงจรสำหรับ คลื่นใน โหมด TE จะเป็น

$$\tilde{E}_u = -\tilde{Z}_h \tilde{J}_u \quad \tilde{E}_{u1} = \tilde{E}_{u2} = \tilde{E}_u \quad (2.3-4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tilde{Z}_h = \frac{1}{Y_1^h + Y_2^h} \quad (2.3-5)$$

โดยที่  $Y_1^h$  และ  $Y_2^h$  คือ แอดมิแตนซ์ของคลื่น ในโหมด TE ดังนั้น  $\tilde{Z}_e$  และ  $\tilde{Z}_h$  อาจเรียกรวมได้ว่าเป็นฟังก์ชัน Green ของคลื่นในโหมด TM และ TE ตามลำดับ

เมื่อทราบ  $\tilde{Z}_e$  และ  $\tilde{Z}_h$  แล้วก็สามารถหาฟังก์ชันของสนามแต่ละตัวได้ โดยการแปลงจากระบบพิกัด  $(u,v)$  ไปเป็นระบบพิกัด  $(x,z)$  แล้ววิเคราะห์โดยใช้วิธีดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว จากสมการการแปลงระบบพิกัด (2.3-1) จะได้ว่า  $\tilde{E}_x$  และ  $\tilde{E}_z$  จะได้จากการแปลงระบบพิกัดของ  $\tilde{E}_u$  และ  $\tilde{E}_v$  และในทำนองเดียวกัน  $\tilde{J}_x$  และ  $\tilde{J}_z$  ได้จากการแปลง  $\tilde{J}_u$  และ  $\tilde{J}_v$  โดยการแปลงพิกัดดังกล่าว จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_{zz} &= -\frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} (\beta^2 \tilde{Z}_e + \alpha^2 \tilde{Z}_h) \\ \tilde{Z}_{zx} &= -\frac{\alpha\beta}{\alpha^2 + \beta^2} (\tilde{Z}_e - \tilde{Z}_h) \\ \tilde{Z}_{xx} &= \tilde{Z}_{zz} \\ \tilde{z}_{xx} &= -\frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} (\alpha^2 \tilde{Z}_e + \beta^2 \tilde{Z}_h) \end{aligned} \quad (2.3-6)$$

ในการวิเคราะห์หา  $\tilde{Z}_e$  และ  $\tilde{Z}_h$  จากโครงสร้างที่กำหนด ทำได้โดยใช้ทฤษฎีของสายส่ง (transmission line theory) ซึ่งเราสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ได้จาก

$$Z_{in} = Z_{oi} \frac{Z_L \coth \gamma_i h_i + Z_0}{Z_0 \coth \gamma_i h_i + Z_L} \quad (2.3-7)$$

เมื่อ  $Z_L$  คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด (load impedance)  $h_i$  คือ ความหนาของแต่ละชั้น และ  $Z_{oi}$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$Z_{0TM} = -\frac{\tilde{E}_v}{\tilde{H}_u} = \frac{\gamma_i}{j\omega\epsilon_i} \quad (= \gamma_{yi}) \quad (2.3-8)$$

$$Z_{0TE} = \frac{\tilde{E}_u}{\tilde{H}_v} = \frac{j\omega\mu_i}{\gamma_i} \quad (= \frac{1}{\gamma_{xi}}) \quad (2.3-9)$$

เมื่อ  $i$  แทนบริเวณที่พิจารณา  $\gamma_i$  ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.2-11) สำหรับโครงสร้างดังรูป 2.3-2 ทางด้านบนและด้านล่างถูกปิดด้วยผนังตัวนำสมบูรณ์ ซึ่งทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับมามีเฟส (phase) เปลี่ยนไป  $180^\circ$  หรือสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการลัดวงจร (short circuit) ในการแทนค่าลงในสมการ (2.3-7) จึงสามารถพิจารณาได้ว่า อิมพีแดนซ์โหลดมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากนี้ สำหรับโครงสร้างแบบเปิด ไม่มีผนังตัวนำปิดทางด้านบนและ

ล่าง ในทางกลับกัน ก็สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นวงจรเปิด (open circuit) สำหรับโครงสร้างแบบหลายชั้น อิมพีแดนซ์ที่พิจารณาที่บริเวณรอยต่อ จะได้จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.3-7)

ดังนั้น สำหรับสายส่งไมโครสตริปที่มีสับสเตรตตั้งแต่ ชั้นเดียวจนถึง 3 ชั้น ดังแสดงในรูป 2.3-3 จะสามารถหาค่าของ  $\tilde{Z}_e$  และ  $\tilde{Z}_h$  ได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

สับสเตรตชั้นเดียว

$$\begin{aligned}\tilde{Z}_e &= \frac{\gamma_{y1}\gamma_{y2}}{\gamma_{y1}Ct_2 + \gamma_{y2}Ct_1} & \tilde{Z}_h &= \frac{1}{\gamma_{z1}Ct_1 + \gamma_{z2}Ct_2} \\ Ct_1 &= \coth \gamma_1(h-d) & Ct_2 &= \coth \gamma_2 d\end{aligned}\quad (2.3-10)$$

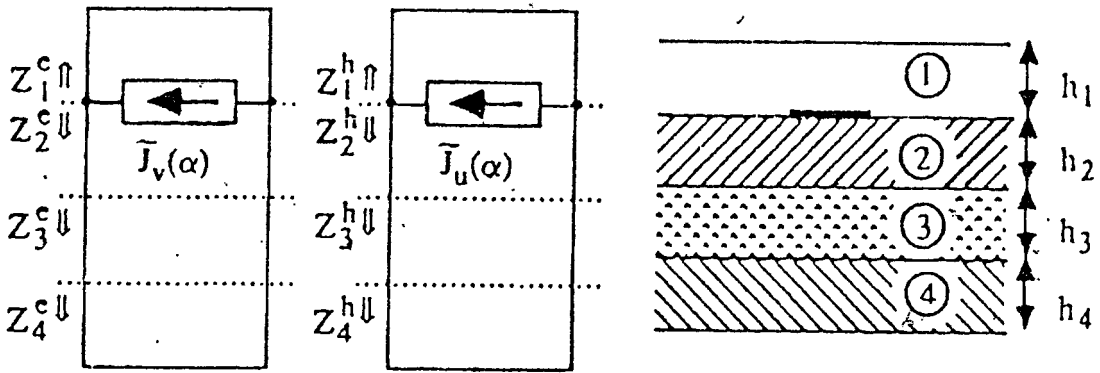
สับสเตรต 2 ชั้น

$$\begin{aligned}\tilde{Z}_e &= \frac{\gamma_{y2}Ct_3 + \gamma_{y3}Ct_2}{Ct_2Ct_3 + Ct_1Ct_3\gamma_{y2}/\gamma_{y1} + \gamma_{y3}/\gamma_{y2}} \\ \tilde{Z}_h &= \frac{\gamma_{z2}Ct_2 + \gamma_{z3}Ct_3}{\gamma_{z1}\gamma_{z2}Ct_1Ct_2 + \gamma_{z1}\gamma_{z3}Ct_1Ct_3 + \gamma_{z2}\gamma_{z3}Ct_2Ct_3 + \gamma_{z2}^2} \\ Ct_1 &= \coth \gamma_1 h & Ct_2 &= \coth \gamma_2 t & Ct_3 &= \coth \gamma_3 d\end{aligned}\quad (2.3-11)$$

สับสเตรต 3 ชั้น

$$\begin{aligned}Z_4^e &= \gamma_{y4} / Ct_4 & Z_4^h &= 1 / \gamma_{z4} Ct_4 \\ Z_3^e &= \gamma_{y3} \frac{\gamma_{y4} Ct_3 + \gamma_{y3} Ct_4}{\gamma_{y3} Ct_3 Ct_4 + \gamma_{y4}} & Z_3^h &= \frac{1}{\gamma_{z3}} \frac{\gamma_{z3} Ct_3 + \gamma_{z4} Ct_4}{\gamma_{z3} \gamma_{z4} Ct_3 Ct_4 + \gamma_{z3}} \\ Z_2^e &= \gamma_{y2} \frac{Z_3^e Ct_2 + \gamma_{y2}}{\gamma_{y2} Ct_2 + Z_3^e} & Z_2^h &= \frac{1}{\gamma_{z2}} \frac{\gamma_{z2} Z_3^h Ct_2 + 1}{Ct_2 + \gamma_{z2} Z_3^h} \\ Z_1^e &= \gamma_{y1} / Ct_1 & Z_1^h &= 1 / \gamma_{z1} Ct_1 \\ \tilde{Z}_e &= \left( \frac{1}{Z_1^e} + \frac{1}{Z_2^e} \right)^{-1} & \tilde{Z}_h &= \left( \frac{1}{Z_1^h} + \frac{1}{Z_2^h} \right)^{-1} \\ Ct_i &= \coth \gamma_i h_i & i &= 1, 2, 3, 4\end{aligned}\quad (2.3-12)$$

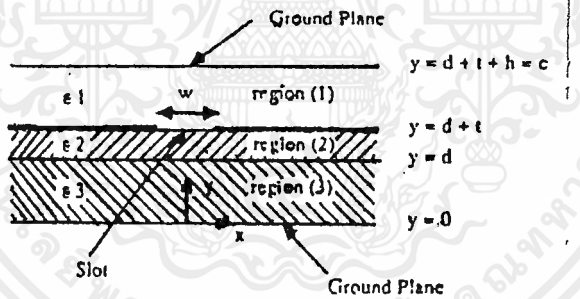
สังเกตได้ว่า ผลลัพธ์ในสมการ (2.3-11) เหมือนกับที่ได้โดยใช้วิธีทั่วไปในสมการ (2.2-21)



รูปที่ 2.3-3 วงจรสายส่งสมมูลสำหรับสายส่งไมโครสตริปที่มีสับสเตรต 3 ชั้น

2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างที่ประกอบด้วยสายส่งแบบสลิต (slotlines)

ในควมถี่ย่านมิลลิเมตร จะนิยมใช้สายส่งชนิดฟิโนไลน์ (finline) หรือสลิต (slotline) ในการออกแบบวงจรรวมทางไมโครเวฟ (Microwave Integrated Circuits) สำหรับการวิเคราะห์สายส่งชนิดดังกล่าวโดยใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมนั้น ทำได้โดยการปรับปรุงสมการที่ใช้สำหรับไมโครสตริป ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่แล้ว



รูปที่ 2.4-1 โครงสร้างของสายส่งชนิดสลิตไลน์

รูปที่ 2.4-1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของสายส่งชนิดสลิตไลน์ ซึ่งสำหรับสลิตไลน์นั้นพิจารณาได้โดยการย้ายตำแหน่งของผนังตัวนำไปไว้ที่ระยอนันต์ ระหว่างรอยต่อของบริเวณที่ 1 และบริเวณที่ 2 จะมีแผ่นตัวนำที่บางมากวางอยู่ในตำแหน่งที่กลับกับสตริปในรูป 2.2-1 สมการสนามที่ใช้ในการวิเคราะห์ก็จะเหมือนกับที่ใช้ในหัวข้อที่ 2.2 ดังนั้นระบบสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างนี้ก็เหมือนๆกับสมการ (2.2-21) แต่อย่างไรก็ดี สำหรับการหาผลเฉลยโดยใช้วิธีของ Galerkin จะสังเกตว่า จำเป็นที่จะต้องกำหนดฟังก์ชันฐานที่มีขนาดใหญ่เพื่อแทนการกระจายของกระแสในแผ่นตัวนำที่มีพื้นที่ที่มาก ๆ ดังกล่าว ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกกว่าที่จะใช้การวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนของ Galerkin กับ สนามไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่า E บนสลิต และจะได้สมการของสนามที่ปรับปรุงแล้ว คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$\begin{bmatrix} \tilde{J}_x \\ \tilde{J}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_{xx} & \tilde{Y}_{xz} \\ \tilde{Y}_{zx} & \tilde{Y}_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{E}_{x1} \\ \tilde{E}_{x2} \end{bmatrix} \quad (2.4-1)$$

เมื่อ

$$\begin{bmatrix} \tilde{Y}_{xx} & \tilde{Y}_{xz} \\ \tilde{Y}_{zx} & \tilde{Y}_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{Z}_{xx} & \tilde{Z}_{xz} \\ \tilde{Z}_{zx} & \tilde{Z}_{zz} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\tilde{Y}_{xx} = -\frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \left( \frac{\alpha^2}{\tilde{Z}_c} + \frac{\beta^2}{\tilde{Z}_h} \right)$$

$$\tilde{Y}_{xz} = -\frac{\alpha\beta}{\alpha^2 + \beta^2} \left( \frac{1}{\tilde{Z}_c} - \frac{1}{\tilde{Z}_h} \right)$$

$$\tilde{Y}_{zx} = \tilde{Y}_{xz}$$

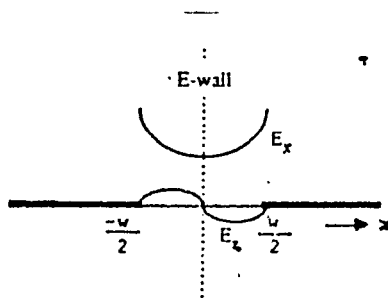
$$\tilde{Y}_{zz} = -\frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \left( \frac{\beta^2}{\tilde{Z}_c} + \frac{\alpha^2}{\tilde{Z}_h} \right)$$

เนื่องจากความสมมาตรของโครงสร้าง สำหรับโหมดหลัก (dominant mode) ของสนามไฟฟ้า จะพิจารณาได้ว่าเสมือนมีผนังตัวนำไฟฟ้า (electric wall) วางอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางสล็อต ดังนั้นโดยคุณสมบัติทวิภาวะ (duality) จะได้ว่าฟังก์ชันฐานก็จะมีรูปแบบเดียวกันกับที่ใช้ในโครงสร้างของไมโครสตริป คือ

$$E_{xm}(x) = \frac{\cos[2(n-1)\pi x / w]}{\sqrt{1 - (2x/w)^2}}, \quad n=1,2,\dots \quad (2.4-2)$$

$$E_{zm}(x) = \frac{\sin[2n\pi x / w]}{\sqrt{1 - (2x/w)^2}}, \quad n=1,2,\dots \quad (2.4-3)$$

โดยที่ฟังก์ชันที่กำหนดจะมีค่าเฉพาะบนสล็อต และมีค่าเป็นศูนย์ในบริเวณอื่นๆ การแปลง Fourier ของฟังก์ชันฐานดังกล่าว จะอยู่ในรูปแบบเดียวกันกับสมการ (2.2-27) และ (2.2-28) ลักษณะของฟังก์ชันฐานจะแสดงได้ดังรูปที่ 2.4-2



ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันฐานเพียงเทอมเดียวในการวิเคราะห์ โครงสร้างนี้ โดยการใช้วิธีของ Galerkin จะได้สมการเมตริกซ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \int_{\alpha} \tilde{E}_{x1} \tilde{Y}_{xx} \tilde{E}_{x1} & \int_{\alpha} \tilde{E}_{x1} \tilde{Y}_{x2} \tilde{E}_{z1} \\ \int_{\alpha} \tilde{E}_{z1} \tilde{Y}_{xx} \tilde{E}_{x1} & \int_{\alpha} \tilde{E}_{z1} \tilde{Y}_{zz} \tilde{E}_{z1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ d_1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.4-4)$$

จากสมการข้างต้น สามารถใช้วิธีการสมมติค่า  $\beta$  แล้วแทนไปจนกว่าจะทำให้ดีเทอร์มิแนนต์ มีค่าเป็นศูนย์ ก็จะสามารถคำนวณค่าคงตัวการแพร่กระจายเพื่อจะได้นำไปคำนวณหาคุณลักษณะของสายส่งต่อไปได้

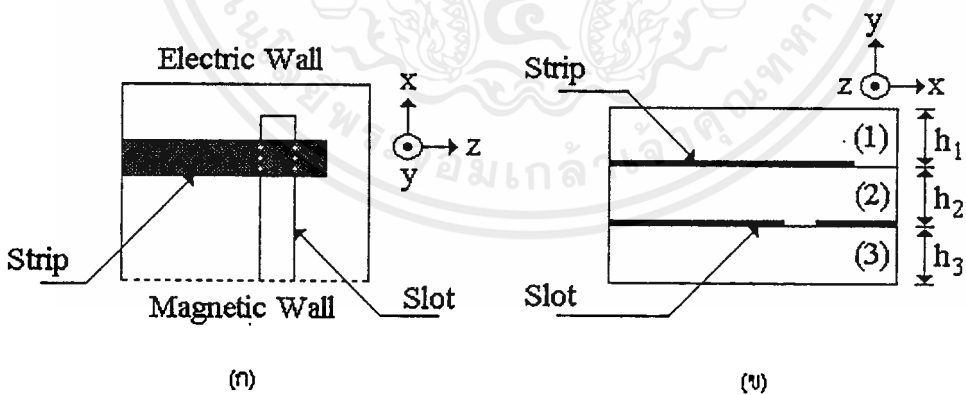
## 2.5 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบหลายชั้นและมีความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้าง

ในการออกแบบอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบโดยใช้โครงสร้างแบบหลายชั้น ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบวงจรกรอง (filter) อุปกรณ์เชื่อมต่อ (coupler) ตลอดจนการวิเคราะห์การคัปปลิง (coupling) ระหว่างสายส่งเชิงระนาบหลายๆ ชนิด เช่น การคัปปลิงระหว่างสายส่งไมโครสตริปเป็นสล็อตไลน์ (microstrip-slotline coupling) ส่วนจำเป็นที่จะต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้างที่ประกอบด้วยความไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) ทั้งสิ้น

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีพิจารณาในโดเมนเชิงสเปกตรัม สามารถทำได้ไม่ยากนัก โดยการใช้วิธีอิมมิตแดนซ์ ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ความไม่ต่อเนื่องของสายส่งระหว่างชั้นได้ โดยอาศัยทฤษฎีของสายส่งทั่วไป

พิจารณาความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการคัปปลิงระหว่างไมโครสตริปไปเป็นสล็อตไลน์ ดังแสดงในรูปที่

2.5-1



รูปที่ 2.5-1 ความไม่ต่อเนื่องที่เกิดจากการคัปปลิงระหว่างไมโครสตริปกับสล็อตไลน์

จากการพิจารณาโครงสร้างดังกล่าว จะสรุปได้ว่า สนามไฟฟ้าในโหมด TE และ TM ที่ระนาบของตัวนำหนึ่งๆ นอกจากจะมีความสัมพันธ์กับ ความหนาแน่นกระแสที่ไหลบนระนาบเดียวกันด้วยอิมพีแดนซ์ของคลื่น ในโหมด TE และ TM ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.3 แล้ว ก็ยังมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแสที่ไหลบน

ระนาบที่ต่างกันอื่นๆ ด้วยอิมพีแดนซ์ถ่ายโอน (transfer impedance) ของคลื่นในโหมด TE และ TM ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ [2]

$$\begin{aligned}\tilde{E}_{ui} &= \tilde{Z}_{i1}^h \tilde{J}_{u1} + \dots + \tilde{Z}_{ii}^h \tilde{J}_{ui} + \dots + \tilde{Z}_{iN}^h J_{uN} \\ \tilde{E}_{vi} &= \tilde{Z}_{i1}^e \tilde{J}_{v1} + \dots + \tilde{Z}_{ii}^e \tilde{J}_{vi} + \dots + \tilde{Z}_{iN}^e J_{vN}\end{aligned}\quad (2.5-1)$$

สำหรับการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส ทำได้โดยใช้สมการ

$$\tilde{Z}_{\mu\mu}^h = \frac{1}{\tilde{Y}_{\mu\mu}^h + \tilde{Y}_{d\mu\mu}^h}, \quad \tilde{Z}_{\mu\mu}^e = \frac{1}{\tilde{Y}_{\mu\mu}^e + \tilde{Y}_{d\mu\mu}^e}\quad (2.5-2)$$

โดยที่  $\tilde{Z}_{\mu\mu}^h$  และ  $\tilde{Z}_{\mu\mu}^e$  คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่นโหมด TE และ TM ที่มองจากระนาบ  $\mu$  ตามลำดับ ตัวห้อย  $u$  และ  $d$  ของแอดมิตแดนซ์แต่ละตัวแสดงว่าเป็นการมองขึ้นหรือลง จากระนาบที่พิจารณา สำหรับอิมพีแดนซ์ของคลื่นดังกล่าว สามารถวิเคราะห์ได้ โดยใช้ทฤษฎีของสายส่ง ดังที่ได้กล่าวไว้โดยละเอียดในหัวข้อ 2.3 ด้วยการหาอิมพีแดนซ์ทางด้านเข้า จากวงจรสมมูลด้วยสมการ

$$\tilde{Z}_{in} = \tilde{Z}_{o1} \frac{\tilde{Z}_L \coth \gamma_i h_i + \tilde{Z}_0}{\tilde{Z}_0 \coth \gamma_i h_i + \tilde{Z}_L}\quad (2.5-3)$$

ส่วนอิมพีแดนซ์ส่งผ่านที่แสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่ระนาบตัวนำ  $v$  และความหนาแน่นกระแสที่ระนาบตัวนำ  $\mu$  จะเป็น

$$\tilde{Z}_{\mu\nu} = \tilde{Z}_{\nu\nu} \prod_{i=q}^p \frac{\tilde{Y}_{0i} / \sinh \gamma_i h_i}{\tilde{Y}_{\mu-1} + \tilde{Y}_{0i} \coth \gamma_i h_i}\quad (2.5-4)$$

เมื่อ  $p$  คือ บริเวณของชั้นไดอิเล็กตริกที่อยู่ใต้ ระนาบตัวนำ  $\mu$  ส่วน  $q$  คือ บริเวณของชั้นไดอิเล็กตริกที่อยู่เหนือ ระนาบตัวนำ  $\nu$

โดยอาศัยเทคนิคของการพิจารณาอิมพีแดนซ์และอิมพีแดนซ์ถ่ายโอน จากทฤษฎีของสายส่งต่างๆ ไปดังที่กล่าวในหัวข้อนี้ จะสามารถใช้วิธีการอิมพีแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบที่มีความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างได้

## 2.6 การหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance)

โดยทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของโครงสร้างของสายส่งหรืออุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบ อาทิเช่น สายส่งไมโครสตริป ท่อนำคลื่นเชิงระนาบร่วม (co-planar waveguide :CPW) หรืออุปกรณ์คัปปลิงเชิงระนาบแบบต่างๆ นั้น พบว่า สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในอุปกรณ์ดังกล่าวมิได้มีธรรมชาติเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นระนาบ หรือ โหมด TEM ดังนั้นจึงไม่มีค่านิยามที่แน่นอน สำหรับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ อย่างไรก็ตามค่านิยามหนึ่งที่เป็นไปได้[1] คือ

$$Z_0 = \frac{2P}{I_0^2} \quad (2.6-1)$$

เมื่อ  $P$  คือ ค่าเฉลี่ยเวลาของกำลังของพอยน์ติง (Poynting power) ที่ไหลไปตามแกน  $z$  และ  $I_0$  คือ ค่าแอมพลิจูดของกระแสที่ไหลไปตามแนวแกน  $z$  สำหรับค่า  $P$  นั้นสามารถหาได้โดย

$$P = \operatorname{Re} \int_0^c \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{a}_z dx dy \quad (2.6-2)$$

กำหนดให้  $\mathbf{a}_z$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ในทิศ  $z$  และ  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*$  เป็นค่าเฉลี่ยเวลาของเวกเตอร์ของพอยน์ติง และโดยการใช้ทฤษฎีของ Parseval กับสมการ (2.6-2) จะได้ว่าส่วนอินทิกรัลของสมการดังกล่าวจะเป็น

$$\begin{aligned} \int_0^c \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{a}_z dx dy &= \frac{1}{2\pi} \int_0^c \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{a}_z dy d\alpha \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [E_{h1} + E_{h2} + E_{h3}] d\alpha \end{aligned} \quad (2.6-3)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} E_{h1} &= \int_{d^+}^c (\tilde{E}_{x1} \tilde{H}_{y1}^* - \tilde{E}_{y1} \tilde{H}_{x1}^*) dy \\ E_{h2} &= \int_d^{d^+} (\tilde{E}_{x2} \tilde{H}_{y2}^* - \tilde{E}_{y2} \tilde{H}_{x2}^*) dy \\ E_{h3} &= \int_0^d (\tilde{E}_{x3} \tilde{H}_{y3}^* - \tilde{E}_{y3} \tilde{H}_{x3}^*) dy \end{aligned}$$

องค์ประกอบสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามแม่เหล็ก  $H$  ในสมการ (2.6-3) จะสามารถหาได้จากการแทนค่า  $\tilde{J}_z$  และ  $\tilde{J}_x$  หลังจากทราบค่า  $\beta$  ในสมการ (2.2-12) การอินทิเกรตเทียบกับ  $y$  สามารถทำได้โดยใช้วิธีวิเคราะห์ธรรมดา (analytical method) ดังนั้นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E_{h1} &= \pm \frac{1}{2} A_1 A_4^* \left( \frac{S_1 C_1}{\gamma_1} - h \right) - \frac{1}{2} A_2 A_3^* \left( \frac{S_1 C_1}{\gamma_1} + h \right) \\
 E_{h2} &= \pm \frac{1}{2} (C_1 C_4^* - B_2 B_3^*) \left( \frac{S_2 C_2}{\gamma_2} - t \right) + \frac{1}{2} (B_1 B_4^* - C_2 C_3^*) \left( \frac{S_2 C_2}{\gamma_2} + t \right) \\
 &\quad + \frac{1}{2} [C_1 B_4^* - B_2 B_3^* \pm (B_1 C_4^* - C_2 B_3^*)] \frac{S_2^2}{\gamma_2} \\
 E_{h3} &= \pm \frac{1}{2} D_1 D_4^* \left( \frac{S_3 C_3}{\gamma_3} - d \right) - \frac{1}{2} D_2 D_3^* \left( \frac{S_3 C_3}{\gamma_3} + d \right)
 \end{aligned} \tag{2.6-4}$$

เมื่อ

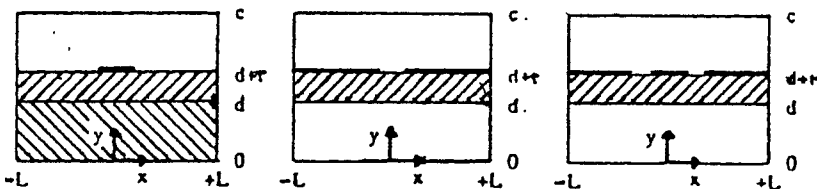
$$\begin{aligned}
 C_1 &= \cosh \gamma_1 h & C_2 &= \cosh \gamma_2 t & C_3 &= \cosh \gamma_3 d \\
 S_1 &= \sinh \gamma_1 h & S_2 &= \sinh \gamma_2 t & S_3 &= \sinh \gamma_3 d
 \end{aligned}$$

เครื่องหมาย  $\pm$  จะเป็น  $+$  ถ้า  $\gamma_i$  มีค่าเป็นจำนวนจริง และเป็น  $-$  เมื่อ  $\gamma_i$  มีค่าเป็นจำนวนจินตภาพ สำหรับ  $I_0$  จะหาได้จากกรีนฟังก์ชัน  $J_{\pm}(x)$  ตลอดหน้าตัดของสายส่งที่มีกระแสผ่าน

## 2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีผนังด้านข้าง (enclosed structure)

สำหรับการอินทิเกรตของผลคูณในสมการ (2.2-24) มีความเป็นไปได้ที่จะพบโพล (pole) ของฟังก์ชันของ Green บนเส้นทางการอินทิเกรตตลอดค่าของ  $\alpha$  ซึ่งโพลดังกล่าวเกิดมาจากการที่ตัวหารของ  $\tilde{Z}_c$  หรือ  $\tilde{Z}_h$  มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากเป็นเงื่อนไขของการรีโซแนนซ์แบบตามขวาง (transverse resonance) ดังนั้นในการหลีกเลี่ยงโพล ในการเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณค่า จะต้องตรวจสอบว่ามีการเกิดโพลในจุดที่จะคำนวณหรือไม่

อย่างไรก็ดี วิธีการที่สะดวกกว่าในการที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดโพล คือ การปิดล้อมโครงสร้างด้วยผนังตัวนำ ดังแสดงในรูป 2.7-1 ในการทำเช่นนี้จะทำให้ลดโอกาสการเกิดโพลลงได้อย่างมาก เนื่องจากค่าของ  $\alpha$  จะมีค่าไม่ต่อเนื่อง สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบเปิด ของสายส่งไมโครสตริบ หรือสล็อต ก็สามารถใช้นิยามเดียวกันได้ โดยการกำหนดค่าของ  $L$  และบริเวณที่เป็นอากาศให้มีค่ามาก ๆ



รูปที่ 2.7-1 โครงสร้างแบบมีผนังด้านข้างของสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโครงสร้างที่มีผนังด้านข้างดังกล่าวจะได้ว่า การแปลง Fourier ในสมการ (2.2-3) จะสามารถแทนได้ด้วยการแปลง Fourier แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete Fourier transform)

$$\tilde{\phi}(\alpha) = \int_{-L}^L \phi(x) e^{j\alpha x} dx \quad (2.7-1)$$

เมื่อ

$$\alpha = \frac{n\pi}{L}, \quad n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, +\infty$$

โดยการอินทิเกรตตลอดช่วงดังกล่าวสามารถเขียนได้ในรูปของผลรวม (summation) จะทำให้การคำนวณทำได้ง่ายขึ้นอีกด้วย โดยวิธีการดังกล่าว สมการ (2.6-3) จะสามารถเขียนอยู่ในรูปผลรวมได้คือ

$$\int_s \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{a}_z dx dy = \frac{1}{2L} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [E_{h1}(\alpha) + E_{h2}(\alpha) + E_{h3}(\alpha)] \quad (2.7-2)$$

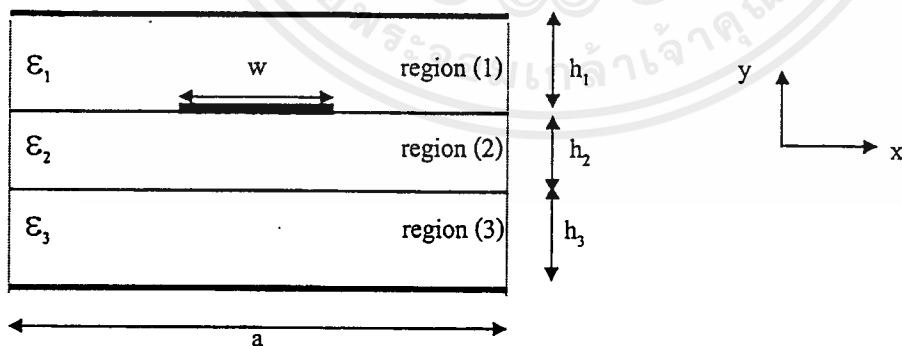
ซึ่งจะเห็นได้ว่า การเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณสามารถทำได้สะดวกมากขึ้น

## บทที่ 3

## การออกแบบและผลการคำนวณ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำวิธีอิมิตแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว และแบบหลายชั้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบทฤษฎีและความถูกต้องของวิธีการดังกล่าว สายส่งไมโครสตริป เป็นสายส่งเชิงระนาบที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการออกแบบวงจรรวมทางไมโครเวฟที่ใช้งานในย่านความถี่ไม่สูงมากนัก เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อน สามารถสร้างได้ง่าย อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์คุณลักษณะเพื่อใช้ในการออกแบบอย่างถูกต้องทำได้ไม่ง่ายนัก เนื่องจากคลื่นที่เดินทางในสายส่งดังกล่าวจะเป็นคลื่นในโหมด Quasi-TEM ซึ่งจะทำให้การคำนวณโดยการวิเคราะห์โดยตรงทำได้ยาก ในการออกแบบโดยทั่วไป จึงนิยมที่จะใช้สูตรสำเร็จ ซึ่งได้มาจากการทดลอง แล้วสร้างเป็นสมการเชิงประสพการณ์ (empirical equation or empirical formula) ซึ่งมีผู้เสนอไว้มากมาย และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับในปริยญาณีพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอทฤษฎีและสูตรที่ใช้ในการคำนวณโดยอ้างอิงสูตรของ Hammerstad และ Jansen [10,11] ไว้ในภาคผนวก ก. นอกจากนี้ยังได้ทดลองทำการคำนวณออกแบบ และทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวิธีอิมิตแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม วิธีใช้สูตรเชิงประสพการณ์ และใช้โปรแกรมออกแบบสำเร็จรูปสำหรับสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียวด้วย

สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น ดังแสดงในรูป 3-1 นั้น ไม่สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรเชิงประสพการณ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์โดยตรง ซึ่งในปริยญาณีพนธ์ฉบับนี้ได้นำปัญหาดังกล่าวมาวิเคราะห์ โดยใช้วิธีอิมิตแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม และทำการสร้างชิ้นงานเพื่อวัดทดสอบผลการคำนวณ



รูปที่ 3-1 สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น

### 3.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายส่งไมโครสตริปโดยวิธีอิมมิตแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม

ในหัวข้อนี้ จะได้ใช้วิธีการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปโดยวิธีอิมมิตแดนซ์ ซึ่งได้อธิบายโดยละเอียดในบทที่ 2 มาทำการวิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบสองชั้น ดังรูป 3-1 โดยมีลำดับชั้นในการคำนวณดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 การหาฟังก์ชันของกรีนสำหรับโครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปแบบสองชั้น

โดยใช้วิธีการหาฟังก์ชันของกรีน ด้วยวิธีอิมมิตแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม ซึ่งพิจารณาแต่ละชั้นของสัปดาห์เป็นวงจรสายส่งสมมูล ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.3 จะได้ฟังก์ชันของกรีนในระบบพิกัด  $(u, v)$  คือ

$$\begin{aligned}\tilde{Z}_e &= \frac{\gamma_{y2} Ct_3 + \gamma_{y3} Ct_2}{Ct_2 Ct_3 + Ct_1 Ct_3 \gamma_{y2} / \gamma_{y1} + \gamma_{y3} / \gamma_{y2}} \\ \tilde{Z}_h &= \frac{\gamma_{z2} Ct_2 + \gamma_{z3} Ct_3}{\gamma_{z1} \gamma_{z2} Ct_1 Ct_2 + \gamma_{z1} \gamma_{z3} Ct_1 Ct_3 + \gamma_{z2} \gamma_{z3} Ct_2 Ct_3 + \gamma_{z2}^2} \\ Ct_1 &= \coth \gamma_1 h_1 \quad Ct_2 = \coth \gamma_2 h_2 \quad Ct_3 = \coth \gamma_3 h_3\end{aligned}\tag{3.3-1}$$

เมื่อทำการแปลงระบบพิกัดให้เป็นระบบพิกัด  $(x, y)$  จะได้

$$\begin{aligned}\tilde{Z}_{zz} &= -\frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} (\beta^2 \tilde{Z}_e + \alpha^2 \tilde{Z}_h) \\ \tilde{Z}_{zx} &= -\frac{\alpha\beta}{\alpha^2 + \beta^2} (\tilde{Z}_e - \tilde{Z}_h) \\ \tilde{Z}_{xz} &= \tilde{Z}_{zx} \\ \tilde{Z}_{xx} &= -\frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} (\alpha^2 \tilde{Z}_e + \beta^2 \tilde{Z}_h)\end{aligned}\tag{3.1-2}$$

และจะได้ความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสบริเวณที่มีสายส่งไมโครสตริปเป็น

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}_{z1} \\ \tilde{E}_{x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{Z}_{zz} & \tilde{Z}_{zx} \\ \tilde{Z}_{xz} & \tilde{Z}_{xx} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{J}_z \\ \tilde{J}_x \end{bmatrix}\tag{3.1-3}$$

ซึ่งจะสามารถหาผลเฉลยของสมการดังกล่าวได้โดยใช้วิธีของ Galerkin

### 3.1.2 การหาผลเฉลยโดยใช้วิธีการของ Galerkin

การหาผลเฉลยของสมการ (3.1-3) ทำได้โดยการใช้วิธีการของ Galerkin ด้วยการกำหนดฟังก์ชันฐานที่เหมาะสม ซึ่งในการวิเคราะห์ในปริภูมิอนินทรีย์นี้ ได้เลือกใช้ฟังก์ชันฐานดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} J_m(x) &= \frac{\cos[2(n-1)\pi x / w]}{\sqrt{1-(2x/w)^2}}, \quad n=1,2,.. \\ J_{xn}(x) &= \frac{\sin[2n\pi x / w]}{\sqrt{1-(2x/w)^2}}, \quad n=1,2,... \end{aligned} \quad (3.1-4)$$

ซึ่งจะได้รับการแปลง Fourier ของฟังก์ชันฐานดังกล่าวคือ

$$\begin{aligned} \tilde{J}_m(\alpha) &= \frac{\pi w}{4} \left[ J_0\left(\frac{w\alpha}{2} + (n-1)\pi\right) + J_0\left(\frac{w\alpha}{2} - (n-1)\pi\right) \right] \\ \tilde{J}_{xn}(\alpha) &= \frac{\pi w}{4j} \left[ J_0\left(\frac{w\alpha}{2} + n\pi\right) - J_0\left(\frac{w\alpha}{2} - n\pi\right) \right] \end{aligned} \quad (3.1-5)$$

เมื่อแทนฟังก์ชันฐานและหาผลคูณภายในด้วยฟังก์ชันที่มีลักษณะเดียวกับฟังก์ชันฐานที่ได้เลือกตามวิธีการของ Galerkin รวมทั้งใช้ทฤษฎีของ Parseval ทำให้ด้านหนึ่งของสมการเป็นศูนย์ ดังรายละเอียดในบทที่ 2 และเนื่องจากโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์นี้ ถูกปิดล้อมด้วยผนังตัวนำทำให้ค่าของ  $\alpha$  มีความไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจะได้ระบบสมการที่สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์เพื่อใช้ในการหาผลเฉลยดังนี้

$$\alpha = \frac{n\pi}{a}, \quad n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, +\infty$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^N K_{km}^{(1,1)} c_m + \sum_{m=1}^N K_{km}^{(1,2)} d_m &= 0, \quad k = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{m=1}^N K_{lm}^{(2,1)} c_m + \sum_{m=1}^N K_{lm}^{(2,2)} d_m &= 0, \quad l = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3.1-6)$$

$$K_{km}^{(1,1)} = \frac{2\pi}{a} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{zk}(\alpha) \tilde{Z}_{zz}(\alpha, \beta) \tilde{J}_{zm}(\alpha)$$

$$K_{km}^{(1,2)} = \frac{2\pi}{a} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{zk}(\alpha) \tilde{Z}_{zx}(\alpha, \beta) \tilde{J}_{xm}(\alpha)$$

$$K_{lm}^{(2,1)} = \frac{2\pi}{a} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{xl}(\alpha) \tilde{Z}_{xz}(\alpha, \beta) \tilde{J}_{zm}(\alpha)$$

$$K_{lm}^{(2,2)} = \frac{2\pi}{a} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{J}_{xl}(\alpha) \tilde{Z}_{xx}(\alpha, \beta) \tilde{J}_{xm}(\alpha)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ดี ขนาดของเมทริกซ์จะขึ้นอยู่กับจำนวนเทอมของฟังก์ชันฐาน เพื่อให้เข้าใจรูปแบบของเมทริกซ์ดังกล่าวได้ง่ายขึ้น จะสมมติให้จำนวนเทอมของฟังก์ชันฐาน  $N = 2$  จะได้เมทริกซ์เป็น

$$\begin{bmatrix} K_{11}^{(1,1)} & K_{12}^{(1,1)} & K_{11}^{(1,2)} & K_{12}^{K(1,2)} \\ K_{21}^{(1,1)} & K_{22}^{(1,1)} & K_{21}^{(1,2)} & K_{22}^{(1,2)} \\ K_{11}^{(2,1)} & K_{12}^{(2,1)} & K_{11}^{(2,2)} & K_{12}^{(2,2)} \\ K_{21}^{(2,1)} & K_{22}^{(2,1)} & K_{21}^{(2,2)} & K_{22}^{(2,2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1-7)$$

โดยการทดลองเปลี่ยนค่า  $\beta$  จนกระทั่งดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์เป็นศูนย์ ก็จะได้ค่า  $\beta$  ที่ถูกต้อง เพื่อนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของฟังก์ชันฐาน และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะต่อไป

### 3.1.3 การหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.6 จะสามารถหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะได้จาก

$$Z_0 = \frac{2P}{I_0^2} \quad (3.1-8)$$

เนื่องจากโครงสร้างที่ถูกปิดล้อมด้วยผนังตัวนำทางด้านข้างจะได้

$$P = \frac{1}{2a} \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} [E_{h1} + E_{h2} + E_{h3}] \right\} \quad (3.1-9)$$

โดยที่

$$E_{h1} = \int_{h_2+h_3}^{h_1+h_2+h_3} (\tilde{E}_{x1} \tilde{H}_{y1}^* - \tilde{E}_{y1} \tilde{H}_{x1}^*) dy$$

$$E_{h2} = \int_{h_3}^{h_2+h_3} (\tilde{E}_{x2} \tilde{H}_{y2}^* - \tilde{E}_{y2} \tilde{H}_{x2}^*) dy$$

$$E_{h3} = \int_0^{h_3} (\tilde{E}_{x3} \tilde{H}_{y3}^* - \tilde{E}_{y3} \tilde{H}_{x3}^*) dy$$

องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละตัวจะสามารถหาได้จากการแทนค่า  $\beta$  ที่ถูกต้องซึ่งได้มาจากหัวข้อที่ผ่านมาในสมการ (2.2-12) แล้วแทนฟังก์ชันฐานที่ได้ในสมการซึ่งได้จากการวิเคราะห์เงื่อนไขขอบเขตดังนี้

$$\begin{aligned}
\tilde{E}_{x1} &= A_1 \sinh \gamma_1 (h_1 + h_2 + h_3 - y) \\
\tilde{E}_{x2} &= B_1 \cosh \gamma_2 (y - h_3) + C_1 \sinh \gamma_2 (y - h_3) \\
\tilde{E}_{x3} &= D_1 \sinh \gamma_3 y \\
\tilde{E}_{y1} &= A_2 \cosh \gamma_1 (h_1 + h_2 + h_3 - y) \\
\tilde{E}_{y2} &= B_2 \sinh \gamma_2 (y - h_3) + C_2 \cosh \gamma_2 (y - h_3) \\
\tilde{E}_{y3} &= D_2 \cosh \gamma_3 y \\
\tilde{H}_{x1} &= A_3 \cosh \gamma_1 (h_1 + h_2 + h_3 - y) \\
\tilde{H}_{x2} &= B_3 \sinh \gamma_2 (y - h_3) + C_3 \cosh \gamma_2 (y - h_3) \\
\tilde{H}_{x3} &= D_3 \cosh \gamma_3 y \\
\tilde{H}_{y1} &= A_4 \sinh \gamma_1 (h_1 + h_2 + h_3 - y) \\
\tilde{H}_{y2} &= B_4 \cosh \gamma_2 (y - h_3) + C_4 \sinh \gamma_2 (y - h_3) \\
\tilde{H}_{y3} &= D_4 \sinh \gamma_3 y
\end{aligned} \tag{3.1-10}$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
E_{h1} &= \pm \frac{1}{2} A_1 A_4^* \left( \frac{S_1 C_1}{\gamma_1} - h_1 \right) - \frac{1}{2} A_2 A_3^* \left( \frac{S_1 C_1}{\gamma_1} + h_1 \right) \\
E_{h2} &= \pm \frac{1}{2} (C_1 C_4^* - B_2 B_3^*) \left( \frac{S_2 C_2}{\gamma_2} - h_2 \right) + \frac{1}{2} (B_1 B_4^* - C_2 C_3^*) \left( \frac{S_2 C_2}{\gamma_2} + h_2 \right) \\
&\quad + \frac{1}{2} [C_1 B_4^* - B_2 B_3^* \pm (B_1 C_4^* - C_2 B_3^*)] \frac{S_2^2}{\gamma_2} \\
E_{h3} &= \pm \frac{1}{2} D_1 D_4^* \left( \frac{S_3 C_3}{\gamma_3} - h_3 \right) - \frac{1}{2} D_2 D_3^* \left( \frac{S_3 C_3}{\gamma_3} + h_3 \right)
\end{aligned} \tag{3.1-11}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
C_1 &= \cosh \gamma_1 h_1 & C_2 &= \cosh \gamma_2 h_2 & C_3 &= \cosh \gamma_3 h_3 \\
S_1 &= \sinh \gamma_1 h_1 & S_2 &= \sinh \gamma_2 h_2 & S_3 &= \sinh \gamma_3 h_3
\end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned}
A_1 &= j(\alpha \gamma_{y1} A^e - \beta A^h) \\
B_1 &= -j(\alpha \gamma_{y2} B^e + \beta B^h) \\
C_1 &= -j(\alpha \gamma_{y2} C^e + \beta C^h) \\
D_1 &= -j(\alpha \gamma_{y3} D^e + \beta D^h)
\end{aligned}$$

$$A_2 = \frac{1}{\hat{y}_1} [\gamma_1^2 + k_1^2] A^e$$

$$B_2 = \frac{1}{\hat{y}_2} [\gamma_2^2 + k_2^2] B^e$$

$$C_2 = \frac{1}{\hat{y}_2} [\gamma_2^2 + k_2^2] C^e$$

$$D_2 = \frac{1}{\hat{y}_3} [\gamma_3^2 + k_3^2] D^e$$

$$A_3 = j(\beta A^e + \alpha \gamma_{z1} A^h)$$

$$B_3 = j(\beta B^e - \alpha \gamma_{z2} B^h)$$

$$C_3 = j(\beta C^e - \alpha \gamma_{z2} C^h)$$

$$D_3 = j(\beta D^e - \alpha \gamma_{z3} D^h)$$

$$A_4 = \frac{1}{\hat{z}_1} [\gamma_1^2 + k_1^2] A^h$$

$$B_4 = \frac{1}{\hat{z}_2} [\gamma_2^2 + k_2^2] B^h$$

$$C_4 = \frac{1}{\hat{z}_2} [\gamma_2^2 + k_2^2] C^h$$

$$D_4 = \frac{1}{\hat{z}_3} [\gamma_3^2 + k_3^2] D^h$$

และ

$$A^e = j \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \frac{\gamma_{y2}}{S_1} \frac{Y_2^e}{\Gamma_e'} [J_e]$$

$$A^h = j \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \frac{1}{S_1} \frac{Y_2^h}{\Gamma_h'} [J_h]$$

$$B^e = -j \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \gamma_{y3} \frac{P_1}{\Gamma_e'} [J_e]$$

$$B^h = j \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \frac{T}{\Gamma_h'} [J_h]$$

$$C^e = -j \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \gamma_{y2} C t_3 \frac{P_1}{\Gamma_e'} [J_e]$$

$$C^h = j \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \frac{\gamma_{z3}}{\gamma_{z2}} C t_3 \frac{T}{\Gamma_h'} [J_h]$$

$$D^e = -j \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \frac{\gamma_{y2}}{S_3} \frac{P_1}{\Gamma_e'} [J_e]$$

$$D^h = j \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \frac{1}{S_3} \frac{T}{\Gamma_h'} [J_h]$$

เมื่อ

เอกสารนี้เผยแพร่โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[J_h] = \alpha \cdot \tilde{J}_z - \beta \cdot \tilde{J}_x$$

$$\Gamma_e' = Y_1^e Y_2^e - P_1 P_2$$

$$\Gamma_h' = Y_1^h Y_2^h - T^2$$

$$Y_1^e = \gamma_{y1} C t_2 + \gamma_{y2} C t_1$$

$$Y_2^e = \gamma_{y2} C t_3 + \gamma_{y3} C t_2$$

$$Y_1^h = \gamma_{z1} C t_1 + \gamma_{z2} C t_2$$

$$Y_2^h = \gamma_{z2} C t_2 + \gamma_{z3} C t_3$$

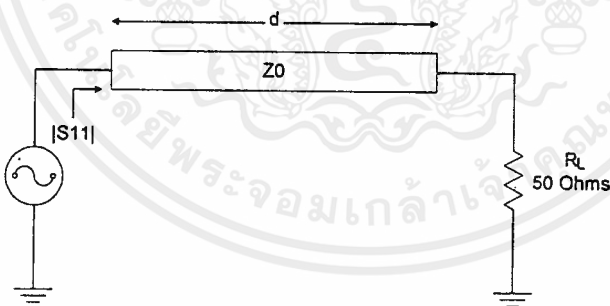
$$P_1 = \frac{\gamma_{y1}}{S_2}$$

$$P_2 = \frac{\gamma_{y3}}{S_2}$$

$$T = \frac{\gamma_{y2}}{S_2}$$

### 3.1.4 การคำนวณหาค่าของ $S_{11}$ ของวงจรสายส่ง

เพื่อทดสอบผลการคำนวณจึงได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อวัดคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป โดยการต่อวงจรสายส่งดังรูป



รูปที่ 3.1-1 วงจรสายส่งที่ใช้ในการวัดคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป

ในการคำนวณและทดสอบจะละผลของความสูญเสียในสายส่ง ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของ  $|S_{11}|$  และ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะคือ

$$|S_{11}| = 20 \log \left| \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0} \right| \quad (3.1-12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นยังสามารถคำนวณค่า ความยาวคลื่นในสายส่ง (guided wavelength :  $\lambda_g$ ) และค่าคงตัวสภาพยอมประสิทธิผล (effective permittivity :  $\epsilon_e$ ) ได้ดังนี้

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta}$$

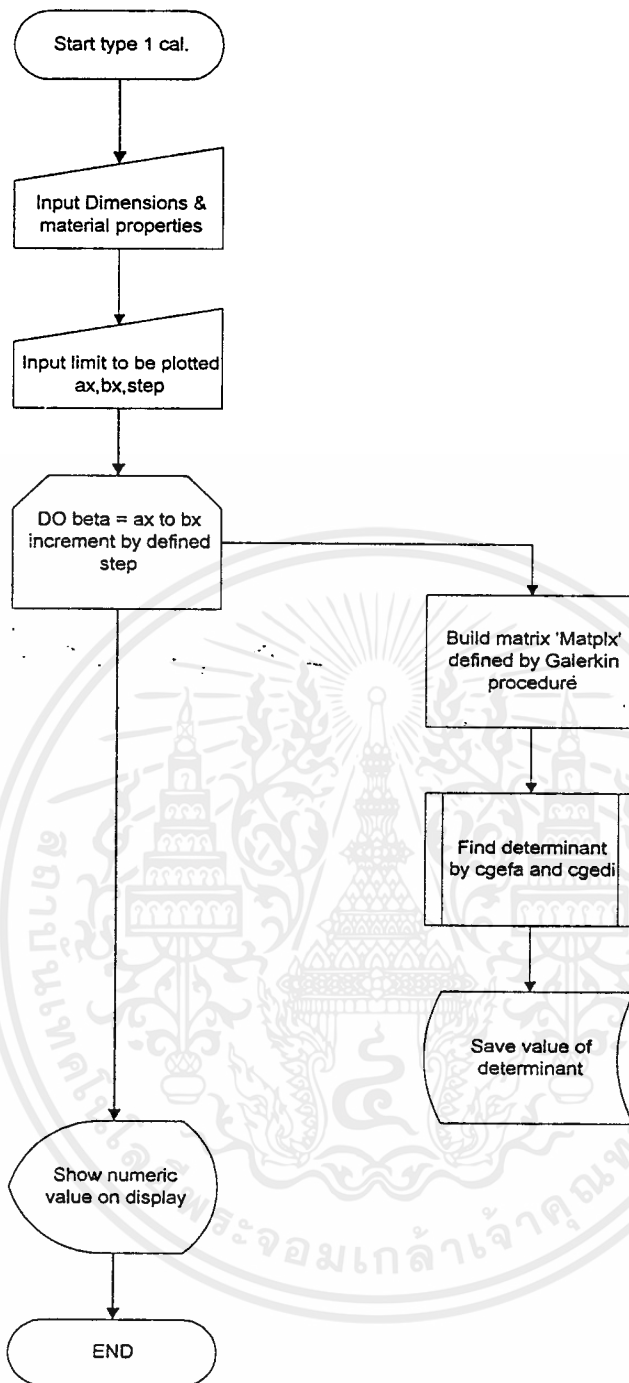
$$\epsilon_e = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_g} \right)^2 \quad (3.1-13)$$

### 3.1.5 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ

ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วยภาษาฟอร์แทรน (FORTRAN) เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของสมการ (3.1-6) คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ค่าความยาวคลื่นในสายส่ง ค่าคงตัวสภาพยอมประสิทธิผล และค่า  $|S_{11}|$  ของวงจรสายส่งที่ใช้ทดสอบการคำนวณ โดยโปรแกรมที่สมบูรณ์แสดงในภาคผนวก ก.

โปรแกรมหักแบ่งการทำงานหลักออกเป็น 3 แบบด้วยกัน คือ

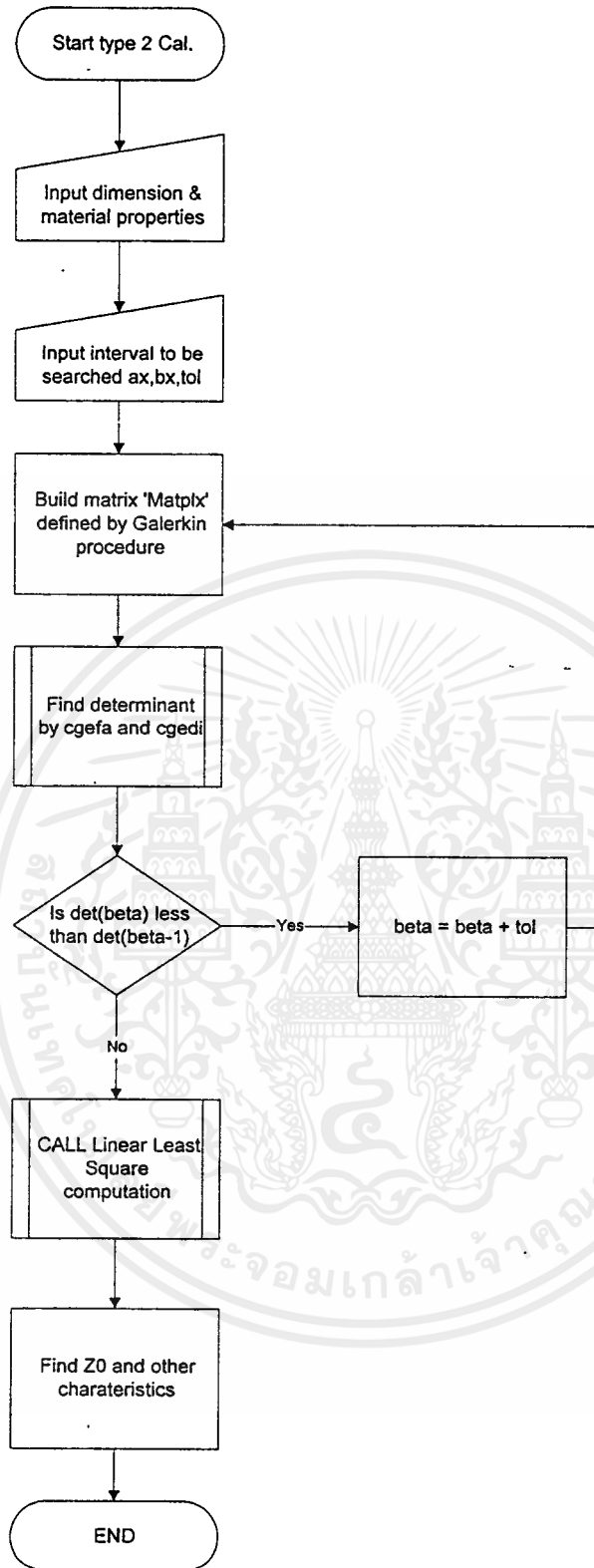
1. คำนวณแนวโน้มน้ำค่าดีเทอร์มิแนนต์ของสมการ (3.1-6) ในช่วง  $\beta$  ที่กำหนด โดยสามารถกำหนดความละเอียดในการคำนวณได้ เพื่อจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า  $\beta$  โดยละเอียดต่อไป สำหรับค่าที่ได้จะเก็บในลักษณะของไฟล์ตัวอักษร (text file) ซึ่งสามารถนำไปวาด (plot) โดยใช้โปรแกรมกราฟทั่วๆ ไปได้ ผังงาน (flow chart) ของโปรแกรมในส่วนนี้แสดงได้ดังรูป 3.1-2



รูปที่ 3.1-2 ฟังงานของโปรแกรมในส่วนการคำนวณแนวโน้มของค่าดีเทอร์มิแนนต์

2.คำนวณหาค่า  $\beta$  โดยละเอียดในช่วงที่กำหนด ซึ่งได้จากการพิจารณารูปที่ได้จากข้อ 1 ด้วยวิธีการค้นหาโดยตรง (direct search) เพื่อหาค่า  $\beta$  ที่ให้ค่าดีเทอร์มิแนนต์มีค่าใกล้เคียงศูนย์ที่สุด และแสดงผลการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติ ค่าความยาวคลื่นในสายส่ง และค่าคงตัวสภาพยอมประสิทธิผล ฟังงานของโปรแกรมในส่วนนี้คือ

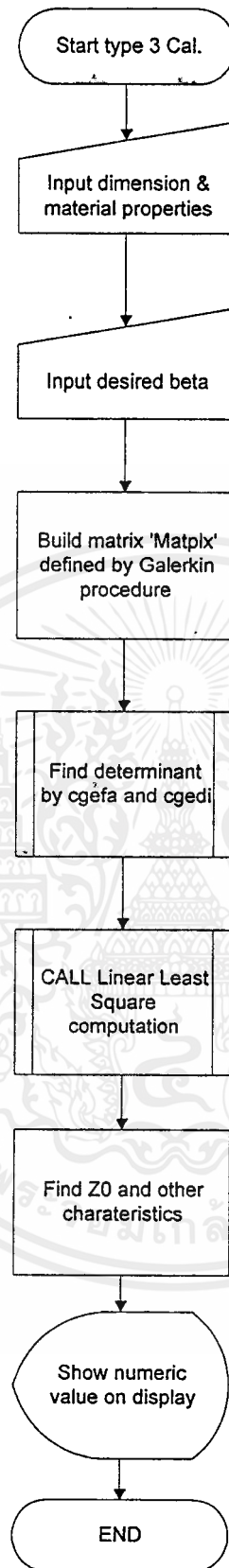
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1-3 ฟังก์ชันของโปรแกรมในส่วนการคำนวณหาค่า  $\beta$

3.คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ค่าความยาวคลื่นในสายส่งและค่าคงตัวสภาพยอมประสิทธิผล เมื่อทราบค่า  $\beta$  ที่ถูกต้องแล้ว ฟังก์ชันของโปรแกรมในส่วนสุดท้ายสามารถแสดงได้ดังรูป

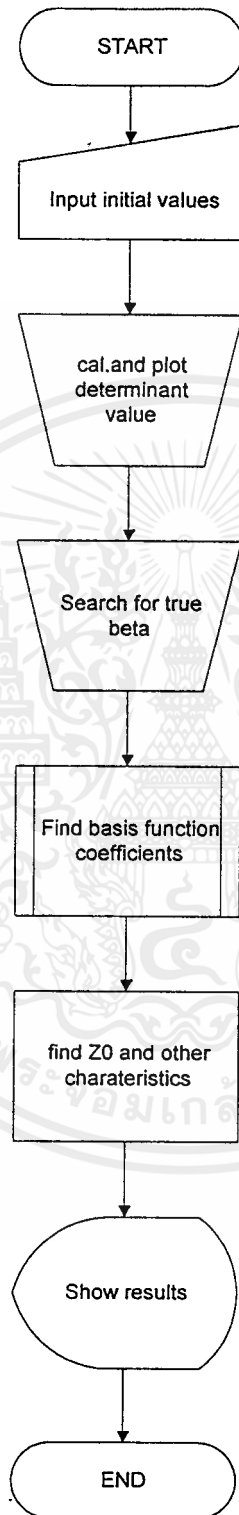
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1-4 ผังงานของโปรแกรมในส่วนการหาค่าลักษณะเฉพาะเมื่อทราบค่า  $\beta$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทำงานใน 3 ส่วนดังกล่าวของโปรแกรมจะสามารถวิเคราะห์หาคูณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้นได้โดยมีวิธีการโดยสรุปดังรูป



รูปที่ 3.1-5 ขั้นตอนโดยสรุปในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์หาคูณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบโปรแกรมดังกล่าว ได้มีการเรียกใช้โปรแกรมย่อยมาตรฐาน (standard subprogram) ในบางขั้นตอนในวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical analysis) เพื่อประสิทธิภาพและความถูกต้องในการคำนวณดังต่อไปนี้

โปรแกรมย่อย	แพ็คเกจ (package)	การใช้งาน
besj0	SLATEC, VECLIB*	คำนวณหาค่าของฟังก์ชัน Bessel ชนิดที่ 1 ลำดับ 0
cgefa และ cgedi	LAPACK	คำนวณหาค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์เชิงสี่เหลี่ยมจัตุรัสใดๆ
cgels	LAPACK	คำนวณผลเฉลยของระบบสมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด
qags	QUADPACK	อินทิเกรตฟังก์ชันที่อาจมีค่าเอกฐานระหว่างช่วงการอินทิเกรต

\* Convex mathematical library

### รูปที่ 3.1-6 โปรแกรมย่อยมาตรฐานที่เรียกใช้ในโปรแกรม

โดยทั่วไปโปรแกรมย่อยดังกล่าวจะมีติดตั้งไว้พร้อมกับตัวแปลภาษาฟอร์แทรน (FORTRAN compiler) ในเครื่องระดับเวิร์กสเตชัน (work station) ทั่วไป สำหรับในปัญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการแปล (compile) และประมวลผล (process) โปรแกรม บนเครื่อง HP-Convex Exemplar SPP-1000 ซึ่งเป็นเครื่องระดับซูเปอร์คอมพิวเตอร์ (super computer) อย่างไรก็ดี รายละเอียดวิธีการใช้งานโปรแกรมย่อยมาตรฐานดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข. รวมทั้งส่วนของโปรแกรมย่อย qags.f ซึ่งมีได้ติดตั้งไว้บนคอมพิวเตอร์ดังกล่าว

```

Telnet - nawamas.kmutt.ac.th
fc -o multmp.exe *.o -llapack -lveclib
multmp.exe
Enter frequency <GHz>:
4
----- Main Menu -----
1 = PLOT DEI v.s. beta between given interval
2 = FIND beta which performs minimum of DEI and find Z0
3 = FIND Z0 and other characteristics of the given beta
Enter your choice :
3
Enter beta
130.6183
DEI is 4.27827E-05
MAT( 1, 1) = (.05,08881E-03)
MAT( 1, 2) = (.3628793,.0)
MAT( 2, 1) = (.3628793,.0)
MAT( 2, 2) = (.8,-25.8683)
X( 1) = (1.0,.0)
X( 2) = (.0,-1.40280E-02)
info = 0
---RESULT NO ERROR---
P = (2.37258E-03,.0)
l0 = (9.73874E-03,.0)
error = 0
Z0 = (50.03164,.0)
Guided wavelength = (4.81034E-02,.0)
Effective permittivity = (2.43092,.0)
S11 = (-69.9972,.0) dB

```

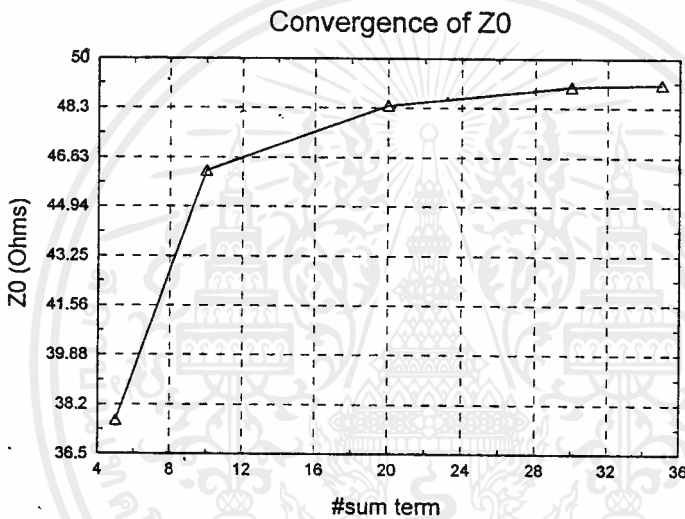
### รูปที่ 3.1-7 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 พฤติกรรมการลู่เข้า (convergence) ของผลเฉลย

เนื่องจากการคำนวณโดยใช้โครงสร้างที่ถูกปิดล้อมด้วยผนังตัวนำ ทำให้ค่าของ  $\alpha$  มีค่าเป็นช่วงๆ จึงสามารถพิจารณาการอินทิเกรตให้เป็นผลรวมของค่าที่เป็นช่วงๆ นั้นได้ อย่างไรก็ตาม การหาผลรวมดังกล่าวทางทฤษฎีนั้น จะต้องทำการหาผลรวมตั้งแต่  $n$  มีค่า เป็น  $-\infty$  จนถึง  $\infty$  แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ เนื่องจากปัญหาข้อจำกัดของค่าของตัวแปรที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ อย่างไรก็ตาม ก็ไม่มีความจำเป็นจะต้องหาผลรวมในช่วงที่กว้างมากดังกล่าว เพราะผลเฉลยมีพฤติกรรมที่ลู่เข้า ซึ่งการลู่เข้าของผลเฉลยนั้นจะขึ้นอยู่กับ (1) จำนวนเทอมที่ใช้ในการหาผลรวม และ (2) จำนวนเทอมของฟังก์ชันฐาน

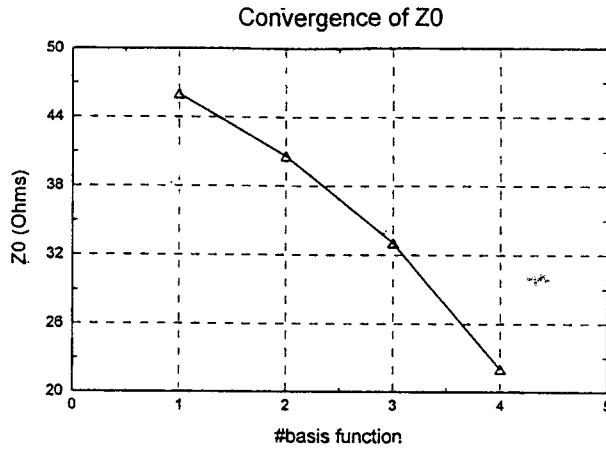
ในหัวข้อนี้ ได้ทดลองคำนวณหาพฤติกรรมการลู่เข้าของผลเฉลย โดยการพิจารณาการลู่เข้าของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เมื่อมีการเพิ่มจำนวนเทอมของการหาผลรวม และจำนวนเทอมของฟังก์ชันฐาน ได้ผลการคำนวณดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2-1 พฤติกรรมการลู่เข้าของ  $Z_0$  เมื่อเพิ่มจำนวนเทอมของผลรวม

( $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \epsilon_{r3} = 1.00, 2.54, 2.54$   $h_1, h_2, h_3 = 10.0, 0.5, 0.5$  mm ตามลำดับ

และ  $W = 2.872$  mm #basis term = 1 frequency = 4 GHz)



รูปที่ 3.2-2 พฤติกรรมการลู่เข้าของ  $Z_0$  เมื่อเพิ่มจำนวนเทอมของฟังก์ชันฐาน

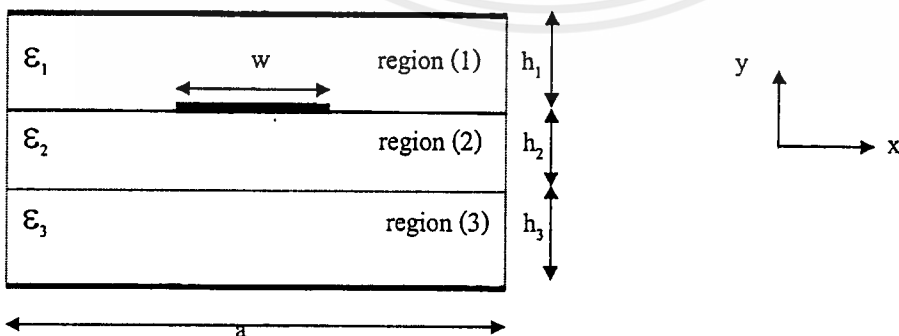
( $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \epsilon_{r3} = 1.00, 2.54, 2.54$   $h_1, h_2, h_3 = 10.0, 0.5, 0.5$  mm ตามลำดับ

และ  $W = 2.872$  mm #summation term = 10 frequency = 4 GHz)

จากกราฟในรูปทั้งสองพบว่า ผลเฉลยจะมีการลู่เข้าเมื่อมีการเพิ่มจำนวนเทอมของผลรวม แต่มีแนวโน้มจะลู่ออกเมื่อมีการเพิ่มจำนวนเทอมของฟังก์ชันฐาน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเพิ่มจำนวนเทอมของฟังก์ชันฐานนั้นทำให้ฟังก์ชันฐานมีลักษณะไม่สอดคล้องกับลักษณะของกระแสจริงในไมโครสตริป ดังนั้นในการคำนวณหาคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปในปริภูมิพหุนามนี้ จึงได้เลือกใช้จำนวนเทอมของฟังก์ชันฐาน 1 เทอม และจำนวนผลรวม 35 เทอมด้วยเหตุผลดังที่กล่าวนี้

### 3.3 ผลการคำนวณออกแบบสายส่งไมโครสตริปแบบชั้นเดียว (single layer microstrip)

ในหัวข้อนี้ ได้ทำการคำนวณออกแบบสายส่งไมโครสตริปแบบชั้นเดียวดังรูป 3.3-1 โดยใช้วิธีอิมมิตแตนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม เปรียบเทียบกับการคำนวณออกแบบโดยใช้สูตรเชิงประสบการณ์ และออกแบบโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป TxLine™



รูปที่ 3.3-1 สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว

(สเปกตรเทคนิคเทฟลอน หนา 1.550 mm  $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, \epsilon_{r3} = 1, 2.55, 2.55$   $h_1, h_2, h_3 = 10.000, 0.775, 0.775$  mm

$W = 2.872$  mm  $a = 49.650$  mm และ frequency = 4 GHz)

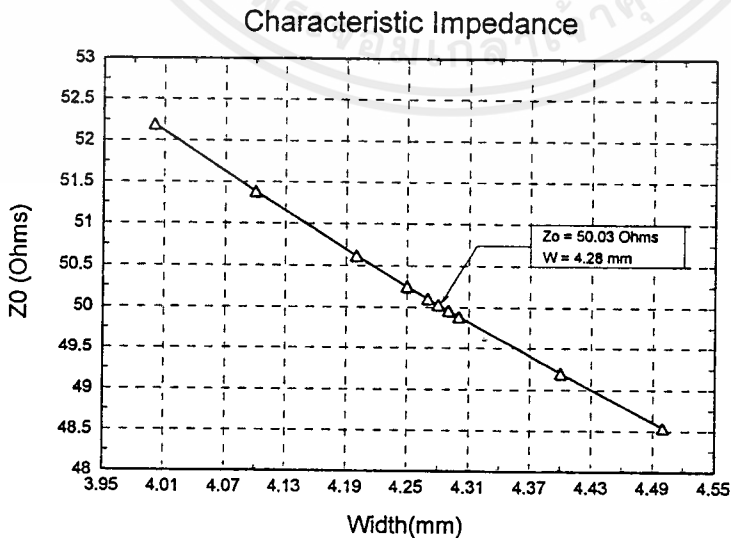
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมนั้นจะต้องทำการสมมติค่า  $W$  ขึ้นก่อน ซึ่งอาจได้มาจากการประมาณโดยใช้สูตรเชิงประสพการณ์ จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนค่า  $W$  ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ต้องการ ในการออกแบบในปริภูมิตวินนี้ ต้องการออกแบบสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียวโดยมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 50 โอห์ม ที่ความถี่ 4 GHz ได้ผลการคำนวณดังตารางในรูป 3.3-2

W (mm)	$\beta$ (rad/m)	$Z_0$ (Ohms)
4.00	122.8903	52.19087
4.10	123.0041	51.38149
4.20	123.1146	50.61564
4.25	123.1685	50.24783
4.27	123.1899	50.10241
<b>**4.28**</b>	123.2006	50.02999
4.29	123.2113	49.95988
4.30	123.2219	49.88732
4.40	123.3270	49.19660
4.50	123.4308	48.53456

รูปที่ 3.3-2 ผลการคำนวณออกแบบสายส่งไมโครสตริปแบบชั้นเดียวโดยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม

จากตารางดังกล่าวจะเห็นว่า ขนาดของสายส่งไมโครสตริปที่ต้องการคือ  $W = 4.28$  mm และจะสามารถแสดงผลของขนาด  $W$  ที่มีผลต่ออิมพีแดนซ์คุณลักษณะของไมโครสตริปได้ดังนี้



รูปที่ 3.3-3 ขนาดของ  $W$  ที่มีผลต่ออิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

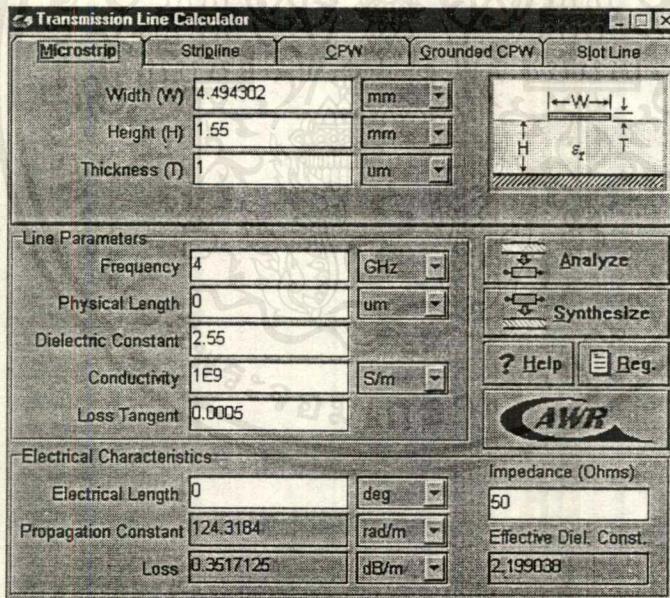
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้น ได้ทำการออกแบบสายส่งไมโครสตริปที่มีคุณลักษณะดังที่ต้องการ ด้วยวิธีอื่นๆ อีก 2 วิธี ได้แก่ (1) การออกแบบโดยใช้สูตรเชิงประสบการณ์ ซึ่งกล่าวรายละเอียดไว้ในภาคผนวก จ. (2) การออกแบบโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป TxLine™ ซึ่งนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการออกแบบข้างต้นได้ดังนี้

วิธี คุณลักษณะ	โดเมนเชิงสเปกตรัม	สูตรเชิงประสพ การณ์	โปรแกรมสำเร็จรูป TxLine™
$W$ (mm)	4.28	5.63	4.49
$Z_0$ (ohms)	50.03	50.00	50.00
$\epsilon_r$	2.16	2.14	2.20
$\lambda_g$ (mm)	51.00	51.21	-
$\beta$ (rad/m)	123.20	122.70	124.32

รูปที่ 3.3-4 ผลการเปรียบเทียบการออกแบบโดยวิธีต่างๆ

จากผลการออกแบบ จะได้ทำการสร้างชิ้นงานเพื่อทดสอบทฤษฎีต่อไปในบทที่ 4



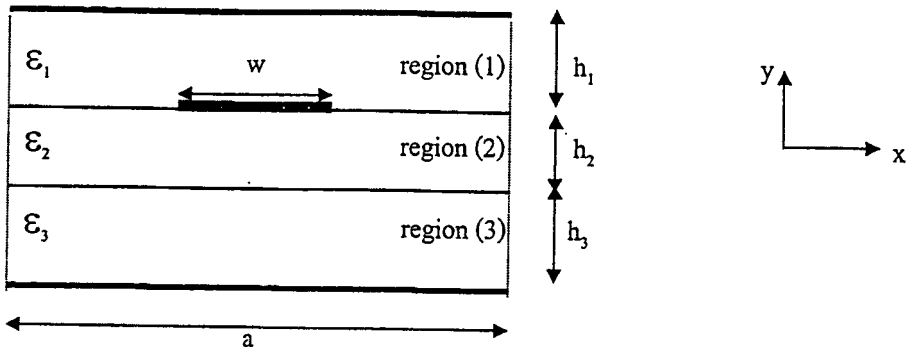
รูปที่ 3.3-5 โปรแกรมสำเร็จรูป TxLine™ ที่ใช้ในการออกแบบสายส่งไมโครสตริป

### 3.4 ผลการคำนวณออกแบบ และวิเคราะห์คุณลักษณะของไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น

สำหรับในหัวข้อนี้จะได้แสดงผลการคำนวณออกแบบสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น

ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



region (1) : Air	$\epsilon_{r1} = 1.00$	$h_1 = 10.00$ mm	$a = 49.65$ mm
region (2) : Teflon	$\epsilon_{r2} = 3.30$	$h_2 = 1.60$ mm	
region (3) : RT-Duroid	$\epsilon_{r3} = 2.10$	$h_3 = 0.75$ mm	

รูปที่ 3.4-1 สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น

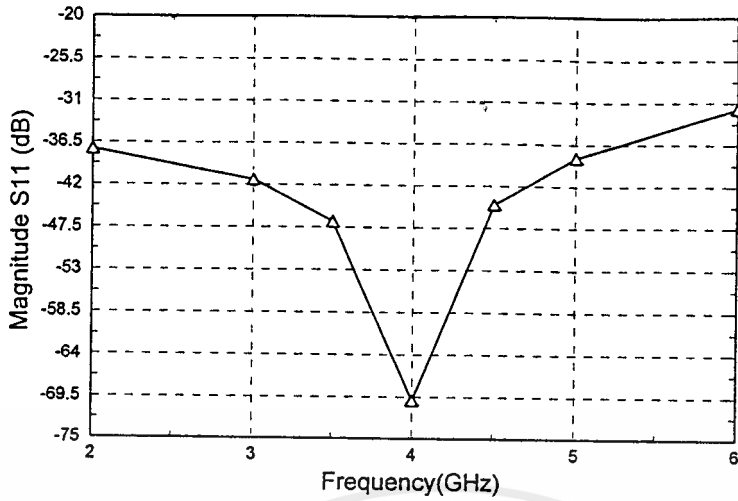
โดยการออกแบบด้วยวิธีอิมิตแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม  
โครงสร้างแบบหลายชั้นดังนี้

จะได้คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มี

ความกว้างของไมโครสตริป ( $W$ )	6.20	mm
อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ( $Z_0$ )	50.03	Ohms
ความยาวคลื่นในสายส่ง ( $\lambda_g$ )	48.10	mm
ค่าคงตัวสภาพยอมประสิทธิผล ( $\epsilon$ )	2.43	
ค่าคงตัวการแพร่กระจาย ( $\beta$ )	130.61	

รูปที่ 3.4-2 คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้นที่ได้ออกแบบ

นอกจากนั้น ได้ทดลองทำการวิเคราะห์หาคุณลักษณะทางความถี่ของสายส่งไมโครสตริปที่ได้ออกแบบ โดยทำนายคุณลักษณะของ  $|S_{11}|$  ที่ความถี่ตั้งแต่ 2-6 GHz เพื่อจะได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบทฤษฎีต่อไปในบทที่ 4 จากการคำนวณจะได้คุณลักษณะทางความถี่ดังนี้



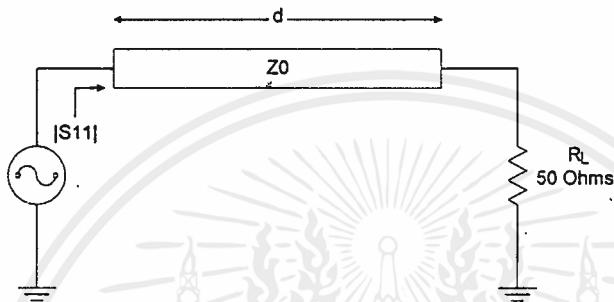
รูปที่ 3.4-3 คุณลักษณะทางความถี่ของสายส่งไมโครสตริปที่ได้ออกแบบ



## บทที่ 4

## ผลการทดลอง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลการทดลองวัดคุณลักษณะของไมโครสตริปทั้งแบบโครงสร้างชั้นเดียวและแบบโครงสร้างหลายชั้น เพื่อทดสอบผลการออกแบบทางทฤษฎีที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 การวัดคุณลักษณะของไมโครสตริปทำได้โดยการวัดหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ จากค่า  $|S_{11}|$  เมื่อทำการต่อไมโครสตริปดังกล่าวเป็นวงจรสายส่งคังรูป

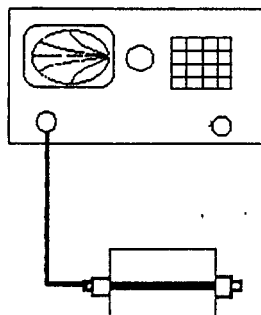


รูปที่ 4-1 วงจรสายส่งที่ใช้ในการวัดคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป

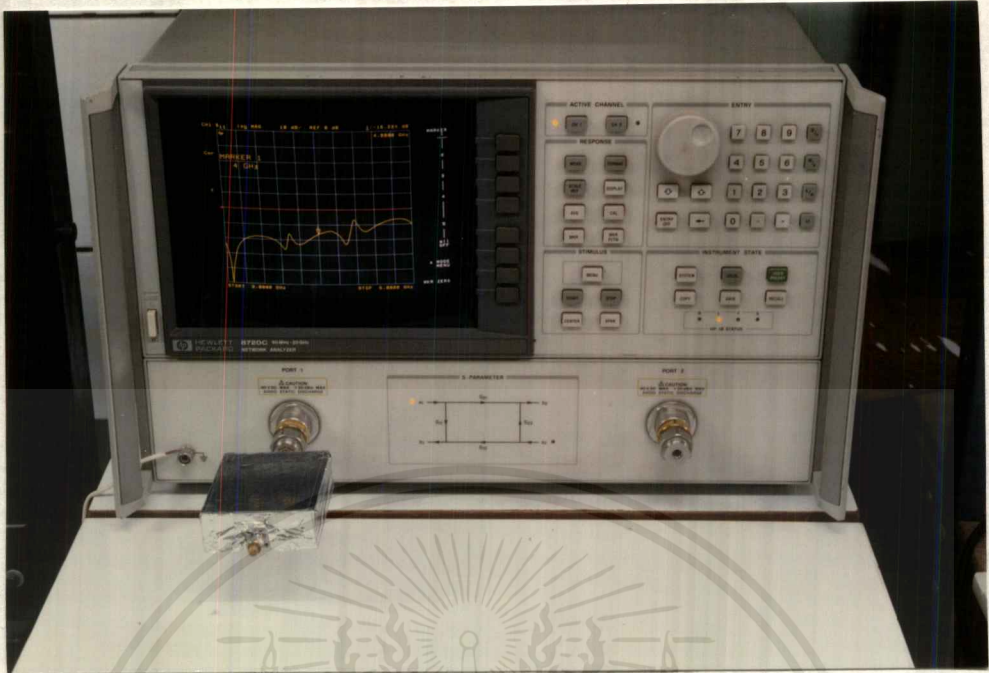
และใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) ในการวัดอิมพีแดนซ์ทางด้านเข้า (input impedance) และค่า  $|S_{11}|$  ซึ่งจะสามารถใช้ทฤษฎีสายส่งทั่วไปในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์คุณลักษณะได้ สำหรับในปริณญาณิพนธ์นี้ ได้ทำการสร้างสายส่งไมโครสตริปโดยอาศัยแบบที่ได้จากการคำนวณในบทที่ 3 ใน 2 แบบด้วยกัน คือ

- (1) โครงสร้างแบบชั้นเดียว ซึ่งได้ทำการออกแบบโดยใช้วิธีการอิมิตแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม วิธีใช้สูตรเชิงประสบการณ์ และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป TxLine™ การทดลองเพื่อทดสอบทฤษฎีนี้จะได้กล่าวในหัวข้อ 4.1
- (2) โครงสร้างแบบหลายชั้น ซึ่งออกแบบโดยใช้วิธีการโดเมนเชิงสเปกตรัม การทดลองเพื่อทดสอบทฤษฎีและผลการคำนวณ ทำได้โดยการวัดคุณลักษณะทางความถี่ของสายส่งไมโครสตริปที่ได้สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับการทำนายด้วยการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 4.2

## เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



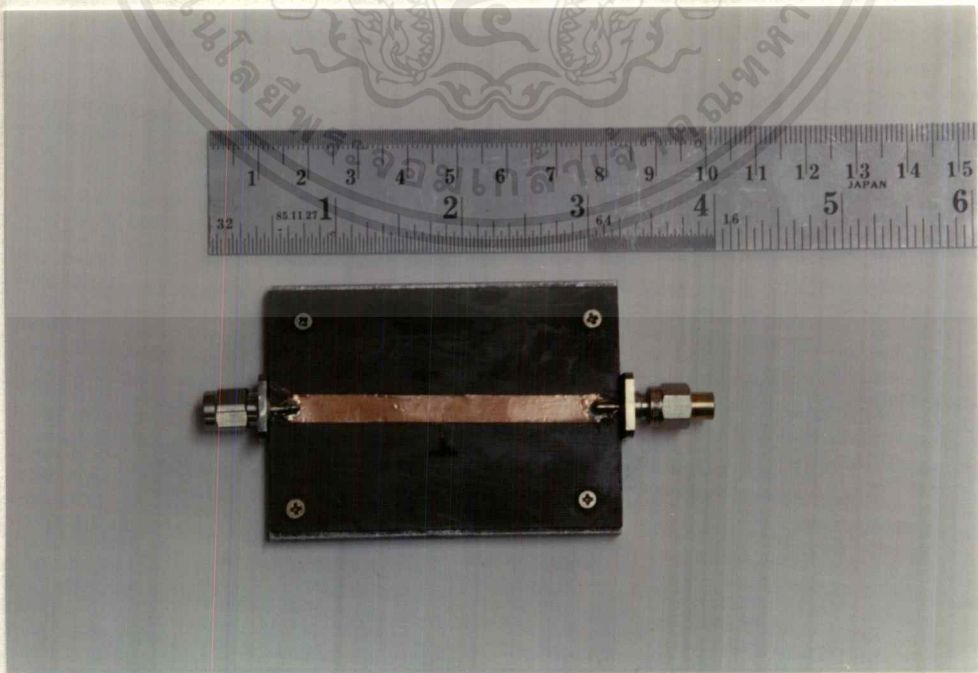
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 การทดลองวัดคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป

#### 4.1 ผลการวัดหาคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว

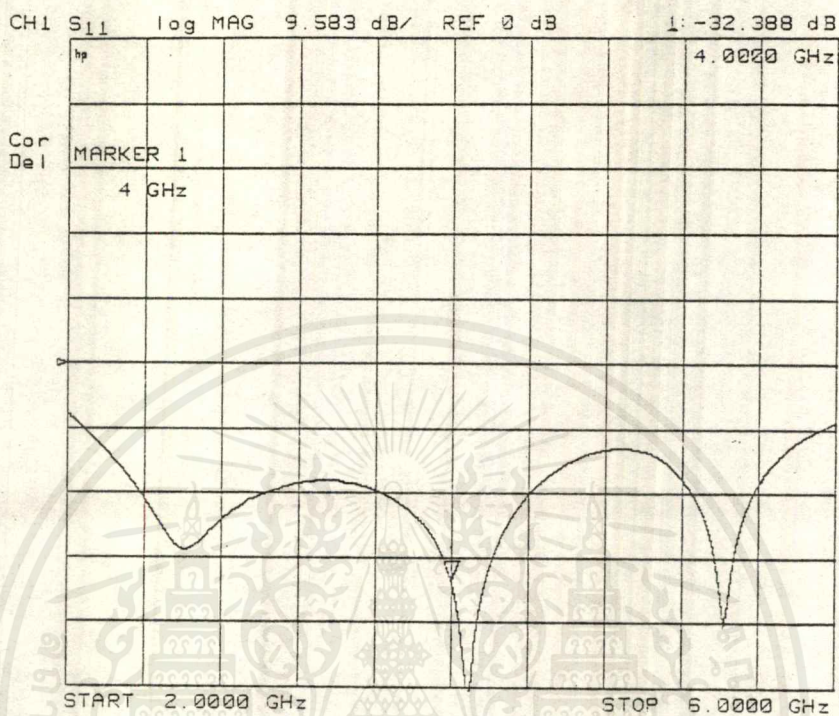
ในหัวข้อนี้ได้ทำการสร้างสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว 2 แบบ แตกต่างกันตามวิธีการออกแบบ ซึ่งได้แก่ (1) วิธีอิมมิตแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม (2) วิธีใช้สูตรเชิงประสบการณ์ และ (3) วิธีออกแบบโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป TxLine™



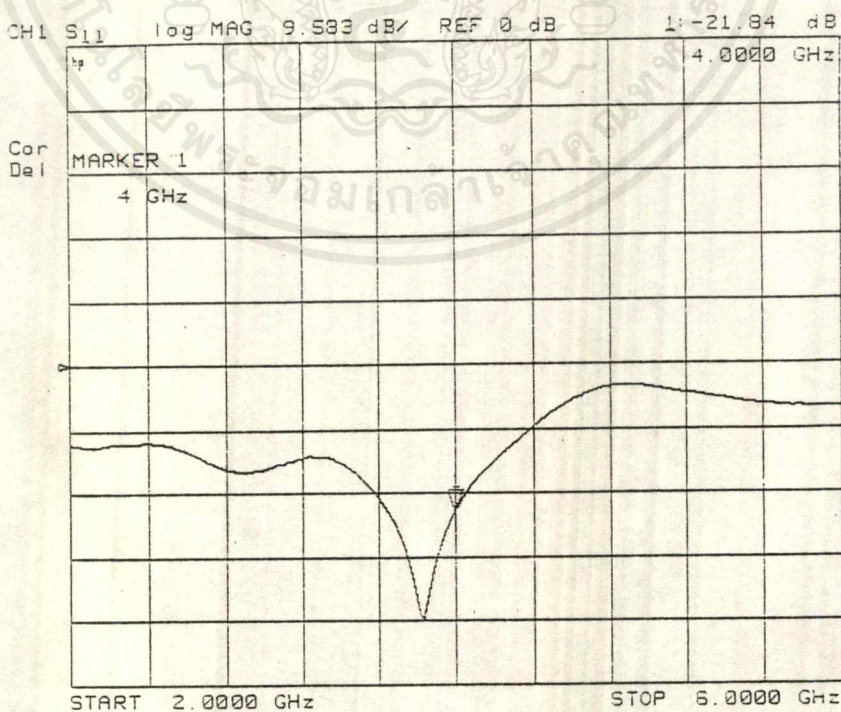
รูปที่ 4.1-1 สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

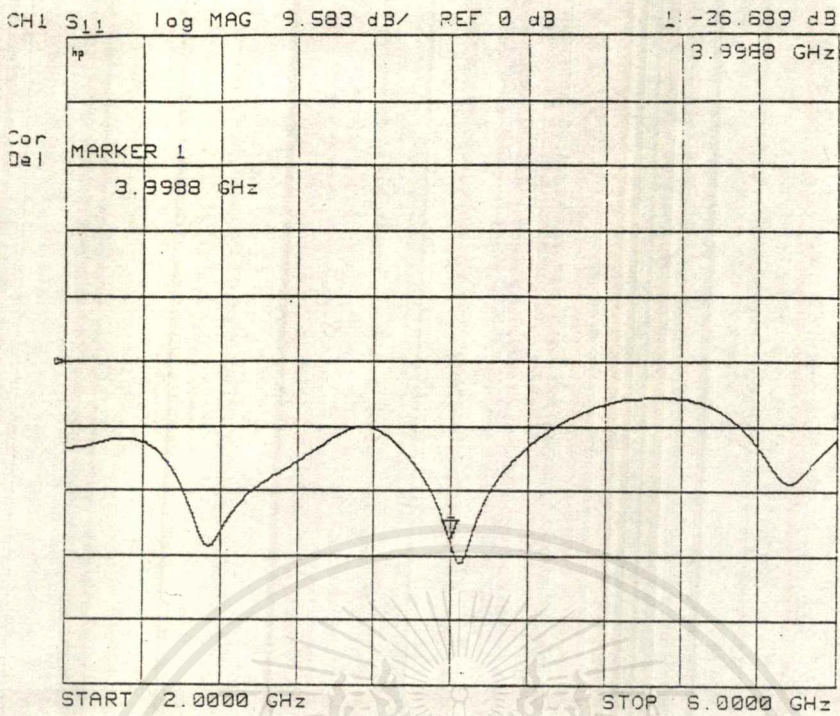
จากการทดลองวัดคุณลักษณะ โดยใช้วงจรสายส่งดังรูป 4-2 จะได้ผลการทดลองวัดค่า  $|S_{11}|$  ดังนี้



(ก) วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
(ข) วิธีใช้สูตรเชิงประสบการณ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) โปรแกรม TxLine™

รูปที่ 4.1-2 ผลการวัด  $|S_{11}|$  ของวงจрсายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว

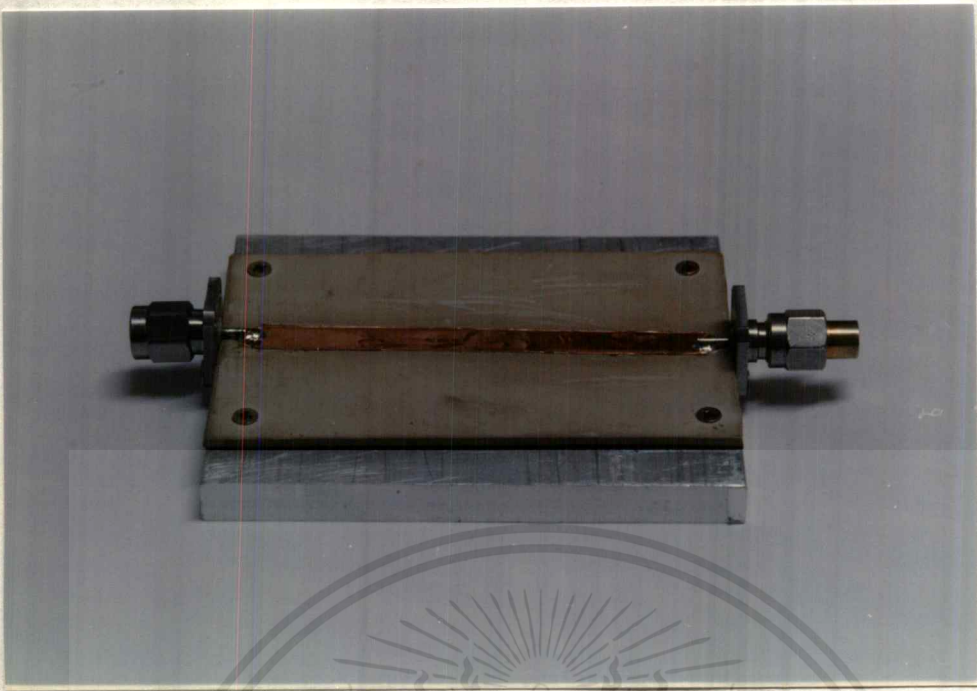
จากผลการทดลองวัด  $|S_{11}|$  จะสามารถนำมาคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเปรียบเทียบกับค่าคำนวณได้ ดังนี้

คุณลักษณะ	วิธี	โดเมนเชิงสเปกตรัม		สูตรเชิงประสพการณ์		TxLine™	
		ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง	ทฤษฎี	ทดลอง
$W$ (mm)		4.28		5.63		4.49	
$ S_{11} $ (dB)		-70.470	-32.388	-	-21.84	-	-26.689
$Z_0$ (Ohms)		50.03	47.65	50.00	42.51	50.00	45.58

รูปที่ 4.1-3 ผลการทดลองวัดหาคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว

#### 4.2 ผลการวัดหาคุณลักษณะของไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น

ในหัวข้อนี้ได้แสดงผลการทดลองวัดหาคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น โดยอาศัยการออกแบบด้วยวิธีอิมมิตแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม



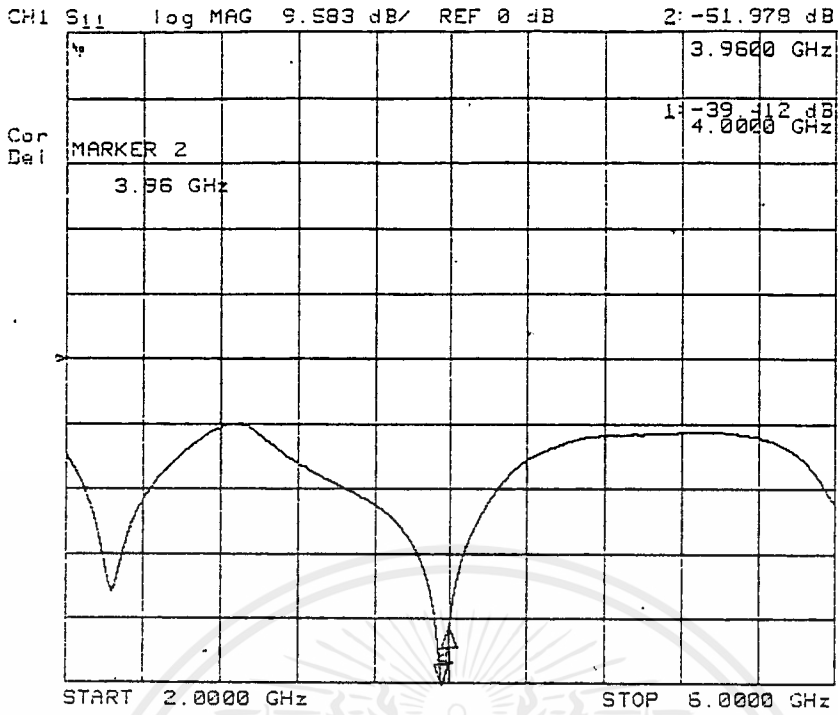
รูปที่ 4.2-1 สายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น

จากการทดลองวัดหาค่าคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปดังกล่าวที่ความถี่ 4 GHz จะได้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี ดังนี้

คุณลักษณะ	ทฤษฎี	ทดลอง
$ S_{11} $ (dB)	-70.47	-39.412
$Z_0$ (Ohms)	50.03	48.94

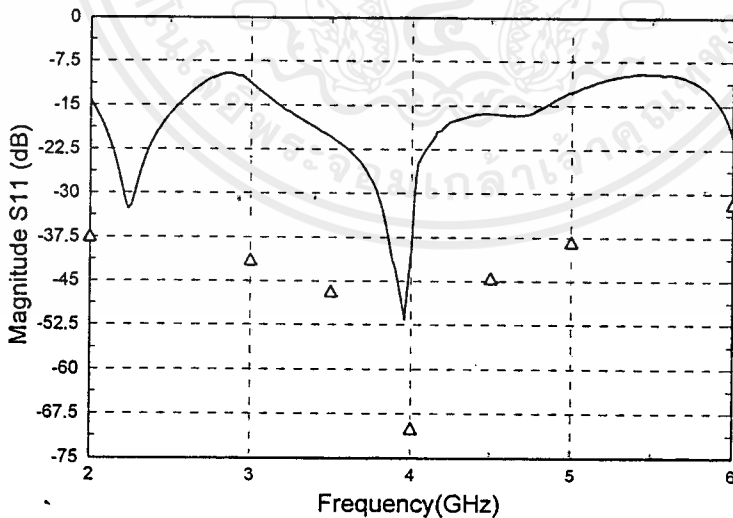
รูปที่ 4.2-2 ผลการทดลองวัดหาค่าคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปแบบหลายชั้น

นอกจากนั้น ยังได้ทำการทดลองวัดหาค่าคุณลักษณะทางความถี่ของสายส่งไมโครสตริปดังกล่าวในช่วงความถี่ 2-6 GHz ได้ผลการวัดค่า  $|S_{11}|$  ดังนี้



รูปที่ 4.2-3 ผลการวัดหาค่า  $|S_{11}|$  ในช่วงความถี่ 2-6 GHz

และได้นำผลการวัดดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับการทำนายด้วยวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม เพื่อทำการทดสอบการคำนวณ ได้ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการทำนายทางทฤษฎีดังรูป



△ ผลการคำนวณ      \_\_\_\_\_ ผลการทดลอง

รูปที่ 4.2-4 คุณลักษณะทางความถี่ของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 สรุปผลการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องในการคำนวณและออกแบบสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว และแบบสองชั้น โดยใช้วิธีอิมิตแดนซ์ในโดเมนเชิงสเปกตรัมพบว่าผลการวัดมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการคำนวณ ซึ่งสามารถพิสูจน์ความถูกต้องของการคำนวณได้

สำหรับการออกแบบสายส่งไมโครสตริปแบบชั้นเดียว ซึ่งเป็นสายส่งไมโครสตริปที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป ได้ทำการออกแบบเปรียบเทียบกันโดยใช้วิธีการ 3 วิธี คือ (1) โดเมนเชิงสเปกตรัม (2) วิธีใช้สูตรเชิงประสบการณ์ และ (3) การใช้โปรแกรมสำเร็จรูป TxLine™ จากการทดลองพบว่าวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม ให้ผลในการออกแบบที่ดีที่สุด คือ ให้ค่า  $|S_{11}|$  ต่ำที่สุดที่ความถี่ที่ต้องการออกแบบ

ผลการทดลองวัดคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น ซึ่งได้ถูกออกแบบโดยใช้วิธีโดเมนเชิงสเปกตรัม ให้ผลการทดลองที่ดี กล่าวคือ ได้ค่าอิมิตแดนซ์คุณลักษณะจากการทดลองใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ นอกจากนั้นในการวัดหาคุณลักษณะทางความถี่เปรียบเทียบกับการทำนายทางทฤษฎี ก็ได้ผลที่มีแนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน



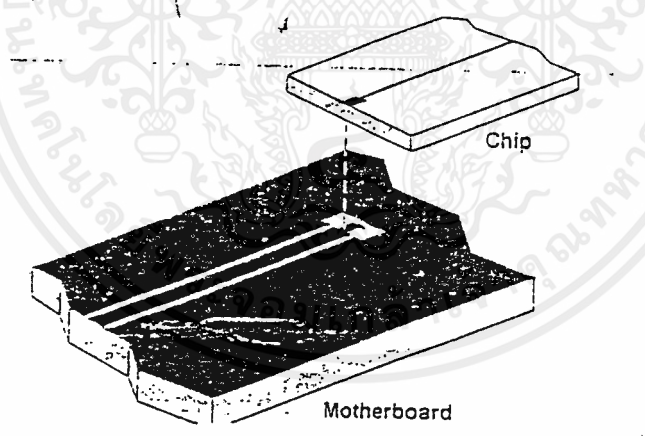
บทที่ 5  
บทสรุป

ในการวิเคราะห์หรือออกแบบอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบ ที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้นนั้น สามารถทำได้โดยการใช้วิธีวิเคราะห์ในโดเมนเชิงสเปกตรัม ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ (1) วิธีทั่วไป และ (2) วิธีอิมมิตแดนซ์ สำหรับวิธีหลังนั้น เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ หรือออกแบบมากกว่า เนื่องจากสามารถลดขั้นตอนในการวิเคราะห์หาสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยปัญหาเงื่อนไขขอบเขตออกไปได้ ดังนั้น การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อน ก็จะสามารถทำได้สะดวกขึ้น ส่วนผลเฉลยของสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถหาได้โดยการใช้วิธีของ Galerkin

การคำนวณทางคณิตศาสตร์ในวิธีการนี้ จำเป็นต้องใช้การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีขั้นตอนการคำนวณที่ซับซ้อน และจะสามารถประมวลผลได้เร็วขึ้นหากมีการเลือกใช้โปรแกรมย่อมาตรฐานสำหรับการคำนวณเชิงเลขที่มีประสิทธิภาพดี

การทดลองเพื่อทดสอบการคำนวณและออกแบบได้ผลดี กล่าวคือ สามารถทำนายคุณลักษณะต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบได้ใกล้เคียง และให้แนวโน้มไปในลักษณะเดียวกัน

นอกจากนั้นวิธีโดเมนเชิงสเปกตรัมยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณวิเคราะห์ และออกแบบอุปกรณ์ไมโครเวฟเชิงระนาบที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น อาทิเช่น การออกแบบการคัปปลิง (coupling) ระหว่างสายส่งไมโครสตริปและท่อนำคลื่นเชิงระนาบร่วม [12] ซึ่งได้ถูกเสนอโดย John J. BURKE โดยมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 5-1 การคัปปลิงระหว่างสายส่งไมโครสตริปและท่อนำคลื่นเชิงระนาบร่วม

การคัปปลิงดังกล่าว ได้รับการออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างชิพวงจรรวมทางไมโครเวฟ และแผ่นวงจรหลัก (mother board) ทดแทนการเชื่อมต่อด้วยลวดตัวนำ โดยวิธีการดังกล่าวสามารถทำนายและออกแบบคุณลักษณะที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ยังมีคุณลักษณะที่ดีกว่าการเชื่อมต่อด้วยลวดตัวนำ เมื่อใช้งานที่ความถี่สูงมากๆ

สายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น เช่น สายอากาศแบบแอคทีฟ (active antenna) ก็สามารถนำวิธีการโดเมนเชิงสเปกตรัมไปประยุกต์ในการวิเคราะห์และออกแบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริป

ในบทนี้ได้แสดงรายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น โปรแกรมดังกล่าวเขียนโดยใช้ภาษาฟอร์แทรน บนเครื่อง HP-Convex Exemplar SPP-1000 ซึ่งเป็นเครื่องระดับซูเปอร์คอมพิวเตอร์ สำหรับโปรแกรมนี้ได้มีการเรียกใช้โปรแกรมย่อยมาตรฐาน ในการคำนวณเชิงตัวเลขบางอย่าง ซึ่งโดยทั่วไปโปรแกรมย่อยมาตรฐานดังกล่าวจะถูกติดตั้งมาในไลบรารีทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรภาษาฟอร์แทรนในเครื่องคอมพิวเตอร์ระดับเวิร์กสเตชันทั่วไป ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดในการใช้งานโปรแกรมย่อยมาตรฐานดังกล่าวในภาคผนวก ข.

## Program SDA\_Microstrip

```
*****
* The aim of this program is to calculate characteristics of the multi*
* layer microstrip transmission line by using Spectral Domain *
* Immittance Approach (Immittance SDA).For convenience in calculating *
* and writing computer program,that transmission line has been assumed*
* to be a lossless one. *
*
* Note:program will call standard mathematical functions and *
* subroutine listed below: *
*     besj0,cgefa,cgedi,cgels,and qags *
* All of them should be installed in general FORTRAN Mathematical *
* library.If it has no such a subprogram done,it will be obtained *
* in www.netlib.org *
*
* Authors:- *
*     N.Kurukitkoson and A.Pongsaruth *
*     Senior students in Department of Telecommunication Engineering *
*     Faculty of Engineering,KMITL *
*****
```

```
COMPLEX h1,h2,h3,W,a
COMPLEX Epsi1,Epsi2,Epsi3,Mu1,Mu2,Mu3
COMPLEX Sgma1,Sgma2,Sgma3,k1,k2,k3
COMPLEX PIE,J
COMPLEX yhat1,yhat2,yhat3,zhat1,zhat2,zhat3
INTEGER sumterm,expterm

COMPLEX omega,freq,mul0
REAL DETZERO,beta
REAL Det,findmin,ax,bx,TOL,value
COMMON /DIM/h1,h2,h3,W,a
COMMON /MATERIAL/Epsi1,Epsi2,Epsi3,k1,k2,k3
COMMON /INIT/yhat1,yhat2,yhat3,zhat1,zhat2,zhat3
COMMON /ETC/PIE,J,sumterm,expterm
```

```
COMPLEX L
COMMON /COUPL/L
COMMON /FREQUENCY/omega
```

```

INTEGER  choose, count, II, JJ
REAL     step
COMPLEX  Matplx(100,100)

COMPLEX  X(100), Z(2,2), S(2,2)
COMPLEX  Z0, Lamda0, Lamdag, Epeff, GmL, S11
COMMON /BASIS/X
INTEGER  info

EXTERNAL DETZERO

```

```

C--> Input DATA
C--> Dimension in mm

```

```

PRINT *, 'Enter dimension :h1,h2,h3,W,a (mm) '
READ  *, h1,h2,h3,W,a

```

```

mul0 = (1.E-3,0.E0)
h1    = h1*mul0
h2    = h2*mul0
h3    = h3*mul0
W     = W *mul0
a     = a *mul0
L     = L *mul0

```

```

C--> Relative permittivity

```

```

PRINT *, 'Enter relative permittivity in layer 1-3'
READ  *, Epsi1,Epsi2,Epsi3

```

```

mul0 = (8.85418781761E-12,0.E0)
Epsi1 = Epsi1*mul0
Epsi2 = Epsi2*mul0
Epsi3 = Epsi3*mul0

```

```

C--> Relative permeability

```

```

Mu1 = (1.,0.)
Mu2 = (1.,0.)
Mu3 = (1.,0.)

```

```

mul0 = (1.25663706144E-6,0.E0)
Mu1 = Mu1*mul0
Mu2 = Mu2*mul0
Mu3 = Mu3*mul0

```

```

PRINT *, 'Enter number of summation terms:'
READ  *, sumterm

```

```

PRINT *, 'Enter number of basis function expansion terms:'
READ  *, expterm

```

```

PRINT *, 'Enter frequency (GHz):'
READ  *, freq
freq = freq*(1.E9,0.E0)

```

```

C--> Assign constant

```

เอกสาร  $\text{PIE} = \text{PIE}(3.14159265359E0, 0.E0)$  เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
J = (0.E0,1.E0)
```

```
C--> Calculate initial datum
omega = (2.E0,0.E0)*PIE*freq
```

```
mul0 = J*omega
yhat1 = mul0*Epsi1
yhat2 = mul0*Epsi2
yhat3 = mul0*Epsi3
zhat1 = mul0*Mu1
zhat2 = mul0*Mu2
zhat3 = mul0*Mu3
```

```
mul0 = omega*omega
k1 = CSQRT(mul0*Mu1*Epsi1)
k2 = CSQRT(mul0*Mu2*Epsi2)
k3 = CSQRT(mul0*Mu3*Epsi3)
```

```
C--> Calculate beta and characteristics
```

```
PRINT *, '===== Main Menu ====='
PRINT *, '1 = PLOT DET v.s. beta between given interval'
PRINT *, '2 = FIND beta which performs minimum of DET and find Z0'
PRINT *, '3 = FIND Z0 from the given beta'
PRINT *, 'Enter your choice : '
READ *, choose
```

```
IF (choose.EQ.1) GO TO 20
IF (choose.EQ.2) GO TO 30
IF (choose.EQ.3) GO TO 40
GO TO 3
```

```
20 OPEN (99,file='plot.d')
9 FORMAT (I10,F20.5,E20.5)
```

```
PRINT *, 'ENTER THE RANGE TO BE PLOTTED'
READ *, ax, bx
PRINT *, 'Enter increment: '
READ *, step
beta = ax
```

```
count = 0
11 IF (beta.LE.bx) THEN
    count = count + 1
    Det = DETZERO(beta,Matplx)
    WRITE (99,9) count,beta,Det
    PRINT *,beta,Det
    beta = beta + step
    GO TO 11
ENDIF
```

```
CLOSE(99)
GO TO 3
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C=====
C--> Find minimum DET of the given interval and find Z

30 PRINT *, 'Enter limit values and TOL ax,bx,TOL'
   READ *, ax,bx,TOL
   beta = findmin(ax,bx,DETZERO,value,TOL)
   PRINT *, 'beta is ',beta
   PRINT *, 'The value of DET is ',value

   PRINT *, 'DET is ',DETZERO(beta,Matplx)

C--> LSE

CALL LSE(Matplx,expterm,X,info)
DO II=1,2*expterm
  PRINT *, 'X(',II,') = ',X(II)
ENDDO
PRINT *, 'info = ',info

C--> Check LSE error
IF (info.EQ.0) THEN
  PRINT *, '--- LSE RESULT NO ERROR---'
  GO TO 4
ENDIF
PRINT *, '!!! Result ERROR !!!'

GO TO 4

C=====
C--> Calculate Z-parameter

40 PRINT *, 'Enter beta '
   READ *,beta
   Det = DETZERO(beta,Matplx)
   PRINT *, 'DET is ',Det

   DO II=1,2*expterm
     DO JJ=1,2*expterm
       PRINT *, 'MAT(',II,',' ,JJ,') = ',Matplx(II,JJ)
     ENDDO
   ENDDO

C--> LSE

CALL LSE(Matplx,expterm,X,info)
DO II=1,2*expterm
  PRINT *, 'X(',II,') = ',X(II)
ENDDO
PRINT *, 'info = ',info

C--> Check LSE error
IF (info.EQ.0) THEN
  PRINT *, '---RESULT NO ERROR---'
  GO TO 4
ENDIF
PRINT *, '!!! LSE Result ERROR !!!'

GO TO 4

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 CONTINUE

C--> Characteristic Impedance

CALL findZ(beta,Z0)

PRINT \*,'Z0 = ',Z0

Lamda0 = (3.E8,0.)/freq

Lamdag = (2.,0.)\*PIE/beta

Epeff = Lamda0\*Lamda0 / (Lamdag\*Lamdag)

PRINT \*,'Guided wavelength = ',Lamdag

PRINT \*,'Effective permittivity = ',Epeff

GmL = ((50.,0.) - Z0)/((50.,0.) + Z0)

S11 = 20.\*alog10(REAL(CABS(GmL)))

PRINT \*,'S11 = ',S11,' dB'

3 STOP

END

C--> Function calculate DET

REAL FUNCTION DETZERO(betaC,Matplx)

REAL betaC

COMPLEX h1,h2,h3,W,a

COMPLEX Epsi1,Epsi2,Epsi3,Mu1,Mu2,Mu3

COMPLEX Sgma1,Sgma2,Sgma3,k1,k2,k3

COMPLEX PIE,J

COMPLEX yhat1,yhat2,yhat3,zhat1,zhat2,zhat3

INTEGER sumterm,expterm

COMMON /DIM/h1,h2,h3,W,a

COMMON /MATERIAL/Epsi1,Epsi2,Epsi3,k1,k2,k3

COMMON /INIT/yhat1,yhat2,yhat3,zhat1,zhat2,zhat3

COMMON /ETC/PIE,J,sumterm,expterm

COMPLEX alpha,beta

COMPLEX Gm1,Gm2,Gm3,Gmy1,Gmy2,Gmy3,Gmz1,Gmz2,Gmz3

COMPLEX tmp,tmp1,tmp2,tmp3,tmp4,Y1,Y2,Y3,Y4;Yup,Ydown

COMPLEX Ze,Zh

COMPLEX Zxx,Zxz,Zzx,Zzz

COMPLEX Ct1,Ct2,Ct3,Si2,ccoath,csinh

COMPLEX matd(2\*expterm,2\*expterm),mat(2\*expterm,2\*expterm)

COMPLEX Jx,Jz

COMPLEX Jxtmp(2\*expterm)

COMPLEX Jztmp(2\*expterm)

COMPLEX cgefa,cgedi

INTEGER lda,nn,ipvt(2\*expterm),ier,job

COMPLEX det(2),work(2\*expterm),result

COMPLEX Matplx(100,100)

INTEGER m,I,pos,k,n,ld,II,JJ,row

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C--> Initial zero value for matrices
DO II=1,2*expterm
  DO JJ=1,2*expterm
    mat(II,JJ)      = (0.E0,0.E0)
    matd(II,JJ)     = (0.E0,0.E0)
    Matplx(II,JJ)   = (0.E0,0.E0)
  ENDDO
ENDDO

C=====
C  Summation (Integration) over alpha
C=====
DO 10 m = -1*sumterm,sumterm
  alpha = ( (2.E0,0.E0)*m*PIE ) / a
  beta  = CMPLX(betaC)

C--> Define Gamma
tmp = alpha*alpha + beta*beta
Gm1 = CSQRT(tmp - k1*k1)
Gm2 = CSQRT(tmp - k2*k2)
Gm3 = CSQRT(tmp - k3*k3)

Gmy1 = Gm1 / yhat1
Gmy2 = Gm2 / yhat2
Gmy3 = Gm3 / yhat3

Gmz1 = Gm1 / zhat1
Gmz2 = Gm2 / zhat2
Gmz3 = Gm3 / zhat3

C--> define hyperbolic function
Ct1 = ccoth(Gm1*h1)
Ct2 = ccoth(Gm2*h2)
Ct3 = ccoth(Gm3*h3)
Si2 = csinh(Gm2*h2)

C----->Define Ze,Zh<-----
C--> Ze
tmp1 = Gmy2*Ct3 + Gmy3*Ct2
tmp2 = Ct2*Ct3+Ct1*Ct3*Gmy2/Gmy1+Ct1*Ct2*Gmy3/Gmy1+Gmy3/Gmy2
Ze = tmp1/tmp2

C--> Zh
tmp1 = Gmz2*Ct2+Gmz3*Ct3
tmp2 = Gmz1*Gmz2*Ct1*Ct2+Gmz1*Gmz3*Ct1*Ct3+Gmz2*Gmz3*Ct2*Ct3
&      +Gmz2*Gmz2
Zh = tmp1/tmp2

C--> Coordinate transformation
tmp = alpha*alpha + beta*beta
tmp1 = (-1.E0,0.E0)/tmp
tmp2 = alpha*beta*tmp1

Zzz = tmp1*(beta*beta*Ze + alpha*alpha*Zh)
Zzx = tmp2*(Ze - Zh)
Zxz = Zzx
Zxx = tmp1*(alpha*alpha*Ze + beta*beta*Zh)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C-----> Define adder matrix <-----
DO n=1,expterm
  Jxtmp(n) = Jx(alpha,n)
  Jztmp(n) = Jz(alpha,n)
ENDDO

pos = 1
row = 1
DO k=1,expterm
  tmp = Jz(alpha,k)
  DO n=1,expterm
    matd(row,pos) = tmp*Zzz*Jztmp(n)
    matd(row,pos +expterm) = tmp*Zzx*Jxtmp(n)
    pos = pos + 1
  ENDDO
  row = row + 1
  pos = 1
ENDDO

row = expterm + 1
DO k=1,expterm
  tmp = Jx(alpha,k)
  DO n=1,expterm
    matd(row,pos) = tmp*Zxz*Jztmp(n)
    matd(row,pos +expterm) = tmp*Zxx*Jxtmp(n)
    pos = pos + 1
  ENDDO
  row = row + 1
  pos = 1
ENDDO

C--> Summation
DO II=1,2*expterm
  DO JJ=1,2*expterm
    mat(II,JJ) = mat(II,JJ) + matd(II,JJ)
  ENDDO
ENDDO

10 CONTINUE

DO II=1,2*expterm
  DO JJ=1,2*expterm
    mat(II,JJ) = ((2.E0,0.E0)*PIE/a)*mat(II,JJ)
    matplx(II,JJ) = mat(II,JJ)
  ENDDO
ENDDO

nn = expterm * 2
lda = nn
CALL cgefa(mat,lda,nn,ipvt,ier)

job = 10
CALL cgedi(mat,lda,nn,ipvt,det,work,job)

result = det(1)*(10.E0,0.E0)**INT(det(2))
DETZERO = REAL(CABS(result))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

\* ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
RETURN
END
```

C--> Define basis function

```
COMPLEX FUNCTION Jz(alpha,n)
COMPLEX alpha,nn,PIE,J
COMPLEX argL,argR,tmp,tmp1,tmp2,tmp3
COMPLEX cbesj0,Xp
INTEGER n,sumterm,expterm

COMPLEX h1,h2,h3,W,a
COMMON /DIM/h1,h2,h3,W,a
COMMON /ETC/PIE,J,sumterm,expterm
```

```
nn = CMLX(n)
```

```
argL = CABS((0.5E0,0.E0)*W*alpha + (nn - (1.E0,0.E0))*PIE)
argR = CABS((0.5E0,0.E0)*W*alpha - (nn - (1.E0,0.E0))*PIE)
tmp = PIE*W*(0.25E0,0.E0)
```

```
Jz = tmp*(cbesj0(argL) + cbesj0(argR))
RETURN
END
```

```
COMPLEX FUNCTION Jx(alpha,n)
COMPLEX alpha,nn,PIE,J
COMPLEX argL,argR,tmp,tmp1,tmp2,tmp3
COMPLEX cbesj0,Xp
INTEGER n,sumterm,expterm

COMPLEX h1,h2,h3,W,a
COMMON /DIM/h1,h2,h3,W,a
COMMON /ETC/PIE,J,sumterm,expterm
```

```
nn = CMLX(n)
```

```
argL = CABS((0.5E0,0.E0)*W*alpha + nn*PIE)
argR = CABS((0.5E0,0.E0)*W*alpha - nn*PIE)
tmp = PIE*W*(-0.25E0,0.E0)*J
```

```
Jx = tmp*(cbesj0(argL) - cbesj0(argR))
RETURN
END
```

C--> Subroutine to find Z0

```
SUBROUTINE findZ(betain,Z0)

COMPLEX h1,h2,h3,W,a
COMPLEX Epsi1,Epsi2,Epsi3,Mu1,Mu2,Mu3
COMPLEX Sgma1,Sgma2,Sgma3,k1,k2,k3
COMPLEX PIE,J
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
COMPLEX yhat1, yhat2, yhat3, zhat1, zhat2, zhat3
INTEGER sumterm, expterm
```

```
COMMON /DIM/h1, h2, h3, W, a
COMMON /MATERIAL/Epsi1, Epsi2, Epsi3, k1, k2, k3
COMMON /INIT/yhat1, yhat2, yhat3, zhat1, zhat2, zhat3
COMMON /ETC/PIE, J, sumterm, expterm
```

```
COMPLEX Ae, Ah, Be, Bh, Ce, Ch, De, Dh
COMPLEX A1, B1, C1, D1, A2, B2, C2, D2, A3, B3, C3, D3, A4, B4, C4, D4
```

```
COMPLEX Ye1, Ye2, P1, P2, Yh1, Yh2, T, GGe, GGh
COMPLEX L
COMMON /COUPL/L
```

```
COMPLEX X(100), Z0, beta
COMMON /BASIS/X
```

```
EXTERNAL SReJz.
EXTERNAL SImJz
```

```
REAL aa, bb, epsabs, epsrel, abserr, work(100000)
INTEGER neval, ier, limit, lenw, last, iwork(25000)
```

```
REAL Ire, Iim
COMPLEX IO
REAL Ic, Ip
```

```
INTEGER II, JJ, m, n
REAL betain
```

```
COMPLEX Jx, Jz, Je, Jh
COMPLEX JJx, JJz
COMPLEX alpha
COMPLEX tmp, tmp1, tmp2, tmp3, tmp4
COMPLEX Si1, Si2, Si3, Ct1, Ct2, Ct3, Cs1, Cs2, Cs3
COMPLEX csinh, ccoth, ccosh
```

```
COMPLEX omega
COMMON /FREQUENCY/omega
```

```
COMPLEX Eh, Ehd, P
```

```
COMPLEX Gm1, Gm2, Gm3, Gmy1, Gmy2, Gmy3, Gmz1, Gmz2, Gmz3
```

```
COMPLEX Eh1, Eh2, Eh3
```

```
COMPLEX sgn1, sgn2, sgn3
```

```
Eh = (0., 0.)
```

```
C--> Integrate or sum over alpha
DO 10 m = -1*sumterm, sumterm
```

```
alpha = ((2., 0.) * CMLPX(m) * PIE) / a
beta = CMLPX(betain)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
JJx = (0.,0.)
JJz = (0.,0.)
```

C--> Calculate summation of basis function

```
DO n = 1,expterm
  JJz = JJz + X(n)          * Jz(alpha,n)
  JJx = JJx + X(expterm + n) * Jx(alpha,n)
ENDDO
```

C--> Assign Potential coefficient value

```
C=====
C   Calculate Potential coefficient
C=====
```

C--> Define Gamma

```
tmp = alpha*alpha + beta*beta
Gm1 = CSQRT(tmp - k1*k1)
Gm2 = CSQRT(tmp - k2*k2)
Gm3 = CSQRT(tmp - k3*k3)
```

```
Gmy1 = Gm1 / yhat1
Gmy2 = Gm2 / yhat2
Gmy3 = Gm3 / yhat3
```

```
Gmz1 = Gm1 / zhat1
Gmz2 = Gm2 / zhat2
Gmz3 = Gm3 / zhat3
```

C--> Assign hyperbolic function

```
Si1 = csinh(Gm1*h1)
Si2 = csinh(Gm2*h2)
Si3 = csinh(Gm3*h3)
Ct1 = ccoth(Gm1*h1)
Ct2 = ccoth(Gm2*h2)
Ct3 = ccoth(Gm3*h3)
```

C--> Assign Coefficient for C-mode

```
Je = beta *JJz + alpha*JJx
Jh = alpha*JJz - beta *JJx
```

```
P1 = Gmy1/Si2
P2 = Gmy3/Si2
T = Gmz2/Si2
Ye1 = Gmy1*Ct2 + Gmy2*Ct1
Yh1 = Gmz1*Ct1 + Gmz2*Ct2
Ye2 = Gmy2*Ct3 + Gmy3*Ct2
Yh2 = Gmz2*Ct2 + Gmz3*Ct3
GGe = Ye1*Ye2 - P1*P2
GGh = Yh1*Yh2 - T*T
```

```
tmp = (1.,0.)/(alpha*alpha + beta*beta)
Ae = J*tmp*(Gmy2/Si1)*(Ye2/GGe)*Je
Ah = J*tmp*((1.,0.)/Si1)*(Yh2/GGh)*Jh
Be = (-1.,0.)*J*tmp*Gmy3*(P1/GGe)*Je
Bh = J*tmp*(T/GGh)*Jh
Ce = (-1.,0.)*J*tmp*Gmy2*Ct3*(P1/GGe)*Je
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Ch = J*tmp*(Gmz3/Gmz2)*Ct3*(T/GGh)*Jh
De = (-1.,0.)*J*tmp*(Gmy2/Si3)*(P1/GGe)*Je
Dh = J*tmp*((1.,0.)/Si3)*(T/GGh)*Jh

```

```

A1 = J*(alpha*Gmy1*Ae - beta*Ah)
C1 = (-1.,0.)*J*(alpha*Gmy2*Ce + beta*Ch)
A2 = ((1.,0.)/yhat1)*(Gm1*Gm1 + k1*k1)*Ae
C2 = ((1.,0.)/yhat2)*(Gm2*Gm2 + k2*k2)*Ce
A3 = J*(beta*Ae + alpha*Gmz1*Ah)
C3 = J*(beta*Ce - alpha*Gmz2*Ch)
A4 = ((1.,0.)/zhat1)*(Gm1*Gm1 + k1*k1)*Ah
C4 = ((1.,0.)/zhat2)*(Gm2*Gm2 + k2*k2)*Ch
B1 = (-1.,0.)*J*(alpha*Gmy2*Be + beta*Bh)
D1 = (-1.,0.)*J*(alpha*Gmy3*De + beta*Dh)
B2 = ((1.,0.)/yhat2)*(Gm2*Gm2 + k2*k2)*Be
D2 = ((1.,0.)/yhat3)*(Gm3*Gm3 + k3*k3)*De
B3 = J*(beta*Be - alpha*Gmz2*Bh)
D3 = J*(beta*De - alpha*Gmz3*Dh)
B4 = ((1.,0.)/zhat2)*(Gm2*Gm2 + k2*k2)*Bh
D4 = ((1.,0.)/zhat3)*(Gm3*Gm3 + k3*k3)*Dh

```

C--> Calculate Eh

C--> Assign sign of gamma

```

sgn1 = CMPLX(SIGN(1.,REAL(Gm1)))
sgn2 = CMPLX(SIGN(1.,REAL(Gm2)))
sgn3 = CMPLX(SIGN(1.,REAL(Gm3)))

```

C--> Assign hyperbolic value

```

Si1 = csinh(Gm1*h1)
Si2 = csinh(Gm2*h2)
Si3 = csinh(Gm3*h3)
Cs1 = ccosh(Gm1*h1)
Cs2 = ccosh(Gm2*h2)
Cs3 = ccosh(Gm3*h3)

```

C--> Eh1

```

tmp1 = sgn1*(0.5,0.)*A1*CONJG(A4)*(Si1*Cs1/Gm1 - h1)
tmp2 = (0.5,0.)*A2*CONJG(A3)*(Si1*Cs1/Gm1 + h1)
Eh1 = tmp1 - tmp2

```

C--> Eh2

```

tmp1 = sgn2*(0.5,0.)*(C1*CONJG(C4) - B2*CONJG(B3))*(Si2*Cs2/Gm2 - h2)
tmp2 = (0.5,0.)*(B1*CONJG(B4) - C2*CONJG(C3))*(Si2*Cs2/Gm2 + h2)
tmp3 = (0.5,0.)*(C1*CONJG(B4) - B2*CONJG(B3) + sgn2*
& (B1*CONJG(C4) - C2*CONJG(C3)))*Si2*Si2/Gm2
Eh2 = tmp1 + tmp2 + tmp3

```

C--> Eh3

```

tmp1 = sgn3*(0.5,0.)*D1*CONJG(D4)*(Si3*Cs3/Gm3 - h3)
tmp2 = (0.5,0.)*D2*CONJG(D3)*(Si3*Cs3/Gm3 + h3)
Eh3 = tmp1 - tmp2

```

C-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C Calculate the differential and summation of integration

```

C=====
      Ehd = Eh1 + Eh2 + Eh3

      Eh  = Eh + Ehd

10  CONTINUE

      P = (0.5,0.)/a * CMPLX( REAL(Eh) )

      PRINT *, 'P = ', P

C--> Integrate over transverse variable x of conductor

C--> I0
      aa = -0.5*W
      bb =  0.5*W

      epsabs = 1.E-4
      epsrel = 1.E-6
      limit  = 25000
      lenw   = 100000
      CALL qags(SReJz, aa, bb, epsabs, epsrel, Ire, abserr, neval,
&             ier, limit, lenw, last, iwork, work)

      epsabs = 1.E-4
      epsrel = 1.E-6
      limit  = 25000
      lenw   = 100000
      CALL qags(SImJz, aa, bb, epsabs, epsrel, Iim, abserr, neval,
&             ier, limit, lenw, last, iwork, work)

      I0 = CMPLX(Ire, Iim)

      PRINT *, 'I0 = ', I0
      PRINT *, 'error = ', ier

C--> Calculate characteristic impedance

      Z0 = 2.*P/(I0*I0)

      RETURN
      END

```

```

C=====
C      Define basis function in spatial domain
C=====
*****
C--> SJz
      COMPLEX FUNCTION SJz(xx)
      COMPLEX xx

```

```

      COMPLEX h1, h2, h3, W, a
      COMPLEX PIE, J

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

INTEGER sumterm,expterm
COMPLEX X(100)
COMPLEX tmp1,tmp2,F
INTEGER n

```

```

COMMON /DIM/h1,h2,h3,W,a
COMMON /ETC/PIE,J,sumterm,expterm
COMMON /BASIS/X

```

```
F = (0.,0.)
```

```

DO n=1,expterm
  tmp1 = ccos( (2.,0.)*CMPLX(n-1)*PIE*xx/W )
  tmp2 = CSQRT( (1.,0.) - (4.,0.)*xx*xx/(W*W) )
  F = F + X(n)*(tmp1/tmp2)
ENDDO

```

```

SJz = F
RETURN
END

```

```

C--> SReJz
REAL FUNCTION SReJz(x)
REAL x
COMPLEX SJz,xx,tmp

xx = CMPLX(x)
tmp = SJz(xx)
SReJz = REAL(tmp)

RETURN
END

```

```

C--> SImJz
REAL FUNCTION SImJz(x)
REAL x
COMPLEX SJz,xx,tmp

xx = CMPLX(x)
tmp = SJz(xx)
tmp = tmp * (0.,-1.)

SImJz = REAL(tmp)

RETURN
END

```

\*\*\*\*\*

```
C--> Define COMPLEX hyperbolic function
```

```
C This function is to calculate complex hyperbolic co-tangent
```

```

COMPLEX FUNCTION ccoth(z)
COMPLEX z,x
IF (CABS(z).LE.1.E-10) z = 1.E-10
ccoth = (cexp(z) + cexp(-1.E0*z)) /
& (cexp(z) - cexp(-1.E0*z))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
RETURN
END
```

```
C This function is to calculate complex hyperbolic sine
COMPLEX FUNCTION csinh(z)
COMPLEX z,x
IF (CABS(z).GE.30.E0) z = (30.E0,0.)
x = (cexp(z) - cexp((-1.E0,0.E0)*z)) /2.E0
csinh = x
RETURN
END
```

```
C This function is to calculate complex hyperbolic co-sine
COMPLEX FUNCTION ccosh(z)
COMPLEX z

IF (CABS(z).GE.30.E0) z = 30.E0
ccosh = (cexp(z) + cexp((-1.E0,0.E0)*z)) /2.E0

RETURN
END
```

```
C This function is to calculate complex co-tangent
COMPLEX FUNCTION ccot(z)
COMPLEX z

IF (CABS(z).LE.1.E-10) z = 1.E-10
ccot = ccos(z)/csin(z)

RETURN
END
```

```
C This function is to calculate complex co-secant
COMPLEX FUNCTION ccsc(z)
COMPLEX z

IF (CABS(z).LE.1.E-10) z = 1.E-10
ccsc = (1.E0,0.E0)/csin(z)

RETURN
END
```

```
C This function is to calculate complex bessel function of the first kind
COMPLEX FUNCTION cbesj0(x)
COMPLEX x
REAL xx,besj0

xx = REAL(x)
cbesj0 = CMLPX(besj0(xx))
RETURN
END
```

C--> Find minimum of the function

C This function is to find out the minimum of the specified function  
C by using forward direct search technique.  
C Written by N.Kurukitkason

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

REAL FUNCTION findmin(ax,bx,f,value,TOL)
REAL ax,bx,f,value,TOL
REAL step,present,next
INTEGER count,onepcent,percent,order
REAL loop

```

```

loop = (bx - ax)/TOL
onepcent= INT(loop/100)
count = 0
percent = 0
order = 0

```

```

step = ax
present = f(step)
10 next = f(step+TOL)

```

```

IF (next.LE.present) THEN
step = step + TOL
present = next

```

```

IF (count .EQ. order) THEN
PRINT *, 'Scaned : ',percent,'% '
order = order + onepcent
percent = percent + 1
ENDIF

```

```

count = count + 1

```

```

GO TO 10

```

```

ELSE
findmin = step
value = present
ENDIF

```

```

RETURN
END

```

C--> Subroutine for solving linear least square equations  
C--> subroutine cgels from LAPACK is required

```

SUBROUTINE LSE(MAT,expterm,X,info)
COMPLEX MAT(100,100),X(100)
INTEGER expterm
COMPLEX A(100,2*expterm - 1),B(100,1),work(100)
CHARACTER trans
INTEGER info,lda,ldb,lwork,m,n,nrhs
INTEGER I,J

```

```

DO I=1,2*expterm
DO J=1,2*expterm - 1
A(I,J) = MAT(I,J + 1)
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=1,2*expterm
B(I,1) = (-1.E0,0.E0)*MAT(I,1)
ENDDO

```

```

trans = 'N'

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

      m = 2*expterm
      n = m - 1
      nrhs = 1
      lda = 100
      ldb = 100
      lwork = 100

      CALL cgels(trans,m,n,nrhs,A,lda,B,ldb,work,lwork,info)

      DO I=1,100
        X(I) = (0.E0,0.E0)
      ENDDO

      X(1) = (1.E0,0.E0)

      DO I=1,2*expterm - 1
        X(I + 1) = B(I,1)
      ENDDO

      RETURN
      END

```

```

C--> Calculate Zin
      COMPLEX FUNCTION Zin(Z)
      COMPLEX Z(2,2),tmp1,tmp2

      tmp1 = Z(1,2)*Z(2,1) / ( Z(1,1) + (50.,0.) )
      tmp2 = Z(2,2) + tmp1

      Zin = tmp2

      RETURN
      END

```

```

      SUBROUTINE Scal(Z,S)
      COMPLEX Z(2,2),S(2,2)
      COMPLEX Z11,Z12,Z21,Z22
      COMPLEX tmp1,tmp2,tmp
      REAL R,ZETA,PIE

```

```

      PIE = 3.14159265359

```

```

      Z11 = Z(1,1)
      Z12 = Z(1,2)
      Z21 = Z(2,1)
      Z22 = Z(2,2)

```

```

C--> S11
      tmp1 = (Z11 - (1.,0.))* (Z22 + (1.,0.)) - Z12*Z21
      tmp2 = (Z11 + (1.,0.))* (Z22 + (1.,0.)) - Z12*Z21
      tmp = tmp1/tmp2

      R = CABS(tmp)
      R = 20.*ALOG10(R)
      ZETA = ATAN2(AIMAG(tmp),REAL(tmp))*180./PIE
      S(1,1) = CMPLX(R,ZETA)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C--> S12
tmp1 = (2.,0.)*Z12
tmp2 = (Z11 + (1.,0.))*(Z22 + (1.,0.)) - Z12*Z21
tmp = tmp1/tmp2

R = CABS(tmp)
R = 20.*ALOG10(R)
ZETA = ATAN2(AIMAG(tmp),REAL(tmp))*180./PIE
S(1,2) = CMPLX(R,ZETA)

```

```

C--> S21
tmp1 = (2.,0.)*Z21
tmp2 = (Z11 + (1.,0.))*(Z22 + (1.,0.)) - Z12*Z21
tmp = tmp1/tmp2

R = CABS(tmp)
R = 20.*ALOG10(R)
ZETA = ATAN2(AIMAG(tmp),REAL(tmp))*180./PIE
S(2,1) = CMPLX(R,ZETA)

```

```

C--> S22
tmp1 = (Z11 + (1.,0.))*(Z22 - (1.,0.)) - Z12*Z21
tmp2 = (Z11 + (1.,0.))*(Z22 + (1.,0.)) - Z12*Z21
tmp = tmp1/tmp2

R = CABS(tmp)
R = 20.*ALOG10(R)
ZETA = ATAN2(AIMAG(tmp),REAL(tmp))*180./PIE
S(2,2) = CMPLX(R,ZETA)
RETURN
END

```

## ภาคผนวก ข.

## การใช้งานโปรแกรมย่อยมาตรฐาน

การเขียนโปรแกรมภาษาฟอร์แทรนในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีเชิงเลขนั้น สำหรับวิธีการคำนวณที่ใช้กันโดยทั่วไป อาทิเช่น การหาค่าดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ การอินทิเกรต และการหาผลเฉลยของระบบสมการเชิงเส้น นิยมใช้โปรแกรมย่อยมาตรฐาน เนื่องจากมีประสิทธิภาพและความถูกต้องในการคำนวณสูง นอกจากนี้ยังทำให้การประมวลผลของคอมพิวเตอร์ มีความรวดเร็วและประสิทธิภาพสูงขึ้น หากใช้โปรแกรมย่อยมาตรฐานที่ได้รับการออกแบบมาสำหรับคอมพิวเตอร์นั้นๆ โดยตรง

โดยทั่วไป โปรแกรมย่อยมาตรฐานสำหรับคำนวณทางคณิตศาสตร์ จะถูกติดตั้งมาในไลบรารีทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรภาษาฟอร์แทรนบนเครื่องคอมพิวเตอร์ระดับเวิร์กสเตชันทั่วไป รวมทั้งโปรแกรมย่อยมาตรฐานที่มีประสิทธิภาพสูงมากบนเครื่องคอมพิวเตอร์ระดับซูเปอร์คอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตาม เราสามารถดาวน์โหลดโปรแกรมย่อยมาตรฐานเหล่านี้ได้จาก [www.netlib.org](http://www.netlib.org)

ในบทนี้ ได้นำเสนอรายละเอียดการใช้งานโปรแกรมย่อยมาตรฐาน ที่ถูกเรียกใช้ในโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์หาค่าคุณลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น ซึ่งเป็นโปรแกรมย่อยมาตรฐานในไลบรารี ConvexMlib ของเครื่อง Convex Exemplar SPP-1000 ซึ่งจะสามารถเรียกใช้ได้โดยการเพิ่มตัวเลือก (option) `-llibname` ในการแปล ดังตัวอย่างต่อไปนี้

```
Sfc -o test.exe test.f -llibname
```

สำหรับการแปล โปรแกรมที่ใช้ในปริญญานิพนธ์นี้ ซึ่งมีการเรียกโปรแกรมย่อยมาตรฐานในไลบรารี LAPACK และ VECLIB นอกจากนั้นยังต้องการโปรแกรมย่อยมาตรฐานภายนอก qags ซึ่งได้ถูกแปลให้เป็นไฟล์ชนิคอปเจกต์ (object file) แล้ว ทำได้ดังนี้

```
Sfc -o sda.exe sda.f qags.o -llapack -lveclib
```

การใช้งานโปรแกรมย่อยมาตรฐาน และโปรแกรมย่อย qags ซึ่ง ไม่มีในไลบรารีของ Convex มีดังต่อไปนี้

## NAME

sgefa, dgefa, cgefa, zgefa - factor a general matrix

## SYNOPSIS

## VECLIB

```
INTEGER*4 lda, n, ipvt(n), ier
REAL*4 a(lda, n)
CALL SGEFA (a, lda, n, ipvt, ier)
```

```
INTEGER*4 lda, n, ipvt(n), ier
REAL*8 a(lda, n)
CALL DGEFA (a, lda, n, ipvt, ier)
```

```
INTEGER*4 lda, n, ipvt(n), ier
COMPLEX*8 a(lda, n)
CALL CGEFA (a, lda, n, ipvt, ier)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

INTEGER*4 lda, n, ipvt(n), ier
COMPLEX*16 a(lda, n)
CALL ZGEFA (a, lda, n, ipvt, ier)

```

VECLIB8 and SCILIB

```

INTEGER*8 lda, n, ipvt(n), ier
REAL*8 a(lda, n)
CALL SGEFA (a, lda, n, ipvt, ier)

```

```

INTEGER*8 lda, n, ipvt(n), ier
COMPLEX*16 a(lda, n)
CALL CGEFA (a, lda, n, ipvt, ier)

```

#### DESCRIPTION

These subprograms compute the triangular factorization of a general dense  $n$ -by- $n$  matrix  $A$ . Specifically, given  $A$ , these subprograms determine an  $n$ -by- $n$  permutation matrix  $P$ , an  $n$ -by- $n$  unit lower-triangular matrix  $L$ , and an  $n$ -by- $n$  upper-triangular matrix  $U$ , such that

$$P * A = L * U.$$

Computational singularity of  $A$  results in one or more zero diagonal elements of  $U$ . This condition is detected during the factorization, and a status response is returned to indicate its occurrence. A more common situation, however, is that  $A$  is not numerically singular but happens to be ill-conditioned. When a matrix is ill-conditioned, small errors in the matrix and right-hand side, and small roundoff errors introduced during the solution process itself, are magnified greatly in the solution. A set of companion subprograms computes the triangular factorization of a matrix and also estimates its condition number. These companion subprograms provide a more reliable indication of singularity. The small amount of additional time they require is usually worthwhile, especially when developing a program or encountering stability or convergence problems. The triangular factors may be used to solve a system of linear equations, to evaluate the determinant of  $A$ , or to compute the inverse of  $A$ .

#### ARGUMENTS

Input  
Input

$a$  Array containing the  $n$ -by- $n$  matrix  $A$ .

$lda$  The leading dimension of array  $a$  as declared in the calling program unit, with  $lda > \max(n, 1)$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n The order of matrix A,  $n > 0$ .

#### Output

a The triangular factors replace the input matrix; the strict lower triangle of a contains the strict lower triangle of L and the upper triangle of a contains U. a must be preserved between the factorization call and any solve, determinant, or inverse call.

ipvt The pivot information necessary to construct the permutation matrix P. ipvt must be preserved between the factorization and any solve, determinant, or inverse call.

ier Status response:

ier = 0 Normal return.  
ier = k  $\neq$  0 If  $u(k,k) = 0$ . ( $u(k,k)$  is the k-th

ier Status response:

ier = 0 Normal return.  
ier = k  $\neq$  0 If  $u(k,k) = 0$ . ( $u(k,k)$  is the k-th element on the diagonal of upper triangular matrix U.) Technically, this is not an error condition for these subprograms, but it does indicate that A is computationally singular and that a division by zero will occur if the factorization is used to solve a system of linear equations or to compute the matrix inverse.

#### NOTES

These subprograms are usage compatible with the standard LINPACK subprograms with the same names. The triangular factors are stored in a different format from the format used by the standard LINPACK subprograms, but are compatible with the ConvexMLIB: VECLIB condition number estimation, solve, and determinant and inverse subprograms.

#### NAME

sgedi, dgedi, cgedi, zgedi - determinant and inverse of a general matrix

#### SYNOPSIS

VECLIB

```
INTEGER*4 lda, n, ipvt(n), job
REAL*4 a(lda, n), det(2), work(n)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
CALL SGEDI (a, lda, n, ipvt, det, work, job)
```

```
INTEGER*4 lda, n, ipvt(n), job
REAL*8 a(lda, n), det(2), work(n)
CALL DGEDI (a, lda, n, ipvt, det, work, job)
```

```
INTEGER*4 lda, n, ipvt(n), job
COMPLEX*8 a(lda, n), det(2), work(n)
CALL CGEDI (a, lda, n, ipvt, det, work, job)
```

```
INTEGER*4 lda, n, ipvt(n), job
COMPLEX*16 a(lda, n), det(2), work(n)
CALL ZGEDI (a, lda, n, ipvt, det, work, job)
```

#### VECLIB8 and SCILIB

```
INTEGER*8 lda, n, ipvt(n), job
REAL*8 a(lda, n), det(2), work(n)
CALL SGEDI (a, lda, n, ipvt, det, work, job)
```

```
INTEGER*8 lda, n, ipvt(n), job
COMPLEX*16 a(lda, n), det(2), work(n)
CALL CGEDI (a, lda, n, ipvt, det, work, job)
```

#### DESCRIPTION

Given the triangular factorization of a general dense  $n$ -by- $n$  coefficient matrix  $A$ , these subprograms evaluate the determinant of

$A$

and/or compute the inverse of  $A$ . Triangular factors of the coefficient matrix may be computed by either of two companion subprograms. One of them computes only the factorization, using an elementary test for singularity of the coefficient matrix, and is slightly the faster of the two. The other not only computes factorization, but also estimates the condition number of the matrix.

factorization, but also estimates the condition number of the matrix.

This process takes a little more time, but is considerably more reliable, especially when the inverse of  $A$  is desired.

It is almost never necessary to compute either the determinant or the

inverse of a matrix. While papers and reference books extensively use

the notation ```det(A) <> 0''` to mean ```A is nonsingular,``` ConvexMLIB:

VECLIB includes more efficient and more reliable subprograms for

detecting singularity. Similarly, references frequently use  $A$ -inverse

$* b$  to mean the solution  $x$  of the system of linear equations  $A * x =$

$b$ . Again, it is more efficient and accurate to compute the solution

directly than to invert the coefficient matrix and multiply the inverse times the right-hand-side vector. This is true even if there

are many systems of equations, all using the same coefficient matrix;

the matrix may be factored once and systems may be solved from the factors just as efficiently, and more accurately, than by matrix multiplication by the inverse.

#### ARGUMENTS

Input

a Array containing the triangular factors L and U of the n-by-n coefficient matrix A as computed by the companion factorization

or condition number estimation subprogram. a must have been preserved between the factorization or condition number call

and

the determinant or inverse call.

lda The leading dimension of array a as declared in the calling program unit, with  $lda > \max(n,1)$ .

n The order of matrix A,  $n > 0$ .

ipvt The pivot information necessary to construct the permutation matrix P as computed by the companion factorization or condition number estimation subprogram. ipvt must have been preserved between the factorization or condition number call and the determinant or inverse call.

job Option flag:

job = 1 Compute only A-inverse  
 job = 1 Compute only A-inverse  
 job = 10 Compute only det(A)  
 job = 11 Compute both A-inverse and det(A)

work An array used for work space if A-inverse is requested.

Output

a Unchanged if A-inverse is not requested. Otherwise, A-inverse overwrites the triangular factors of the coefficient matrix.

Otherwise, det Not referenced if the determinant is not requested.

(2). the determinant of A, in the form  $\det(A) = \det(1) * 10^{**}\det$

This expression may underflow or overflow if evaluated; on the CONVEX supercomputer, underflows automatically flush to zero,

but

overflows normally terminate execution. For REAL\*4 and COMPLEX\*8, overflow cannot occur if  $\det(2) < 37$ . For REAL\*8

and

COMPLEX\*16, overflow cannot occur if  $\det(2) < 306$ . If

evaluation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

evaluation COMPLEX\*16, overflow cannot occur if  $\det(2) < 306$ . If is safe, an efficient way to do it is with the statement

$$\det(A) = \det(1) * 10.0 ** \text{INT}(\det(2))$$

The value stored in  $\det(2)$  is an integer in REAL or COMPLEX form.

$\det(1)$  is normalized so that either  $\det(1) = 0$  or  $1 < |\text{Re}(\det(1))| + |\text{Im}(\det(1))| < 10$ , where  $\text{Re}(z)$  and  $\text{Im}(z)$  are the real and imaginary parts of  $z$ ;  $\text{Re}(z) = z$  and  $\text{Im}(z) = 0$  if  $z$  is real.

#### NOTES

These subprograms are usage compatible with the standard LINPACK subprograms with the same names.

It is almost never necessary to compute either the determinant or the inverse of a matrix. While papers and reference books extensively use the notation  $\det(A) \neq 0$  to mean 'A is nonsingular,' ConvexMLIB:

VECLIB includes both more efficient and more reliable subprograms for detecting singularity. Similarly, references frequently use 'A-inverse \* b' to mean 'the solution x of the system of linear equations  $A * x = b$ .' Again, it is more efficient and accurate to compute the solution directly than to invert the coefficient matrix and multiply the inverse times the right-hand-side vector. This is true even if there are many systems of equations, all using the same coefficient matrix; the matrix may be factored once and the systems may be solved from the factors just as efficiently, and more accurately, than by matrix multiplication by the inverse.

#### NAME

sgels, dgels, cgels, zgels - solve a general least squares problem using orthogonal factorization

#### SYNOPSIS

##### LAPACK

```
CHARACTER*1 trans
INTEGER*4   info, lda, ldb, lwork, m, n, nrhs
REAL*4     a(lda, n), b(ldb, nrhs), work(lwork)
CALL SGELS (trans, m, n, nrhs, a, lda, b, ldb,
            work, lwork, info)
```

```
CHARACTER*1 trans
INTEGER*4   info, lda, ldb, lwork, m, n, nrhs
REAL*8     a(lda, n), b(ldb, nrhs), work(lwork)
CALL DGELS (trans, m, n, nrhs, a, lda, b, ldb,
            work, lwork, info)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

CHARACTER*1 trans
INTEGER*4   info, lda, ldb, lwork, m, n, nrhs
COMPLEX*8   a(lda, n), b(ldb, nrhs), work(lwork)
CALL CGELS (trans, m, n, nrhs, a, lda, b, ldb,
            work, lwork, info)

```

```

CHARACTER*1 trans
INTEGER*4   info, lda, ldb, lwork, m, n, nrhs
COMPLEX*16  a(lda, n), b(ldb, nrhs), work(lwork)
CALL ZGELS (trans, m, n, nrhs, a, lda, b, ldb,
            work, lwork, info)

```

#### LAPACK8

```

CHARACTER*1 trans
INTEGER*8   info, lda, ldb, lwork, m, n, nrhs
REAL*8      a(lda, n), b(ldb, nrhs), work(lwork)
CALL SGELS (trans, m, n, nrhs, a, lda, b, ldb,
            work, lwork, info)

```

```

CHARACTER*1 trans
INTEGER*8   info, lda, ldb, lwork, m, n, nrhs
COMPLEX*16  a(lda, n), b(ldb, nrhs), work(lwork)
COMPLEX*16  a(lda, n), b(ldb, nrhs), work(lwork)
CALL CGELS (trans, m, n, nrhs, a, lda, b, ldb,
            work, lwork, info)

```

#### DESCRIPTION

These subprograms solve square or over- and under-determined linear systems involving the  $m$ -by- $n$  matrix  $A$  and the right hand side  $B$  using orthogonal factorization of  $A$ .  $A$  must have full rank, i.e.,  $\text{rank}(A) =$

$\min(m, n)$ .

There are several cases, depending on the values of  $m$  and  $n$  and a transposition option:

1.  $m > n$ ,  $\text{trans} = \text{'N'}$  or  $\text{'n'}$ : Solve the least squares problem of finding  $X$  to minimize the Euclidean norm of each column of  $A * X$

is  $B$ , where  $A$  is an  $m$ -by- $n$  matrix,  $B$  is an  $m$ -by- $\text{nrhs}$  matrix, and  $X$  is an  $n$ -by- $\text{nrhs}$  matrix.

2.  $m > n$ ,  $\text{trans} = \text{'T'}$  or  $\text{'t'}$  or  $\text{'C'}$  or  $\text{'c'}$ : Solve the underdetermined

system  $A\text{-transpose} * X = B$  or  $A\text{-conjugate-transpose} * X = B$ , where

$A\text{-transpose}$  is the transpose of the real matrix  $A$  and  $A\text{-conjugate-}$

$\text{transpose}$  is the conjugate transpose of the complex matrix  $A$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.  $m < n$ ,  $\text{trans} = \text{'N'}$  or  $\text{'n'}$ : Solve the underdetermined system  $A * X = B$ .
4.  $m < n$ ,  $\text{trans} = \text{'T'}$  or  $\text{'t'}$  or  $\text{'C'}$  or  $\text{'c'}$ : Solve the least squares problem of finding  $X$  to minimize the Euclidean norm of each column of  $A\text{-transpose} * X - B$  or  $A\text{-conjugate-transpose} * X - B$ , where  $A$  is an  $m\text{-by-}n$  matrix,  $A\text{-transpose}$  is the transpose of the real matrix  $A$ ,  $A\text{-conjugate-transpose}$  is the conjugate transpose of the complex matrix  $A$ ,  $B$  is an  $m\text{-by-}nrhs$  matrix, and  $X$  is an  $n\text{-by-}nrhs$  matrix.

#### ARGUMENTS

Input

$\text{trans}$

Transposition option for the matrix  $A$ :

$\text{trans} = \text{'N'}$  or  $\text{'n'}$  Solve  $A * X = B$ .

$\text{trans} = \text{'T'}$  or  $\text{'t'}$  Solve  $A\text{-transpose} * X = B$ .

$\text{trans} = \text{'T'}$  or  $\text{'t'}$  Solve  $A\text{-transpose} * X = B$ .

$\text{trans} = \text{'C'}$  or  $\text{'c'}$  Solve  $A\text{-conjugate-transpose} * X = B$ .

$\text{trans} = \text{'T'}$  or  $\text{'t'}$  is valid only in subprograms SGELS and

DGELS,

and  $\text{trans} = \text{'C'}$  or  $\text{'c'}$  is valid only in subprograms CGELS and ZGELS.

$m$  The number of rows of the matrix  $A$ .  $m > 0$ .

$n$  The number of columns of the matrix  $A$ .  $n > 0$ .

$nrhs$  The number of right hand sides; i.e., the number of columns of the matrix  $B$ .  $nrhs > 0$ .

$a$  The  $m\text{-by-}n$  matrix  $A$ .

$lda$  The leading dimension of array  $a$  in the calling program unit.

$lda > \max(1, m)$ .

$lda > \max(1, m)$ .

$b$  If  $\text{trans} = \text{'N'}$  or  $\text{'n'}$ , the  $m\text{-by-}nrhs$  right hand side matrix  $B$ .

If  $\text{trans} = \text{'T'}$  or  $\text{'t'}$  or  $\text{'C'}$  or  $\text{'c'}$ , the  $n\text{-by-}nrhs$  right hand side matrix  $B$ .

$ldb$  The leading dimension of array  $b$  in the calling program unit.

$ldb > \max(1, m, n)$ .

$lwork$

The length of array  $work$ .  $lwork > \max(1, \min(m, n) + \max(m, n, nrhs))$ . For good performance,  $lwork$  must generally be

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

larger. The optimal value of `lwork` for high performance is returned in `work(1)`.

### Working Storage

`work` An array used for work space. On successful exit, `work(1)` contains the optimal work space length `lwork` for high performance.

### Output

a If  $m > n$ , `a` has been overwritten by the QR factorization of `A`. If  $m < n$ , `a` has been overwritten by the LQ factorization of `A`.

b On successful exit, if  $m > n$  and `trans` = `'N'` or `'n'`, the  $n$ -by-`nrhs` least squares solution; the residual sum of squares for

the solution in each column is given by the sum of squares of elements  $n+1$  to  $m$  in that column.

On successful exit, if  $m > n$  and `trans` = `'T'` or `'t'`, the  $m$ -by-`nrhs` minimum-norm solution.

On successful exit, if  $m < n$  and `trans` = `'N'` or `'n'`, the  $n$ -by-`nrhs` minimum-norm solution.

On successful exit, if  $m < n$  and `trans` = `'T'` or `'t'`, the  $m$ -by-`nrhs` least squares solution; the residual sum of squares for

the solution in each column is given by the sum of squares of elements  $m+1$  to  $n$  in that column.

`info` Status response:

`info` = 0 Successful exit.

`info` < 0 If `info` =  $-k$ , the  $k$ -th argument had an

`info` < 0 If `info` =  $-k$ , the  $k$ -th argument had an invalid value.

### NOTES

If an error in the arguments is detected, the subprograms call error handler `XERBLA`, which writes an error message onto the standard error

file and terminates execution. The standard version of `XERBLA` (see `xerbla(3m)`) may be replaced with a user-supplied version to change the

error procedure. Error conditions are

`trans` <> `'N'` or `'n'` or `'T'` or `'t'` or `'C'` or `'c'`,  
 $m < 0$ ,  
 $n < 0$ ,  
 $nrhs < 0$ ,  
 $lda < \max(1, m)$ ,  
`ldb` too small, and  
`lwork` too small.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Actual character arguments in a subroutine call may be longer than the corresponding dummy arguments. Therefore, readability of the CALL statement may be improved by coding, e.g., the trans argument as `NotTransposed' for `N' or `Transposed' for `T' or `ConjugateTransposed' for `C'.

โปรแกรมย่อยมาตรฐาน qags.f แสดงได้ดังนี้

```
* =====
* NIST Guide to Available Math Software.
* Fullsource for module QAGS from package QUADPACK.
* Retrieved from NETLIB on Wed Mar 18 13:54:09 1998.
* =====
      subroutine qags(f,a,b,epsabs,epsrel,result,abserr,neval,ier,
*      limit,lenw,last,iwork,work)
c***begin prologue  qags
c***date written   800101   (yymmdd)
c***revision date  830518   (yymmdd)
c***category no.  h2a1a1
c***keywords      automatic integrator, general-purpose,
c                  (end-point) singularities, extrapolation,
c                  globally adaptive
c***author        piessens,robert,appl. math. & progr. div. - k.u.leuven
c                  de doncker,elise,appl. math. & prog. div. - k.u.leuven
c***purpose       the routine calculates an approximation result to a given
c                  definite integral  $i = \int_a^b f(x) dx$ ,
c                  hopefully satisfying following claim for accuracy
c                   $abs(i-result) \leq \max(epsabs, epsrel * abs(i))$ .
c***description
c
c                  computation of a definite integral
c                  standard fortran subroutine
c                  real version
c
c
c                  parameters
c                  on entry
c                  f          - real
c                              function subprogram defining the integrand
c                              function f(x). the actual name for f needs to be
c                              declared external in the driver program.
c
c                  a          - real
c                              lower limit of integration
c
c                  b          - real
c                              upper limit of integration
c
c                  epsabs - real
c                              absolute accuracy requested
c                  epsrel - real
c                              relative accuracy requested
c                              if  $epsabs \leq 0$ 
c                              and  $epsrel < \max(50 * rel.mach.acc., 0.5d-28)$ ,
c                              the routine will end with ier = 6.
c
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

on return
result - real
        approximation to the integral

abserr - real
        estimate of the modulus of the absolute error,
        which should equal or exceed abs(i-result)

neval  - integer
        number of integrand evaluations

ier    - integer
        ier = 0 normal and reliable termination of the
                routine. it is assumed that the requested
                accuracy has been achieved.
        ier.gt.0 abnormal termination of the routine
                the estimates for integral and error are
                less reliable. it is assumed that the
                requested accuracy has not been achieved.

error messages
        ier = 1 maximum number of subdivisions allowed
                has been achieved. one can allow more sub-
                divisions by increasing the value of limit
                (and taking the according dimension
                adjustments into account. however, if
                this yields no improvement it is advised
                to analyze the integrand in order to
                determine the integration difficulties. if
                the position of a local difficulty can be
                determined (e.g. singularity,
                discontinuity within the interval) one
                will probably gain from splitting up the
                interval at this point and calling the
                integrator on the subranges. if possible,
                an appropriate special-purpose integrator
                should be used, which is designed for
                handling the type of difficulty involved.
        = 2 the occurrence of roundoff error is detec-
                ted, which prevents the requested
                tolerance from being achieved.
                the error may be under-estimated.
        = 3 extremely bad integrand behaviour
                occurs at some points of the integration
                interval.
        = 4 the algorithm does not converge.
                roundoff error is detected in the
                extrapolation table. it is presumed that
                the requested tolerance cannot be
                achieved, and that the returned result is
                the best which can be obtained.
        = 5 the integral is probably divergent, or
                slowly convergent. it must be noted that
                divergence can occur with any other value
                of ier.
        = 6 the input is invalid, because
                (epsabs.le.0 and
                epsrel.lt.max(50*rel.mach.acc.,0.5d-28)
                or limit.lt.1 or lenw.lt.limit*4.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c          .
c          result, abserr, neval, last are set to
c          zero.except when limit or lenw is invalid,
c          iwork(1), work(limit*2+1) and
c          work(limit*3+1) are set to zero, work(1)
c          is set to a and work(limit+1) to b.
c
c      dimensioning parameters
c          limit - integer
c                  dimensioning parameter for iwork
c                  limit determines the maximum number of subintervals
c                  in the partition of the given integration interval
c                  (a,b), limit.ge.1.
c                  if limit.lt.1, the routine will end with ier = 6.
c
c          lenw - integer
c                  dimensioning parameter for work
c                  lenw must be at least limit*4.
c                  if lenw.lt.limit*4, the routine will end
c                  with ier = 6.
c
c          last - integer
c                  on return, last equals the number of subintervals
c                  produced in the subdivision process, detemines the
c                  number of significant elements actually in the work
c                  arrays.
c
c      work arrays
c          iwork - integer
c                  vector of dimension at least limit, the first k
c                  elements of which contain pointers
c                  to the error estimates over the subintervals
c                  such that work(limit*3+iwork(1)),... ,
c                  work(limit*3+iwork(k)) form a decreasing
c                  sequence, with k = last if last.le.(limit/2+2),
c                  and k = limit+1-last otherwise
c
c          work - real
c                  vector of dimension at least lenw
c                  on return
c                  work(1), ..., work(last) contain the left
c                  end-points of the subintervals in the
c                  partition of (a,b),
c                  work(limit+1), ..., work(limit+last) contain
c                  the right end-points,
c                  work(limit*2+1), ..., work(limit*2+last) contain
c                  the integral approximations over the subintervals,
c                  work(limit*3+1), ..., work(limit*3+last)
c                  contain the error estimates.
c
c
c      c***references (none)
c      c***routines called qagse,xerror
c      c***end prologue qags
c
c
c      real a,abserr,b,epsabs,epsrel,f,result,work
c      integer ier,iwork,lenw,limit,lvl,l1,l2,l3,neval

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c
dimension iwork(limit),work(lenw)
c
external f
c
check validity of limit and lenw.
c
c***first executable statement qags
ier = 6
neval = 0
last = 0
result = 0.0e+00
abserr = 0.0e+00
if(limit.lt.1.or.lenw.lt.limit*4) go to 10
c
prepare call for qagse.
c
l1 = limit+1
l2 = limit+l1
l3 = limit+l2
c
call qagse(f,a,b,epsabs,epsrel,limit,result,abserr,neval,
* ier,work(1),work(l1),work(l2),work(l3),iwork,last)
c
call error handler if necessary.
c
lvl = 0
10 if(ier.eq.6) lvl = 1
if(ier.ne.0) call xerror(26habnormal return from qags,
* 26,ier,lvl)
return
end
subroutine qagse(f,a,b,epsabs,epsrel,limit,result,abserr,neval,
* ier,alist,blist,rlist,elist,iord,last)
c***begin prologue qagse
c***date written 800101 (yymmdd)
c***revision date 830518 (yymmdd)
c***category no. h2a1a1
c***keywords automatic integrator, general-purpose,
c (end point) singularities, extrapolation,
c globally adaptive
c***author piessens,robert,appl. math. & progr. div. - k.u.leuven
c de doncker,elise,appl. math. & progr. div. - k.u.leuven
c***purpose the routine calculates an approximation result to a given
c definite integral  $i = \text{integral of } f \text{ over } (a,b)$ ,
c hopefully satisfying following claim for accuracy
c  $\text{abs}(i\text{-result}) \leq \text{max}(\text{epsabs}, \text{epsrel} * \text{abs}(i))$ .
c***description
c
computation of a definite integral
c standard fortran subroutine
c real version
c
parameters
c on entry
c f - real
c function subprogram defining the integrand
c function f(x), the actual name for f needs to be

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c          declared e x t e r n a l in the driver program.
c
c          a      - real
c                  lower limit of integration
c
c          b      - real
c                  upper limit of integration
c
c          epsabs - real
c                  absolute accuracy requested
c          epsrel - real
c                  relative accuracy requested
c                  if epsabs.le.0
c                  and epsrel.lt.max(50*rel.mach.acc.,0.5d-28),
c                  the routine will end with ier = 6.
c
c          limit  - integer
c                  gives an upperbound on the number of subintervals
c                  in the partition of (a,b)
c
c on return
c          result - real
c                  approximation to the integral
c
c          abserr - real
c                  estimate of the modulus of the absolute error,
c                  which should equal or exceed abs(i-result)
c
c          neval  - integer
c                  number of integrand evaluations
c
c          ier    - integer
c                  ier = 0 normal and reliable termination of the
c                  routine. it is assumed that the requested
c                  accuracy has been achieved.
c                  ier.gt.0 abnormal termination of the routine
c                  the estimates for integral and error are
c                  less reliable. it is assumed that the
c                  requested accuracy has not been achieved.
c
c          error messages
c                  = 1 maximum number of subdivisions allowed
c                  has been achieved. one can allow more sub-
c                  divisions by increasing the value of limit
c                  (and taking the according dimension
c                  adjustments into account). however, if
c                  this yields no improvement it is advised
c                  to analyze the integrand in order to
c                  determine the integration difficulties. if
c                  the position of a local difficulty can be
c                  determined (e.g. singularity,
c                  discontinuity within the interval) one
c                  will probably gain from splitting up the
c                  interval at this point and calling the
c                  integrator on the subranges. if possible,
c                  an appropriate special-purpose integrator
c                  should be used, which is designed for
c                  handling the type of difficulty involved.
c                  = 2 the occurrence of roundoff error is detec-

```

ted, which prevents the requested tolerance from being achieved. the error may be under-estimated.

= 3 extremely bad integrand behaviour occurs at some points of the integration interval.

= 4 the algorithm does not converge. roundoff error is detected in the extrapolation table. it is presumed that the requested tolerance cannot be achieved, and that the returned result is the best which can be obtained.

= 5 the integral is probably divergent, or slowly convergent. it must be noted that divergence can occur with any other value of ier.

= 6 the input is invalid, because  $\text{epsabs} \leq 0$  and  $\text{epsrel} < \max(50 * \text{rel.mach.acc.}, 0.5d-28)$ . result, abserr, neval, last, rlist(1), iord(1) and elist(1) are set to zero. alist(1) and blist(1) are set to a and b respectively.

alist - real  
vector of dimension at least limit, the first last elements of which are the left end points of the subintervals in the partition of the given integration range (a,b)

blist - real  
vector of dimension at least limit, the first last elements of which are the right end points of the subintervals in the partition of the given integration range (a,b)

rlist - real  
vector of dimension at least limit, the first last elements of which are the integral approximations on the subintervals

elist - real  
vector of dimension at least limit, the first last elements of which are the moduli of the absolute error estimates on the subintervals

iord - integer  
vector of dimension at least limit, the first k elements of which are pointers to the error estimates over the subintervals, such that  $\text{elist}(\text{iord}(1)), \dots, \text{elist}(\text{iord}(k))$  form a decreasing sequence, with  $k = \text{last}$  if  $\text{last} \leq (\text{limit}/2+2)$ , and  $k = \text{limit}+1-\text{last}$  otherwise

last - integer  
number of subintervals actually produced in the

```

c          subdivision process
c
c***references (none)
c***routines called  qelg,qk21,qpsrt,rlmach
c***end prologue  qagse
c
c      real a,abseps,abserr,alist,area,area1,area12,area2,a1,
c      * a2,b,blist,b1,b2,correc,defabs,defab1,defab2,rlmach,
c      * dres,elist,epmach,epsabs,epsrel,erlarg,erlast,errbnd,
c      * errmax,error1,error2,errol2,errsum,ertest,f,oflow,resabs,
c      * reseps,result,res3la,rlist,rlist2,small,uflow
c      integer id,ier,ierro,iord,iroff1,iroff2,iroff3,jupbnd,k,ksgn,
c      * ktmin,last,limit,maxerr,neval,nres,nrmax,numrl2
c      logical extrap,noext
c
c      dimension alist(limit),blist(limit),elist(limit),iord(limit),
c      * res3la(3),rlist(limit),rlist2(52)
c
c      external f
c
c      the dimension of rlist2 is determined by the value of
c      limexp in subroutine qelg (rlist2 should be of dimension
c      (limexp+2) at least).
c
c      list of major variables
c      -----
c
c      alist      - list of left end points of all subintervals
c                  considered up to now
c      blist      - list of right end points of all subintervals
c                  considered up to now
c      rlist(i)    - approximation to the integral over
c                  (alist(i),blist(i))
c      rlist2     - array of dimension at least limexp+2
c                  containing the part of the epsilon table
c                  which is still needed for further computations
c      elist(i)    - error estimate applying to rlist(i)
c      maxerr     - pointer to the interval with largest error
c                  estimate
c      errmax     - elist(maxerr)
c      erlast     - error on the interval currently subdivided
c                  (before that subdivision has taken place)
c      area       - sum of the integrals over the subintervals
c      errsum     - sum of the errors over the subintervals
c      errbnd     - requested accuracy max(epsabs,epsrel*
c                  abs(result))
c      *****1  - variable for the left interval
c      *****2  - variable for the right interval
c      last       - index for subdivision
c      nres       - number of calls to the extrapolation routine
c      numrl2     - number of elements currently in rlist2. if an
c                  appropriate approximation to the compounded
c                  integral has been obtained it is put in
c                  rlist2(numrl2) after numrl2 has been increased
c                  by one.
c      small     - length of the smallest interval considered
c                  up to now, multiplied by 1.5
c      erlarg     - sum of the errors over the intervals larger

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c          than the smallest interval considered up to now
c      extrapol  - logical variable denoting that the routine
c                  is attempting to perform extrapolation
c                  i.e. before subdividing the smallest interval
c                  we try to decrease the value of erlarg.
c      noext     - logical variable denoting that extrapolation
c                  is no longer allowed (true value)
c
c      machine dependent constants
c      -----
c
c      epmach is the largest relative spacing.
c      uflow is the smallest positive magnitude.
c      oflow is the largest positive magnitude.
c
c***first executable statement  qagse
    epmach = rlmach(4)
c
c      test on validity of parameters
c      -----
c      ier = 0
c      neval = 0
c      last = 0
c      result = 0.0e+00
c      abserr = 0.0e+00
c      alist(1) = a
c      blist(1) = b
c      rlist(1) = 0.0e+00
c      elist(1) = 0.0e+00
c      if(epsabs.le.0.0e+00.and.epsrel.lt.amax1(0.5e+02*epmach,0.5e-14))
*      ier = 6
c      if(ier.eq.6) go to 999
c
c      first approximation to the integral
c      -----
c
c      uflow = rlmach(1)
c      oflow = rlmach(2)
c      ierro = 0
c      call qk21(f,a,b,result,abserr,defabs,resabs)
c
c      test on accuracy.
c
c      dres = abs(result)
c      errbnd = amax1(epsabs,epsrel*dres)
c      last = 1
c      rlist(1) = result
c      elist(1) = abserr
c      iord(1) = 1
c      if(abserr.le.1.0e+02*epmach*defabs.and.abserr.gt.
*      errbnd) ier = 2
c      if(limit.eq.1) ier = 1
c      if(ier.ne.0.or.(abserr.le.errbnd.and.abserr.ne.resabs).or.
*      abserr.eq.0.0e+00) go to 140
c
c      initialization
c      -----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

rlist2(1) = result
errmax = abserr
maxerr = 1
area = result
errsum = abserr
abserr = oflow
nrmax = 1
nres = 0
numrl2 = 2
ktmin = 0
extrap = .false.
noext = .false.
iroff1 = 0
iroff2 = 0
iroff3 = 0
ksgn = -1
if(dres.ge.(0.1e+01-0.5e+02*epmach)*defabs) ksgn = 1

```

```

c
c      main do-loop
c      -----
c

```

```

do 90 last = 2,limit

```

```

c
c      bisect the subinterval with the nrmax-th largest
c      error estimate.
c

```

```

c
c      a1 = alist(maxerr)
c      b1 = 0.5e+00*(alist(maxerr)+blist(maxerr))
c      a2 = b1
c      b2 = blist(maxerr)
c      erlast = errmax
c      call qk21(f,a1,b1,area1,error1,resabs,defab1)
c      call qk21(f,a2,b2,area2,error2,resabs,defab2)

```

```

c
c      improve previous approximations to integral
c      and error and test for accuracy.
c

```

```

c
c      area12 = area1+area2
c      erro12 = error1+error2
c      errsum = errsum+erro12-errmax
c      area = area+area12-rlist(maxerr)
c      if(defab1.eq.error1.or.defab2.eq.error2) go to 15
c      if(abs(rlist(maxerr)-area12).gt.0.1e-04*abs(area12)
* .or.erro12.lt.0.99e+00*errmax) go to 10
c      if(extrap) iroff2 = iroff2+1
c      if(.not.extrap) iroff1 = iroff1+1
10  if(last.gt.10.and.erro12.gt.errmax) iroff3 = iroff3+1
15  rlist(maxerr) = area1
    rlist(last) = area2
    errbnd = amax1(epsabs,epsrel*abs(area))

```

```

c
c      test for roundoff error and eventually
c      set error flag.
c

```

```

if(iroff1+iroff2.ge.10.or.iroff3.ge.20) ier = 2
if(iroff2.ge.5) ierro = 3

```

```

c
c      set error flag in the case that the number of

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c         subintervals equals limit.
c
c         if(last.eq.limit) ier = 1
c
c         set error flag in the case of bad integrand behaviour
c         at a point of the integration range.
c
c         if(amax1(abs(a1),abs(b2))'.le.(0.1e+01+0.1e+03*epmach)*
*         (abs(a2)+0.1e+04*uflow)) ier = 4
c
c         append the newly-created intervals to the list.
c
c         if(error2.gt.error1) go to 20
c         alist(last) = a2
c         blist(maxerr) = b1
c         blist(last) = b2
c         elist(maxerr) = error1
c         elist(last) = error2
c         go to 30
20      alist(maxerr) = a2
c         alist(last) = a1
c         blist(last) = b1
c         rlist(maxerr) = area2
c         rlist(last) = area1
c         elist(maxerr) = error2
c         elist(last) = error1
c
c         call subroutine qpsrt to maintain the descending ordering
c         in the list of error estimates and select the
c         subinterval with nrmax-th largest error estimate (to be
c         bisected next).
c
30      call qpsrt(limit,last,maxerr,errmax,elist,iord,nrmax)
c ***jump out of do-loop
c         if(errsum.le.errbnd) go to 115
c ***jump out of do-loop
c         if(ier.ne.0) go to 100
c         if(last.eq.2) go to 80
c         if(noext) go to 90
c         erlarg = erlarg-erlast
c         if(abs(b1-a1).gt.small) erlarg = erlarg+erro12
c         if(extrap) go to 40
c
c         test whether the interval to be bisected next is the
c         smallest interval.
c
c         if(abs(blist(maxerr)-alist(maxerr)).gt.small) go to 90
c         extrap = .true.
c         nrmax = 2
40      if(ierro.eq.3.or.erlarg.le.ertest) go to 60
c
c         the smallest interval has the largest error.
c         before bisecting decrease the sum of the errors
c         over the larger intervals (erlarg) and perform
c         extrapolation.
c
c         id = nrmax
c         jupbnd = last

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(last.gt.(2+limit/2)) jupbnd = limit+3-last
do 50 k = id,jupbnd
  maxerr = iord(nrmax)
  errmax = elist(maxerr)
c ***jump out of do-loop
  if(abs(blist(maxerr)-alist(maxerr)).gt.small) go to 90
  nrmax = nrmax+1
50  continue
c
c      perform 'extrapolation.
c
60  numrl2 = numrl2+1
    rlist2(numrl2) = area
    call qelg(numrl2,rlist2,reseps,abseps,res3la,nres)
    ktmin = ktmin+1
    if(ktmin.gt.5.and.abserr.lt.0.1e-02*errsum) ier = 5
    if(abseps.ge.abserr) go to 70
    ktmin = 0
    abserr = abseps
    result = reseps
    correc = erlarg
    ertest = amax1(epsabs,epsrel*abs(reseps))
c ***jump out of do-loop
    if(abserr.le.ertest) go to 100
c
c      prepare bisection of the smallest interval.
c
70  if(numrl2.eq.1) noext = .true.
    if(ier.eq.5) go to 100
    maxerr = iord(1)
    errmax = elist(maxerr)
    nrmax = 1
    extrap = .false.
    small = small*0.5e+00
    erlarg = errsum
    go to 90
80  small = abs(b-a)*0.375e+00
    erlarg = errsum
    ertest = errbnd
    rlist2(2) = area
90  continue
c
c      set final result and error estimate.
c      -----
c
100 if(abserr.eq.oflow) go to 115
    if(ier+ierro.eq.0) go to 110
    if(ierro.eq.3) abserr = abserr+correc
    if(ier.eq.0) ier = 3
    if(result.ne.0.0e+00.and.area.ne.0.0e+00) go to 105
    if(abserr.gt.errsum) go to 115
    if(area.eq.0.0e+00) go to 130
    go to 110
105 if(abserr/abs(result).gt.errsum/abs(area)) go to 115
c
c      test on divergence.
c
110 if(ksgn.eq.(-1).and.amax1(abs(result),abs(area)).le.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

* defabs*0.1e-01) go to 130
  if(0.1e-01.gt.(result/area).or.(result/area).gt.0.1e+03
* .or.errsum.gt.abs(area)) ier = 6
  go to 130
c
c          compute global integral sum.
c
115 result = 0.0e+00
  do 120 k = 1,last
    result = result+rlist(k)
120 continue
  abserr = errsum
130 if(ier.gt.2) ier = ier-1
140 neval = 42*last-21
999 return
  end
  subroutine qelg(n,epstab,result,abserr,res3la,nres)
c***begin prologue qelg
c***refer to qagie,qagoe,qagpe,qagse
c***routines called rlmach
c***revision date 830518 (yymmdd)
c***keywords epsilon algorithm, convergence acceleration,
c          extrapolation
c***author piessens,robert,appl. math. & progr. div. - k.u.leuven
c          de doncker,elise,appl. math & progr. div. - k.u.leuven
c***purpose the routine determines the limit of a given sequence of
c          approximations, by means of the epsilon algorithm of
c          p. wynn. an estimate of the absolute error is also given.
c          the condensed epsilon table is computed. only those
c          elements needed for the computation of the next diagonal
c          are preserved.
c***description
c
c          epsilon algorithm
c          standard fortran subroutine
c          real version
c
c          parameters
c          n          - integer
c                    epstab(n) contains the new element in the
c                    first column of the epsilon table.
c
c          epstab - real
c                    vector of dimension 52 containing the elements
c                    of the two lower diagonals of the triangular
c                    epsilon table. the elements are numbered
c                    starting at the right-hand corner of the
c                    triangle.
c
c          result - real
c                    resulting approximation to the integral
c
c          abserr - real
c                    estimate of the absolute error computed from
c                    result and the 3 previous results
c
c          res3la - real
c                    vector of dimension 3 containing the last 3

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c          results

```

```

c          nres   - integer
c                  number of calls to the routine
c                  (should be zero at first call)

```

```

c***end prologue  qelg

```

```

c
c  real abserr,delta1,delta2,delta3,rlmach,
c *  epmach,epsinf,epstab,error,err1,err2,err3,e0,e1,e1abs,e2,e3,
c *  oflow,res,result,res3la,ss,toll1,tol2,tol3
c  integer i,ib,ib2,ie,indx,k1,k2,k3,limexp,n,newelm,nres,num
c  dimension epstab(52),res3la(3)

```

```

c          list of major variables

```

```

c          -----
c          e0      - the 4 elements on which the
c          e1      computation of a new element in
c          e2      the epsilon table is based
c          e3      e0
c                  e3      e1      new
c                  e2
c          newelm - number of elements to be computed in the new
c                  diagonal
c          error  - error = abs(e1-e0)+abs(e2-e1)+abs(new-e2)
c          result - the element in the new diagonal with least value
c                  of error

```

```

c          machine dependent constants

```

```

c          -----
c          epmach is the largest relative spacing.
c          oflow is the largest positive magnitude.
c          limexp is the maximum number of elements the epsilon
c          table can contain. if this number is reached, the upper
c          diagonal of the epsilon table is deleted.

```

```

c***first executable statement  qelg

```

```

c  epmach = rlmach(4)
c  oflow = rlmach(2)
c  nres = nres+1
c  abserr = oflow
c  result = epstab(n)
c  if(n.lt.3) go to 100
c  limexp = 50
c  epstab(n+2) = epstab(n)
c  newelm = (n-1)/2
c  epstab(n) = oflow
c  num = n
c  k1 = n
c  do 40 i = 1,newelm
c    k2 = k1-1
c    k3 = k1-2
c    res = epstab(k1+2)
c    e0 = epstab(k3)
c    e1 = epstab(k2)
c    e2 = res

```

```

e1abs = abs(e1)
delta2 = e2-e1
err2 = abs(delta2)
tol2 = amax1(abs(e2),e1abs)*epmach
delta3 = e1-e0
err3 = abs(delta3)
tol3 = amax1(e1abs,abs(e0))*epmach
if(err2.gt.tol2.or.err3.gt.tol3) go to 10

```

```

c
c      if e0, e1 and e2 are equal to within machine
c      accuracy, convergence is assumed.
c      result = e2
c      abserr = abs(e1-e0)+abs(e2-e1)
c

```

```

result = res
abserr = err2+err3

```

```

c ***jump out of do-loop
go to 100

```

```

10  e3 = epstab(k1)
epstab(k1) = e1
delta1 = e1-e3
err1 = abs(delta1)
tol1 = amax1(e1abs,abs(e3))*epmach

```

```

c
c      if two elements are very close to each other, omit
c      a part of the table by adjusting the value of n

```

```

if(err1.le.tol1.or.err2.le.tol2.or.err3.le.tol3) go to 20
ss = 0.1e+01/delta1+0.1e+01/delta2-0.1e+01/delta3
epsinf = abs(ss*e1)

```

```

c
c      test to detect irregular behaviour in the table, and
c      eventually omit a part of the table adjusting the value
c      of n.

```

```

if(epsinf.gt.0.1e-03) go to 30

```

```

20  n = i+i-1

```

```

c ***jump out of do-loop
go to 50

```

```

c
c      compute a new element and eventually adjust
c      the value of result.
c

```

```

30  res = e1+0.1e+01/ss
epstab(k1) = res
k1 = k1-2
error = err2+abs(res-e2)+err3
if(error.gt.abserr) go to 40
abserr = error
result = res

```

```

40 continue

```

```

c
c      shift the table.
c

```

```

50  if(n.eq.limexp) n = 2*(limexp/2)-1
ib = 1
if((num/2)*2.eq.num) ib = 2
ie = newelm+1

```

```

do 60 i=1,ie
  ib2 = ib+2
  epstab(ib) = epstab(ib2)
  ib = ib2
60 continue
  if(num.eq.n) go to 80
  indx = num-n+1
  do 70 i = 1,n
    epstab(i)= epstab(indx)
    indx = indx+1
70 continue
80 if(nres.ge.4) go to 90
  res3la(nres) = result
  abserr = oflow
  go to 100
c
c      compute error estimate
c
90 abserr = abs(result-res3la(3))+abs(result-res3la(2))
  * +abs(result-res3la(1))
  res3la(1) = res3la(2)
  res3la(2) = res3la(3)
  res3la(3) = result
100 abserr = amax1(abserr,0.5e+01*epmach*abs(result))
  return
  end
  subroutine qk21(f,a,b,result,abserr,resabs,resasc)
c***begin prologue qk21
c***date written 800101 (yymmdd)
c***revision date 830518 (yymmdd)
c***category no. h2ala2
c***keywords 21-point gauss-kronrod rules
c***author piessens,robert,appl. math. & progr. div. - k.u.leuven
c      de doncker,elise,appl. math. & progr. div. - k.u.leuven
c***purpose to compute i = integral of f over (a,b), with error
c      estimate
c      j = integral of abs(f) over (a,b)
c***description
c
c      integration rules
c      standard fortran subroutine
c      real version
c
c      parameters
c      on entry
c          f      - real
c                  function subprogram defining the integrand
c                  function f(x). the actual name for f needs to be
c                  declared e x t e r n a l in the driver program.
c
c          a      - real
c                  lower limit of integration
c
c          b      - real
c                  upper limit of integration
c
c      on return
c          result - real

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c          approximation to the integral i
c          result is computed by applying the 21-point
c          kronrod rule (resk) obtained by optimal addition
c          of abscissae to the 10-point gauss rule (resg).
c
c          abserr - real
c          estimate of the modulus of the absolute error,
c          which should not exceed abs(i-result)
c
c          resabs - real
c          approximation to the integral j
c
c          resasc - real
c          approximation to the integral of abs(f-i/(b-a))
c          over (a,b)
c
c***references (none)
c***routines called  rlmach
c***end prologue  qk21
c
c          real a,absc,abserr,b,centr,dhlgth,epmach,f,fc,fsum,fval1,fval2,
c          * fv1,fv2,hlgth,resabs,resg,resk,reskh,result,rlmach,uflow,wg,wgk,
c          * xgk
c          integer j,jtw,jtwm1
c          external f
c
c          dimension fv1(10),fv2(10),wg(5),wgk(11),xgk(11)
c
c          the abscissae and weights are given for the interval (-1,1).
c          because of symmetry only the positive abscissae and their
c          corresponding weights are given.
c
c          xgk      - abscissae of the 21-point kronrod rule
c                   xgk(2), xgk(4), ... abscissae of the 10-point
c                   gauss rule
c                   xgk(1), xgk(3), ... abscissae which are optimally
c                   added to the 10-point gauss rule
c
c          wgk      - weights of the 21-point kronrod rule
c
c          wg       - weights of the 10-point gauss rule
c
c          data xgk(1),xgk(2),xgk(3),xgk(4),xgk(5),xgk(6),xgk(7),
c          * xgk(8),xgk(9),xgk(10),xgk(11)/
c          *      0.9956571630258081e+00,      0.9739065285171717e+00,
c          *      0.9301574913557082e+00,      0.8650633666889845e+00,
c          *      0.7808177265864169e+00,      0.6794095682990244e+00,
c          *      0.5627571346686047e+00,      0.4333953941292472e+00,
c          *      0.2943928627014602e+00,      0.1488743389816312e+00,
c          *      0.0000000000000000e+00/
c
c          data wgk(1),wgk(2),wgk(3),wgk(4),wgk(5),wgk(6),wgk(7),
c          * wgk(8),wgk(9),wgk(10),wgk(11)/
c          *      0.1169463886737187e-01,      0.3255816230796473e-01,
c          *      0.5475589657435200e-01,      0.7503967481091995e-01,
c          *      0.9312545458369761e-01,      0.1093871588022976e+00,
c          *      0.1234919762620659e+00,      0.1347092173114733e+00,
c          *      0.1427759385770601e+00,      0.1477391049013385e+00,

```

```

c
*      0.1494455540029169e+00/
c
data wg(1),wg(2),wg(3),wg(4),wg(5)/
*      0.6667134430868814e-01,      0.1494513491505806e+00,
*      0.2190863625159820e+00,      0.2692667193099964e+00,
*      0.2955242247147529e+00/
c
c
c      list of major variables
c      -----
c
c      centr  - mid point of the interval
c      hlgth  - half-length of the interval
c      absc   - abscissa
c      fval*  - function value
c      resg   - result of the 10-point gauss formula
c      resk   - result of the 21-point kronrod formula
c      reskh  - approximation to the mean value of f over (a,b),
c              i.e. to  $i/(b-a)$ 
c
c
c      machine dependent constants
c      -----
c
c      epmach is the largest relative spacing.
c      uflow is the smallest positive magnitude.
c
c***first executable statement  qk21
  epmach = rlmach(4)
  uflow = rlmach(1)
c
  centr = 0.5e+00*(a+b)
  hlgth = 0.5e+00*(b-a)
  dhlgh = abs(hlgth)
c
c      compute the 21-point kronrod approximation to
c      the integral, and estimate the absolute error.
c
  resg = 0.0e+00
  fc = f(centr)
  resk = wgk(11)*fc
  resabs = abs(resk)
  do 10 j=1,5
    jtw = 2*j
    absc = hlgth*xgk(jtw)
    fval1 = f(centr-absc)
    fval2 = f(centr+absc)
    fv1(jtw) = fval1
    fv2(jtw) = fval2
    fsum = fval1+fval2
    resg = resg+wg(j)*fsum
    resk = resk+wgk(jtw)*fsum
    resabs = resabs+wgk(jtw)*(abs(fval1)+abs(fval2))
  10 continue
  do 15 j = 1,5
    jtwm1 = 2*j-1
    absc = hlgth*xgk(jtwm1)
    fval1 = f(centr-absc)

```

```

    fval2 = f(centr+absc)
    fv1(jtwm1) = fval1
    fv2(jtwm1) = fval2
    fsum = fval1+fval2
    resk = resk+wgk(jtwm1)*fsum
    resabs = resabs+wgk(jtwm1)*(abs(fval1)+abs(fval2))
15 continue
    reskh = resk*0.5e+00
    resasc = wgk(11)*abs(fc-reskh)
    do 20 j=1,10
        resasc = resasc+wgk(j)*(abs(fv1(j))-reskh)+abs(fv2(j))-reskh))
20 continue
    result = resk*hlgth
    resabs = resabs*dhlgth
    resasc = resasc*dhlgth
    abserr = abs((resk-resg)*hlgth)
    if(resasc.ne.0.0e+00.and.abserr.ne.0.0e+00)
*   abserr = resasc*amin1(0.1e+01,
*   (0.2e+03*abserr/resasc)**1.5e+00)
    if(resabs.gt.uflow/(0.5e+02*epmach)) abserr = amax1
*   ((epmach*0.5e+02)*resabs,abserr)
    return
    end
    subroutine qpsrt(limit,last,maxerr,ermax,elist,iord,nrmax)
c***begin prologue  qpsrt
c***refer to  qage,qagie,qagpe,qagse,qawce,qawse,qawoe
c***routines called  (none)
c***keywords  sequential sorting
c***description
c
c 1.      qpsrt
c         ordering routine
c         standard fortran subroutine
c         real version
c
c 2.      purpose
c         this routine maintains the descending ordering
c         in the list of the local error estimates resulting from
c         the interval subdivision process. at each call two error
c         estimates are inserted using the sequential search
c         method, top-down for the largest error estimate
c         and bottom-up for the smallest error estimate.
c
c 3.      calling sequence
c         call qpsrt(limit,last,maxerr,ermax,elist,iord,nrmax)
c
c         parameters (meaning at output)
c         limit - integer
c                 maximum number of error estimates the list
c                 can contain
c
c         last - integer
c                 number of error estimates currently
c                 in the list
c
c         maxerr - integer
c                 maxerr points to the nrmax-th largest error
c                 estimate currently in the list

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ممنอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c
c      ermax - real
c              nrmax-th largest error estimate
c              ermax = elist(maxerr)
c
c      elist - real
c              vector of dimension last containing
c              the error estimates
c
c      iord - integer
c              vector of dimension last, the first k
c              elements of which contain pointers
c              to the error estimates, such that
c              elist(iord(1)),... , elist(iord(k))
c              form a decreasing sequence, with
c              k = last if last.le.(limit/2+2), and
c              k = limit+1-last otherwise
c
c      nrmax - integer
c              maxerr = iord(nrmax)
c
c 4.      no subroutines or functions needed
c***end prologue  qpsrt
c
c      real elist,ermax,errmax,errmin
c      integer i,ibeg,ido,iord,isucc,j,jbnd,jupbn,k,last,limit,maxerr,
c      * nrmax
c      dimension elist(last),iord(last)
c
c      check whether the list contains more than
c      two error estimates.
c
c***first executable statement  qpsrt
c      if(last.gt.2) go to 10
c      iord(1) = 1
c      iord(2) = 2
c      go to 90
c
c      this part of the routine is only executed
c      if, due to a difficult integrand, subdivision
c      increased the error estimate. in the normal case
c      the insert procedure should start after the
c      nrmax-th largest error estimate.
c
c 10 errmax = elist(maxerr)
c      if(nrmax.eq.1) go to 30
c      ido = nrmax-1
c      do 20 i = 1,ido
c          isucc = iord(nrmax-1)
c ***jump out of do-loop
c          if(errmax.le.elist(isucc)) go to 30
c          iord(nrmax) = isucc
c          nrmax = nrmax-1
c 20      continue
c
c      compute the number of elements in the list to
c      be maintained in descending order. this number
c      depends on the number of subdivisions still

```

```

c         allowed.
c
c 30 jupbn = last
c     if(last.gt.(limit/2+2)) jupbn = limit+3-last
c     errmin = elist(last)
c
c         insert errmax by traversing the list top-down,
c         starting comparison from the element elist(iord(nrmax+1)).
c
c     jbnd = jupbn-1
c     ibeg = nrmax+1
c     if(ibeg.gt.jbnd) go to 50
c     do 40 i=ibeg,jbnd
c         isucc = iord(i)
c ***jump out of do-loop
c         if(errmax.ge.elist(isucc)) go to 60
c         iord(i-1) = isucc
c 40 continue
c 50 iord(jbnd) = maxerr
c     iord(jupbn) = last
c     go to 90
c
c         insert errmin by traversing the list bottom-up.
c
c 60 iord(i-1) = maxerr
c     k = jbnd
c     do 70 j=i,jbnd
c         isucc = iord(k)
c ***jump out of do-loop
c         if(errmin.lt.elist(isucc)) go to 80
c         iord(k+1) = isucc
c         k = k-1
c 70 continue
c     iord(i) = last
c     go to 90
c 80 iord(k+1) = last
c
c         set maxerr and ermax.
c
c 90 maxerr = iord(nrmax)
c     ermax = elist(maxerr)
c     return
c     end

```

```

REAL FUNCTION R1MACH(I)
INTEGER I

```

```

C
C SINGLE-PRECISION MACHINE CONSTANTS
C R1MACH(1) = B**(EMIN-1), THE SMALLEST POSITIVE MAGNITUDE.
C R1MACH(2) = B**EMAX*(1 - B**(-T)), THE LARGEST MAGNITUDE.
C R1MACH(3) = B**(-T), THE SMALLEST RELATIVE SPACING.
C R1MACH(4) = B**(1-T), THE LARGEST RELATIVE SPACING.
C R1MACH(5) = LOG10(B)
C
C THIS VERSION ADAPTS AUTOMATICALLY TO MOST CURRENT MACHINES,
C INCLUDING AUTO-DOUBLE COMPILERS.
C TO ALTER FOR A PARTICULAR ENVIRONMENT, THE DESIRED SET OF DATA
C STATEMENTS MAY BE ACTIVATED BY REMOVING THE C FROM COLUMN 1.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C CONSTANTS FOR OLDER MACHINES CAN BE OBTAINED BY  
 C mail netlib@research.bell-labs.com  
 C send oldmach from blaš  
 C PLEASE SEND CORRECTIONS TO dmg OR ehg@bell-labs.com.  
 C

INTEGER SMALL(2)  
 INTEGER LARGE(2)  
 INTEGER RIGHT(2)  
 INTEGER DIVER(2)  
 INTEGER LOG10(2)  
 INTEGER CRAY1, SC  
 COMMON /D8MACH/ CRAY1  
 SAVE SMALL, LARGE, RIGHT, DIVER, LOG10, SC  
 REAL RMACH(5)  
 EQUIVALENCE (RMACH(1), SMALL(1))  
 EQUIVALENCE (RMACH(2), LARGE(1))  
 EQUIVALENCE (RMACH(3), RIGHT(1))  
 EQUIVALENCE (RMACH(4), DIVER(1))  
 EQUIVALENCE (RMACH(5), LOG10(1))

C MACHINE CONSTANTS FOR THE HONEYWELL DPS 8/70 SERIES.  
 C

DATA RMACH(1) / 0402400000000 /  
 DATA RMACH(2) / 037677777777 /  
 DATA RMACH(3) / 0714400000000 /  
 DATA RMACH(4) / 0716400000000 /  
 DATA RMACH(5) / 0776464202324 /, SC/987/

C MACHINE CONSTANTS FOR PDP-11 FORTRANS SUPPORTING  
 C 32-BIT INTEGERS (EXPRESSED IN INTEGER AND OCTAL).  
 C

DATA SMALL(1) / 8388608 /  
 DATA LARGE(1) / 2147483647 /  
 DATA RIGHT(1) / 880803840 /  
 DATA DIVER(1) / 889192448 /  
 DATA LOG10(1) / 1067065499 /, SC/987/

DATA RMACH(1) / 000040000000 /  
 DATA RMACH(2) / 017777777777 /  
 DATA RMACH(3) / 006440000000 /  
 DATA RMACH(4) / 006500000000 /  
 DATA RMACH(5) / 007746420233 /, SC/987/

C MACHINE CONSTANTS FOR THE SEQUENT BALANCE 8000.  
 C

DATA SMALL(1) / \$00800000 /  
 DATA LARGE(1) / \$7F7FFFFF /  
 DATA RIGHT(1) / \$33800000 /  
 DATA DIVER(1) / \$34000000 /  
 DATA LOG10(1) / \$3E9A209B /, SC/987/

C MACHINE CONSTANTS FOR THE UNIVAC 1100 SERIES.  
 C

DATA RMACH(1) / 000040000000 /  
 DATA RMACH(2) / 037777777777 /  
 DATA RMACH(3) / 014640000000 /  
 DATA RMACH(4) / 014740000000 /  
 DATA RMACH(5) / 0177464202324 /, SC/987/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

IF (SC .NE. 987) THEN
*   *** CHECK FOR AUTODOUBLE ***
    SMALL(2) = 0
    RMACH(1) = 1E13
    IF (SMALL(2) .NE. 0) THEN
*       *** AUTODOUBLED ***
        IF (      SMALL(1) .EQ. 1117925532
*           .AND. SMALL(2) .EQ. -448790528) THEN
*           *** IEEE BIG ENDIAN ***
            SMALL(1) = 1048576
            SMALL(2) = 0
            LARGE(1) = 2146435071
            LARGE(2) = -1
            RIGHT(1) = 1017118720
            RIGHT(2) = 0
            DIVER(1) = 1018167296
            DIVER(2) = 0
            LOG10(1) = 1070810131
            LOG10(2) = 1352628735
        ELSE IF ( SMALL(2) .EQ. 1117925532
*             .AND. SMALL(1) .EQ. -448790528) THEN
*             *** IEEE LITTLE ENDIAN ***
                SMALL(2) = 1048576
                SMALL(1) = 0
                LARGE(2) = 2146435071
                LARGE(1) = -1
                RIGHT(2) = 1017118720
                RIGHT(1) = 0
                DIVER(2) = 1018167296
                DIVER(1) = 0
                LOG10(2) = 1070810131
                LOG10(1) = 1352628735
            ELSE IF ( SMALL(1) .EQ. -2065213935
*                 .AND. SMALL(2) .EQ. 10752) THEN
*                 *** VAX WITH D_FLOATING ***
                    SMALL(1) = 128
                    SMALL(2) = 0
                    LARGE(1) = -32769
                    LARGE(2) = -1
                    RIGHT(1) = 9344
                    RIGHT(2) = 0
                    DIVER(1) = 9472
                    DIVER(2) = 0
                    LOG10(1) = 546979738
                    LOG10(2) = -805796613
                ELSE IF ( SMALL(1) .EQ. 1267827943
*                     .AND. SMALL(2) .EQ. 704643072) THEN
*                     *** IBM MAINFRAME ***
                        SMALL(1) = 1048576
                        SMALL(2) = 0
                        LARGE(1) = 2147483647
                        LARGE(2) = -1
                        RIGHT(1) = 856686592
                        RIGHT(2) = 0
                        DIVER(1) = 873463808
                        DIVER(2) = 0
                        LOG10(1) = 1091781651
                        LOG10(2) = 1352628735

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ELSE
  WRITE(*,9010)
  STOP 777
  END IF
ELSE
  RMACH(1) = 1234567.
  IF (SMALL(1) .EQ. 1234613304) THEN
    *** IEEE ***
    SMALL(1) = 8388608
    LARGE(1) = 2139095039
    RIGHT(1) = 864026624
    DIVER(1) = 872415232
    LOG10(1) = 1050288283
  ELSE IF (SMALL(1) .EQ. -1271379306) THEN
    *** VAX ***
    SMALL(1) = 128
    LARGE(1) = -32769
    RIGHT(1) = 13440
    DIVER(1) = 13568
    LOG10(1) = 547045274
  ELSE IF (SMALL(1) .EQ. 1175639687) THEN
    *** IBM MAINFRAME ***
    SMALL(1) = 1048576
    LARGE(1) = 2147483647
    RIGHT(1) = 990904320
    DIVER(1) = 1007681536
    LOG10(1) = 1091781651
  ELSE IF (SMALL(1) .EQ. 1251390520) THEN
    *** CONVEX C-1 ***
    SMALL(1) = 8388608
    LARGE(1) = 2147483647
    RIGHT(1) = 880803840
    DIVER(1) = 889192448
    LOG10(1) = 1067065499
  ELSE
    CRAY1 = 4617762693716115456.D0
    IF (SMALL(1) .NE. CRAY1) THEN
      WRITE(*,9020)
      STOP 777
      END IF
    *** CRAY 1, XMP, 2, AND 3 ***
    SMALL(1) = 2306828171632181248.D0
    LARGE(1) = 6917247552664371198.D0
    RIGHT(1) = 4598878906987053056.D0
    DIVER(1) = 4599160381963763712.D0
    LOG10(1) = 4611574008272714704.D0
    END IF
  END IF
  SC = 987
  END IF
  * SANITY CHECK
  IF (RMACH(4) .GE. 1.0) STOP 776
  IF (I .LT. 1 .OR. I .GT. 5) THEN
    WRITE(*,*) 'R1MACH(I): I = ',I,' is out of bounds.'
    STOP
  END IF
  R1MACH = RMACH(I)
  RETURN

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

9010 FORMAT(/' Adjust autodoubled R1MACH by getting data'/
*' appropriate for your machine from DIMACH.')
```

```

9020 FORMAT(/' Adjust R1MACH by uncommenting data statements'/
*' appropriate for your machine.')
```

```

* /* C source for R1MACH -- remove the * in column 1 */
#include <stdio.h>
#include <float.h>
#include <math.h>
float rlmach_(long *i)
*{
*   switch(*i){
*     case 1: return FLT_MIN;
*     case 2: return FLT_MAX;
*     case 3: return FLT_EPSILON/FLT_RADIX;
*     case 4: return FLT_EPSILON;
*     case 5: return log10(FLT_RADIX);
*   }
*   fprintf(stderr, "invalid argument: rlmach(%ld)\n", *i);
*   exit(1); return 0; /* for compilers that complain of missing return
values */
*}

END

subroutine xerror(messg,nmessg,nerr,level)
C
C abstract
C   xerror processes a diagnostic message, in a manner
C   determined by the value of level and the current value
C   of the library error control flag, kontrl.
C   (see subroutine xsetf for details.)
C
C description of parameters
C   --input--
C   messg - the hollerith message to be processed, containing
C           no more than 72 characters.
C   nmessg- the actual number of characters in messg.
C   nerr   - the error number associated with this message.
C           nerr must not be zero.
C   level  - error category.
C           =2 means this is an unconditionally fatal error.
C           =1 means this is a recoverable error. (i.e., it is
C             non-fatal if xsetf has been appropriately called.)
C           =0 means this is a warning message only.
C           =-1 means this is a warning message which is to be
C             printed at most once, regardless of how many
C             times this call is executed.
C
C examples
C   call xerror(23hsmooth -- num was zero.,23,1,2)
C   call xerror(43hinteg  -- less than full accuracy achieved.,
C             43,2,1)
C   call xerror(65hrooter -- actual zero of f found before interval
C 1 fully collapsed.,65,3,0)
C   call xerror(39hexp    -- underflows being set to zero.,39,1,-1)
C
C written by ron jones, with slatec common math library subcommittee
C latest revision --- 7 feb 1979
C
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

dimension messg(nmessg)
call xerrwv(messg,nmessg,nerr,level,0,0,0,0,0.,0.)
return
end

```

```

subroutine xerrwv (msg, nmes, nerr, level, ni, i1, i2, nr, r1, r2)
integer msg, nmes, nerr, level, ni, i1, i2, nr,
1 i, lun, lunit, mesflg, ncpw, nch, nwds
real r1, r2
dimension msg(nmes)

```

-----

c subroutines xerrwv, xsetf, and xsetun, as given here, constitute  
c a simplified version of the slatec error handling package.  
c written by a. c. hindmarsh at llnl. version of march 30, 1987.

c  
c all arguments are input arguments.

c  
c msg = the message (hollerith literal or integer array).  
c nmes = the length of msg (number of characters).  
c nerr = the error number (not used).  
c level = the error level..  
c 0 or 1 means recoverable (control returns to caller).  
c 2 means fatal (run is aborted--see note below).  
c ni = number of integers (0, 1, or 2) to be printed with message.  
c i1,i2 = integers to be printed, depending on ni.  
c nr = number of reals (0, 1, or 2) to be printed with message.  
c r1,r2 = reals to be printed, depending on nr.

c  
c note.. this routine is machine-dependent and specialized for use  
c in limited context, in the following ways..  
c 1. the number of hollerith characters stored per word, denoted  
c by ncpw below, is a data-loaded constant.  
c 2. the value of nmes is assumed to be at most 60.  
c (multi-line messages are generated by repeated calls.)  
c 3. if level = 2, control passes to the statement stop  
c to abort the run. this statement may be machine-dependent.  
c 4. r1 and r2 are assumed to be in single precision and are printed  
c in e21.13 format.  
c 5. the common block /eh0001/ below is data-loaded (a machine-  
c dependent feature) with default values.  
c this block is needed for proper retention of parameters used by  
c this routine which the user can reset by calling xsetf or xsetun.  
c the variables in this block are as follows..

c mesflg = print control flag..  
c 1 means print all messages (the default).  
c 0 means no printing.  
c lunit = logical unit number for messages.  
c the default is 6 (machine-dependent).

-----

c the following are instructions for installing this routine  
c in different machine environments.

c  
c to change the default output unit, change the data statement below.

c  
c for some systems, the data statement below must be replaced  
c by a separate block data subprogram.

c  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c for a different number of characters per word, change the  
 c data statement setting ncpw below, and format 10. alternatives for  
 c various computers are shown in comment cards.

c  
 c for a different run-abort command, change the statement following  
 c statement 100 at the end.

```
-----
common /eh0001/ mesflg, lunit
```

```
c
data mesflg/1/, lunit/6/
-----
```

c the following data-loaded value of ncpw is valid for the cdc-6600  
 c and cdc-7600 computers.

```
c data ncpw/10/
```

c the following is valid for the cray-1 computer.

```
c data ncpw/8/
```

c the following is valid for the burroughs 6700 and 7800 computers.

```
c data ncpw/6/
```

c the following is valid for the pdp-10 computer.

```
c data ncpw/5/
```

c the following is valid for the vax computer with 4 bytes per integer,  
 c and for the ibm-360, ibm-370, ibm-303x, and ibm-43xx computers.

```
c data ncpw/4/
```

c the following is valid for the pdp-11; or vax with 2-byte integers.

```
c data ncpw/2/
-----
```

```
c
if (mesflg .eq. 0) go to 100
```

c get logical unit number. -----

```
lun = lunit
```

c get number of words in message. -----

```
nch = min0(nmes,60)
```

```
nwds = nch/ncpw
```

```
if (nch .ne. nwds*ncpw) nwds = nwds + 1
```

c write the message. -----

```
write (lun, 10) (msg(i),i=1,nwds)
-----
```

c the following format statement is to have the form

```
c 10 format(1x,mmann)
```

c where nn = ncpw and mm is the smallest integer .ge. 60/ncpw.

c the following is valid for ncpw = 10.

```
c 10 format(1x,6a10)
```

c the following is valid for ncpw = 8.

```
10 format(1x,8a8)
```

c the following is valid for ncpw = 6.

```
c 10 format(1x,10a6)
```

c the following is valid for ncpw = 5.

```
c 10 format(1x,12a5)
```

c the following is valid for ncpw = 4.

```
c 10 format(1x,15a4)
```

c the following is valid for ncpw = 2.

```
c 10 format(1x,30a2)
-----
```

```
if (ni .eq. 1) write (lun, 20) i1
```

```
20 format(6x,23hin above message, i1 =,i10)
```

```
if (ni .eq. 2) write (lun, 30) i1,i2
```

```
30 format(6x,23hin above message, i1 =,i10,3x,4hi2 =,i10)
```

```
if (nr .eq. 1) write (lun, 40) r1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

40  format(6x,23hin above message,  r1 =,e21.13)
    if (nr .eq. 2) write (lun, 50) r1,r2
50  format(6x,15hin above,  r1 =,é21.13,3x,4hr2 =,e21.13)
c  abort the run if level = 2. -----
100 if (level .ne. 2) return
    stop
c----- end of subroutine xerrw -----
end

```

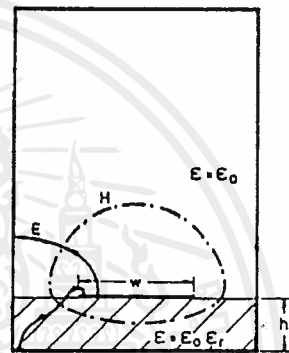
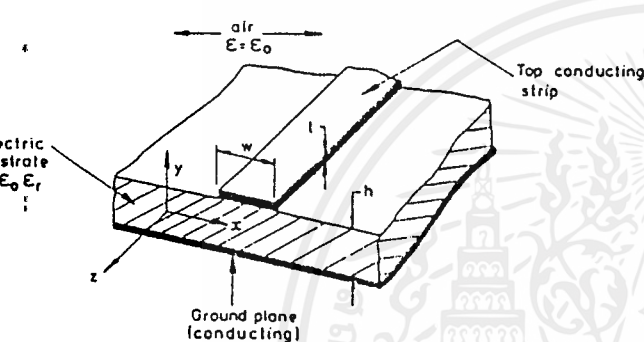


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

## สายส่งไมโครสตริปและการออกแบบโดยใช้สูตรเชิงประสพการณ์ (empirical formula)

ไมโครสตริปไลน์ เป็นสายส่งเชิงระนาบ (planar transmission line) ชนิดหนึ่งประกอบด้วยแผ่นสตริปตัวนำ (strip conductor) และระนาบพื้นดิน (ground plane) ซึ่งถูกคั่นกลางด้วยไดอิเล็กตริกสับสเตรต (dielectric substrate) ซึ่งทำจากสารไดอิเล็กตริก (dielectric material) โครงสร้างของไมโครสตริป แสดงดังรูปที่ ค-1 ลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในตัวนำสตริป ประกอบด้วยสนาม ที่อยู่ในไดอิเล็กตริกสับสเตรตใต้แผ่นสตริปและสนามที่อยู่ในอากาศเหนือแผ่นสตริป ดังแสดงในรูปที่ ค-2 ดังนั้นไมโครสตริปจึงมีโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous)



รูปที่ ค-1 ลักษณะของไมโครสตริปไลน์

รูปที่ ค-2 ลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในไมโครสตริปไลน์

สำหรับคลื่นในโหมด TEM (Transverse Electromagnetic Mode) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริก ได้แก่ค่า  $\epsilon$  และ  $\mu$  ในกรณีที่มีสารตัวกลางสองชนิด คลื่นในโหมดนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสองค่า ค่าหนึ่งเป็นความเร็วในไดอิเล็กตริกสับสเตรตและอีกค่าหนึ่งเป็นความเร็วในอากาศเหนือพื้นผิว ซึ่งทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไม่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นคลื่นที่เคลื่อนที่ไปบนแผ่นสตริปจึงไม่ใช่คลื่นในโหมด TEM ในการวิเคราะห์โดยทั่วไปจะพิจารณาคลื่นที่เดินทางในไมโครสตริปเป็นคลื่นในโหมด Quasi-TEM ซึ่งถือเป็นคลื่นในโหมดผสม (hybrid mode)

ค.1 คงตัวสภาพยอมประสิทธิผล (effective permittivity ;  $\epsilon_e$ ) [10]

การประมาณลักษณะการเดินทางของคลื่นในแผ่นสตริปเป็นคลื่นในโหมด Quasi-TEM สามารถแทนโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของไมโครสตริปได้ด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) โดยที่ยังคงขนาดทางเรขาคณิตเดิมไว้ ( $w, h, \epsilon$ ) แต่จะพิจารณาค่า  $\epsilon_e$  เสมือนว่าคลื่นเดินทางในสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกค่าใหม่ค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ ค-3 ทั้งนี้สามารถคำนวณค่าได้จาก

$$\varepsilon_e \cong \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{W}\right)^{-ab} \quad (\text{ค-1})$$

$$\text{โดยที่ } a = 1 + \frac{1}{49} \log \frac{(W/h)^4 + (W/52h)^2}{(W/h)^4 + 0.432} + \frac{1}{18.7} \log \left\{1 + \left(\frac{W}{18.1h}\right)^3\right\} \quad (\text{ค-2})$$

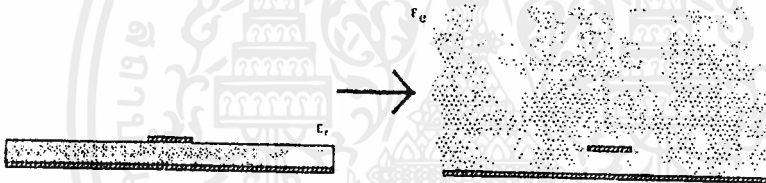
$$b = 0.564 \left(\frac{\varepsilon_r - 0.9}{\varepsilon_r + 3}\right)^{0.053} \quad (\text{ค-3})$$

เมื่อ  $\varepsilon_r$  = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (dielectric constant) หรือ ค่าคงตัวสภาพยอมประสิทธิผลของไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์  $1 \leq \varepsilon_r \leq 128$

$W$  = ความกว้างของแผ่นสตริป (m)

$h$  = ความหนาของไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (m)

$$0.01 \leq W/h \leq 100$$



รูปที่ ค-3 หลักการของค่าคงตัวสภาพยอม

## ค.2 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance ; $Z_0$ )

คลื่นโหมด Quasi-TEM ที่เดินทางบนตัวนำที่ไม่มีกระแสสูญเสีย ค่าของ  $Z_0$  จะไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของคลื่น และจะเป็นฟังก์ชันทางเรขาคณิตของ  $W/h$  และ  $\varepsilon_r$  ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Hammerstad และ Jansen

$$Z_0 \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_e}} \log \left\{ F_1 \frac{h}{W} + \sqrt{1 + \left(2 \frac{h}{W}\right)^2} \right\} \quad (\text{ค-4})$$

$$\text{โดยที่ } F_1 = 6 + (2\pi - 6) \exp\left\{-(30.666h/W)^{0.7528}\right\} \quad (\text{ค-5})$$

จากสมการเห็นได้ว่าสำหรับแผ่นสตริปที่มีค่า  $Z_0$  ต่ำ จะมีขนาดของแผ่นกว้างกว่าสตริปที่มีค่า  $Z_0$  สูง

### ค.3 การหาค่า $W/h$

ในการเริ่มออกแบบวงจรทางไมโครสตริปนั้น สิ่งที่จะต้องรู้เป็นอันดับแรกคืออัตราส่วน  $W/h$  ของแผ่นสตริปที่สอดคล้องกับ  $Z_0$ ,  $\epsilon_r$  และ  $h$  ที่ต้องการ ซึ่งการประมาณอัตราส่วน  $W/h$  ในเทอมของ  $Z_0$  และ  $\epsilon_r$  นั้นสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Wheeler ซึ่งถูกพัฒนาโดย Hammerstad อีกครั้ง

เมื่อ  $W/h \leq 2$

$$\frac{W}{h} \cong 4 \left[ \frac{1}{2} e^A - e^{-A} \right]^{-1} \quad (\text{ค-6})$$

$$\text{โดยที่ } A = \pi \sqrt{2(\epsilon_r + 1)} \frac{Z_0}{120\pi} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (\text{ค-7})$$

หรือเมื่อ  $W/h \geq 2$

$$\frac{W}{h} \cong \frac{\epsilon_r - 1}{\pi \epsilon_r} \left[ \log(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] + \frac{2}{\pi} [B - 1 - \log(2B - 1)] \quad (\text{ค-8})$$

$$\text{โดยที่ } B = \frac{\pi}{2\sqrt{\epsilon_r}} \frac{120\pi}{Z_0} \quad (\text{ค-9})$$

อย่างไรก็ตาม สมการดังกล่าวจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อความหนา  $t$  ของแผ่นสตริปมีค่าน้อยมากจนกระทั่งถือว่าเป็นศูนย์เท่านั้น

### ค.4 ความเร็วเฟสและความยาวคลื่นบนแผ่นสตริป (phase velocity and line wave-length)

ความเร็วเฟสและความยาวคลื่นบนแผ่นสตริปสามารถพิจารณาเป็นความสัมพันธ์กับค่าคงตัวสภาพยอมประสิทธิผล ได้ดังนี้

$$v = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (\text{ค-10})$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (\text{ค-11})$$

โดยที่  $v$  = ความเร็วเฟส (m/s)

$\lambda_g$  = ความยาวคลื่นบนแผ่นสตริป (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\lambda_0 =$  ความยาวคลื่นของคลื่นที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง (m)

$C =$  ความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่า  $3 \times 10^8$  m/s

จากความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่า  $V_\phi$  และ  $\lambda_g$  เป็นฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางเรขาคณิตของไมโครสตริปและเกี่ยวเนื่องไปถึงค่า  $Z_0$  ด้วย

#### ค.5 ผลเนื่องจากความหนาของแผ่นสตริป [11]

ในกรณีนี้  $t$  ซึ่งเป็นความหนาของแผ่นสตริป มีค่าไม่เท่ากับศูนย์จะมีผลต่อสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในไมโครสตริป ดังแสดงในรูปที่ ค-4 จึงต้องมีการพิจารณาค่าความกว้างของแผ่นสตริปใหม่  $W_e$  แทนความกว้างเดิม  $W$  จากสมการของ Gunston โดยที่

$$W_e = W + \frac{t}{\pi} \left[ 1 + \ln \left( \frac{2x}{t} \right) \right] \quad (\text{ค-12})$$

โดยที่  $x = h$  เมื่อ  $W > h/2\pi$

และ  $x = 2\pi W$  เมื่อ  $h/2\pi > W > 2t$

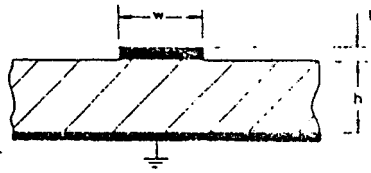
นอกจากนี้ต้องพิจารณาค่า  $\epsilon_e$  ใหม่ด้วยเช่นกัน โดยที่

$$\Delta\epsilon_e(t) = \frac{(\epsilon_r - 1)t/h}{4.6\sqrt{W/h}} \quad (\text{ค-13})$$

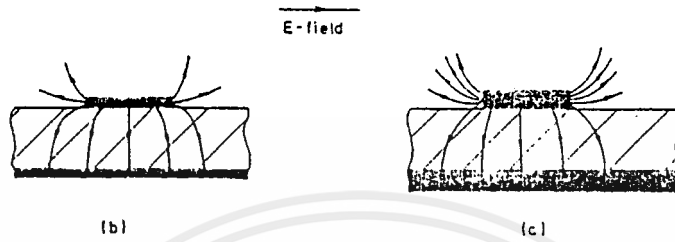
เพราะฉะนั้น

$$\epsilon_e(t) = \epsilon_e - \Delta\epsilon_e(t) \quad (\text{ค-14})$$

อย่างไรก็ตาม สำหรับไมโครสตริปที่มีขนาด  $t/h \leq 0.005$ ,  $2 \leq \epsilon \leq 10$  และ  $W/h \geq 0.1$  ผลของความหนาดังกล่าวสามารถละทิ้งได้



(a) Microstrip showing thickness  $l$



Increasing  
thickness  $l$  →

รูปที่ ค-4 ผลของความหนาของแผ่นสตริปต่อสนามไฟฟ้า

## กิตติกรรมประกาศ

คุณความดีอันใดที่บังเกิดจากปริญญาพันธบัตรนี้ ขออุทิศให้แก่ผู้มีพระคุณ อันได้แก่บิดา มารดา ครู อาจารย์ ตลอดจนผู้มีอุปการคุณทั้งปวง

ปริญญาพันธบัตรนี้ จะสำเร็จลงไม่ได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จากบุคคลหลายฝ่าย ตั้งแต่เริ่มต้นทำโครงการจนกระทั่งจัดทำปริญญาพันธบัตรนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จเร สุรวัฒน์ปัญญา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความกรุณาชี้แนะแนวทางในการทำ ปริญญาพันธบัตร และให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจสอบต้นฉบับของปริญญาพันธบัตรนี้

ขอขอบพระคุณ Prof.Dr.Tatsuo Itoh แห่ง UCLA,USA และ Prof.Dr.-Ing.Wolfgang Menzel แห่ง University of Ulm,Germany ที่ให้ความกรุณาให้คำปรึกษาแก้ปัญหาทางทฤษฎีโดเมนเชิงสเปกตรัม โดยผ่านทางจดหมายอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบพระคุณ ดร.ภูษงค์ อุทัยภาส แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ Assoc.Prof.Dr.Jun-ichi TAKADA แห่ง TIT,Japan ในโอกาสที่เดินทางมาทำหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญ JICA ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการเขียน โปรแกรมประมวลผลทางคณิตศาสตร์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่กรุณาเอื้อเพื่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณคมศักดิ์ เมฆสมุทร คุณชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ นักศึกษาปริญญาเอกและคุณวงศกร วัชรานานันท์ นักศึกษาปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายควบคุมเครื่อง สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ที่อำนวยความสะดวกในการประมวลผล โปรแกรมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ HP-Convex Exemplar SPP-1000 (nawamas.kmitl.ac.th)

ขอขอบคุณ คุณมณฑา เทียมเมือง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่กรุณาอำนวยความสะดวกในการสร้าง ชิ้นงานด้วยเครื่องกัดเอ็นซี และคุณชาติ นุตรา นักศึกษาปริญญาตรี ที่ให้คำปรึกษาในการสร้างชิ้นงาน

ขอขอบคุณ คุณเอกลักษณ์ ชคทิส และคุณอำภา ทนุถนอมราษฎร์ นักศึกษาปริญญาตรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการตรวจสอบจุดผิดพลาดในการพิสูจน์สมการทางคณิตศาสตร์ และแก้ไขข้อผิดพลาดในโปรแกรม

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- [1] T.Itoh, Ed., *Numerical Techniques for Microwave and Millimeter Wave Passive Structures*. New York: Wiley,1989
- [2] W.Schwab and W.Menzel, "On the Design of Planar Microwave Components Using Multilayer Structures" , *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,vol. 40, No.1, pp.67-72, Jan 1992
- [3] E.Chen and Stephen Y. Chou, "Characteristic of Coplanar Transmission Lines on Multilayer Substate: Modeling and Experiments", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,vol. 45, No.6 , pp. 939-945, Jun 1997
- [4] T.Itoh, "Spectral Domain Imittance Approach for Dispersion Characteristics of Generalized Printed Transmission Lines", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,vol. MTT-28, No.7, July 1980
- [5] R.F.Harrington, *Time-harmonic Electromagnetic wave*,McGraw-Hill
- [6] W.Menzel, "A New Interpretation of the Spectral Domain Imittance Matrix Approach", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*,vol.3, No.9, Sep 1993
- [7] R.F.Harrington,*Field Computation by Moment Method*, Robert E. Krieger Publishing Company,Inc.,USA,1968
- [8] Matthew N.O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, CRC Press,USA,1992 ✕
- [9] Ben Noble and J.W. Daniel, *Applied Linear Algebra* ,3rd edition, Prentice-Hall, USA, 1988
- [10] Fred Gardiol,*Microstrip Circuit*,John Wiley & Sons Inc.
- [11] Terry Edwards,*Foundations for Microstrip Circuit Design*,2nd edition,John Wiley & Sons Inc.,England,1992
- [12] John J.BURKE, "Surface-to-Surface Transition via Electromagnetic Coupling of Microstrip and Coplanar Waveguide",*IEEE Trans.Microwave Theory Tech.*,vol 37 No.3 pp.519-525 March 1989
- [13] Ellis,T.M.R.,*FORTRAN77 programming :with an introduction to the FORTRAN90 standard*,Addison-Wesley pub.,1990
- [14] Convex,*Fortran User's Guide*,11th edition,Convex press,1994