



# การออกแบบสายอากาศแบบพลาแนสล็อตอาร์เรย์

## THE DESIGN OF THE PLANAR SLOTTED ARRAY ANTENNA



โดย

นายกวิน จัตรานนท์

นายธนา อุ่ณสมบัติ

นายจระชัย คุณากร

นายธนาพันธ์ ดันดีสัตยกุล

วัน เดือน ปี..... 19 ม.ค. ๒53๙  
เลขทะเบียน..... 0๒4๙๘๒  
เลขเรียกหนังสือ..... ๒๒๙1๙๒ ๓๖

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ใจว่ากรณิดองทั้งสี่บ ลึกซึ้งห่วยเป็ให้ดัดแปลงบื้อหา และต้องอ้างถึงเกล้าของเอกสารทกครั้งทีปีการง่าไปใ้

# การออกแบบสายอากาศแบบพลาแนสล็อตอาร์เรย์

## THE DESIGN OF THE PLANAR SLOTTED ARRAY ANTENNA

โดย

นาย กวิน ฉัตรานนท์ 34101011

นายธนา อุ่นสมบัติ 34103139

นายจิระชัย คุณากร 34101059

นายธนาพันธ์ ดันติสัตยกุล 34103140

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2537 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2537

ภาควิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบสายอากาศแบบพลาแนลสล็อตอาร์เรย์

**ผู้จัดทำ**

1. นาย กวิน ฉัตรานนท์ 34101011
2. นาย ธนา อุ่นสมบัติ 34103138
3. นาย จิระชัย คุณากร 34101059
4. นาย ธนาพันธ์ ตันติสัตยกุล 34103140



อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร.ไมโนะ ไกรฤกษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบสายอากาศแบบพลาแนสล็อตอาร์เรย์

### THE DESIGN OF THE PLANAR SLOTTED ARRAY ANTENNA

โดย	นายกวิน ฉัตรานนท์	34101011
	นายธนา อุ่สมบัติ	34103138
	นายจิระชัย คุณากร	34101059
	นายธนาพันธ์ ดันติสัตยกุล	34103140

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาในเรื่องการออกแบบสายอากาศแบบพลาแนสล็อตอาร์เรย์ การศึกษาจะเน้นไปยังสล็อตที่พีดด้วยท่อนำคลื่น โดยจะอธิบายถึงพื้นฐานของสล็อตบนท่อนำคลื่นว่าเกิดผลเช่นไรกับคลื่นที่เดินทางภายในท่อนำคลื่น และทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกสู่ภายนอกได้อย่างไร หลังจากนั้นก็จะพิจารณาการออกแบบสล็อตของสล็อตอาร์เรย์ที่จะทำให้ได้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นและอินพุทแอดมิแตนซ์ (อิมพีแดนซ์) ที่ต้องการ ผลที่ได้จะนำไปพิจารณาการออกแบบสายอากาศพลาแนสล็อตอาร์เรย์ที่สามารถนำไปใช้งานจริง

สำหรับโครงการในภาคเรียนนี้ เป็นโครงการต่อเนื่องจากภาคเรียนแรก จะมีการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนแรกคือการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้สำหรับออกแบบและสร้างสายอากาศพลาแนสล็อตอาร์เรย์ขนาด 6 คูณ 6 โดยมีลำบีมเป็นรูปดินสอ (pencil beam) เมื่อคิดผลจากมิวชวลคัปปลิง ซึ่งถูกกำหนดให้ใช้งานในย่านความถี่ Ku-band ส่วนที่สองเป็นการศึกษาถึงระบบการป้อนสัญญาณจากท่อนำคลื่นหลักไปสู่ท่อนำคลื่นย่อย ส่วนที่สามเป็นการนำผลที่ได้จากส่วนแรกซึ่งเป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในส่วนของโปรแกรมและส่วนที่สองซึ่งเป็นการศึกษาถึงระบบพีดมาสร้างเป็นสายอากาศพลาแนสล็อตอาร์เรย์ขนาด 6 คูณ 6 ส่วนที่สี่ซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายจะเป็นการทดสอบสายอากาศที่สร้างได้เพื่อพิจารณาว่าเป็นไปตามที่ออกแบบไว้หรือไม่

#### Abstract

This project is a case study showing the procedure of designing slot-antenna arrays. The study will be limited to rectangular-waveguide-fed slot arrays showing why and how they can be used as radiation elements. The design of slots of slot-antenna arrays to achieve the required radiation pattern and input admittance (impedance) will subsequently be described in detail. From this procedure, the slots of linear slot-antenna arrays and planar slot-antenna arrays will then be properly designed.

The project implemented during this semester is a continuation of the project undertaken in the first semester and consists of 4 parts. The first part is the development of the program for the design and construction of the 6x6 Planar Slotted Array Antenna with a pencil beam, taking into consideration the mutual coupling which is designed at Ku-band frequency. The second part is the study of the feeding system. The third part will be an integration of the results derived from the study of the first and second parts in order to construct the 6x6 Planar Slotted Array Antenna. The fourth and final part will be the testing of the constructed antenna according to the desired goals and objectives.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 สล็อตในแผ่นตัวนำขนาดใหญ่	2
บทที่ 3 สล็อตที่ฟีดโดยท่อนำคลื่น	4
บทที่ 4 สมการและการออกแบบสล็อตของสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่ฟีดด้วยท่อนำคลื่น	7
บทที่ 5 การออกแบบสล็อตของสายอากาศสล็อตแบบยูนิฟอร์มพลาานอาร์เรย์ จำนวน 6*6 อิลิเมนต์ ซึ่งฟีดโดยท่อนำคลื่น	19
บทที่ 6 ระบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสล็อตโดยใช้ท่อนำคลื่น	36
บทที่ 7 การคำนวณ และออกแบบระบบการป้อนสัญญาณโดยใช้ Incline Series Slot	45
บทที่ 8 วิธีสร้าง วิธีทดลอง และผลการทดลอง	47
แนวทางการพัฒนา	67
บรรณานุกรม	68
กิตติกรรมประกาศ	69
ภาคผนวก	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันนี้การสื่อสารด้านต่าง ๆ ได้เข้ามามีบทบาทต่อการดำรงชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การสื่อสารดาวเทียมเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยม และเพิ่มความสำคัญขึ้นเรื่อย ๆ ดังจะเห็นได้จากการทำงานที่ประเทศไทยมีดาวเทียมเป็นของตนเอง ซึ่งจะทำให้การสื่อสารดาวเทียมมีบทบาทมากยิ่งขึ้น อุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการรับและส่งสัญญาณดาวเทียมก็คือสายอากาศ สายอากาศรับสัญญาณดาวเทียมนั้นมียูหลายชนิด และปริญญาโทฉบับนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับสายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์ ซึ่งเป็นสายอากาศที่นำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบเรดาร์ทางอากาศ หรือในพาหะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เช่น เครื่องบิน ด้วยข้อดีที่ว่า สายอากาศชนิดนี้ไม่มีส่วนยื่นออกมานอกพื้นผิวของยานพาหนะ และยังสามารถสร้างให้มีไซด์โลบเลเวล ( side lobe level ) ต่ำ พร้อมกับมีบีมิวิดซ์ ( beam width ) ที่แคบได้ตามต้องการโดยอาศัยหลักการแพร่กระจายคลื่นผ่านทางสล็อตของท่อนำคลื่นด้วยขนาดที่เหมาะสม

เนื้อหาในปริญญาโทฉบับนี้ จะเจาะจงลงไปทีสล็อตอาร์เรย์ที่พีดด้วยท่อนำคลื่น ส่วนสล็อตอาร์เรย์ที่พีดด้วยสายส่งคู่ขนาน ( two-wire-line ) จะไม่กล่าวถึงในที่นี้ เนื่องจากสล็อตอาร์เรย์ที่พีดด้วยสายส่งคู่ขนานจะมีข้อดีคือ สร้างได้ง่าย และราคาถูกแต่ข้อเสียของมันก็คือจะต้องสิ้นเปลืองสายส่งคู่ขนานเป็นจำนวนมากที่ใช้ในการพีด

สายอากาศสล็อตอาร์เรย์สามารถสร้างให้อยู่ในรูปแบบลิเนียร์อาร์เรย์ หรือ พลาสมาอาร์เรย์ก็ได้ หากแต่ในทางปฏิบัติ เช่น ระบบเรดาร์ทางอากาศ จะนิยมสร้างเป็นแบบพลาสมาอาร์เรย์มากกว่า

ในปริญญาโทฉบับนี้ จะเริ่มจากการกล่าวถึงทฤษฎีของสล็อตที่เจาะบนท่อนำคลื่นเสียก่อนว่ามีชนิดใดบ้าง และมีผลต่อท่อนำคลื่นอย่างไรบ้าง และทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นออกสู่ภายนอกท่อนำคลื่นได้อย่างไร และจะมีการกล่าวถึงสมการและการออกแบบสายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์ขนาด  $6 \times 6$  เพื่อให้ได้ค่าความยาวสล็อต และตำแหน่งที่เจาะบนท่อนำคลื่น ซึ่งจะทำให้ได้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการ รวมทั้งการออกแบบระบบป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศ ซึ่งจะมีการกล่าวถึงวิธีการเจาะสล็อตแบบต่าง ๆ ทางด้านกว้างของท่อนำคลื่น ( Broad wall slot array ) และทางด้านแคบของท่อนำคลื่น ( Narrow wall slot array ) และจะทำการเลือกรูปแบบและวิธีการเจาะสล็อตที่เหมาะสมที่สุดมาทำการสร้างระบบการป้อนสัญญาณ ซึ่งในส่วนของระบบการป้อนสัญญาณจะมีการแสดงสมการ ริชีสแตนท์ ของการเจาะสล็อตแบบกึ่งกลาง ( center inclined series slot ) บนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น ซึ่งใช้ในการป้อนสัญญาณ

นอกจากนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้าง และวิธีการทดลองวัดแพทเทิร์นของสายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์ขนาด  $6 \times 6$  รวมทั้งผลการทดลองดังกล่าว

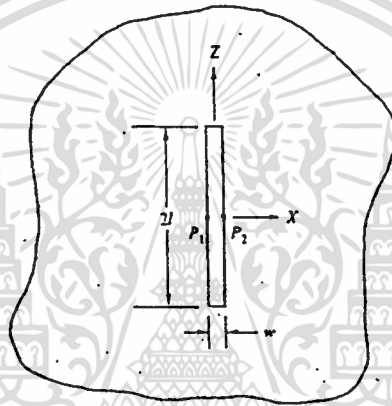
สายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์นี้จะใช้สำหรับรับสัญญาณที่ย่านความถี่ Ku Band

## บทที่ 2

### สล็อตในแผ่นตัวนำขนาดใหญ่มาก

#### (Center-Fed slot In Large Ground Plane)

ในงานด้านสายอากาศ ส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ได้ก็คือ สล็อต (ช่อง) ที่เหลี่ยมมุมฉากแคบๆที่ถูกพีด (ป้อนสัญญาณ) ที่จุดกึ่งกลาง ซึ่งอยู่ในระนาบตัวนำขนาดใหญ่มาก (large ground plane) ดังแสดงในรูป 2.1 ซึ่งความยาวและความกว้างของสล็อตคือ  $2l$  และ  $w$  ตามลำดับ โดยที่ความกว้างจะแคบมากๆเมื่อเทียบกับความยาวของสล็อต ( $2l \gg w$ ) และจะสมมติให้มีสายส่งคู่ขนาน (two-wire line) ป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของสล็อตพอดีที่  $P_1$  และ  $P_2$



รูปที่ 2.1

เมื่อพิจารณาว่าความกว้างของช่องเปิดมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณที่ป้อน ( $w \ll \lambda$ ) ทำให้สล็อตดังกล่าวถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ณ จุดที่ป้อนสัญญาณจากสายส่งคู่ขนาน ลักษณะของช่องเปิดทั้งสองส่วนจะเสมือนสายส่งสัญญาณคู่ขนานสองคู่ที่มีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของกราวด์เพลนอนันต์ (semi infinite ground plane) โดยขอบของสายส่งวางห่างกัน  $x = \pm w/2$  และปลายทั้งสองข้างถูกลัดวงจรที่  $z = \pm l$  ตามรูปที่ 2.1 และเนื่องจากช่องเปิดดังกล่าวเป็นเสมือนสายส่งสัญญาณที่ถูกลัดวงจร ทำให้เกิดเป็นคลื่นนิ่งของศักดาไฟฟ้าบนสายส่งสัญญาณเสมือนสองคู่นี้ ดังนั้นจะสามารถประมาณสนามไฟฟ้าบนสล็อตดังกล่าวได้ว่า

$$E(\xi, \eta, \zeta) = a_x E_x(\xi, 0, \zeta) = a_x \frac{V_m}{w} \sin[k(l - |\zeta|)] \quad \dots(2.1)$$

เมื่อ  $V_m$  เป็นค่าศักดาไฟฟ้าสูงสุด (peak voltage)

สมมติว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณ และสายส่งคู่ขนานที่ป้อนสัญญาณให้กับสล็อตที่จุด  $P_1$  และ  $P_2$  อยู่ในช่วง  $y < 0$  และให้ระนาบขนาดใหญ่มีขนาดเป็นอนันต์ พื้นผิว  $S$  ซึ่งไม่รวมแหล่งกำเนิดสัญญาณ จะประกอบด้วยบริเวณปากสล็อต  $S_1$  ( $w|x|$ ) รวมกับพื้นผิว  $S_2$  ภายใต้ระนาบกราวด์เพลนขนาดอนันต์และรวมกับพื้นผิวครึ่งทรงกลมขนาดอนันต์ในบริเวณ  $y < 0$  จาก image principle ทำให้สามารถลดรูปของแหล่งกำเนิดทั้งหมดให้เป็น แผ่นกระแสแม่เหล็ก (magnetic current sheet) บน  $S_1$  ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้  $\mathbf{K}_m = -2\mu_0^{-1} a_y \times a_x \frac{V_m}{w} \sin[k(l - |\zeta|)]$  อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= a_z \frac{2\mu_0^{-1} V_m}{w} \sin(k(l - |\zeta|)) \quad \dots(2.2)$$

ซึ่งจะเหมือนกับกรณีของแมกเนติกไดโพล ที่มีสมการอยู่ว่า

$$F_{\theta}(\theta) = \frac{-4\mu_0^{-1}V_m}{k \sin \theta} [\cos(kl \cos \theta) - \cos(kl)] \quad \dots(2.3)$$

สำหรับสล็อตที่มีความยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ( $2l \approx \lambda/2$ ) จะคำนวณหา E และ H ได้ดังนี้

$$E_{\phi} = -j \frac{V_m}{\pi} \frac{e^{j(\omega t - kr)}}{r} \left[ \frac{\cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin \theta} \right] \quad \dots(2.4)$$

$$H_{\theta} = j \frac{V_m}{\pi \eta} \frac{e^{j(\omega t - kr)}}{r} \left[ \frac{\cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin \theta} \right] \quad \dots(2.5)$$

ซึ่งก็เหมือนกับกรณีของไดโพลยาวครึ่งหนึ่งของความยาว แต่ทิศทางโพลาร์ไอเซนชันจะหมุนไป  $90^\circ$  ทำให้ได้แนวแพร่กระจายคลื่นในทำนองเดียวกัน

เนื่องจากไม่มี A ( magnetic vector potential ) ในสายอากาศชนิดนี้ ดังนั้นจะได้

$$P_{r,\phi}(\theta) = \frac{8V_m^2/\eta}{(4\pi r)^2} \left[ \frac{\cos^2[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin^2 \theta} \right] \quad \dots(2.6)$$

หากสมมติว่าแหล่งกำเนิดและสายส่งคู่ขนานซึ่งอยู่ในบริเวณ  $y < 0$  มีผลกระทบน้อยมากต่อบริเวณระยะไกลในบริเวณ  $y < 0$  ดังนั้นจากสมการ (2.4) ถึง (2.6) จะสามารถพิจารณากำลังงานทั้งหมดที่แพร่กระจายออกไปทั้งสองด้านของระนาบอนันต์ได้ว่า

$$P_{rad} = (0.609) \frac{4V_m^2/\eta}{2\pi} \quad \dots(2.7)$$

เพราะเราพิจารณาในกรณีที่สล็อตมีความยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น  $l = \lambda/4$  จะได้ว่าที่จุดต่อกับสายส่ง สัญญาณ ( $P_1, P_2$ ) จะมีค่าอินพุทโวลเตจสูงสุดเท่ากับ  $V_m$  และกล่าวได้ว่าสายส่งนี้ได้ส่งถ่ายกำลังงานเท่ากับ

$$\frac{1}{2} V_m^2 G_{rad} = (0.609) \frac{4V_m^2/\eta}{2\pi} \quad \dots(2.8)$$

โดย  $G_{rad}$  คือค่าความนำของการแพร่กระจายคลื่นที่ระหว่างจุด  $P_1$  และ  $P_2$  หรือ  $R_{rad} = 1/G_{rad}$  หมายถึง ค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น ของสล็อตยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นซึ่งพืดที่กึ่งกลาง มีค่าดังนี้

$$R_{rad} = \frac{\pi\eta/4}{0.609} = 486 \text{ ohms} \quad \dots(2.9)$$

หากจะหาความสัมพันธ์เทียบกับไดโพล โดยการคูณค่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล จะได้ว่า

$$R_{rad}^{dipole} R_{rad}^{slot} = \left( \frac{0.609\eta}{\pi} \right) \left( \frac{\pi\eta/4}{0.609} \right) = \frac{\eta^2}{4} \quad \dots(2.10)$$

ซึ่งเป็นกรณีพิเศษของความสัมพันธ์ตามกฎของ Booker หรืออาจแสดงได้ว่า

$$Z^{dipole} \cdot Z^{slot} = \frac{\eta^2}{4} \quad \dots(2.11)$$

ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน สายอากาศชนิดนี้นิยมพืดด้วยท่อนำคลื่นมากกว่าสายส่งคู่ขนาน โดยการเจาะสล็อตลงบนผนังของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งจะได้อีกต่อไปในบทที่ 3

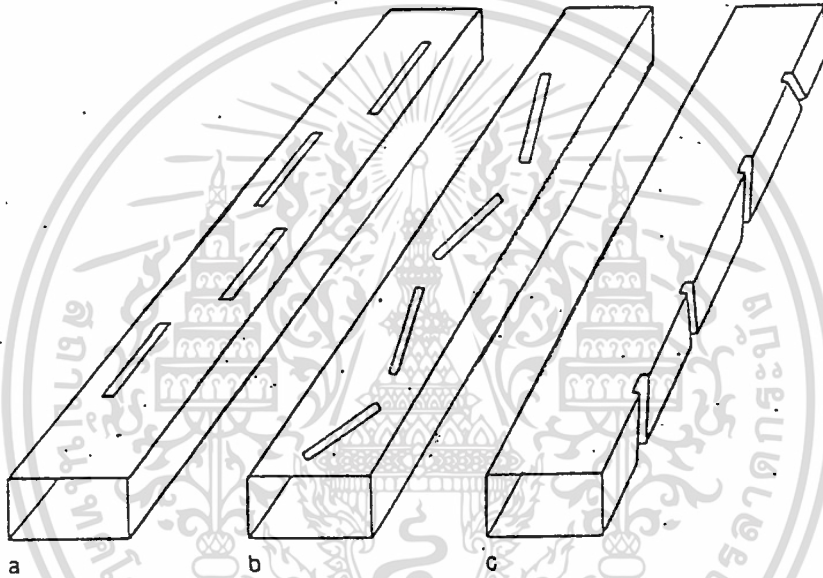
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## สล๊อตที่ปิดโดยท่อนำคลื่น

งานสายอากาศที่นำเอาเรื่องของสล๊อตที่กล่าวในบทที่ 2 มาประยุกต์ใช้ ส่วนใหญ่แล้วจะสร้างขึ้นโดยการเจาะสล๊อตบนด้านใดด้านหนึ่งของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมดังรูป 3.1 ซึ่งจะต้องมีสายส่งที่ไม่มีการรั่วไหลของคลื่น, การแมชชิงที่ถูกต้อง และมีโครงสร้างที่แข็งแรง โดยทั่วไปการจัดวางสล๊อตจะนิยมทำเป็นอาร์เรย์ แต่จะมีความยุ่งยากในการผลิตเนื่องจากมีวัสดุที่ปปลิง ในบทนี้จะกล่าวถึงสล๊อตเดี่ยวที่เจาะบนด้านต่างๆของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดหน้าตัดสำหรับคลื่นโหมด  $TE_{10}$



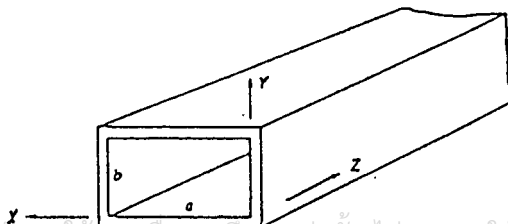
รูปที่ 3.1 a) สล๊อตตามยาวบนด้านบรอดวอลล์ b) สล๊อตเอียงบนกึ่งกลางด้านบรอดวอลล์ c) สล๊อตเอียงบนด้านแนโรวอลล์

จากการกำหนดแแกนดังรูป 3.2 จะได้ว่าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ถูกนอมอลไลซ์ (normalize) ของคลื่นโหมด  $TE_{10}$  ที่เดินทางในทิศทาง  $+z$  คือ

$$H_z = j \cos \frac{\pi x}{a} e^{j(\omega t - \beta_{10} z)}$$

$$H_x = \frac{-\beta_{10}}{\pi/a} \sin \frac{\pi x}{a} e^{j(\omega t - \beta_{10} z)} \quad \dots(3.1)$$

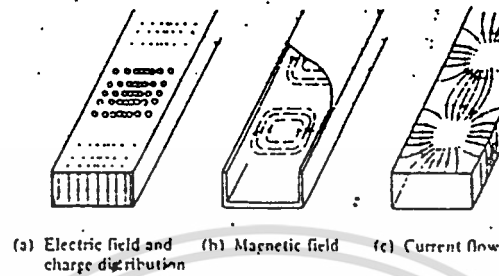
$$E_y = \frac{\omega \mu_0}{\pi/a} \sin \frac{\pi x}{a} e^{j(\omega t - \beta_{10} z)}$$



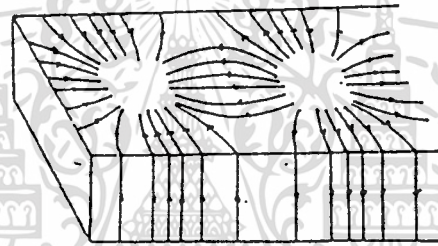
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และขอยกย่องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.2

การนอมอลไลซ์ในสมการ (3.1) นี้ ได้มีการเลือกให้ค่าขนาดสูงสุดขององค์ประกอบตามทิศทาง  $+z$  มีค่าเป็นหนึ่ง แต่เฟสเลื่อนไป  $90^\circ$  โดยใช้แฟกเตอร์  $j$  ซึ่งจะทำให้องค์ประกอบของสนามที่ตั้งฉากกับทิศทางที่คลื่นเดินทาง ( $+z$ ) มีเฉพาะค่าจริงเท่านั้น การคำนวณค่าพอยน์ติงเวกเตอร์ (Poynting vector) ของกำลังงานที่กระจายไปในท่อนำคลื่น ( $W=ExH$ ) ก็จะทำให้สะดวกขึ้น



รูปที่ 3.3



ขยายรูปที่ 3.3c

รูป 3.3a แสดงถึงการกระจายของสนามไฟฟ้าและการกระจายของประจุไฟฟ้าบนด้านบรอดวอลล์ (broad wall) ที่เวลาหนึ่ง รูปที่ 3.3b แสดงถึงการกระจายสนามแม่เหล็กภายในท่อนำคลื่น และรูปที่ 3.3c แสดงถึงการกระจายของกระแสไฟฟ้าที่เวลาหนึ่งบนผนังของท่อนำคลื่น เมื่อเวลาผ่านไป รูปแบบของการกระจายในรูปที่ 3.3a ถึง 3.3c ก็จะแพร่ไปในทิศทางตามยาวของท่อนำคลื่น โดยที่มี phase velocity เท่ากับ phase velocity ของคลื่นโหมด  $TE_{10}$

หากมีการเจาะสลิตแคบ ๆ ลงบนผนังของท่อนำคลื่นโดยให้แนวยาวของสลิตขนานไปกับเส้นทางการไหลของกระแส ก็จะทำให้เห็นได้ว่าสลิตจะไม่ไปขวางการกระจายของกระแสและจะไม่มีการคัปปลิงสนามไปสู่ภายนอกท่อนำคลื่นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเจาะสลิตตามยาวบนกึ่งกลางผนังของท่อนำคลื่น ทำให้ขวางการกระจายของกระแสน้อยมาก การเจาะสลิตดังกล่าวนี้จะนำไปใช้ประโยชน์ในการวัดค่าสนามไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่น โดยการนำ probe แห่ลงไปในท่อนำคลื่นเพื่อสุ่มค่าสนามแต่ละจุดขึ้นมา ซึ่งหากเราเลื่อน probe ในทิศตามยาวของท่อนำคลื่น ก็จะสามารถพิจารณาหาค่า VSWR ได้

อย่างไรก็ตาม หากเลื่อนสลิตที่เจาะออกห่างจากกึ่งกลางของผนังท่อนำคลื่น สลิตดังกล่าวก็จะไปขวางการกระจายของกระแสในทิศ  $x$  บนผนังท่อนำคลื่น และหากยิ่งเลื่อนตำแหน่งห่างออกไปมากเท่าไร สลิตก็จะยิ่งไปตัดขวางการกระจายกระแสมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ปากสลิต สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้สามารถแทนได้ด้วยแผ่นกระแสแม่เหล็ก (magnetic current sheet) ดังรูป 3.3b และสามารถแพร่กระจายคลื่นออกสู่ภายนอกได้

เอกสารนี้เป็นในทำนองเดียวกัน สลิตที่เจาะเฉียงๆ บนด้านบรอดวอลล์ก็จะขวางกระแสในทิศ  $z$  ซึ่งจะตัดขวางมากขึ้น หากมุมเอียงมีค่ามากขึ้น และท้ายสุดก็เป็นสลิตเอียงที่เจาะบนด้านแคบหรือแนโรววอลล์ (narrow wall) ของท่อนำคลื่น ซึ่ง

จะยิ่งตัดขวางสนามในทิศ  $y$  มากขึ้นหากมีมุมเอียงมากขึ้น สลิตทั้งสองชนิดนี้สามารถใช้เป็นอีลิเมนต์ในการแพร่กระจายคลื่นออกสู่ภายนอกก่อนำคลื่นได้เช่นกัน

ในบทนี้ได้กล่าวถึงลักษณะคร่าวๆ ของสลิตเดี่ยวที่ปิดโดยท่อนำคลื่น ซึ่งในบทต่อไปจะได้กล่าวถึงทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นของสลิตที่ปิดโดยท่อนำคลื่น

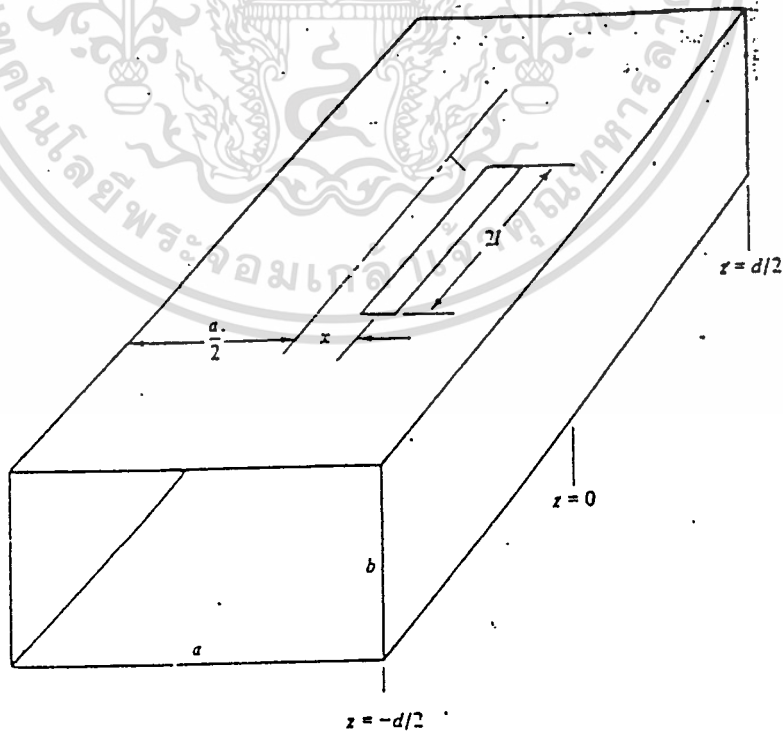


## บทที่ 4

# สมการ และ การออกแบบสล็อตของสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่พิดด้วยท่อนำคลื่น

### 4.1 หลักการของแอมป์ฟิแอดมิตแดนซ์ (อิมพีแดนซ์)

สายอากาศเวฟไกด์เฟดสล็อตอาร์เรย์ (สล็อตอาร์เรย์ที่พิดกระแสด้วยท่อนำคลื่น) แตกต่างจากสายอากาศทิวไรเฟดสล็อตอาร์เรย์ (สล็อตอาร์เรย์ที่พิดกระแสด้วยสายส่งคู่ขนาน) ด้วยสาเหตุประการสำคัญคงจะได้อธิบายต่อไปนี้ ในกรณีของสายอากาศทิวไรเฟดสล็อตอาร์เรย์ voltage wave บนสายส่งคู่ขนาน (two-wire lines) ที่ป้อนให้แก่สล็อตสามารถใช้คำนวณหาได้ทั้งแอมป์ฟิแอดมิตแดนซ์ของแต่ละสล็อต และแพทเทิร์นสนามระยะไกลของอาร์เรย์ ส่วนในกรณีของสายอากาศเวฟไกด์เฟดสล็อตอาร์เรย์ ค่าแอมป์ฟิแอดมิตแดนซ์ของแต่ละสล็อตสามารถกำหนดได้ในเทอมของคลื่นโหมดที่ตกกระทบสล็อต และคลื่นโหมดที่แตกกระจาย (สะท้อน) กลับจากสล็อตโดยตำแหน่งของค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของผลรวมของคลื่นทั้งสองนี้ สามารถใช้ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของแอมป์ฟิแอดมิตแดนซ์ได้ แต่ทว่าเราไม่สามารถนำเอาผลรวมของคลื่นทั้งสองนี้บนหน้าตัดของท่อนำคลื่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางสล็อตมาเชื่อมโยงกับการกระจายสนามไฟฟ้า (electric field distribution) ในสล็อตได้ง่ายเหมือนกับการพิดแบบทิวไรเฟด แต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบเวฟไกด์เฟดอาร์เรย์ เราจำเป็นต้องทำการคำนวณความสัมพันธ์ของทั้งสองค่านี้ ซึ่งจะต้องคิดค่ามิววลคัปปลิง (mutual coupling) ระหว่างสล็อตอีกด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์ในบทนี้จะเน้นถึงปัญหานี้โดยเฉพาะ ซึ่งจะพิจารณากรณีของสล็อตที่พิดด้วยท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก



ในบทที่ 3 ได้อธิบายถึงท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ถูกเจาะเพียงสลิตเดียวเพื่อให้เป็นต้นกำเนิดการแพร่กระจายคลื่นออกสู่ภายนอก ชนิดของสลิตทั้งสามได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 ซึ่งทั้งสามชนิดจะมีการตัดขวาง กระแสที่ผนังท่อนำคลื่น และการตัดขวางนี้เองจะเหนี่ยวนำให้เกิดการกระจายสนามไฟฟ้าขึ้นในสลิต ซึ่งสามารถมองได้ว่าเป็นต้นกำเนิดการแพร่กระจายคลื่น เมื่อพิจารณาเฉพาะท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีขนาดกว้างยาวสำหรับการแพร่ของคลื่นโหมด  $TE_{10}$  ซึ่งเราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง การกระจายสนามไฟฟ้าในสลิตและคลื่นโหมดที่แตกกระจายออกจากสลิตได้ สำหรับกรณีของสลิตตามยาว (longitudinal slot) บนด้านบรอดวอลล์ (broad wall) นั้นหากสมมติให้มีการกระจายสนามไฟฟ้าที่เป็นคลื่นนิ่งที่สมมาตร (symmetrical standing wave) แล้ว จะทำให้การแตกกระจายของคลื่นโหมด  $TE_{10}$  มีลักษณะเหมือนกับที่เกิดโดยอิลีเมนต์ที่ต่อขนานบนสายส่งคู่ (two-wire transmission line) ส่วนสลิตเอียง (inclined slot) บนด้านบรอดวอลล์จะเป็นเสมือนกับอิลีเมนต์ต่ออนุกรม และสลิตเอียงบนด้านแนโรวอลล์ (narrow wall) นั้นเป็นเสมือนอิลีเมนต์ต่อขนาน

ลิเนียร์อาร์เรย์ (linear array) ของสลิตชนิดใดชนิดหนึ่งในสามชนิดที่ได้กล่าวมานี้ สามารถสร้างได้ขึ้นได้ โดยการเจาะให้เป็นร่องของสลิตหลาย ๆ สลิตที่มีขนาดเท่ากัน บนด้านใดด้านหนึ่งของท่อนำคลื่น โดยความยาวและออฟเซต (หรือ tilt-ความเอียง) ของแต่ละสลิตจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับค่าการแรงแจกความเข้มกระแสไฟฟ้า (แอมพลิจูดและเฟส) ที่จะเกิดขึ้นบนแต่ละสลิต ซึ่งจะทำได้แพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการ นอกจากนี้แล้วจะต้องให้มีการแมทซ์ทางด้านอินพุตด้วย ในการที่จะให้ได้แพทเทิร์นที่ต้องการและอินพุตอิมพีแดนซ์ที่แมชซึ่งจึงเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับการออกแบบลิเนียร์สลิตอาร์เรย์ และไม่เฉพาะแต่เซลฟ์แอดมิตแตนซ์ (self-admittance) (อิมพีแดนซ์) เท่านั้น เรายังจะต้องคำนึงถึงการคัปปลิงระหว่างแต่ละสลิตด้วย นั่นก็คือเราจะต้องคิดมิวชวลอิมพีแดนซ์ (อิมพีแดนซ์) ด้วย ผลานาร์สลิตอาร์เรย์สามารถสร้างได้โดยการวางลิเนียร์อาร์เรย์เรียงต่อกันข้าง ๆ ซึ่งปัญหาในการออกแบบก็เหมือนเดิม เพียงแต่ยุ่งยากกว่าเพราะจะต้องคำนวณค่ามิวชวลคัปปลิงในลักษณะที่เป็นสองมิติ

ในการพิจารณาปัญหาในการออกแบบไม่ว่าจะเป็นลิเนียร์สลิตอาร์เรย์หรือจะเป็นฟลานาอาร์เรย์ เราจะพิจารณาโมดูลที่มีความยาว  $d$  ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเจาะสลิตตามยาว (longitudinal slot) บนด้านบรอดวอลล์ โมดูลนี้นหากนำมาวางต่อกันก็จะได้เป็นลิเนียร์อาร์เรย์ และหากลิเนียร์มาวางขนานกันก็จะได้ฟลานาอาร์เรย์ อย่างไรก็ตามในการสร้างฟลานาอาร์เรย์ การเจาะสลิตบนด้านบรอดวอลล์จะเป็นที่นิยมกว่าบนด้านแนโรวอลล์ ด้วยเหตุผลบางประการ เช่น สามารถใช้ด้านแนโรวอลล์ร่วมกันได้ทำให้ประหยัดกว่า เป็นต้น ดังนั้นในบทนี้ จึงเป็นการพิจารณาเฉพาะสลิตที่เจาะบนด้านบรอดวอลล์เท่านั้น

หากโมดูลมีความยาว  $d = \lambda_g/2$  โดยที่  $\lambda_g$  เป็นความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นสำหรับคลื่นโหมด  $TE_{10}$  อาร์เรย์ของโมดูลนี้ก็จะเรียกว่าเป็นการพีดแบบคลื่นนิ่ง (standing-wave fed) ซึ่งเป็นกรณีที่จะได้พิจารณาต่อไป ส่วนโมดูลที่มีความยาว  $d \neq \lambda_g/2$  อาร์เรย์ของสลิตนี้ก็จะเรียกว่าเป็นการพีดแบบ traveling-wave fed

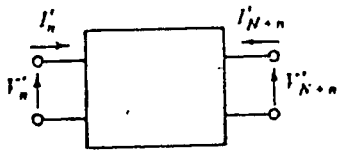
ในขั้นตอนนี้ จะกำหนดให้ที่ระนาบหน้าตัด  $z = \pm \lambda_g/4$  หรือที่บริเวณปลายโมดูล มีเฉพาะคลื่นโหมด  $TE_{10}$  เท่านั้นที่มีค่ามาก โดยคลื่นโหมดสูง ๆ ที่แตกกระจายออกจากสลิตจะมีค่าลดลงจนถือว่าน้อยมากเมื่อถึงปลายโมดูล ดังนั้นในกรณีนี้ เราจึงสามารถอธิบายสนามที่เกิดขึ้นที่ปลายโมดูลได้ในรูปของโหมดโวลเตจและโหมดเคอร์เรนท์ ของคลื่นโหมด  $TE_{10}$  เท่านั้น

ให้มีจำนวน  $N$  โมดูลในอาร์เรย์ ซึ่งจัดวางแบบลิเนียร์หรือฟลานา แต่ละโมดูลสามารถมองได้ว่าเป็นทูพอร์ตอิลีเมนต์ (two-port element) ดังรูป 4.2a และเพื่อความสะดวก เราจะแทนโหมดโวลเตจและโหมดเคอร์เรนท์ที่ปลายด้านหนึ่งของโมดูลที่  $n$  ด้วย  $V^n$  และ  $I^n$  ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งแทนด้วย  $V^{N+n}$  และ  $I^{N+n}$  อาร์เรย์จำนวน  $N$  โมดูลก็จะ เป็นระบบ  $2N$ -พอร์ต ดังนั้นโหมดโวลเตจและโหมดเคอร์เรนท์ สามารถเขียนให้สัมพันธ์กันได้โดยสมการต่อไปนี้

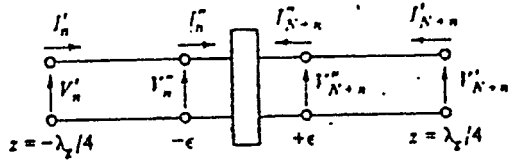
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



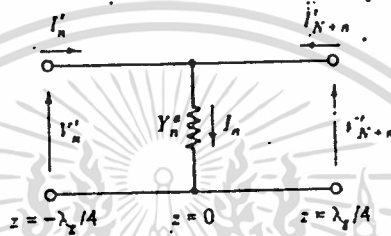
$$V'_m = \sum_{n=1}^{2N} I'_n Z_{mn} \quad m=1,2,\dots,2N \quad \dots(4.1)$$



(a) Two-port representation of  $n^{\text{th}}$  module



(b) Equivalent circuit when scattering obstacles are confined to a narrow central region of length  $2\epsilon$



(c) Equivalent circuit when obstacle is a shunt element

รูปที่ 4.2

หากไม่มีสิ่งกีดขวางที่จะทำให้คลื่นเกิดการแตกกระจาย (scatter) บนคู่สายส่งเสมือนของรูป 4.2a ยกเว้นในบริเวณ  $-\epsilon \leq z \leq \epsilon$  (เมื่อ  $\epsilon$  มีค่าน้อยมาก) ดังนั้นจากสมการมาตรฐานของสายส่งจะได้

$$\begin{aligned} V'_n &= jI''_n Z_0 & V'_{N+n} &= jI''_{N+n} Z_0 \\ I'_n &= jV''_n G_0 & I'_{N+n} &= jV''_{N+n} G_0 \end{aligned} \quad \dots(4.2)$$

เมื่อ  $Z_0 = 1/G_0$  เป็นค่าเรดเตอริสติกอิมพีแดนซ์ของสายส่งเสมือน และ  $(V''_n, I''_n), (V''_{N+n}, I''_{N+n})$  ถูกกำหนดไว้ในรูป 4.2b ซึ่ง  $V''_n$  และ  $I''_n$  หมายถึงโหนดโวลเตจและโหนดเคอร์เรนท์บนระนาบ  $z = -\epsilon$  ตามลำดับ และ  $V''_{N+n}$  และ  $I''_{N+n}$  หมายถึงโหนดโวลเตจและโหนดเคอร์เรนท์บนระนาบ  $z = \epsilon$  ตามลำดับ

นำสมการ (4.2) แทนลงใน (4.1) จะได้

$$I''_m = \sum_{n=1}^{2N} V''_n Z_{mn} / Z_0 \quad m=1,2,\dots,2N \quad \dots(4.3)$$

หากการกระจายสนามไฟฟ้าในสล็อตที่  $n$  เป็นคลื่นนิ่งที่สมมาตร (symmetrical standing wave) โดยไม่ขึ้นกับการกระจายสนามที่เกิดจากคลื่นโหมด  $TE_{10}$  ที่เดินทางภายในท่อนำคลื่นผ่านสล็อต หรือจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอกซึ่งเป็นการคัปปลิงระหว่างสล็อตด้วยกันเอง หรือทั้งสองอย่าง การแตกกระจายจะมีลักษณะสมมาตร และดังนั้นสามารถเปรียบได้กับการแตกกระจายของคลื่นจากอิลิเมนต์ต่อขนานบนคู่สายส่ง ดังนั้นวงจรอีควิวาเลนต์สำหรับโหมดที่

$n$  จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2c และแอกทิฟแอดมิตแตนซ์  $Y_n^a$  จะถูกกำหนดขึ้นเพื่อแทนอิลิเมนต์ขนาน ซึ่งจะให้ผลในการแตกกระจายของคลื่นเหมือนกับสล็อตในท่อนำคลื่น

จากรูป 4.2c จะเห็นได้ว่า  $V'_n = V''_{N+n}$  เป็นโหมตโวลเตจคร่อมอีลิเมนต์ที่ต่อขนาน  $Y''_n$  และ  $I''_n + I''_{N+n}$  เป็นกระแสทั้งหมดที่ไหลผ่าน  $Y''_n$  ดังนั้นเราสามารถเขียน (4.3) ได้ว่า

$$I''_m + I''_{N+m} = \sum_{n=1}^N \frac{V''_n (Z_{mn} + Z_{N+m,n} + Z_{m,N+n} + Z_{N+n,N+n})}{Z_o^2} \quad m=1,2,\dots,N \quad \dots(4.4)$$

หากกำหนดให้

$$V_n = V''_n \quad I_n = I''_m + I''_{N+n}$$

$$Y_{mn} = \frac{Z_{mn} + Z_{N+m,n} + Z_{m,N+n} + Z_{N+n,N+n}}{Z_o^2}$$

ดังนั้นสมการ (4.4) ก็จะเป็น

$$I_m = \sum_{n=1}^N V_n Y_{mn} \quad \dots(4.5)$$

เมื่อ  $I_m$  เป็นโหมตเคอร์เรนท์ทั้งหมดที่ไหลผ่านแอกทิฟแอตมิตแดนซ์เสมือนที่ต่อขนาน ( $Y_m^a$ ) ,  $V_m$  เป็นโหมตโวลเตจคร่อม  $Y_m^a$  จาก (4.5) สามารถเขียนได้ว่า

$$Y_m^a = \frac{I_m}{V_m} = \sum_{n=1}^N \left( \frac{V_n}{V_m} \right) Y_{mn}$$

$$= Y_{mm} + \sum_{n=1}^N \left( \frac{V_n}{V_m} \right) Y_{mn} \quad \dots(4.6)$$

ในสมการ (4.6) เครื่องหมายไพรม์บนเครื่องหมายซัมเมชันจะบอกให้ทราบว่า ซัมเมชันนี้ไม่รวมกรณีที่  $m=n$  ไว้ด้วย ในตอนนี้  $Y_{mm}$  จะมีความหมายถึง เซลฟ์แอตมิตแดนซ์ของสล๊อตที่  $m_{th}$  และ  $Y_{mn}$  จะเรียกว่าเป็น มิวชวลแอตมิตแดนซ์ระหว่างสล๊อตที่  $m_{th}$  กับสล๊อตที่  $n_{th}$  และดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าแอกทิฟแอตมิตแดนซ์จะเกิดจากผลรวมของเซลฟ์แอตมิตแดนซ์กับผลรวมของมิวชวลแอตมิตแดนซ์

เพื่อความสะดวกบางครั้งเราอาจเขียนสมการ (4.6) เสียใหม่ได้ในรูปแบบ

$$Y_m^a = Y_{mm} + Y_m^b \quad \dots(4.7)$$

เมื่อ

$$Y_m^b = \sum_{n=1}^N \left( \frac{V_n}{V_m} \right) Y_{mn} \quad \dots(4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่หมายถึงเทอมของมิวชวลคัปปลิง หัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 อาร์เรย์ของสลิตตามแนวยาวบนด้านบรอดวอลล์ของท่อนำคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยม

: สมการพื้นฐานในการออกแบบ

การแตกกระจายออกจากอีลิเมนต์ขนาน  $Y_n^a/G_o$  ดังแสดงในรูปที่ 4.2c มีลักษณะสมมาตร และเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$B = C = -\frac{1}{2} \frac{Y_n^a}{G_o} V_n \quad \dots(4.9)$$

นอกจากนี้ยังแสดงอีกด้วยว่าแอมพลิจูดเชิงซ้อนของคลื่นโหมด  $TE_{10}$  ที่แตกกระจายออกมาจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามไฟฟ้าในสลิตตามยาวหากเรานำจุดออริจินไปไว้ยังจุดกึ่งกลางของด้านบรอดวอลล์ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และกำหนดให้  $\beta = \beta_{10}$  จะได้ว่า

$$B_{10} = C_{10} = \frac{2V_n^s}{j\omega\mu_o(\beta/k)ab} (\cos \beta l_n - \cos kl_n) \sin \frac{\pi x_n}{a} \quad \dots(4.10)$$

เมื่อ  $V_n^s = wE_x(x_n, 0, 0)$  เป็นโวลเตจสูงสุดที่กึ่งกลางสลิต โดย  $w$  เป็นความกว้างของสลิตและ  $E_x(x_n, 0, \zeta_n)$  เป็นการกระจายสนามไฟฟ้าในปากสลิต

คลื่นสะท้อนกลับ  $B_{10}$  และ  $B$  ในสมการ (4.9) และ (4.10) สามารถสัมพันธ์กันได้หาก คลื่นโหมด  $TE_{10}$  โหมดโวลเตจของมันมีเฟสเดียวกันบนหน้าตัด  $z$  ใดๆ และมีกำลังงานของคลื่นสะท้อนที่เท่ากัน ซึ่งจะได้

$$\frac{Y_n^a}{G_o} = \left\{ j \left[ \frac{8(ab)}{\pi^2 \eta G_o (\beta/k)} \right]^{1/2} (\cos \beta l_n - \cos kl_n) \sin \frac{\pi x_n}{a} \right\} \frac{V_n^s}{V_n} \quad \dots(4.11)$$

สมการ (4.11) นี้เป็นสมการแรกจากสองสมการออกแบบ ที่จะใช้ในการคำนวณหาความยาวและออฟเซ็ทของสลิตต่างๆ ในอาร์เรย์ เพื่อให้ได้แพทเทิร์นและอินพุตแอดมิตแดนซ์ที่ต้องการ

ในการที่จะหาอีกสมการหนึ่งเพื่อใช้ในการออกแบบร่วมกับสมการ (4.11) เราจะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างเวฟไกด์เฟดสลิตอาร์เรย์กับอาร์เรย์โคโพลโดยใช้หลักของบารบินेट (Babinet's principle) ก่อนอื่นสมมติให้มีเวฟไกด์เฟดสลิตอาร์เรย์ฝังอยู่ในระนาบตัวนำสมบูรณ์ขนาดอนันต์ และแพร่กระจายคลื่นไปเฉพาะครึ่งบนเหนือระนาบ นำมาพิจารณาเทียบกับสลิตอาร์เรย์ที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการแต่พิดด้วยสายส่งคู่ขนาน (ทิวัวร์) เราพบว่าอาร์เรย์ทั้งสองจะมีแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นที่เหมือนกัน แต่ลักษณะของแอดมิตแดนซ์จะต่างกัน เนื่องมาจากในกรณีของเวฟไกด์เฟดนั้นจะมีการแตกกระจายของคลื่นโหมดสูงๆ จากสลิตด้วย ต่างกับการพิดแบบทิวัวร์ที่สามารถบังคับโหมดได้ (คือพิดเข้าสลิตโดยตรง) ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลที่เหมือนกัน เราจะสมมติโพลแอดมิตแดนซ์  $Y_n^L$  ต่อขนานกับสลิตที่พิดแบบทิวัวร์ ซึ่งจะใช้แทนการแตกกระจายของคลื่นโหมดสูงๆ สมการของทิวัวร์เฟดสลิตอาร์เรย์จึงเป็นดังนี้

$$I'_m = \sum_{n=1}^N V_n^s \sin kl_n Y'_{mn} \quad \dots(4.12)$$

เครื่องหมายไพรม์จะแสดงว่าเป็นสมการของสลิตที่พิดแบบทิวัวร์ ค่า  $Y'_{mn}$  ( $m \neq n$ ) จะหมายถึงมิวชัวร์แอดมิตแดนซ์ระหว่างสลิตที่  $m$  และสลิตที่  $n$  และจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด... (4.13) ค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
เมื่อ  $Y'_n$  จะหมายถึงเซฟแอดมิตแดนซ์ของสลิตที่  $n$  และ  $Y_n^L$  ใช้แทนการแตกกระจายของคลื่นโหมดสูงๆ

ถัดมาลองพิจารณาอาร์เรย์ของไดโพล ที่พิศกระแสดตรงกลางแบบทิวไรร์ และแพร่กระจายคลื่นออกไปทุกทิศทาง (radiating into a full space) จะมีสมการดังนี้

$$V_m^d = \sum_{n=1}^N I_n^d \sin kl_n Z_{mn} \quad \dots(4.14)$$

เมื่อการกระจายกระแสบนไดโพลที่  $m$  อยู่ในรูปแบบ  $I_n^d \sin k(l_n - |\zeta|)$  และสัญลักษณ์ตัว  $d$  ใช้แสดงว่าโวลเตจและเคอร์เรนซ์ ( $V_m^d, I_m^d \sin kl_m$ ) เป็นของไดโพลอาร์เรย์

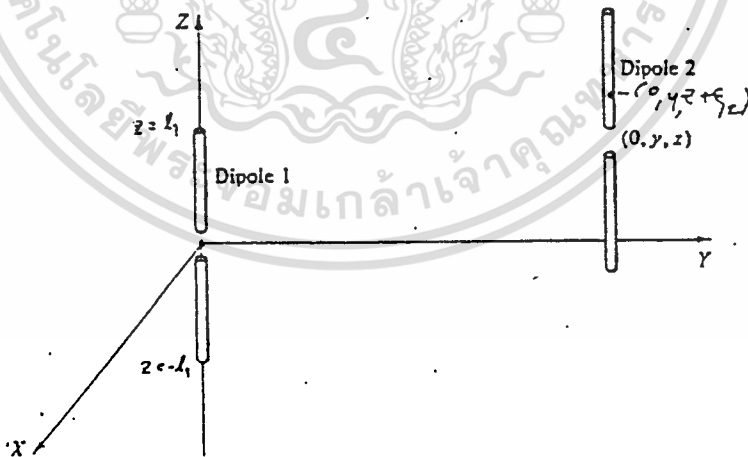
หากการกระจายกระแสของไดโพล  $I_n^d$  มีลักษณะเดียวกับการกระจายโวลเตจบนสลิต  $V_n^d$  ของสลิตอาร์เรย์ทั้งสอง อาร์เรย์ทั้งสามก็จะมีแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นที่เหมือนกัน เว้นแต่มีการสลับค่าของ  $E$  และ  $H$  ของไดโพล อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีที่นำไดโพลไปเชื่อมโยงกับสลิตอาร์เรย์เราจะต้องสมมติมีโหลดอิมพีแดนซ์  $Z_n^L$  ต่ออนุกรมอยู่กับไดโพลที่  $n$  ซึ่งจะได้

$$Z_{mn} = Z_n + Z_n^L \quad \dots(4.15)$$

โดยที่  $Z_n$  เป็นเซลฟอิมพีแดนซ์ของไดโพลที่  $n$

จากสมการ (4.14) ค่า  $Z_{mn}$  (เมื่อ  $m \neq n$ ) จะหมายถึงมิวชวลอิมพีแดนซ์ ซึ่งจะหาได้โดยใช้สมการหาค่ามิวชวลอิมพีแดนซ์ระหว่างไดโพลสองตัวคือ

$$Z_{12} = R_{12} + jX_{12} \quad \dots(4.16)$$



รูปที่ 4.3

เมื่อมีการวางไดโพล 1 และไดโพล 2 ดังรูปที่ 4.3 ไดโพล 2 จะอยู่ที่โคออร์ดิเนต  $(0, y, z + \zeta_2)$  ซึ่งมีจุดกึ่งกลางไดโพลอยู่ที่  $(0, y, z)$  บนระนาบ  $YZ$  ค่ามิวชวลอิมพีแดนซ์ระหว่างไดโพลทั้งสอง  $Z_{12}$  หาได้ดังนี้

$$R_{12} = \frac{j30}{\sin kl_1 \cdot \sin kl_2} \int_{-l_2/\lambda}^{l_2/\lambda} \left( \frac{\sin kr_1}{r_1/\lambda} + \frac{\sin kr_2}{r_2/\lambda} - 2 \cos kl_1 \frac{\sin kr}{r/\lambda} \right) \sin k(l_2 - |\zeta_2|) d\left(\frac{\zeta_2}{\lambda}\right) \dots(4.17)$$

$$\text{และ } X_{12} = \frac{30}{\sin kl_1 \cdot \sin kl_2} \int_{-l_2/\lambda}^{l_2/\lambda} \left( \frac{\cos kr_1}{r_1/\lambda} + \frac{\cos kr_2}{r_2/\lambda} - 2 \cos kl_1 \frac{\cos kr}{r/\lambda} \right) \cdot \sin k(l_2 - |\zeta_2|) d\left(\frac{\zeta_2}{\lambda}\right) \quad \dots(4.18)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } r &= [y^2 + (z + \zeta_2)^2]^{1/2} \\ r_1 &= [y^2 + (z + \zeta_2 - l_1)^2]^{1/2} \\ r_2 &= [y^2 + (z + \zeta_2 + l_1)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad \dots(4.19)$$

ซึ่งจะละการพิสูจน์ไว้ในที่นี้

จากความสัมพันธ์ของ Booker ที่ว่าแอดมิตแดนซ์ของสลีตที่ปิดแบบทิวไรท์ที่ไม่ได้ใส่โหลดเพิ่มลงไป (แพร่กระจายเฉพาะครึ่งบน) จะมีความสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์ของไดโพลที่ไม่ได้ใส่โหลดเพิ่มลงไป (แพร่กระจายไปทุกทิศทาง) ด้วยสมการดังนี้

$$Y'_n = \left(\frac{2}{\eta^2}\right) Z_n \quad Y'_{mn} = \left(\frac{2}{\eta^2}\right) Z_{mn} \quad \dots(4.20)$$

สำหรับกรณีที่ใส่โหลดเพิ่มเข้าไป หากการกระจายกระแสบนไดโพลมีลักษณะเดียวกับการกระจายโวลเตจบนทิวไรท์ สลีสต อินพุตแอดมิตแดนซ์ของสลีสตที่  $m$  ก็จะหาได้ว่า

$$\begin{aligned} Y'_m &= \frac{I'_m}{V'_m \sin kl_m} = Y'_m + Y^L_m + \sum_{n=1}^N \frac{V'_n \sin kl_n}{V'_m \sin kl_m} Y'_{mn} \\ &= \left(\frac{2}{\eta^2}\right) Z_m + Y^L_m + \sum_{n=1}^N \frac{I^d_n \sin kl_n}{I^d_m \sin kl_m} \left(\frac{2}{\eta^2}\right) Z_{mn} \\ &= \left(\frac{2}{\eta^2}\right) \left[ Z_m + \left(\frac{\eta^2}{2}\right) Y^L_m + \sum_{n=1}^N \frac{I^d_n \sin kl_n}{I^d_m \sin kl_m} Z_{mn} \right] \end{aligned} \quad \dots(4.21)$$

ค่าแอกทิฟ (หรืออินพุต) อิมพีแดนซ์ของไดโพลที่  $m$  สามารถหาได้จากสมการ (4.14) คือ

$$Z^a_m = \frac{V^d_m}{I^d_m \sin kl_m} = Z_m + Z^L_m + \sum_{n=1}^N \frac{I^d_n \sin kl_n}{I^d_m \sin kl_m} Z_{mn} \quad \dots(4.22)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (4.21) และ (4.22) แล้วทำให้เราได้ข้อสรุปว่า

$$Y^L_m = \left(\frac{2}{\eta^2}\right) Z^L_m \quad \dots(4.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในโอกาสพิเศษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปก็คือเราได้ต่อโหลดแอดมิตแดนซ์  $Y_m^L$  ขนานกับสล็อตที่  $m$  ที่พิดแบบทูไวร์ เพื่อจำลองการแตกกระจายของคลื่น โหมดสูงๆ ออกจากสล็อตที่พิดด้วยท่อนำคลื่น และเราก็ได้ต่อโหลดอิมพีแดนซ์  $Z_m^L$  อนุกรมที่อินพุทของไดโพลที่  $m$  เพื่อจำลองการแตกกระจายของคลื่นโหมดสูงๆ นี้เช่นกัน หลังจากนั้นเราจึงนำโหลดเหล่านี้มาสัมพันธ์กันตามความสัมพันธ์ของ Booker ( Booker's relation )

หากเราจะนำคุณลักษณะของแอดมิตแดนซ์ของสล็อตอาร์เรย์ที่พิดแบบทูไวร์ และไดโพลอาร์เรย์ มาหาคุณลักษณะของแอดมิตแดนซ์ของสล็อตอาร์เรย์ที่พิดโดยท่อนำคลื่น ค่ากำลังงานเชิงซ้อนที่ไหลผ่านจะต้องมีค่าเท่ากันทุกอิลิเมนต์ นั่นคือ

$$\left(\frac{1}{2}V_m V_m^* Y_m^a\right) = \left(\frac{1}{2}V_m^s \sin kl_m I_m'\right)^* = \left(\frac{1}{2}V_m^d I_m^d \sin kl_m\right) \quad \dots(4.24)$$

แต่เนื่องจาก

$$\begin{aligned} (V_m^s \sin kl_m I_m')^* &= V_m^{s*} \sin kl_m I_m' = V_m^s \sin kl_m \sum_{n=1}^N V_n^s \sin kl_n Y_n' \\ &= V_m^s V_m^{s*} \sin^2 kl_m \sum_{n=1}^N \frac{I_n^d \sin kl_n}{I_n^d \sin kl_m} \left(\frac{2}{\eta^2}\right) Z_{mn} \\ &= \left(\frac{2}{\eta^2}\right) Z_{mn}^a V_m^s V_m^{s*} \sin^2 kl_m \end{aligned} \quad \dots(4.25)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.24) และ (4.25) มารวมกัน จะได้เป็นผลของอิลิเมนต์ที่  $n$  คือ

$$V_n V_n^* Y_n^a Y_n^{a*} = \left(\frac{2}{\eta^2}\right) Y_n^a Z_n^a V_n^s V_n^{s*} \sin^2 kl_n \quad \dots(4.26)$$

ในสมการ (4.26) ค่า  $V_n$ ,  $V_n^s$  และ  $Y_n^a$  หมายถึง โหมดโวลเตจ, สล็อตโวลเตจ และแอกทิฟแอดมิตแดนซ์ของสล็อตที่  $n$  ที่พิดโดยท่อนำคลื่นตามลำดับ ส่วน  $Z_n^a$  จะหมายถึงแอกทิฟแอดมิตแดนซ์ของไดโพลที่  $n$  ที่สอดคล้องกัน

เมื่อนำสมการ (4.11) มาคูณด้วยคอนจูเกตเชิงซ้อนของมันเอง จะได้

$$V_n V_n^* Y_n^a Y_n^{a*} = \frac{8G_o(a/b)}{\pi^2 \eta(\beta/k)} (\cos \beta l_n - \cos kl_n)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi x_a}{a}\right) V_n^s V_n^{s*} \quad \dots(4.27)$$

จับสมการ (4.26) ให้เท่ากับ (4.27) จะได้ว่า

$$\frac{Y_n^a}{G_o} = \frac{1}{Z_n^a/73} \left[ \frac{4(a/b)}{0.61\pi(\beta/k)} \frac{(\cos \beta l_n - \cos kl_n)^2}{\sin^2 kl_n} \sin^2 \frac{\pi x_n}{a} \right] \quad \dots(4.28)$$

โดย  $0.61\eta/\pi = 73$  ohms

สมการ (4.28) เป็นสมการที่สองที่จะใช้ในการออกแบบร่วมกับสมการที่ (4.11) ซึ่งจะใช้คำนวณหาความยาวและระยะออฟเซ็ทของสล็อตตามยาวบนด้านบรอดวอลล์ของท่อนำคลื่น เพื่อที่จะให้ได้แพทเทิร์นและอินพุทแอดมิตแดนซ์ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลึกทั้งห้ามิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการพื้นฐาน 2 สมการที่ใช้ในการออกแบบ (สมการที่ 4.11 และ 4.28) และเพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ เราสามารถเขียนสมการดังกล่าวโดยย่อได้ดังนี้

$$\frac{Y_n^a}{G_o} = K_1 f_n \sin kl_n \frac{V_n^3}{V_n} \quad \dots(4.29)$$

$$\frac{Y_n^a}{G_o} = \frac{K_2 f_n^2}{Z_n^a} \quad \dots(4.30)$$

ค่าคงที่  $K_1, K_2$  และ  $f_n$  คือ

$$K_1 = j \left[ \frac{8}{\pi^2 \eta G_o} \frac{(a/b)}{(\beta/k)} \right]^{1/2} \quad K_2 = \frac{292(a/b)}{0.61\pi(\beta/k)} \quad \dots(4.31)$$

$$f_n = \frac{\cos \beta l_n - \cos kl_n}{\sin kl_n} \sin \frac{\pi x_n}{a} \quad \dots(4.32)$$

โดยที่ค่าเอกทิพแอตมิตแดนซ์ของสล็อตที่  $n$  เปรียบเทียบโดยเสมือนกับไดโพลที่ใส่โหลดตัวที่  $n$  ซึ่งก็คือ

$$Z_n^a = Z_{nn} + Z_n^b \quad \dots(4.33)$$

ซึ่งมีวอร์ลด์คัปปลิง ( $Z_n^b$ ) คือ

$$Z_n^b = \sum_{m=1}^N \frac{V_m^3 \sin kl_m}{V_n^3 \sin kl_n} Z_{nm} \quad \dots(4.34)$$

และ

$$Z_{nn} = Z_n + Z_n^L \quad \dots(4.35)$$

$Z_{nn}$  คือเซลฟิมพีแดนซ์ของไดโพลที่รวมกับโหลด

ก่อนที่จะนำสมการ (4.11) และสมการ (4.28) ซึ่งเป็น 2 สมการที่ใช้ในการออกแบบมาใช้งาน จำเป็นที่จะต้องพิจารณา  $Z_{nn}$  ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของความยาวและระยะออฟเซตของสล็อตที่พิดด้วยท่อนำคลื่นที่เปรียบเทียบกับไดโพลเสียก่อน

จากสมการ (4.30) เราจะได้

$$Z_{nn} = \frac{K_2 f_n^2}{Y_n/G_o} \quad \dots(4.36)$$

ซึ่ง  $Y_n/G_o(x_n, l_n)$  คือเซลฟแอตมิตแดนซ์ของสล็อตที่  $n$  (โดยปราศจากการคัปปลิงจากสล็อตตัวอื่นๆ) หากเราทำการทดลองวัดค่า  $Y/G_o$  ของสล็อตเดี่ยว โดยการเปลี่ยนค่าความยาว ( $2l$ ) และ ระยะออฟเซต ( $x$ ) ของสล็อต เราจะสามารถหา  $Z_{nn}(x_n, l_n)$  จากสมการ (4.36) เพื่อนำไปแทนในสมการ (4.30) ได้

R.J. Stegen ได้ทำการทดลองวัดค่า  $Y/G_o$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวนอร์มอลไลซ์ (normalized length)  $y = l/l_r$  และระยะออฟเซตต่างๆกัน โดยใช้ท่อนำคลื่นทองเหลืองมาตรฐาน X-band RG-52/U ที่ความถี่ 9.375 GHz และทำการพล็อตผลการทดลองที่ได้เป็นกราฟตามรูปที่ 4.4 และกราฟที่ได้เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนดังนี้

$$h(y) = h_1(y) + jh_2(y) \quad \dots(4.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

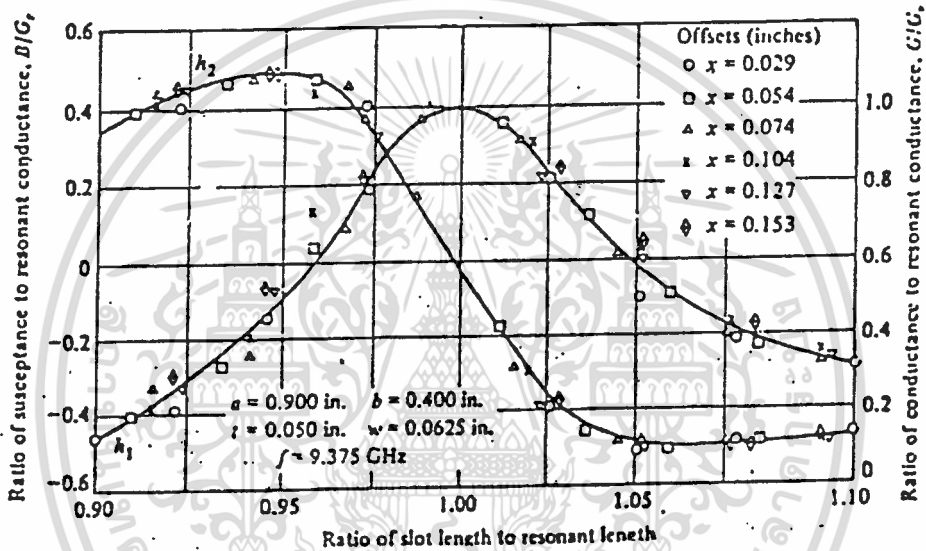
เมื่อ  $y = l/l_r$  และ  $l_r$  เป็นความยาวเรโซแนนซ์ หรือความยาวของสล็อตที่เกิดเรโซแนนซ์

(หมายเหตุ : กราฟดังกล่าวและกราฟต่างๆที่จะพิจารณาต่อไปนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ร่วมกัน เพื่อช่วยในการออกแบบ และคำนวณ )

และจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟจากการทดลองของ R.J. Stegen ตามฟังก์ชันสมการ (4.37) กับค่า  $Y/G_o$  ดังนี้

$$Y/G_o = g(x)h(y) \quad \dots(4.38)$$

โดยที่  $g(x)$  คือค่าความนำอมอลไลซ์ที่เรโซแนนซ์ และเป็นฟังก์ชันของระยะออฟเซต ( $x$ ) กราฟของ  $g(x)$  จากการทดลองของ R.J. Stegen ที่สอดคล้องกับข้อมูลตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 Normalized Self-Admittance Components for a Longitudinal Shunt Slot

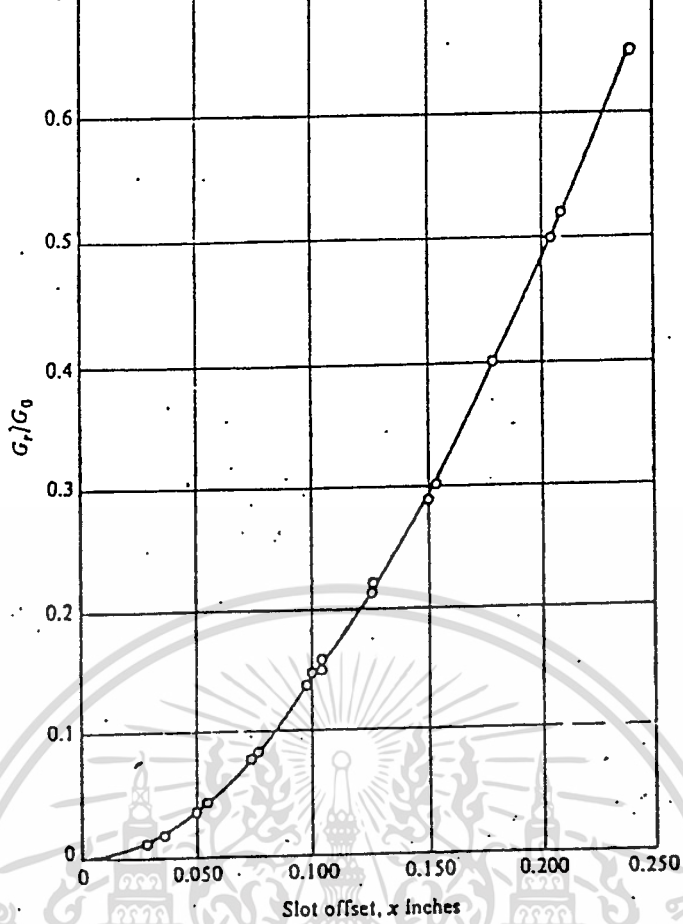
เพื่อที่จะอธิบายโดยเกี่ยวโยงถึงตัวแปร  $y$  เราควรจะต้องรู้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเรโซแนนซ์ ( $l_r$ ) กับระยะออฟเซต ( $x$ ) ซึ่งเขียนเป็นฟังก์ชันดังนี้

$$v(x) = kl_r(x) \quad \dots(4.39)$$

ฟังก์ชันตามสมการ(4.39) แสดงด้วยกราฟจากการทดลองของ R.J. Stegen ได้ดังรูปที่ 4.6

เมื่อแทนฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับกราฟจากการทดลองของ R.J. Stegen คือ  $h(y)$  และ  $g(x)$  ในสมการ (4.36) จะได้

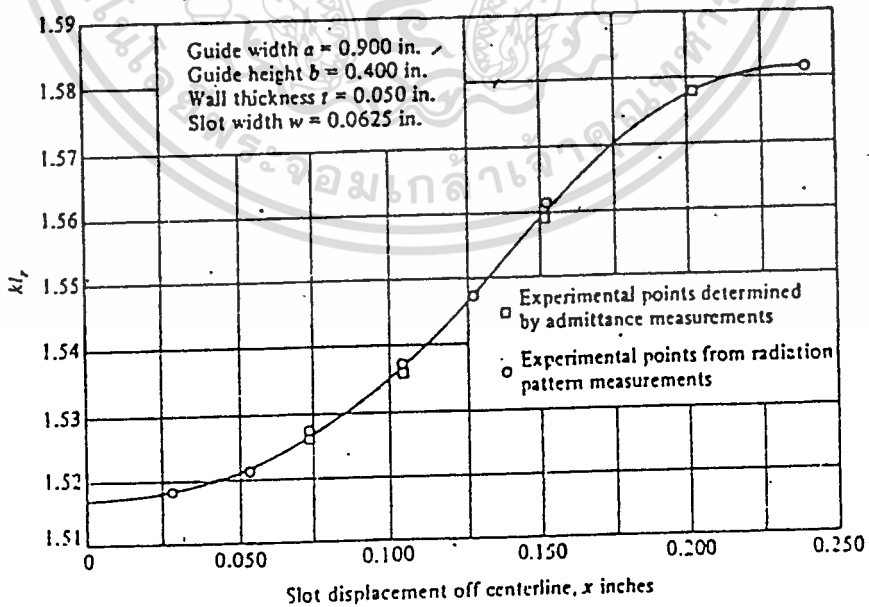
$$Z_{nn}(x_n, y_n) = \frac{K_2 f_n^2(x_n, y_n)}{g(x_n)h(y_n)} \quad \dots(4.40)$$



รูปที่ 4.5 Normalized Resonant Conduction versus Offset for a Longitudinal Shunt Slot

และแทนฟังก์ชัน  $v(x)$  ในสมการ (4.32) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_n(x_n, y_n) = \left\{ \frac{\cos[(\beta/k)y_n v(x_n)] - \cos[y_n v(x_n)]}{\sin[y_n v(x_n)]} \right\} \sin \frac{\pi x_n}{a} \quad \dots(4.41)$$



รูปที่ 4.6 Resonant Length versus Offset for a Longitudinal Shunt Slot

ถึงขั้นตอนนี้เราก็สามารถที่จะใช้สมการข้างต้นในการออกแบบสายอากาศสล็อตอาร์เรย์ที่ติดตั้งด้วยท่อนำคลื่นได้

ตามขั้นตอนนี้ก็จะกล่าวต่อไปนี้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการนำเสนอการพื้นฐานสองสมการที่ใช้ในการออกแบบ และคำนวณหาความยาวและระยะออฟเซต มาประยุกต์ใช้กับค่าผลการทดลองที่วัดได้โดย R.J.Stegen ซึ่งแสดงได้ด้วยกราฟ และฟังก์ชัน

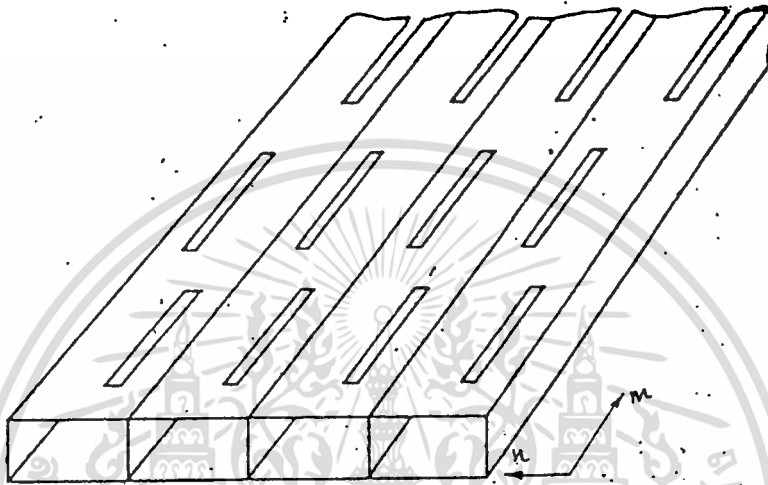


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การออกแบบสล็อตของสายอากาศสล็อตแบบยูนิฟอร์ม พลาสมาอาร์เรย์ จำนวน 6x6 อิลิเมนต์ซึ่งฟีดโดยท่อนำคลื่น

สายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์ที่ฟีดด้วยท่อนำคลื่น คือ สายอากาศที่เกิดจากการนำลิเนียร์สล็อตอาร์เรย์มาจัดเรียงกันเป็นระนาบดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1

ลิเนียร์สล็อตอาร์เรย์แต่ละท่อนั้นเรียกว่า "branch line waveguide" และมีวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับป้อนสัญญาณแต่ละท่อน branch line นี้ อาทิเช่น ใช้ท่อนำคลื่นท่อนหนึ่ง (เรียก main waveguide) นำมาต่อปิดท้ายในลักษณะขวาง (ตั้งฉาก) กับแกนของลิเนียร์ของแต่ละท่อนนำคลื่นที่เป็น branch line และใช้คัปปลิงสล็อต (coupling slots) บนท่อน main waveguide ดึงพลังงาน ไปป้อนให้กับท่อนนำคลื่นแต่ละท่อนได้ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทที่ 6

สมการที่ใช้ในการออกแบบ และคำนวณในกรณีพลาสมาสล็อตอาร์เรย์นี้ ยังคงใช้สมการพื้นฐาน 2 สมการจากบทที่ 4 แต่ subscript จะใช้ m และ n แทน

เมื่อ m หมายถึง สล็อตที่ m

n หมายถึง ท่อนำคลื่นที่เป็น branch line ที่ n

ดังนั้น สมการพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบและการคำนวณ จะเป็นดังนี้

$$\text{สมการที่ 1} \quad \frac{Y_{mn}^a}{G_o} = K_1 f_{mn} \sin v(x_{mn}) \frac{V_{mn}^s}{V_{mn}} \quad \dots(5.1)$$

$$\text{สมการที่ 2} \quad \frac{Y_{mn}^a}{G_o} = \frac{K_2 f_{mn}^2}{Z_{mn}^a} \quad \dots(5.2)$$

ค่าคงที่  $K_1$  และ  $K_2$  คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_1 = j \left[ \frac{8(ab)}{\pi^2 y G_o (\beta/k)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{และ} \quad K_2 = \frac{292(ab)}{0.61\pi(\beta/k)}$$

$$f_{mn} = \left\{ \frac{\cos \left[ \left( \beta/k \right) y_{mn} v(x_{mn}) \right] - \cos \left[ y_{mn} v(x_{mn}) \right]}{\sin \left[ y_{mn} v(x_{mn}) \right]} \right\} \sin \frac{\pi x_{mn}}{a}$$

โดยที่  $y_{mn} = l_{mn}/l_r(x_{mn})$

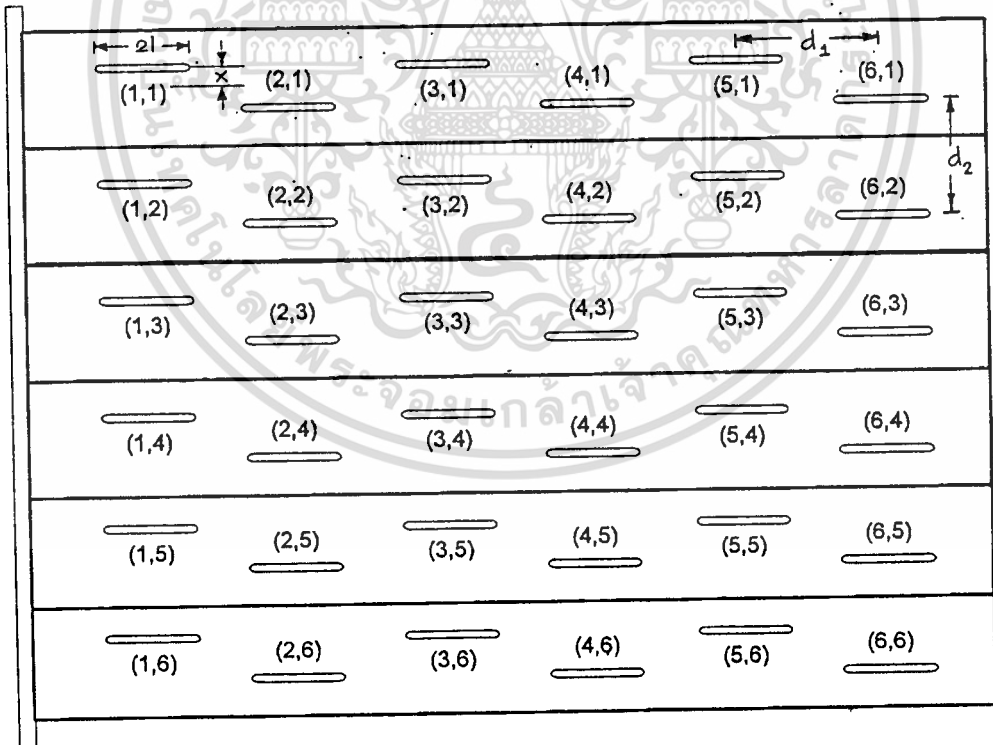
$y_{mn}$  คือ ความยาวสล็อตที่นอมอลไลซ์

$(x_{mn}, 2l_{mn})$  คือ ระยะออฟเซต และความยาวของสล็อตที่  $m$  ของท่อนำคลื่นที่เป็น branch line ที่

n

เนื่องจากสายอากาศชนิดพลาแนสล็อตอาร์เรย์ที่พิดโดยท่อนำคลื่น ซึ่งทำการออกแบบนี้ มีลักษณะของอาร์เรย์เป็นแบบยูนิฟอร์ม คือการจัดอิลิเมนต์ ซึ่งก็คือสล็อตที่ทำการแพร่กระจายคลื่นเรียงกันในลักษณะที่เป็นระนาบ โดยมีขนาด (amplitude) ของโวลต์เตจที่ป้อนแต่ละอิลิเมนต์ และระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์มีค่าสม่ำเสมอ

ลักษณะการจัดเรียงอิลิเมนต์ ของสล็อตที่เจาะบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นในลักษณะของพลาแนสล็อตอาร์เรย์ขนาด 6x6 อิลิเมนต์เป็นดังรูป



รูปที่ 5.2

เมื่อ  $2l$  คือความยาวสล็อต,  $x$  คือระยะออฟเซต (offset)

$d_1$  คือระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ (slots ใน branch line เดียวกัน) ,  $d_2$  คือระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ (slot ที่ branch line อยู่ติดกัน)   
 ใช้งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า   
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีของสล็อตที่พิดโดยท่อนำคลื่น และสมการที่ใช้ออกแบบ ซึ่งใช้วิธีพิดแบบคลื่นนิ่ง (standing wave feed) เพื่อให้เกิดคลื่นนิ่ง (standing wave) ภายในท่อนำคลื่นที่เป็น branch line เพราะต้องการให้จุดที่มีค่า peak amplitude ของคลื่นนิ่ง เกิดขึ้นที่สล็อตที่ใช้แพร่กระจายคลื่นพอดี้ เนื่องจากเหตุผลดังกล่าว ระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ ( $d_i$ ) บนท่อนำคลื่นที่เป็น branch line แต่ละท่อนมีค่าเท่ากับ  $\frac{\lambda_g}{2}$  ( $\lambda_g$  คือความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น )

ตัวแปรที่เป็นตัวควบคุมขนาดของโวลต์เดจ (สล็อตโวลต์เดจ) ที่ป้อนให้แก่สล็อตคือ  $X_{mn}$  และ  $2l_{mn}$  ขนาดของโวลต์เดจแต่ละสล็อตจะมีค่าสูงสุด (เกิดเรโซแนนท์) เมื่อความยาวสล็อตของสล็อตแต่ละสล็อตบนท่อน branch line หรือ  $2l_{mn}$  มีค่าประมาณ  $\lambda_o/2$  ( $\lambda_o$  คือความยาวคลื่นที่ใช้งาน) ดังนั้นถ้ากำหนดคให้ระยะออฟเซตของแต่ละสล็อต ( $X_{mn}$ ) มีค่าเท่ากัน ก็จะได้สายอากาศชนิดพลาแนสล็อตอาร์เรย์แบบยูนิฟอร์ม ในกรณีที่ไม่คิดผลของ mutual coupling

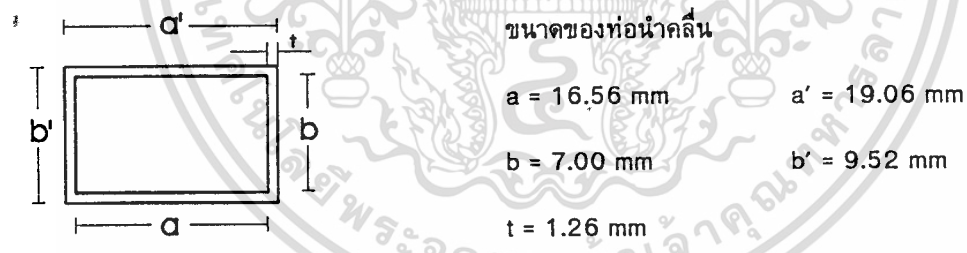
เพื่อที่จะให้ได้ระยะออฟเซต ( $X_{mn}$ ) ที่เหมาะสมกับขนาดของท่อนำคลื่น และความถี่ที่ใช้งาน สำหรับใช้เป็นค่าเริ่มต้นก่อนที่จะนำไปใช้ในกรณีที่เกิดผลของ mutual coupling พิจารณาจากเงื่อนไข 2 ข้อคือ

- 1.) เป็นระยะออฟเซตที่เหมาะสมกับความยาวสล็อตที่เกิดเรโซแนนท์ ( $2l_{mn} \cong \lambda_o/2$ )
- 2.) เป็นระยะออฟเซตที่ทำให้เกิด input matching สำหรับท่อนำคลื่น branch line แต่ละ branch

$$\left( \sum_{m=1}^6 g(X_{mn}) \cong 1 \right)$$

พิจารณาร่วมกับฟังก์ชันจากกราฟผลการทดลองของ R.J.Stegen

ขั้นตอนของกรayoutแบบพลาแนสล็อตอาร์เรย์ แบบยูนิฟอร์มขนาด 6x6 อิลิเมนต์เป็นดังต่อไปนี้



ความเร็วแสง  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$

$f_o = 11.9909 \text{ GHz}$  ( ความถี่ที่  $\lambda_g \text{ main waveguide} = \lambda_g \text{ branch line} = 2a'$  )

$\lambda_o = c/f_o = 2.99792458 \times 10^8 / 11.9909 \times 10^9 = 25.001569 \text{ mm.}$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{2a}\right)^2}} = \frac{25.001569}{\sqrt{1 - \left(\frac{25.001569}{2 \times 16.56}\right)^2}} = 38.12 \text{ mm}$$

$$f_c = \text{ความถี่ cut off ของขนาดท่อนำคลื่นที่ใช้} = c/2a = \frac{2.99792458 \times 10^8}{2 \times 16.56} = 9.0517 \text{ GHz}$$

ฟังก์ชันจากกราฟของการทดลองของ R.J. Stegen สำหรับพิจารณาระยะออฟเซตเริ่มต้น (ไม่คิดผลของ mutual coupling) มีดังนี้ สารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_1(y) = 1 - 275(y-1)^2$$

$$h_2(y) = -14(y-1)$$

$$g(x) = 1.177 \sin^2 \frac{\pi x_{mn}}{a}$$

$$v(x) = 1.517 + 1.822x_{mn}^2 = kl_r$$

เมื่อ  $y = \frac{l_{mn}}{l_{r_{mn}}}$  และ  $x_{mn}$  คือระยะออฟเซต ในหน่วยนิ้ว

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

### 1. พิจารณาหาระยะออฟเซตเริ่มต้นที่เหมาะสม ( $X_{mn}$ )

ระยะออฟเซตเท่ากับ  $2.5 \text{ mm} \cong 0.0984$  นิ้ว

1.1 เงื่อนไขความยาวสลิตที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ คือ  $2l_{mn} \cong \frac{\lambda_0}{2}$

$$\frac{2l_{mn}}{\lambda_0} = \frac{v(x)}{\pi} = \frac{1.517 + 1.822x_{mn}^2}{\pi}$$

แทนค่า  $x_{mn} = 0.0984$  นิ้ว

$$\frac{2l_{mn}}{\lambda_0} = \frac{1.517 + 1.822(0.0984)^2}{\pi} = 0.488$$

ดังนั้น  $2l_{mn} = 0.488\lambda_0 \cong \frac{\lambda_0}{2}$

1.2 เงื่อนไข input matching สำหรับท่อนำคลื่นที่เป็น branch line แต่ละ branch

$$\sum_{i=1}^6 g(x_i) = 1$$

จาก  $g(x) = 1.177 \sin^2 \frac{\pi x_{mn}}{a}$

แทนค่า  $x_{mn} = 2.5 \text{ mm}$  และ  $a = 16.56 \text{ mm}$

$$g(x) = 1.177 \sin^2 \left( \frac{\pi \times 2.5}{16.56} \right) = 0.245$$

ดังนั้น  $\sum_{i=1}^6 g(x_i) = 6 \times 0.245 = 1.470$

จากเงื่อนไขดังกล่าว ระยะออฟเซตสำหรับใช้เป็นค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมคือ  $2.5 \text{ mm}$

### 2. พิจารณาหาความยาวของสลิต ( $2l_{mn}$ ) ที่เหมาะสม

จาก  $v(x) = kl_{r_{mn}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้  $\frac{v(x)}{k} \cong \frac{v(x)}{2\pi} \lambda_0$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2l_{rnm} = \frac{v(x)}{\pi} = 1.517 + 1.822x_{mn}^2$$

แทนค่า  $x_{mn}$  เท่ากับ 0.0984 นิ้ว (2.5 mm)

$$\begin{aligned} 2l_{rnm} &= \frac{1.517 + 1.822(0.0984)^2}{\pi} \times 25.001569 \\ &= 12.213 \text{ mm.} \end{aligned}$$

3. สรุป ระยะออฟเซตเริ่มต้นที่เหมาะสม  $x_{mn} = 2.5 \text{ mm}$ .

ความยาวสลอตเริ่มต้นที่เหมาะสม  $2l_{rnm} = 12.213 \text{ mm}$ .

การคำนวณหาระยะออฟเซตและความยาวสลอต ของสายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์ แบบยูนิฟอร์ม จำนวน 6x6 อิลิเมนต์ ตามขั้นตอนที่ผ่านมา นั้น เป็นการคำนวณในกรณีที่ไม่คิดผลของ mutual coupling ระหว่างอิลิเมนต์ ขึ้นต่อกันต่อไปนี้จะเป็นการคำนวณระยะออฟเซตและความยาวสลอตของแต่ละอิลิเมนต์ โดยคิดผลของ mutual coupling ระหว่างอิลิเมนต์ที่จัดเรียงกันในลักษณะ side by side และ parallel in echelon โดยใช้ระยะออฟเซตเท่ากับ 2.5 mm (0.0984 นิ้ว) และความยาวสลอตเท่ากับ 12.213 mm เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ

4. จากสมการพื้นฐาน 2 สมการคือ

$$\text{สมการที่ 1} \quad \frac{Y_{mn}^a}{Go} = K_1 f_{mn} \sin v(x_{mn}) \frac{V_{mn}^s}{V_{mn}}$$

$$\text{สมการที่ 2} \quad \frac{Y_{mn}^a}{Go} = \frac{K_2 f_{mn}^2}{Z_{mn}^a}$$

$$\text{เมื่อ} \quad K_1 = \left[ \frac{8(a/b)}{\pi^2 \eta Go(\beta/2)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$K_2 = \frac{292(a/b)}{0.61\pi(\beta/k)}$$

$$f_{mn} = \left\{ \frac{\cos \left[ \left( \beta/k \right) y_{mn} v(x_{mn}) \right] - \cos \left[ y_{mn} v(x_{mn}) \right]}{\sin \left[ y_{mn} v(x_{mn}) \right]} \right\} \sin \frac{\pi x_{mn}}{a}$$

$$\text{โดยที่} \quad y_{mn} = l_{mn} / l_r(x_{mn})$$

$y_{mn}$  คือ ความยาวสลอตที่นอมอลไลซ์

$(x_{mn}, 2l_{rnm})$  คือ ระยะออฟเซต และความยาวของสลอตที่  $m$  ของท่อนำคลื่นที่เป็น branch line ที่

$n$

$Z_n^a(\text{slot } m, n)$  คือ ค่าแอกทีฟแอดมิแตนซ์ของสลอตที่  $m$  branch line ที่  $n$  เปรียบเทียบโดยเหมือนกับไดโพลที่ใส่โหลด

$Z_{mn}^a(\text{slot } m, n)$  คือ ค่าเชลฟอิมพีแดนซ์ของไดโพลที่รวมกับโหลด  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับครูในวงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z_n^b$  (slot m,n) คือ มีวาลคัปปลิงของสล๊อตที่ m branch line ที่ n

$Z_{ij}$  คือ มีวาลอิมพีแดนซ์

**หมายเหตุ** ส่วนของการคำนวณต่อไปนี้ จะใช้ตัวย่อแทนค่าแอดคทีฟแอดมิตแตนซ์ เซลฟ์อิมพีแดนซ์ และมีวาลคัปปลิง ดังนี้

$Z_n^a$  คือ ค่าแอดคทีฟแอดมิตแตนซ์ของสล๊อตที่ n บน branch line ต่างๆ ตามรูปที่ 5.2

$Z_{nn}$  คือ ค่า เซลฟ์อิมพีแดนซ์ของไดโพลที่รวมกับโหลด

$Z_n^b$  คือ มีวาลคัปปลิงของสล๊อตที่ n บน branch line ต่างๆ ตามรูปที่ 5.2

เมื่อ 
$$Z_n^a = Z_{nn} + Z_n^b$$

$$Z_n^b = \sum \frac{V_{m'n'}^s \sin kl_{m'n'}}{V_{mn}^s \sin kl_{mn}} Z_{ij}$$

$$Z_{nn} = \frac{K_2 f_{mn}^2}{Y_{mn}^a / G_0}$$

จากกราฟ และฟังก์ชันผลการทดลองของ R.J. Stegen จะได้ว่า

$$\frac{Y_{mn}^a}{G_0} = g(x_{mn})h(y_{mn})$$

$$h(y_{mn}) = h_1(y_{mn}) + jh_2(y_{mn})$$

ดังนั้น

$$Z_{nn}(x_{mn}, y_{mn}) = \frac{K_2 f_{mn}^2(x_{mn}, y_{mn})}{g(x_{mn})h(y_{mn})}$$

##### 5. คำนวณหามีวาลอิมพีแดนซ์

$$Z_{ij} = R_{ij} + X_{ij}$$

พิจารณามีวาลอิมพีแดนซ์ที่สล๊อตตัวที่ 1 จากสล๊อตตัวที่ 2-6 ของ branch line ที่ 1 จะได้

$$Z_{1,2}, Z_{1,3}, Z_{1,4}, Z_{1,5} \text{ และ } Z_{1,6}$$

พิจารณามีวาลอิมพีแดนซ์ที่สล๊อตตัวที่ 1 จากสล๊อตตัวที่ 7-12 ของ branch line ที่ 2 จะได้

$$Z_{1,7}, Z_{1,8}, Z_{1,9}, Z_{1,10}, Z_{1,11} \text{ และ } Z_{1,12}$$

พิจารณามีวาลอิมพีแดนซ์ที่สล๊อตตัวที่ 1 จากสล๊อตตัวที่ 13-18 ของ branch line ที่ 3 จะได้

$$Z_{1,13}, Z_{1,14}, Z_{1,15}, Z_{1,16}, Z_{1,17} \text{ และ } Z_{1,18}$$

พิจารณามีวาลอิมพีแดนซ์ที่สล๊อตตัวที่ 1 จากสล๊อตตัวที่ 19-24 ของ branch line ที่ 4 จะได้

$$Z_{1,19}, Z_{1,20}, Z_{1,21}, Z_{1,22}, Z_{1,23} \text{ และ } Z_{1,24}$$

พิจารณามีวาลอิมพีแดนซ์ที่สล๊อตตัวที่ 1 จากสล๊อตตัวที่ 25-30 ของ branch line ที่ 5 จะได้

$$Z_{1,25}, Z_{1,26}, Z_{1,27}, Z_{1,28}, Z_{1,29} \text{ และ } Z_{1,30}$$

พิจารณามีวาลอิมพีแดนซ์ที่สล๊อตตัวที่ 1 จากสล๊อตตัวที่ 31-36 ของ branch line ที่ 6 จะได้

$Z_{1,31}, Z_{1,32}, Z_{1,33}, Z_{1,34}, Z_{1,35}$  และ  $Z_{1,36}$

ดังนั้นพิจารณาไม่วอลิมพีแดนซ์ที่สลิตตัวที่ 2,3,4,...,36 จากสลิตตัวอื่นๆ ของ branch line ต่าง ๆ จะพิจารณาได้เช่นเดียวกัน

ไม่วอลิมพีแดนซ์ดังกล่าวข้างต้น สามารถคำนวณโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$R_{12} = \frac{j30}{\sin kl_1 \cdot \sin kl_2} \int_{-l_2/\lambda}^{l_2/\lambda} \left( \frac{\sin kr_1}{r_1/\lambda} + \frac{\sin kr_2}{r_2/\lambda} - 2 \cos kl_1 \frac{\sin kr}{r/\lambda} \right) \cdot \sin k(l_2 - |\zeta_2|) d\left(\frac{\zeta_2}{\lambda}\right)$$

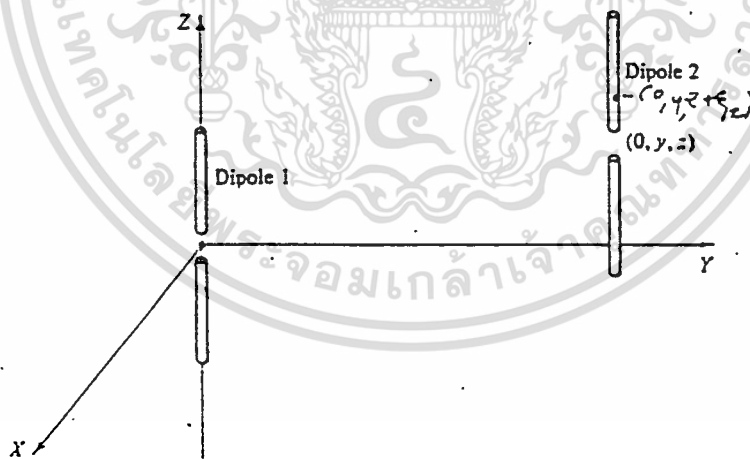
$$X_{12} = \frac{30}{\sin kl_1 \cdot \sin kl_2} \int_{-l_2/\lambda}^{l_2/\lambda} \left( \frac{\cos kr_1}{r_1/\lambda} + \frac{\cos kr_2}{r_2/\lambda} - 2 \cos kl_1 \frac{\cos kr}{r/\lambda} \right) \cdot \sin k(l_2 - |\zeta_2|) d\left(\frac{\zeta_2}{\lambda}\right)$$

$$r = [y^2 + (z + \zeta_2)^2]^{1/2}$$

$$r_1 = [y^2 + (z + \zeta_2 - l_1)^2]^{1/2}$$

$$r_2 = [y^2 + (z + \zeta_2 + l_1)^2]^{1/2}$$

ตัวแปรต่าง ๆ เป็นดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5.3

โดยใช้ ระยะออฟเซต ( $X_{mn}$ ) เท่ากับ 2.5 mm ความยาวสลิต ( $2l_{mn}$ ) เท่ากับ 12.213 mm

ระยะห่างระหว่างสลิตใน branch line เดียวกัน ( $d_1$ ) =  $\frac{\lambda_g}{2} = 19.06$  mm

ระยะห่างระหว่างสลิตที่ branch line อยู่ติดกัน ( $d_2$ ) =  $a' = 19.06$  mm

6. คำนวณหาไม่วอลิมพีแดนซ์

$$Z_n^b = \sum Z_{ij}$$

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยสสารควบแน่นสำหรับการใช้งานในสาขาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาหา  $Z_1^b$  ( มีวาลคัปปลิงของสล็ตตัวที่ 1 ,branch line ที่ 1 ) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 Z_1^b = & (Z_{1,2} + Z_{1,3} + Z_{1,4} + Z_{1,5} + Z_{1,6}) && \text{ผลรวมมีวาลอิมพีแดนซ์ branch line ที่ 1} \\
 & +(Z_{1,7} + Z_{1,8} + Z_{1,9} + Z_{1,10} + Z_{1,11} + Z_{1,12}) && \text{ผลรวมมีวาลอิมพีแดนซ์ branch line ที่ 2} \\
 & +(Z_{1,13} + Z_{1,14} + Z_{1,15} + Z_{1,16} + Z_{1,17} + Z_{1,18}) && \text{ผลรวมมีวาลอิมพีแดนซ์ branch line ที่ 3} \\
 & +(Z_{1,19} + Z_{1,20} + Z_{1,21} + Z_{1,22} + Z_{1,23} + Z_{1,24}) && \text{ผลรวมมีวาลอิมพีแดนซ์ branch line ที่ 4} \\
 & +(Z_{1,25} + Z_{1,26} + Z_{1,27} + Z_{1,28} + Z_{1,29} + Z_{1,30}) && \text{ผลรวมมีวาลอิมพีแดนซ์ branch line ที่ 5} \\
 & +(Z_{1,31} + Z_{1,32} + Z_{1,33} + Z_{1,34} + Z_{1,35} + Z_{1,36}) && \text{ผลรวมมีวาลอิมพีแดนซ์ branch line ที่ 6}
 \end{aligned}$$

ซึ่งการคำนวณ  $Z_2^b, Z_3^b, \dots$ , จนถึง  $Z_{18}^b$  (มีวาลคัปปลิงของสล็ตตัวที่ b branch line ที่ 3) สามารถทำได้โดยวิธีการดังกล่าวข้างต้นเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่า  $Z_n^b$ 

$Z_n^b$	
$Z_1^b$	-19.737-j14.669
$Z_2^b$	-19.943-j13.912
$Z_3^b$	-20.250-j15.147
$Z_4^b$	-22.788-j17.537
$Z_5^b$	-19.128-j18.386
$Z_6^b$	-18.850-j13.584
$Z_7^b$	-39.407-j29.856
$Z_8^b$	-53.508-j18.014
$Z_9^b$	-34.450-j48.951
$Z_{10}^b$	-52.687-j17.780
$Z_{11}^b$	-40.407-j44.398
$Z_{12}^b$	-49.070-j12.392
$Z_{13}^b$	-37.199-j10.948
$Z_{14}^b$	-14.933-j48.928
$Z_{15}^b$	-44.282-j8.044
$Z_{16}^b$	-13.661-j51.509
$Z_{17}^b$	-41.313-j5.816
$Z_{18}^b$	-21.173-j37.800

7. เนื่องจากผลของมิวชาลด์ปลิงทำให้ระยะออฟเซต และความยาวของสลิตในรูปนอมอลไลซ์เปลี่ยนไป สามารถคำนวณได้โดยใช้เงื่อนไข

7.1 ส่วนจินตภาพของ  $Z_{mn}$  หักล้างกับส่วนจินตภาพของ  $Z_n^b$  เพื่อที่จะทำให้  $\frac{Y_{mn}^a}{G_o}$  มีเฉพาะส่วนจริง (Real part)

จาก

$$\frac{Y_{mn}^a}{G_o} = \frac{K_2 f_{mn}^2}{[K_2 f_{mn}^2 / g(x_{mn})h(y_{mn})] + Z_n^b}$$

$$K_2 = \frac{292(ab)}{0.61\pi(\beta/k)}$$

$$= \frac{292(16.56\text{mm}/7.00\text{mm})}{0.61\pi \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{25.001569\text{mm}}{2 \times 16.56\text{mm}} \right)^2} \right]} = 549.6$$

จากเงื่อนไขดังกล่าว เราสามารถตั้งสมการโดยมีระยะออฟเซต ( $x_{mn}$ ) และความยาวสลิตในรูปนอมอลไลซ์ ( $y_{mn}$ ) เป็นตัวแปรได้ 18 สมการดังนี้

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{11}^2}{g(x_{11})h(y_{11})} \right] = \pm \text{Im} [Z_1^b] \quad \dots(5.3)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{21}^2}{g(x_{21})h(y_{21})} \right] = \pm \text{Im} [Z_2^b] \quad \dots(5.4)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{31}^2}{g(x_{31})h(y_{31})} \right] = \pm \text{Im} [Z_3^b] \quad \dots(5.5)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{41}^2}{g(x_{41})h(y_{41})} \right] = \pm \text{Im} [Z_4^b] \quad \dots(5.6)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{51}^2}{g(x_{51})h(y_{51})} \right] = \pm \text{Im} [Z_5^b] \quad \dots(5.7)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{61}^2}{g(x_{61})h(y_{61})} \right] = \pm \text{Im} [Z_6^b] \quad \dots(5.8)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{21}^2}{g(x_{21})h(y_{21})} \right] = \pm \text{Im} [Z_7^b] \quad \dots(5.9)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{22}^2}{g(x_{22})h(y_{22})} \right] = \pm \text{Im} [Z_8^b] \quad \dots(5.10)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{23}^2}{g(x_{23})h(y_{23})} \right] = \pm \text{Im} [Z_9^b] \quad \dots(5.11)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{24}^2}{g(x_{24})h(y_{24})} \right] = \pm \text{Im} [Z_{10}^b] \quad \dots(5.12)$$

$$\text{Im} \left[ \frac{K_2 f_{25}^2}{g(x_{25})h(y_{25})} \right] = \pm \text{Im} [Z_{11}^b] \quad \dots(5.13)$$

$$\operatorname{Im} \left[ \frac{K_2 f_{26}^2}{g(x_{26})h(y_{26})} \right] = \pm \operatorname{Im} [Z_{12}^b] \quad \dots(5.14)$$

$$\operatorname{Im} \left[ \frac{K_2 f_{31}^2}{g(x_{31})h(y_{31})} \right] = \pm \operatorname{Im} [Z_{13}^b] \quad \dots(5.15)$$

$$\operatorname{Im} \left[ \frac{K_2 f_{32}^2}{g(x_{32})h(y_{32})} \right] = \pm \operatorname{Im} [Z_{14}^b] \quad \dots(5.16)$$

$$\operatorname{Im} \left[ \frac{K_2 f_{33}^2}{g(x_{33})h(y_{33})} \right] = \pm \operatorname{Im} [Z_{15}^b] \quad \dots(5.17)$$

$$\operatorname{Im} \left[ \frac{K_2 f_{34}^2}{g(x_{34})h(y_{34})} \right] = \pm \operatorname{Im} [Z_{16}^b] \quad \dots(5.18)$$

$$\operatorname{Im} \left[ \frac{K_2 f_{35}^2}{g(x_{35})h(y_{35})} \right] = \pm \operatorname{Im} [Z_{17}^b] \quad \dots(5.19)$$

$$\operatorname{Im} \left[ \frac{K_2 f_{36}^2}{g(x_{36})h(y_{36})} \right] = \pm \operatorname{Im} [Z_{18}^b] \quad \dots(5.20)$$

เมื่อ

$$g(x_{mn}) = 1.177 \sin^2 \frac{\pi x_{mn}}{a}$$

$$h(y_{mn}) = h_1(y_{mn}) + j h_2(y_{mn}) \quad ; \quad h_1(y_{mn}) = 1 - 275(y_{mn} - 1)^2$$

$$h_2(y_{mn}) = -14(y_{mn} - 1)$$

## 7.2 อัตราส่วนของสล็อตโวลเตจตามลักษณะแพทเทิร์นที่ต้องการ

$$\frac{Y_{m'n'}^a / G_o}{f_{m'n'}} = \frac{-V_{m'n'}^s \sin v(x_{m'n'})}{V_{mn}^s \sin v(x_{mn})} \times \frac{Y_{mn}^a / G_o}{f_{mn}}$$

เนื่องจากเป็นยูนิฟอร์ม พลาสมาอาร์เรย์ ดังนั้นอัตราส่วนของสล็อตโวลเตจแต่ละสล็อตจะมีค่าเท่ากัน จึงตั้งสมการโดยมีระยะออฟเซต ( $x_{mn}$ ) และความยาวสล็อตในรูปนอมอลไลซ์ ( $y_{mn}$ ) เป็นตัวแปร ได้อีก 17 สมการ ดังนี้

$$\frac{Y_{21}^a / G_o}{f_{21}} = \frac{\sin v(x_{21})}{\sin v(x_{11})} \times \frac{Y_{11}^a}{f_{11}} \quad \dots(5.21)$$

$$\frac{Y_{31}^a / G_o}{f_{31}} = \frac{\sin v(x_{31})}{\sin v(x_{21})} \times \frac{Y_{21}^a}{f_{21}} \quad \dots(5.22)$$

$$\frac{Y_{41}^a / G_o}{f_{41}} = \frac{\sin v(x_{41})}{\sin v(x_{31})} \times \frac{Y_{31}^a}{f_{31}} \quad \dots(5.23)$$

$$\frac{Y_{51}^a / G_o}{f_{51}} = \frac{\sin v(x_{51})}{\sin v(x_{41})} \times \frac{Y_{41}^a}{f_{41}} \quad \dots(5.24)$$

$$\frac{Y_{61}^a / G_o}{f_{61}} = \frac{\sin v(x_{61})}{\sin v(x_{51})} \times \frac{Y_{51}^a}{f_{51}} \quad \dots(5.25)$$

$$\frac{Y_{12}^a / G_o}{f_{12}} = \frac{\sin v(x_{12})}{\sin v(x_{61})} \times \frac{Y_{61}^a}{f_{61}} \quad \dots(5.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาของนักศึกษาในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Y_{22}^a/G_o}{f_{22}} = -\frac{\sin v(x_{22})}{\sin v(x_{12})} \times \frac{Y_{12}^a}{f_{12}} \quad \dots(5.27)$$

$$\frac{Y_{32}^a/G_o}{f_{32}} = -\frac{\sin v(x_{32})}{\sin v(x_{22})} \times \frac{Y_{22}^a}{f_{22}} \quad \dots(5.28)$$

$$\frac{Y_{42}^a/G_o}{f_{42}} = -\frac{\sin v(x_{42})}{\sin v(x_{32})} \times \frac{Y_{32}^a}{f_{32}} \quad \dots(5.29)$$

$$\frac{Y_{52}^a/G_o}{f_{52}} = -\frac{\sin v(x_{52})}{\sin v(x_{42})} \times \frac{Y_{42}^a}{f_{42}} \quad \dots(5.30)$$

$$\frac{Y_{62}^a/G_o}{f_{62}} = -\frac{\sin v(x_{62})}{\sin v(x_{52})} \times \frac{Y_{52}^a}{f_{52}} \quad \dots(5.31)$$

$$\frac{Y_{13}^a/G_o}{f_{13}} = -\frac{\sin v(x_{13})}{\sin v(x_{62})} \times \frac{Y_{62}^a}{f_{62}} \quad \dots(5.32)$$

$$\frac{Y_{23}^a/G_o}{f_{23}} = -\frac{\sin v(x_{23})}{\sin v(x_{13})} \times \frac{Y_{13}^a}{f_{13}} \quad \dots(5.33)$$

$$\frac{Y_{33}^a/G_o}{f_{33}} = -\frac{\sin v(x_{33})}{\sin v(x_{23})} \times \frac{Y_{23}^a}{f_{23}} \quad \dots(5.34)$$

$$\frac{Y_{43}^a/G_o}{f_{43}} = -\frac{\sin v(x_{43})}{\sin v(x_{33})} \times \frac{Y_{33}^a}{f_{33}} \quad \dots(5.35)$$

$$\frac{Y_{53}^a/G_o}{f_{53}} = -\frac{\sin v(x_{53})}{\sin v(x_{43})} \times \frac{Y_{43}^a}{f_{43}} \quad \dots(5.36)$$

$$\frac{Y_{63}^a/G_o}{f_{63}} = -\frac{\sin v(x_{63})}{\sin v(x_{53})} \times \frac{Y_{53}^a}{f_{53}} \quad \dots(5.37)$$

$$\text{เมื่อ } v(x_{mn}) = 1.517 + 1.822x_{mn}^2$$

7.3 เพราะจำนวนตัวแปรที่เราต้องการทราบค่าคือ  $(x_{11}, y_{11}), (x_{21}, y_{21}), \dots, (x_{63}, y_{63})$  มีจำนวนทั้งสิ้น 36 ตัวแปร จากเงื่อนไข 2 ข้อที่ผ่านมาสามารถสร้างสมการได้ 35 สมการ จึงจำเป็นต้องสร้างอีก 1 สมการ โดยใช้เงื่อนไขของการแมชชีนซึ่งระหว่าง main guide กับ branch line ทั้ง 6 branch ดังนี้

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{Y_{branch1}} + \frac{1}{Y_{branch2}} + \frac{1}{Y_{branch3}} \quad \dots(5.38)$$

$$\text{เมื่อ } Y_{branch1} = \frac{1}{r} + \frac{Y_{11}^a}{G_o} + \frac{Y_{21}^a}{G_o} + \frac{Y_{31}^a}{G_o} + \frac{Y_{41}^a}{G_o} + \frac{Y_{51}^a}{G_o} + \frac{Y_{61}^a}{G_o}$$

$$Y_{branch2} = \frac{1}{r} + \frac{Y_{12}^a}{G_o} + \frac{Y_{22}^a}{G_o} + \frac{Y_{32}^a}{G_o} + \frac{Y_{42}^a}{G_o} + \frac{Y_{52}^a}{G_o} + \frac{Y_{62}^a}{G_o}$$

$$Y_{branch3} = \frac{1}{r} + \frac{Y_{13}^a}{G_o} + \frac{Y_{23}^a}{G_o} + \frac{Y_{33}^a}{G_o} + \frac{Y_{43}^a}{G_o} + \frac{Y_{53}^a}{G_o} + \frac{Y_{63}^a}{G_o}$$

$r$  คือ นอมอลไลซ์รีโซแนนซ์ (normalized resonant resistance,  $R/Z_o$ ) ของสลิตแบบ

กึ่งกลาง (Inclined slot) ที่เจาะบนผนังด้านกว้างของนำคลื่นหลัก (Main guide) ซึ่งค่า  $r$  ที่เหมาะสมกับเงื่อนไขการแมชชีนมีค่าเท่ากับ  $0.4 \Omega$  (รายละเอียดจะได้กล่าวถึงในบทที่ 6 และ 7)

จากเงื่อนไขทั้ง 3 ข้อ (7.1-7.3) สามารถตั้งสมการได้ 36 สมการ โดยมีระยะออฟเซต ( $x_{mn}$ ) และความยาวสลีดในรูปนอมอลไลซ์ ( $y_{mn}$ ) เป็นตัวแปรคือ  $(x_{11}, y_{11}), (x_{21}, y_{21}), \dots, (x_{63}, y_{63})$  ทั้งหมด 36 ตัวแปร การคำนวณดังกล่าวพิจารณาผลของมิวซวลคัปปลิง ซึ่งการแก้สมการจะใช้วิธี Steepest Descent Method ซึ่งเขียนเป็นโปรแกรมภาษา c ดังภาคผนวก

อนึ่ง การคำนวณหาระยะออฟเซต และความยาวสลีด ในกรณีพิจารณาผลของมิวซวลคัปปลิง จะทำการคำนวณเฉพาะ สลีดที่ 1 ถึง 18 หรือ สลีดที่ 1 branch line ที่ 1 ถึง สลีดที่ 6 branch line ที่ 3 เท่านั้น เพราะลักษณะการจัดเรียงอิลิเมนต์มีลักษณะสมมาตรกัน จึงเป็นการสะดวกในการตั้งสมการคำนวณเฉพาะสลีดที่ 1 ถึง 18 และนำผลที่ได้ไปใช้กับสลีดที่ 17 ถึง 36 หรือสลีดที่ 1 branch line ที่ 4 ถึงสลีดที่ 6 branch line ที่ 6 ในลักษณะสมมาตรแบบ Quadrant ที่ 1 ถึง 3 และ Quadrant ที่ 2 กับ 4



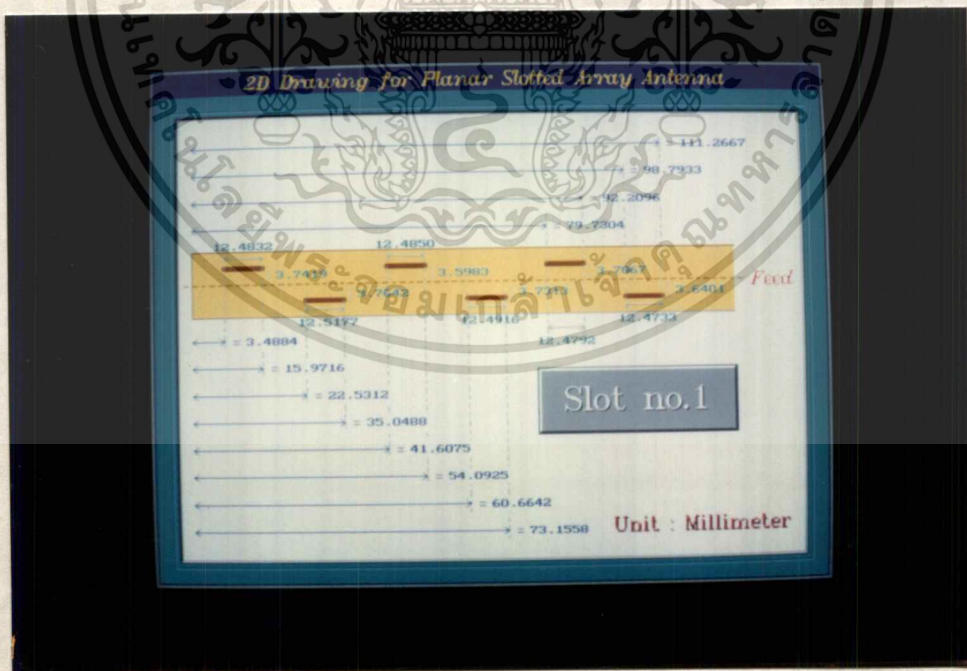
**Planar Slotted Array Designer**

Branch **3** Iteration **2** Error **0.0034143296** %Go **6.0127250588**

Slot	Offset	Length	Slot	Offset	Length
1	3.64011849	12.47339840	19	3.83617017	12.63621018
2	-3.70666699	12.47927619	20	-2.72135220	12.28205464
3	3.73123969	12.49142385	21	4.40388695	12.79890592
4	-3.59831789	12.48515998	22	-2.69240061	12.29456287
5	3.76421926	12.51756033	23	4.60120787	12.82753714
6	-3.74188701	12.48292951	24	-3.12089721	12.37038980
7	3.43083418	12.53112824	25	2.95455872	12.35778778
8	-2.68256093	12.35140751	26	-3.64127065	12.63428022
9	3.79624262	12.67893778	27	2.68778773	12.35989911
10	-2.68778773	12.35989911	28	-3.79624262	12.67893778
11	3.64127065	12.63428022	29	2.68256093	12.35140751
12	-2.95455872	12.35778778	30	-3.43083418	12.53112824
13	3.12089721	12.37038980	31	3.74188701	12.48292951
14	-4.60120787	12.82753714	32	-3.76421926	12.51756033
15	2.69240061	12.29456287	33	3.59831789	12.48515998
16	-4.40388695	12.79890592	34	-3.73123969	12.49142385
17	2.72135220	12.28205464	35	3.70666699	12.47927619
18	-3.83617017	12.63621018	36	-3.64011849	12.47339840

Status Calculating...

ภาพแสดงหน้าจอจากโปรแกรมคำนวณระยะออฟเซตและความยาวสลิต



ภาพแสดงหน้าจอจากโปรแกรมเขียนแบบท่อนำคลื่นย่อย  
ที่จะนำไปเจาะโดยใช้เครื่อง CNC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงระยะออฟเซตและความยาวสล็อตที่ได้จากโปรแกรม

ท่อนำคลื่นย่อยที่ 1 (Branch line 1)

สล็อต m,n	ระยะออฟเซต (x)	ความยาวสล็อต (2l)
1,1	3.644	12.838
2,1	-3.705	12.843
3,1	3.729	12.855
4,1	-3.599	12.850
5,1	3.766	12.882
6,1	-3.742	12.847

ท่อนำคลื่นย่อยที่ 2 (Branch line 2)

สล็อต m,n	ระยะออฟเซต (x)	ความยาวสล็อต (2l)
1,2	3.430	12.896
2,2	-2.602	12.716
3,2	3.796	13.043
4,2	-2.687	12.724
5,2	3.641	12.999
6,2	-2.954	12.722

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนำคลื่นย่อยที่ 3 (Branch line 3 )

สลิตที่ m,n	ระยะออฟเซต (x)	ความยาวสลิต (2l)
1,3	3.120	12.735
2,3	-4.608	13.193
3,3	2.692	12.659
4,3	-4.405	13.164
5,3	2.720	12.646
6,3	-3.837	13.001

ท่อนำคลื่นย่อยที่ 4 (Branch line 4 )

สลิตที่ m,n	ระยะออฟเซต (x)	ความยาวสลิต (2l)
1,4	3.837	13.001
2,4	-2.720	12.646
3,4	4.405	13.164
4,4	-2.692	12.659
5,4	4.608	13.193
6,4	-3.120	12.735

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อนาคลีนย่อยที่ 5 (Branch line 5 )

สล็ต m,n	ระยะออฟเซต (x)	ความยาวสล็ต (2l)
1,5	2.954	12.722
2,5	-3.641	12.999
3,5	2.687	12.724
4,5	-3.796	13.043
5,5	2.602	12.716
6,5	-3.430	12.896

ท่อนาคลีนย่อยที่ 6 (Branch line 6 )

สล็ต m,n	ระยะออฟเซต (x)	ความยาวสล็ต (2l)
1,6	3.742	12.847
2,6	-3.766	12.882
3,6	3.599	12.850
4,6	-3.729	12.855
5,6	3.705	12.843
6,6	-3.644	12.838

หมายเหตุ m คือ สล็ตที่ m

n คือ ท่อนาคลีนย่อย ( Branch line ) ที่ n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ระบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสล็อตโดยใช้ท่อนำคลื่น

การป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศนั้นทำได้โดยการป้อนสัญญาณผ่านทางตัวนำ เช่น สายโคแอกเชียล (coaxial line) ,ไมโครสตริป (micro strip) หรือการป้อนสัญญาณผ่านท่อนำคลื่น ( waveguide ) เป็นต้น ซึ่งการเลือกวิธีป้อนสัญญาณต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ และชนิดของสายอากาศนั้น ๆ สำหรับสายอากาศชนิดสล็อตบนผนังของท่อนำคลื่นที่ใช้งานในย่านความถี่สูง ( microwave ) เหมาะสมกับการป้อนสัญญาณผ่านทางท่อนำคลื่น ( main waveguide ) เพราะใช้วัสดุชนิดเดียวกัน ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและสร้างสายอากาศ นอกจากนี้กำลังงานที่คัปปลิงผ่านทางสล็อตระหว่างท่อนำคลื่นสามารถเลือกให้คัปปลิงออกไป มากหรือน้อยได้ตามต้องการขึ้นอยู่กับลักษณะของสล็อต และกำลังงานของคลื่นที่เดินทางไปในท่อนำคลื่นมีการสูญเสียต่ำเมื่อใช้ในย่านความถี่สูง

การจัดวางตำแหน่งของสล็อตบนท่อนำคลื่น สามารถจัดได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

#### 1. แบบท่อนำคลื่นรีโซแนนท์ ( resonant slotted waveguide )

การออกแบบลักษณะนี้คลื่นที่เดินทางภายในท่อนำคลื่นจะเสมือนเป็นคลื่นนิ่ง เพราะมีการจัดวางตำแหน่งสล็อตไว้อย่างเหมาะสม โดยมีข้อกำหนดดังนี้

1.1 ทุกๆ สล็อตในอาเรย์จะต้องรีโซแนนท์ กล่าวคือ ค่าซัสเซ็ปแตนซ์ ( susceptance ) หรือรีแอกแตนซ์ ( reactance ) ของวงจรสมมูลย์ของสล็อต จะต้องมิต่ำเป็นศูนย์ที่ความถี่ที่ออกแบบ

1.2 แต่ละสล็อตที่อยู่ติดกันจะต้องมีระยะห่างกันเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น คือ  $\frac{\lambda_g}{2}$

1.3 ลักษณะบีม ที่คัปปลิงกำลังงานออกมา จะตั้งฉากกับแนวแกนของอาเรย์ หรือ เรียกว่า บรอดไซด์ ( broadside )

#### 2. แบบท่อนำคลื่นเดินทาง ( travelling wave slotted waveguide )

แบบท่อนำคลื่นเดินทางมีลักษณะแตกต่าง กับ แบบท่อนำคลื่นเรโซแนนท์คือ

2.1 ระยะห่างระหว่างสล็อตที่อยู่ติดกัน มีค่ามากกว่า หรือน้อยกว่า ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น

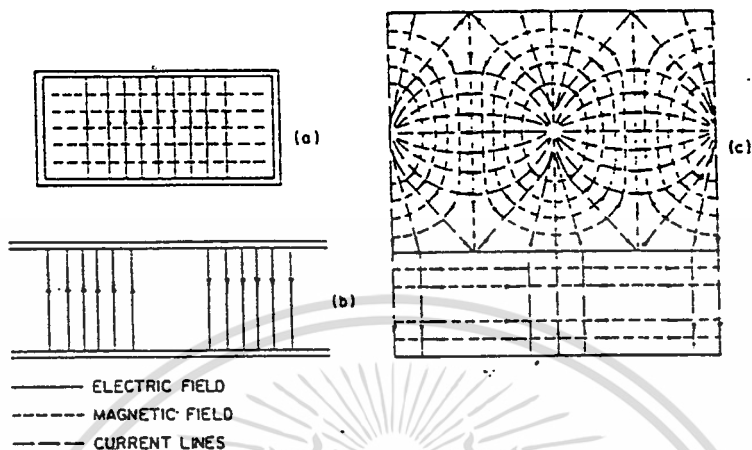
2.2 ปลายท่อนำคลื่นลักษณะนี้จะต้องติดไว้ด้วยแมทช์โหลด ( match load )

2.3 ลักษณะบีม ที่คัปปลิงกำลังงานออกมาไม่อยู่ในแนวบรอดไซด์

การพิจารณาลักษณะการวางตำแหน่งสล็อตบนท่อนำคลื่นหลัก ( main guide ) เพื่อใช้ในการคัปปลิงกำลังงานไปยังท่อนำคลื่นย่อย ( branch line ) เราจะเลือกใช้แบบท่อนำคลื่นรีโซแนนท์ เพราะปริมาณของกำลังงานที่คัปปลิงออกไปมีค่าสูงเนื่องจากสล็อตแต่ละอันรีโซแนนท์ และปริมาณกำลังงานที่กระจายไปยังท่อนำคลื่นย่อยมีค่าสม่ำเสมอเท่ากันทุกท่อ ตรงตามความต้องการ คือ เป็นแบบยูนิฟอร์ม ฟีด

ลักษณะการเจาะสลีตบนท่อนำคลื่น

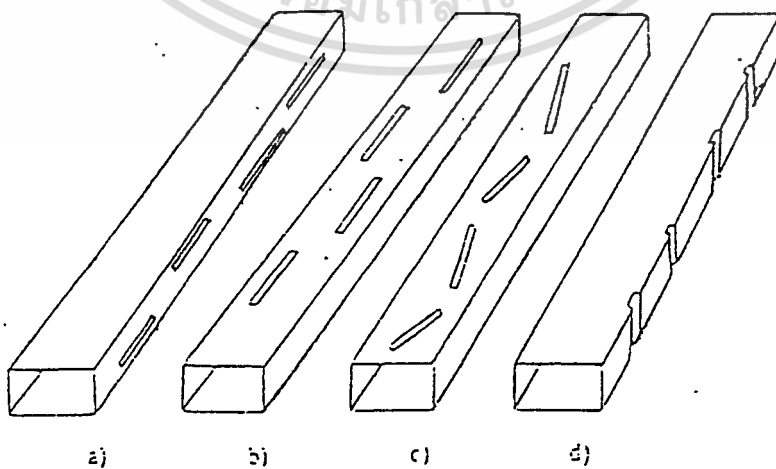
สลีตที่เจาะบนผนังของท่อนำคลื่นจะไปขวางการไหลของกระแสบนผิวท่อ ซึ่งทำให้เกิดกำลังงานกระจายออกมา ทิศทางการไหลของกระแสบนผิวของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม โหมด  $TE_{10}$  เป็นดังรูป



รูปที่ 6.1 แสดงการไหลของกระแสบนผิวท่อนำคลื่น โหมด  $TE_{10}$

โดยสลีตที่เจาะขนานไปกับเวกเตอร์ของกระแสที่ผิวจะไม่กระจายคลื่นออกมา เช่น สลีตที่เจาะขนานไปตามเส้นกึ่งกลางท่อนำคลื่น การเจาะสลีตนั้นกระทำได้หลายลักษณะขึ้นกับตำแหน่งที่เจาะ หรือด้านที่เจาะ ดังนี้

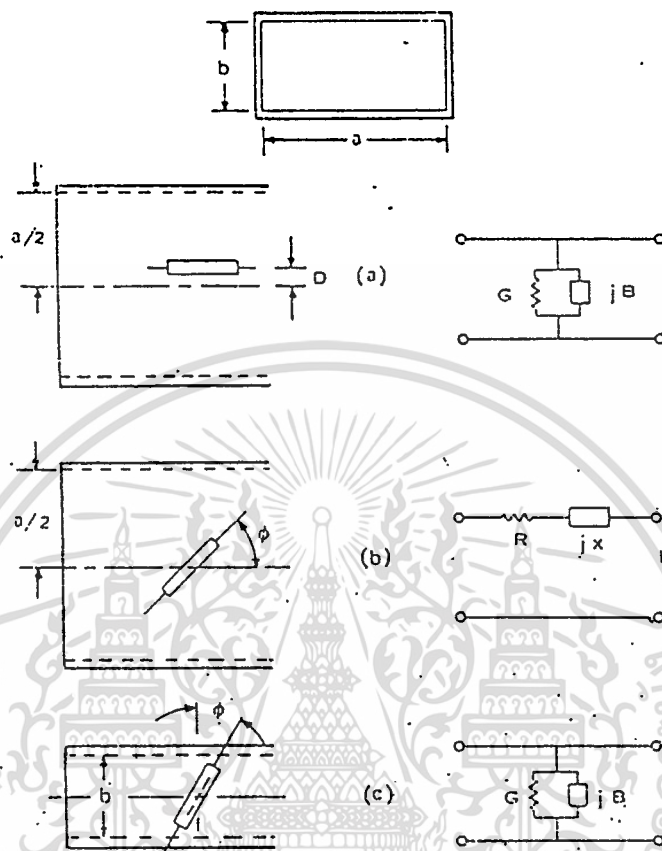
1. การเจาะสลีตบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น ( broadwall slot ) เช่น
  - 1.1 การเจาะแบบขนานตามยาว ( longitudinal slot )
  - 1.2 การเจาะแบบกึ่งกลาง ( center incline slot )
2. การเจาะสลีตบนผนังด้านแคบของท่อนำคลื่น ( narrowwall slot ) เช่น
  - 2.1 การเจาะแบบขนานตามยาว ( longitudinal slot )
  - 2.2 การเจาะขอบผนัง ( edgewall slot )



รูปที่ 6.2 a.) การเจาะแบบขนานตามยาวบนผนังด้านแคบ b.) การเจาะแบบขนานตามยาวบนผนังด้านกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 c.) การเจาะแบบกึ่งกลาง d.) การเจาะขอบผนัง  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรเสมือนของสล롯แบบต่าง ๆ ที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่น (Equivalent-network representations of slot)



รูปที่ 6.3

เราสามารถแสดงวงจรเสมือนแทนลักษณะของสลอตแบบต่าง ๆ โดยที่สลอตเดี่ยวแต่ละอิลิเมนต์ถูกกำหนดโดยสมมุติฐานที่ว่า ความยาวสลอต (slot width) เปรียบเทียบกับความยาวคลื่นแล้วมีค่าน้อยมาก

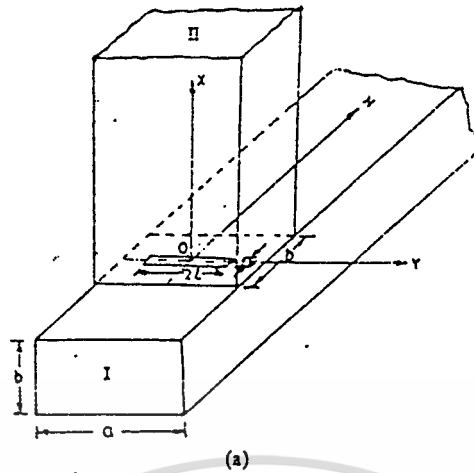
วงจรเสมือนของสลอตที่เจาะแบบขนานตามยาวบนผนังท่อนำคลื่นด้านกว้าง และ เจาะแบบขอบผนังบนผนังด้านแคบ แสดงได้ด้วยชัณฑ์อิลิเมนต์ (shunt element) ของแอดมิตแดนซ์ ประกอบด้วย คอนดักแตนซ์ (G) กับ ซีสเชปแดนซ์ (B) ดังรูป a.) และ c.) ด้านบน

วงจรเสมือนของสลอตที่เจาะแบบกึ่งกลางทำมุม  $\phi$  กับเส้นสมมติกึ่งกลางตามแนวยาวของท่อ แสดงได้ด้วยซีรีย์อิลิเมนต์ (series element) ของอิมพีแดนซ์ ประกอบด้วย รีซิสแดนซ์ (R) กับ รีแอกแตนซ์ (X) ดังรูป b.) ที่แสดงด้านบน

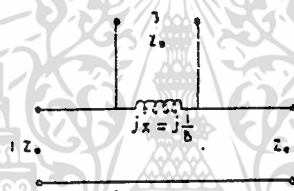
การคัปปลิงกำลังงานระหว่างท่อนำคลื่นหลัก (main guide) กับท่อนำคลื่นย่อย (branch guide)

ซึ่งสัญญาณจะผ่านทางสลอตที่เจาะบนผนังของท่อทั้งทางด้านกว้าง และทางด้านแคบ รวมไปถึงลักษณะของวงจรเสมือนแบบ 2 พอร์ต เนทเวอร์ค ที่นิยมใช้มี 3 ชนิด ดังนี้

เอกสารนี้เป็น 1. การคัปปลิงในลักษณะ Tee Junction ระหว่างท่อนำคลื่นบนระนาบ E plane ไม่ว่าการณ์โดยที่ลิมิตที่เชื่อมจะเจาะที่ผนังด้านกว้างในลักษณะตั้งฉากกับเส้นสมมติกึ่งกลางตามแนวยาวของท่อ ดังรูป



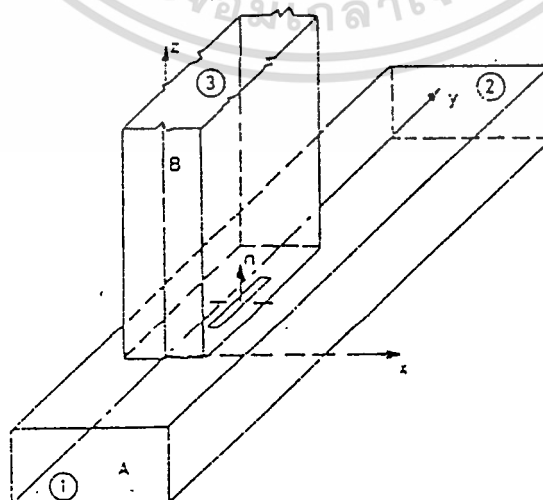
รูปที่ 6.4 แสดงการต่อเชื่อมแบบ Tee Junction ของท่อนำคลื่นหลักและท่อนำคลื่นย่อย  
 วงจรเสมือนแบบ 2 พอร์ต เนทเวอร์ค แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 6.5 แสดงวงจรเสมือนของ Tee Junction บนระนาบอ้างอิง x และ y

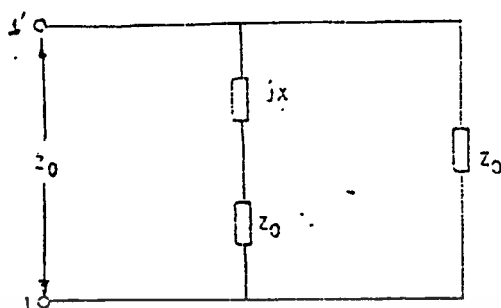
2. การคัปปลิงในลักษณะ Tee Junction ระหว่างท่อนำคลื่น บนระนาบ H plane

สล๊อตที่ใช้คัปปลิงกำลังงาน จะถูกเจาะที่ผนังด้านกว้างในลักษณะขนาน และมีระยะออฟเซตค่าหนึ่งกับเส้นสมมติที่กึ่งกลางตามแนวยาวของท่อ ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและการค้า  
 รูปที่ 6.6 แสดงการต่อเชื่อมแบบ Tee Junction ระหว่างท่อนำคลื่นหลัก และท่อนำคลื่นย่อย  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

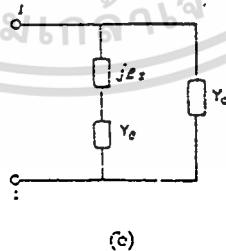
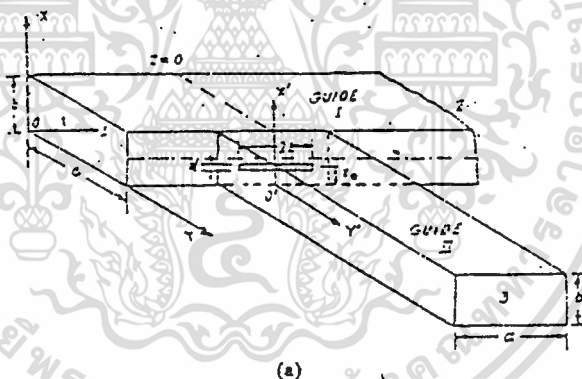
วงจรเสมือนแบบ 2 พอร์ต เน็ทเวอร์ค แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 6.7 แสดงวงจรเสมือนของ Tee Junction เมื่อมองมาจาก พอร์ตที่ 1

3. การคัปปลิงในลักษณะ Tee Junction ระหว่างท่อนำคลื่น ผ่านทางผนังด้านแคบบนระนาบ H plane

สล็อตจะถูกเจาะที่ผนังด้านแคบในลักษณะขนานกับเส้นสมมติกึ่งกลางตามแนวยาวของท่อและวงจรเสมือนแบบ 2 พอร์ต เน็ทเวอร์ค มีลักษณะดังรูป



รูปที่ 6.8 a.) แสดงการต่อเชื่อมแบบ Tee Junction บนผนังด้านแคบของท่อนำคลื่น

b.) แสดงวงจรเสมือนของ Tee Junction เมื่อมองมาจากพอร์ต 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิจารณา และคำนวณคุณลักษณะของสล็อตแบบต่าง ๆ ที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่น

การพิจารณาคุณลักษณะของสล็อตแบบต่าง ๆ นั้น มีหลายวิธีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ เช่น

Stevenson 's Solution , Variational Technique , Scattering Model Analysis และ Moment Method เป็นต้น ซึ่งวิธีการที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบการป้อนสัญญาณโดยท่อนำคลื่นนั้นจะใช้วิธีการของ Stevenson 's Solution มีข้อกำหนดพื้นฐาน 4 ข้อดังนี้

1. ผนังของท่อนำคลื่นมีลักษณะบาง และเป็นตัวนำสมบูรณ์
2. ความกว้างของสล็อตน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น
3. ความยาวของสล็อตมีขนาดประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในอากาศ ( $\lambda_0/2$ )
4. สล็อตถูกเจาะอยู่บน ground plane ขนาดใหญ่มาก

จากการคำนวณ ของ Stevenson จะได้สมการแสดงคุณลักษณะของสล็อตแบบต่าง ๆ ดังนี้

1. สมการแสดงค่า นอมอลไรซ์ รีโซแนนท์ คอนดักแตนซ์ ของสล็อตที่เจาะขนานตามแนวยาว บนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น

$$g = g_1 \sin^2 \left( \frac{D\pi}{a} \right) \dots (6.1)$$

$$g_1 = \left( \frac{2.09a\lambda_g}{b\lambda} \right) \cos^2 \left( \frac{\pi\lambda}{2\lambda_g} \right) \dots (6.2)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศ

$\lambda_g$  คือ ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น

D คือ ระยะห่างระหว่างสล็อตกับแนวเส้นศูนย์กลางของท่อนำคลื่น

a,b คือ ความกว้าง และ ความสูง ของท่อนำคลื่นโดยไม่รวมความหนาของท่อ

2. สมการแสดงค่า นอมอลไรซ์ รีโซแนนท์ รีซีสแตนซ์ ของสล็อตที่เจาะแบบกึ่งกลาง ทำมุม  $\phi$  กับ เส้นกึ่งกลางตามแนวยาวของท่อ บนผนังด้านบน ( slot b. ) รูปที่ 6.3

$$r = 0.131(\lambda^3/ab\lambda_g) [I(\phi) \sin \phi + (\lambda_g/2)J(\phi) \cos(\phi)]^2 \dots (6.3)$$

$$I(\phi) = \frac{\cos(\pi\xi/2)}{1-\xi^2} + \frac{\cos(\pi\zeta/2)}{1-\zeta^2} \dots (6.4)$$

$$J(\phi) = \frac{\cos(\pi\xi/2)}{1-\xi^2} - \frac{\cos(\pi\zeta/2)}{1-\zeta^2} \dots (6.5)$$

$$\xi = \frac{\lambda}{\lambda_g} \cos \phi - \frac{\lambda}{2a} \sin \phi \dots (6.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งได้รับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การคัดลอกหรือการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\phi$  คือ มุมที่สล๊อตทำกับเส้นกึ่งกลางบนผนังด้านกว้างตามแนวยาวของท่อนำคลื่นตามรูปสล๊อต b. ในรูปที่ 6.3

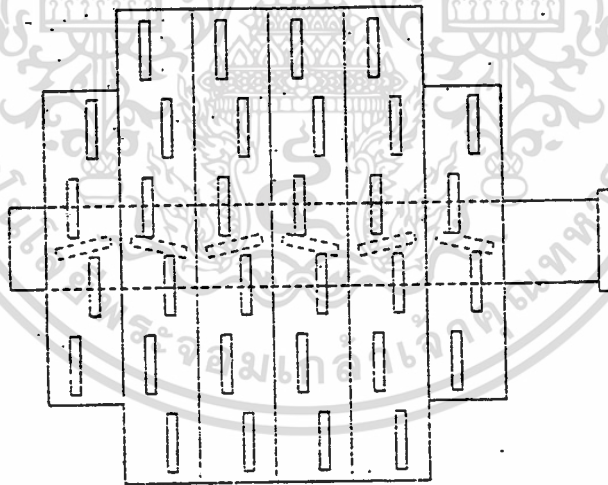
3. สมการแสดงค่าอมพลไรซ์รีโซแนนท์ คอนดักแตนซ์ ของสล๊อตที่เจาะบนขอบผนังด้านแคบของท่อนำคลื่น

$$g = \frac{30\lambda^3\lambda_g}{73\pi\alpha^3b} \left[ \frac{\sin\phi \cos\left(\frac{\pi\lambda\sin\phi}{2\lambda_g}\right)}{1 - \left(\frac{\lambda\sin\phi}{\lambda_g}\right)} \right] \quad \dots (6.8)$$

เมื่อ  $\phi$  คือ มุมที่สล๊อตทำกับเส้นสัมผัสกับผนังด้านแคบ ตามรูป สล๊อต c. ในรูปที่ 6.3

สล๊อตที่เจาะแบบกึ่งกลางบนผนังด้านบนของท่อนำคลื่น ( Incline Series Slot )

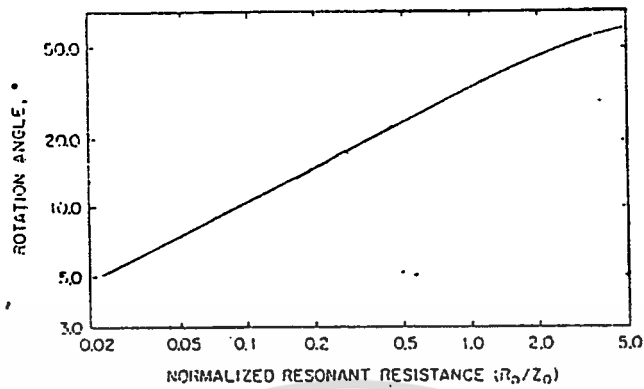
incline series slot ที่มีการเจาะสล๊อตทำมุมเอียงกับเส้นกึ่งกลางตามแนวยาวของท่อนำคลื่นสามารถใช้เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นสำหรับสายอากาศสล๊อตอาเรย์ซึ่งการแพร่กระจายคลื่นจะมี primary - polarization เช่นเดียวกับสล๊อตในแบบขนานตามยาว ( longitudinal slot ) แต่ผลของครอส โพลาริเซชัน (cross-polarization) จะมีค่ามากกว่า ดังนั้นในทางปฏิบัติมักไม่ใช้ Incline Series Slot เป็นตัวแพร่กระจายคลื่น อย่างไรก็ตาม สล๊อตในลักษณะดังกล่าวสามารถใช้คัปปลิงกำลังงานระหว่างท่อนำคลื่นหลักกับท่อนำคลื่นย่อย จึงนิยมนำมาใช้เป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสหานาสล๊อตอาเรย์ดังรูป



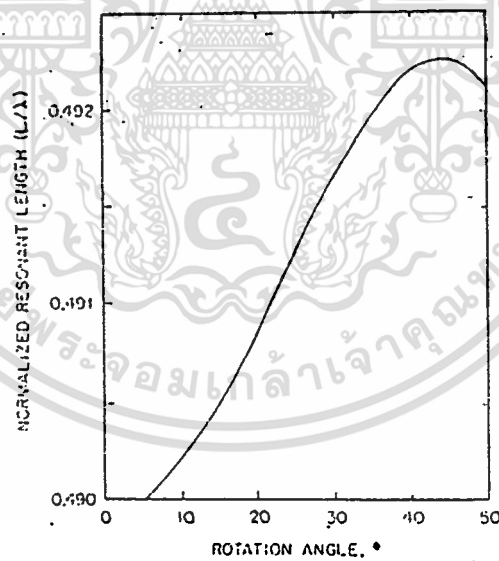
รูปที่ 6.9 ตัวอย่างการนำ Incline Series Slot มาใช้เป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสหานาสล๊อตอาเรย์ โดยป้อนสัญญาณในแบบ center feed

จากสมการแสดงค่าอมพลไรซ์รีโซแนนท์ รีซิสแตนซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับมุมเอียง ( $\phi$ ) ตามวิธีการของ Stevenson 's Solution จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง มุมเอียง (rotation angle) กับค่าอมพลไรซ์ รีโซแนนท์ รีซิสแตนซ์ ( $r=R/Z_0$ ) และ ระหว่าง ความยาวสล๊อตที่รีโซแนนท์ นอมมอลไรซ์กับความยาวคลื่นกับมุมเอียง ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียง (rotation angle) กับ ค่านอมลไวซ์รีโซแนนท์รีซิสแตนซ์

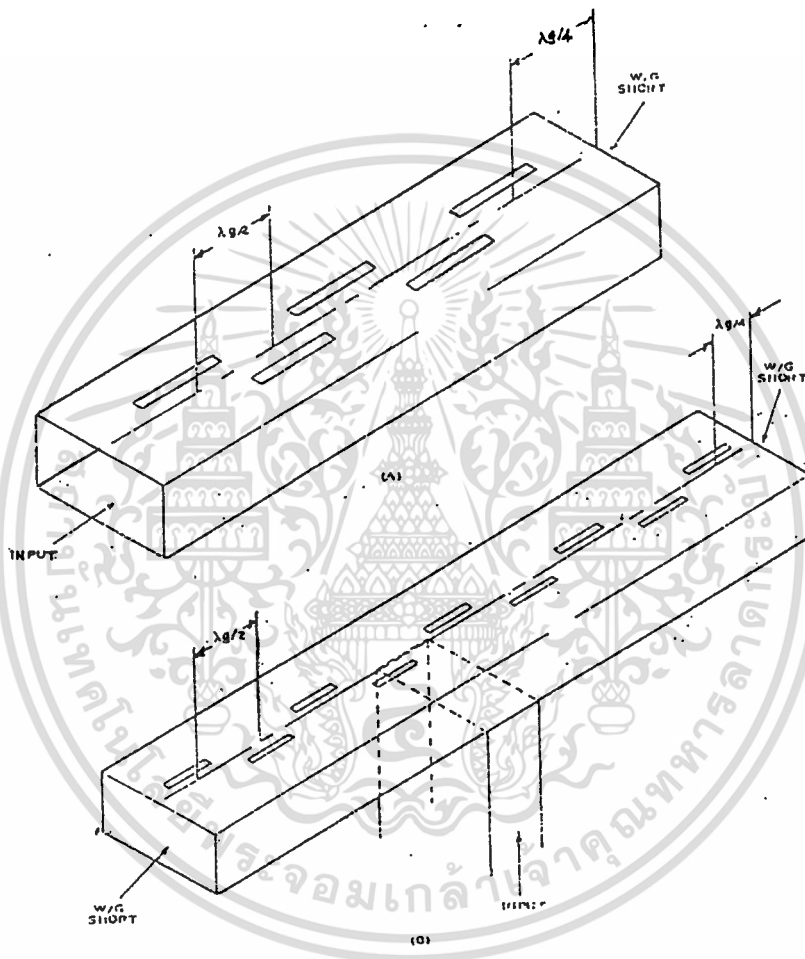


รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง ความยาวสล็อตที่รีโซแนนท์ นอมลไวซ์กับความยาวคลื่น กับมุมเอียง (rotation angle)

## วิธีการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์โดยใช้ท่อนำคลื่น

วิธีการป้อนสัญญาณที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติมี 2 วิธี คือ

1. การป้อนสัญญาณที่ด้านปลายสุด ( waveguide end feed )
2. การป้อนสัญญาณที่กึ่งกลางท่อนำคลื่น ( waveguide center feed )



รูปที่ 6.12 ภาพแสดงการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศสล็อตอาร์เรย์

- a.) ป้อนสัญญาณด้านปลายสุด
- b.) ป้อนสัญญาณที่กึ่งกลาง

วิธีการป้อนสัญญาณที่นำมาใช้กับสายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์ จะใช้การป้อนสัญญาณที่ด้าน ปลายสุด (waveguide end feed) โดยใช้ Incline Series Slot เป็นสล็อตในการคัปปลิงกำลังงานจากท่อนำคลื่นหลักไปยังท่อนำคลื่นย่อย วิธีการคำนวณและออกแบบจะได้พิจารณาในบทต่อไป

## บทที่ 7

### การคำนวณ และออกแบบระบบการป้อนสัญญาณโดยใช้ Incline Series Slot

จากเนื้อหาในบทที่ 6 เราทราบว่า การเจาะสล๊อตกระทำได้หลายลักษณะ เช่น การเจาะสล๊อตบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น ( broadwall slot ) ได้แก่ การเจาะแบบขนานตามยาว ( longitudinal shunt slot ) การเจาะแบบกึ่งกลาง ( center incline slot ) และการเจาะสล๊อตบนผนังด้านแคบของท่อนำคลื่น ( narrow wall slot ) ได้แก่ การเจาะสล๊อตตามยาว ( longitudinal slot ) การเจาะขอบผนัง ( edgewall slot )

สำหรับวิธีการป้อนสัญญาณทำได้ 2 วิธี ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 6 สำหรับการออกแบบระบบการป้อนสัญญาณโดยการเจาะสล๊อตแบบ Incline Series Slot ที่ผนังด้านบนของท่อนำคลื่นหลัก ( main waveguide ) เราเลือกวิธีการป้อนสัญญาณจากทางด้านปลายสุด ( waveguide end feed ) ซึ่งรายละเอียดการคำนวณความยาวสล๊อต ( 2l ) และมุมเอียง (  $\phi$  ) ของสล๊อตที่ทำกับเส้นกึ่งกลางตามแนวยาวของท่อ ใช้วิธี Stevenson 's Solution ดังต่อไปนี้

สมการแสดงค่าอมอลโรซซีรีโซแนนท์ริชิสแดนซ์ ( r ) สัมพันธ์กับมุมเอียง (  $\phi$  ) ที่ทำกับเส้นกึ่งกลางตามแนวยาวของท่อ เป็นดังนี้

$$r = 0.131(\lambda^3/ab\lambda_g) [I(\phi) \sin \phi + (\lambda_g/2)J(\phi) \cos(\phi)]^2 \quad \dots (7.1)$$

$$I(\phi) = \frac{\cos(\pi\xi/2)}{1-\xi^2} + \frac{\cos(\pi\zeta/2)}{1-\zeta^2} \quad \dots (7.2)$$

$$J(\phi) = \frac{\cos(\pi\xi/2)}{1-\xi^2} - \frac{\cos(\pi\zeta/2)}{1-\zeta^2} \quad \dots (7.3)$$

$$\xi = (\lambda/\lambda_g) \cos\phi - (\lambda/2a) \sin \phi \quad \dots (7.4)$$

$$\zeta = (\lambda/\lambda_g) \cos\phi + (\lambda/2a) \sin \phi \quad \dots (7.5)$$

เมื่อ  $a = 16.56 \text{ mm.}$   
 $b = 7.00 \text{ mm.}$   
 $\lambda = 25.001569 \text{ mm.}$   
 $\lambda_g = 38.12 \text{ mm.}$

เนื่องจากสายอากาศพลาสมาสล๊อตอาร์เรย์ ขนาด 6\*6 อิลิเมนต์ โดยใช้ท่อนำคลื่นย่อย 6 ท่อ เป็นแบบยูนิฟอร์ม ดังนั้น การคัปปลิงกำลังงานจากสล๊อตบนท่อนำคลื่นหลัก ซึ่งเป็นแบบ center incline slot จะต้องคัปปลิงกำลังงานออกไปเป็นปริมาณเท่า ๆ กัน เพราะฉะนั้นความยาวของสล๊อต ( 2l ) และมุมเอียง (  $\phi$  ) ที่ทำกับเส้นกึ่งกลางตามแนวยาวที่ผนังด้านบนของท่อนำคลื่น จำนวน 6 สล๊อต จะมีความยาวและมุมเอียงของสล๊อตเท่ากัน ซึ่งค่าความยาวสล๊อต และมุมเอียงที่เหมาะสมจะสอดคล้องกับค่าอมอลโรซซี รีโซแนนท์ ริชิสแดนซ์ ( r ) ที่ใช้ในการคำนวณกรณีเมซซึ่งระหว่างท่อนำคลื่นหลัก กับท่อนำคลื่นย่อยในบทที่ 6 สมการที่ 6.3 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลึกซึ้งหาวิธีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

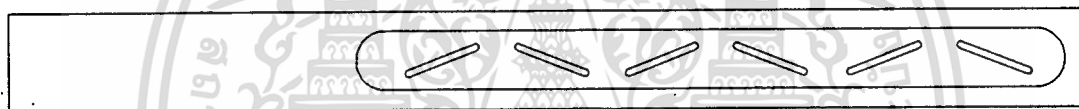
ค่านอมอลไรซ์ ริโซแนนท์ รีซิสแตนซ์ ( $r$ ) ที่ใช้กรณีแมชซิ่ง มีค่าเท่ากับ  $0.4 \Omega$  ใช้ สมการที่ 6.1 คำนวณค่าของมุมเอียง ได้เท่ากับ  $0.4347$  เรเดียน หรือ  $24.908$  องศา จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความยาวสล롯ที่ริโซแนนท์ นอมอลไรซ์ กับความยาวคลื่น ( $2/\lambda$ ) กับมุมเอียง ( $\phi$ ) จะได้  $2/\lambda \cong 0.55593$

$$\text{เพราะฉะนั้นความยาวสล롯} = 2l = 0.55593\lambda = 0.55593 * 25.001569 = 13.899 \text{ mm.}$$

$$\text{มุมเอียง} = \phi = 24.908 \text{ องศา}$$

พิจารณา round-end สลิต จะได้ความยาวสลิตที่นำไปใช้งานจริง โดยใช้ค่า correction factor ( $c$ ) สำหรับกรณี Incline Slot มีค่าเท่ากับ 1 และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกัด (end-mill) หรือ  $d$  มีค่าเท่ากับ 1 mm.

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้นความยาวสลิตเมื่อพิจารณา round-end} &= 2l + cd(1 - \pi/4) \\ &= 13.899 + 1.0 * 1.0 * (1 - \pi/4) \\ &= 14.1136 \text{ mm.} \end{aligned}$$



รูปที่ 7.1 แสดงลักษณะสลิตแบบ Center Incline Series Slot จำนวน 6 สลิต บนผนังด้านบนของท่อนำคลื่นหลัก ( main waveguide )

## บทที่ 8

### วิธีสร้าง วิธีทดลอง และผลการทดลอง

#### วิธีการสร้างสายอากาศแบบพลาแนรอสล็อตอาร์เรย์ขนาด 6\*6

การสร้างสายอากาศจะใช้ท่อทองเหลืองที่มีขนาดหน้าตัดของท่อมีขนาดดังนี้

$$a' = 19.06 \text{ mm.} \quad a = 16.56 \text{ mm.}$$

$$b' = 9.52 \text{ mm.} \quad b = 7.0 \text{ mm.}$$

โดยที่  $a', b'$  เป็นความกว้าง และความสูงของท่อนำคลื่นที่ผิวด้านนอก และ  $a, b$  เป็นความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่นที่ผิวด้านใน ตามลำดับ

ในส่วนของการสร้างเราจะใช้ท่อทองเหลืองเพื่อสร้างสายอากาศ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของท่อนำคลื่นหลัก และท่อนำคลื่นย่อย ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 7.1 และ 5.2 ตามลำดับ โดยที่สล๊อตที่จะเจาะบนผนังด้านบนของท่อนำคลื่นหลัก มุมเอียง (rotation angle) และความยาวสล๊อตนั้นได้มีการคำนวณไว้ในบทที่ 7 โดยไม่ได้คิดมิวซลคัปปลิง ส่วนท่อนำคลื่นย่อย 6 ท่อนั้น ระยะออฟเซต และความยาวสล๊อตจะมีผลการคำนวณจากโปรแกรมโดยคิดมิวซลคัปปลิง ซึ่งมีการแสดงผลไว้อย่างละเอียดในบทที่ 5 ดังนั้น จากระยะออฟเซต และความยาวสล๊อต ดังกล่าวเราสามารถทำการสร้างชิ้นงานได้

เพื่อเพิ่มความละเอียดและความแม่นยำในการสร้าง การเจาะสล๊อตบนท่อนำคลื่นนั้นเราจะใช้เครื่อง C.N.C. ส่วนการปาดผิวชิ้นงาน และการกัดจากนั้นจะใช้เครื่อง milling ซึ่งได้รับความร่วมมืออย่างดีจาก สำนักวิจัย และ ปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ และภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ทำให้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีความถูกต้อง และ ละเอียดสูง (เทคนิคตำแหน่งที่ 3)

ในส่วนการเจาะสล๊อต เราจะทำการโปรแกรมเครื่อง C.N.C. โดยการเขียน G code เพื่อลำดับการทำงานได้อย่างถูกต้อง และเพื่อเพิ่มความเร็วในการทำงานด้วย สำหรับตัววัสดุที่ใช้เจาะนั้นเราสามารถใช้ตัวสว่านเจาะ (สำหรับเจาะรูเริ่มต้นของสล๊อต ) และตัว end mill ( ใช้ในการทำให้เกิดเป็นร่องสล๊อต ) ที่มีขนาดเล็กซึ่งเหมาะสมที่สุด คือมีขนาดเพียง 1 mm.

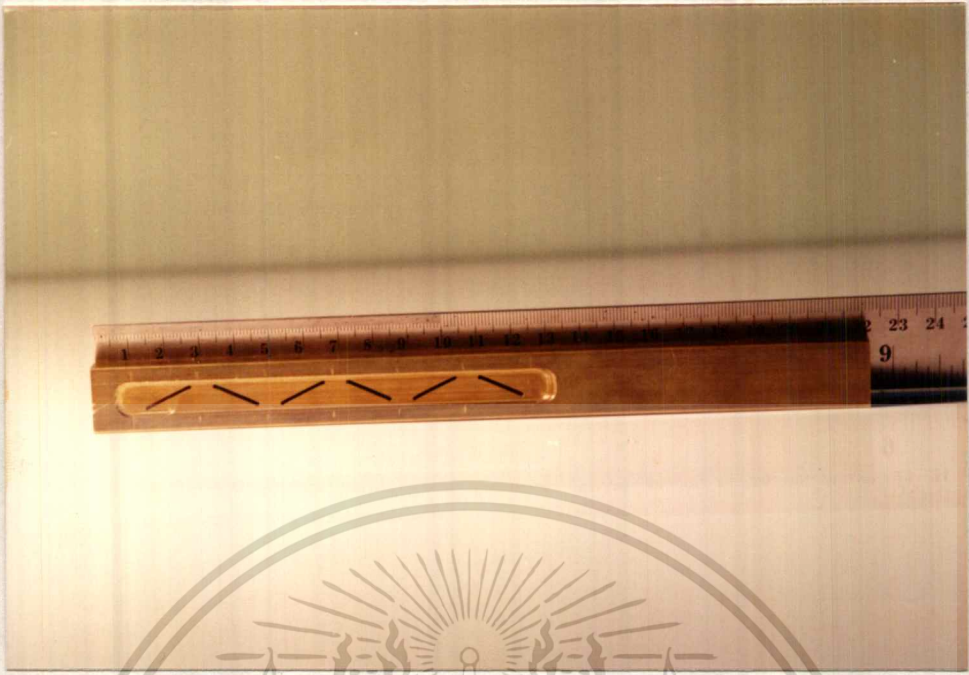
ส่วนตัวท่อนำคลื่นย่อย เราจะทำการปาดผิวด้านบนที่จะทำการเจาะสล๊อตให้บางลงให้มากที่สุดทั้งนี้เพื่อลดผลอันไม่พึงประสงค์ หรือเพื่อให้เป็นไปตามทฤษฎีมากที่สุด โดยใช้เครื่อง milling

หลังจากที่ทำการเจาะสล๊อตบนท่อนำคลื่นหลัก และท่อนำคลื่นย่อยแล้ว จะได้ชิ้นงานทั้งหมด 7 ชิ้น เราจะนำมาทำการเชื่อมต่อเป็นสายอากาศพลาแนรอสล็อตอาร์เรย์ ขนาด 6\*6 ตามที่ออกแบบไว้แล้วข้างต้น โดยใช้วิธีการเชื่อมแบบแก๊สโดยใช้ลวดเงินเป็นตัวเชื่อมชิ้นงานทั้งหมดเข้าด้วยกัน

หลังจากที่ได้ชิ้นงานออกมาเป็นพลาแนรอสล็อตอาร์เรย์แล้ว เราจะทำการปิดท่อนำคลื่นหลัก และท่อนำคลื่นย่อยด้านหนึ่งไว้ หรือการทำ short plate นั้นเอง และวัสดุที่ใช้ในการ short plate คือแผ่นทองเหลือง โดยใช้ตะกั่วเป็นตัวเชื่อมให้ผิวงานติดกัน

ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของท่อนำคลื่นหลัก เราจะทำการติดแฟลนจ์ ( flange ) เพื่อที่จะนำไปต่อกับอุปกรณ์สำหรับทดสอบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงท่อนำคลื่นหลัก (Main waveguide)



ภาพแสดงท่อนำคลื่นย่อย (branch line waveguide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ที่ทำการเจาะสลีตบนผนังด้านกว้าง (broad wall) จำนวน 6 ท่อ และท่อนำคลื่นหลัก  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่มิมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดสอบสายอากาศ

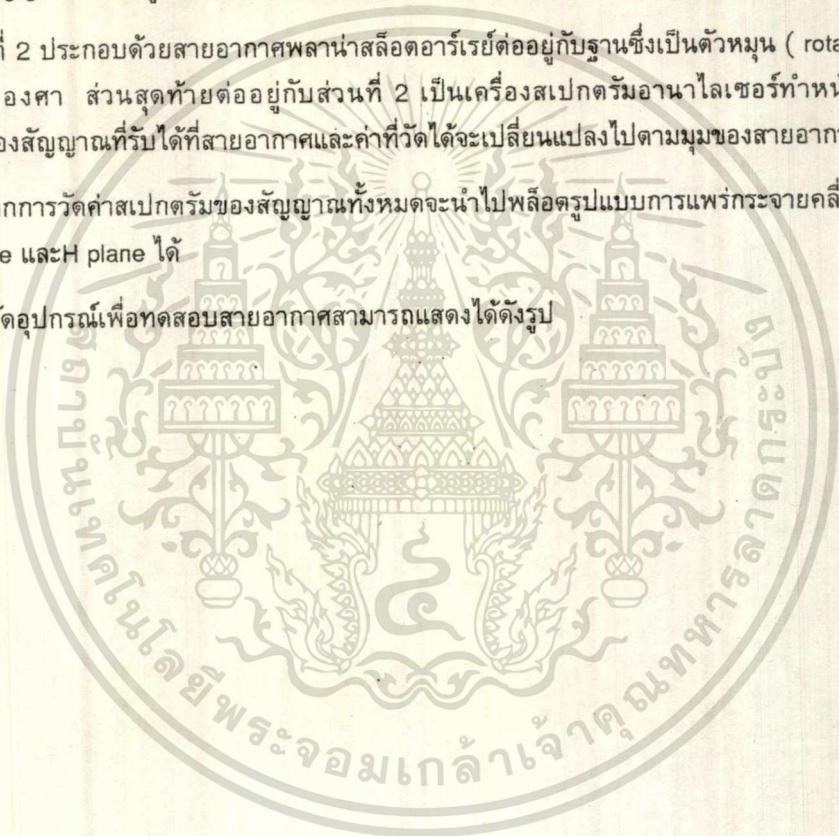
นำสายอากาศที่สร้างขึ้นวัดค่า log magnitude , อิมพีแดนซ์ ( impedance ) , Standing Wave Ratio (SWR ) ของสายอากาศโดยใช้เครื่อง เน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ ( network analyzer ) ซึ่งผลจากการวัดค่า log magnitude , Impedance และ SWR จะทำให้ทราบความถี่ที่สายอากาศสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดว่าห่างจากความถี่ที่เราทำการออกแบบไว้มากน้อยเพียงไร

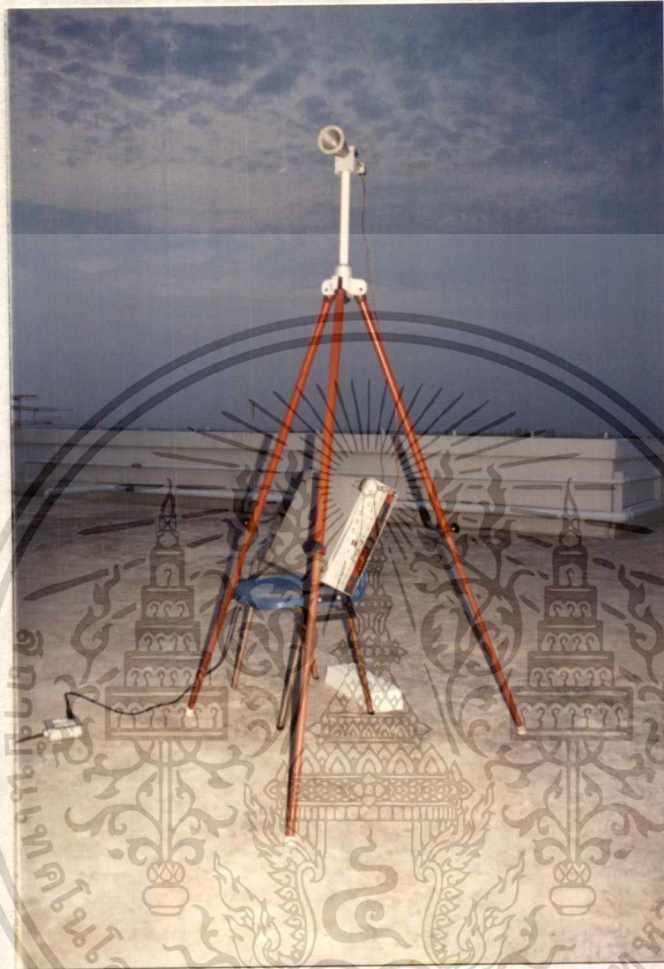
หลังจากนั้นนำสายอากาศไปวัดรูปแบบการกระจายคลื่น ( radiation pattern ) ตามระนาบ E-plane และ H-plane อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดประกอบด้วยส่วนการทำงานที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณในช่วงความถี่ที่ออกแบบไว้คือ 11.990947 GHz และ ความถี่ 12.12 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่สายอากาศเรโซแนนซ์โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณจะต่ออยู่กับสายอากาศชนิดปากแตร ( horn antenna ) ซึ่งทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นออกไป

ส่วนที่ 2 ประกอบด้วยสายอากาศพลาแนลสล็อตอาร์เรย์ต่ออยู่กับฐานซึ่งเป็นตัวหมุน ( rotator ) สายอากาศไปรอบ ๆ 360 องศา ส่วนสุดท้ายต่ออยู่กับส่วนที่ 2 เป็นเครื่องสเปกตรัมแอนาไลเซอร์ทำหน้าที่แสดงสเปกตรัม ( spectrum ) ของสัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศและค่าที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของสายอากาศที่หมุนไป

ผลจากการวัดค่าสเปกตรัมของสัญญาณทั้งหมดจะนำไปพล็อตรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศระนาบ E plane และ H plane ได้

การจัดอุปกรณ์เพื่อทดสอบสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูป





ภาพแสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวัดแพทเทิร์นสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



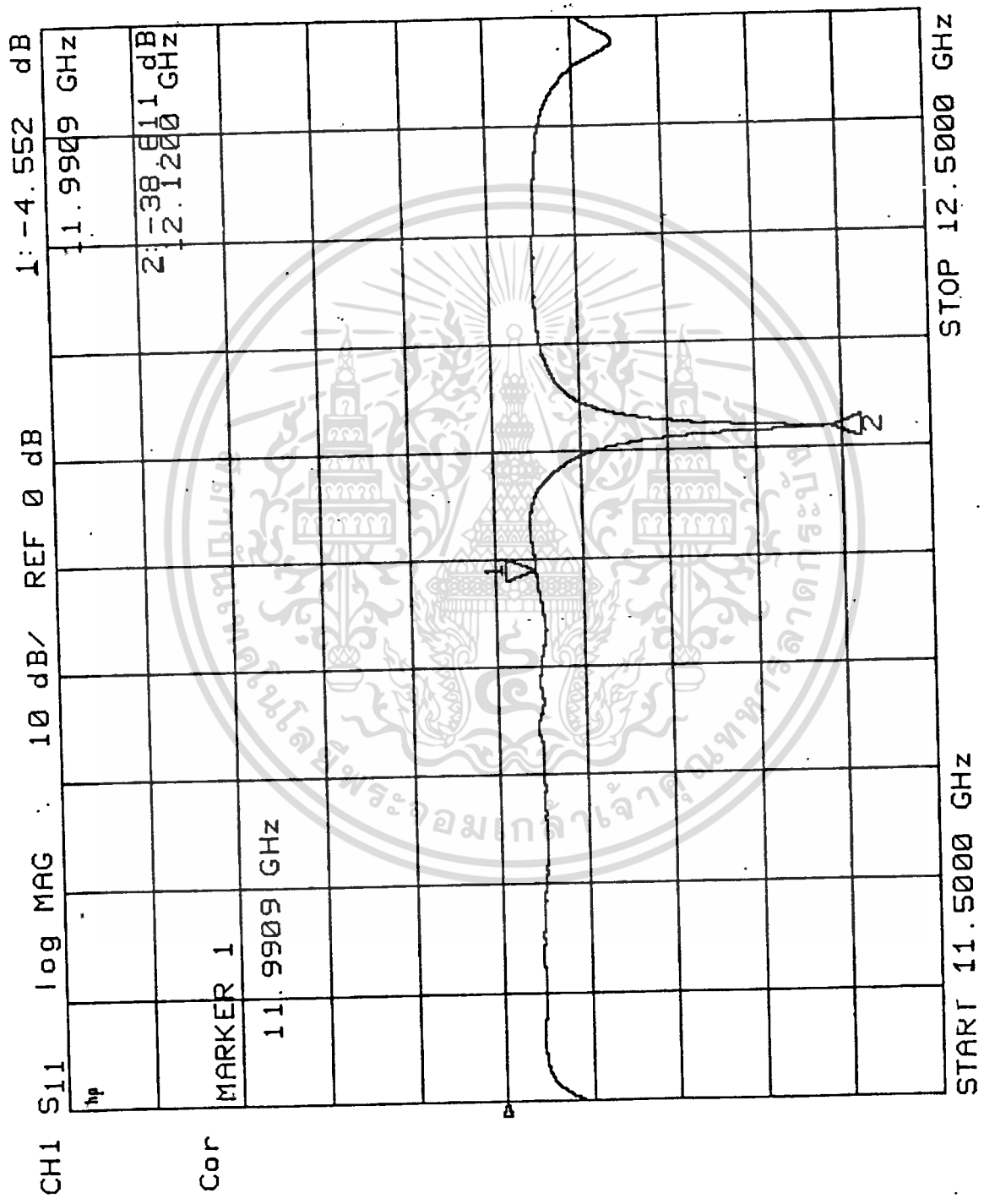
ภาพแสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวัดแพทเทิร์นสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง

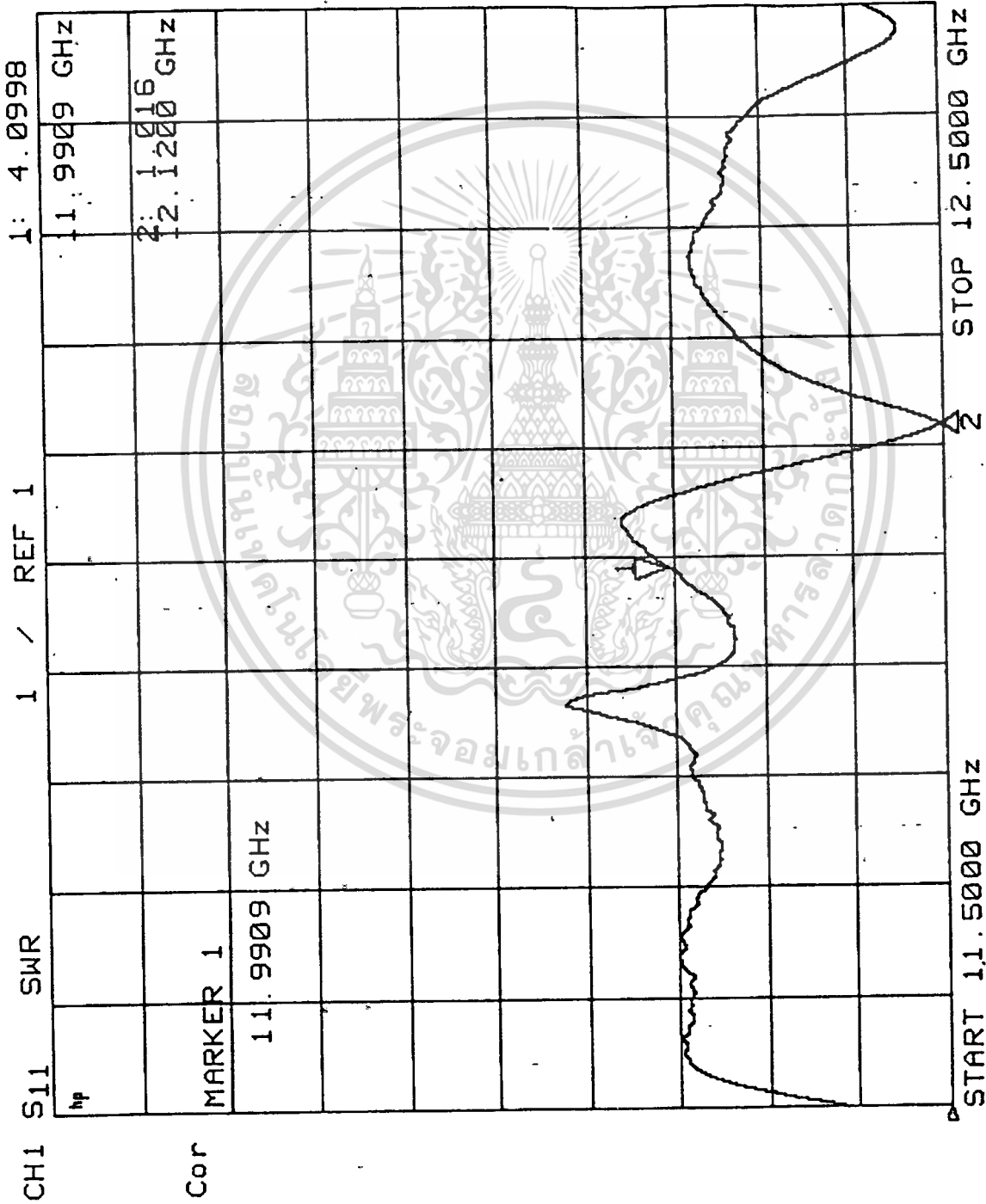
ผลของการวัดค่า log magnitude , Impedance , SWR และ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ E plane และ H plane แสดงดังต่อไปนี้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพแสดงผลการวัดค่า Log Magnitude ของสายอากาศ



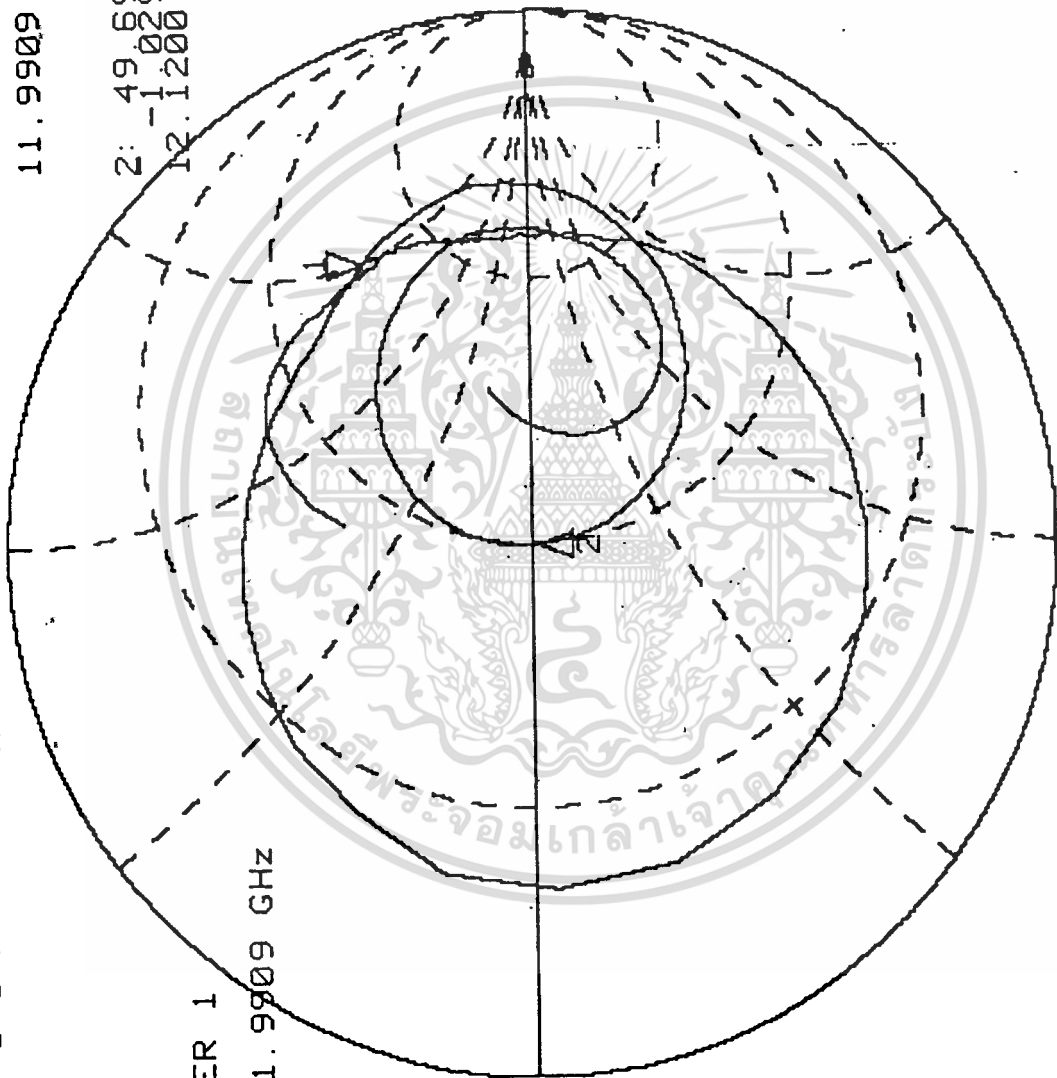
ภาพแสดงผลการวัดค่า SWR ของสายอากาศ

CH1 S11 1 U FS 1: 94.617  $\Omega$  98.895  $\Omega$  1.3126 nH  
hp 11.9909 GHz

2: 49.699  $\Omega$   
-1.0293  $\Omega$   
12.1200 GHz

Cor MARKER 1

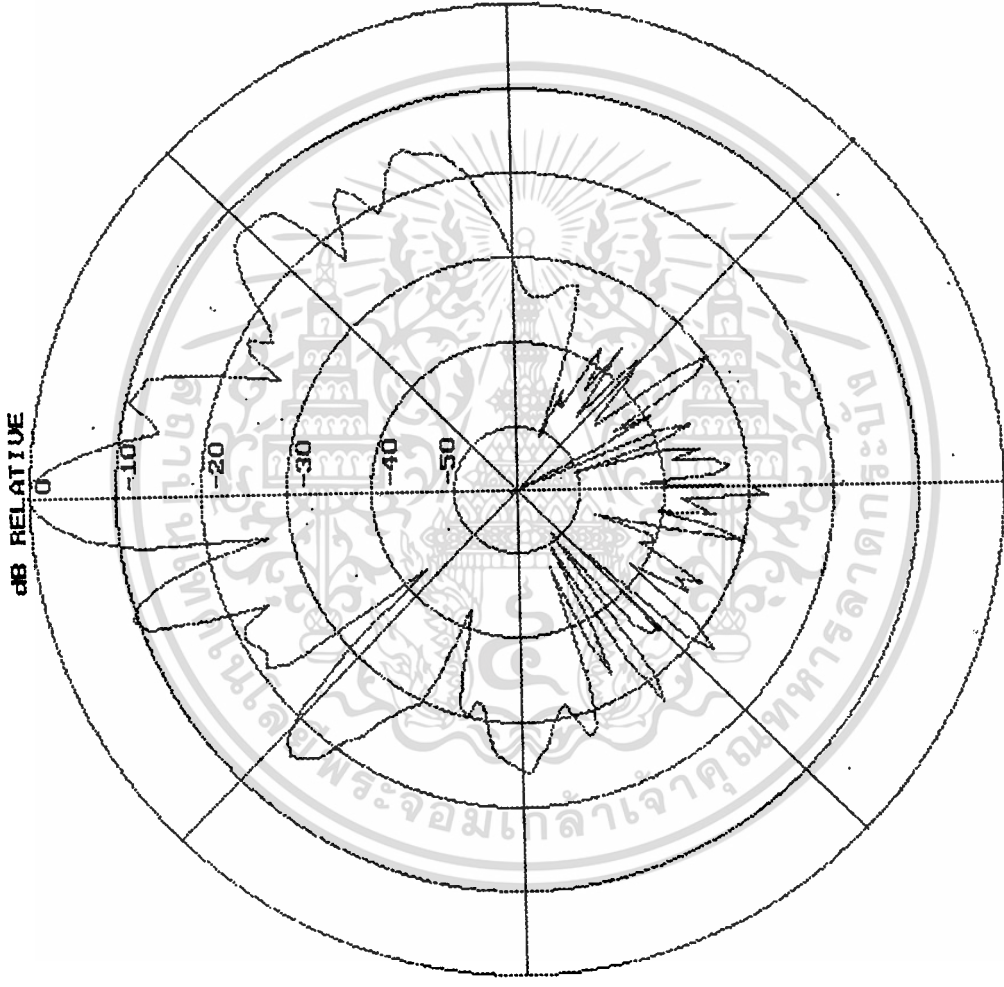
11.9909 GHz



START 11.5000 GHz

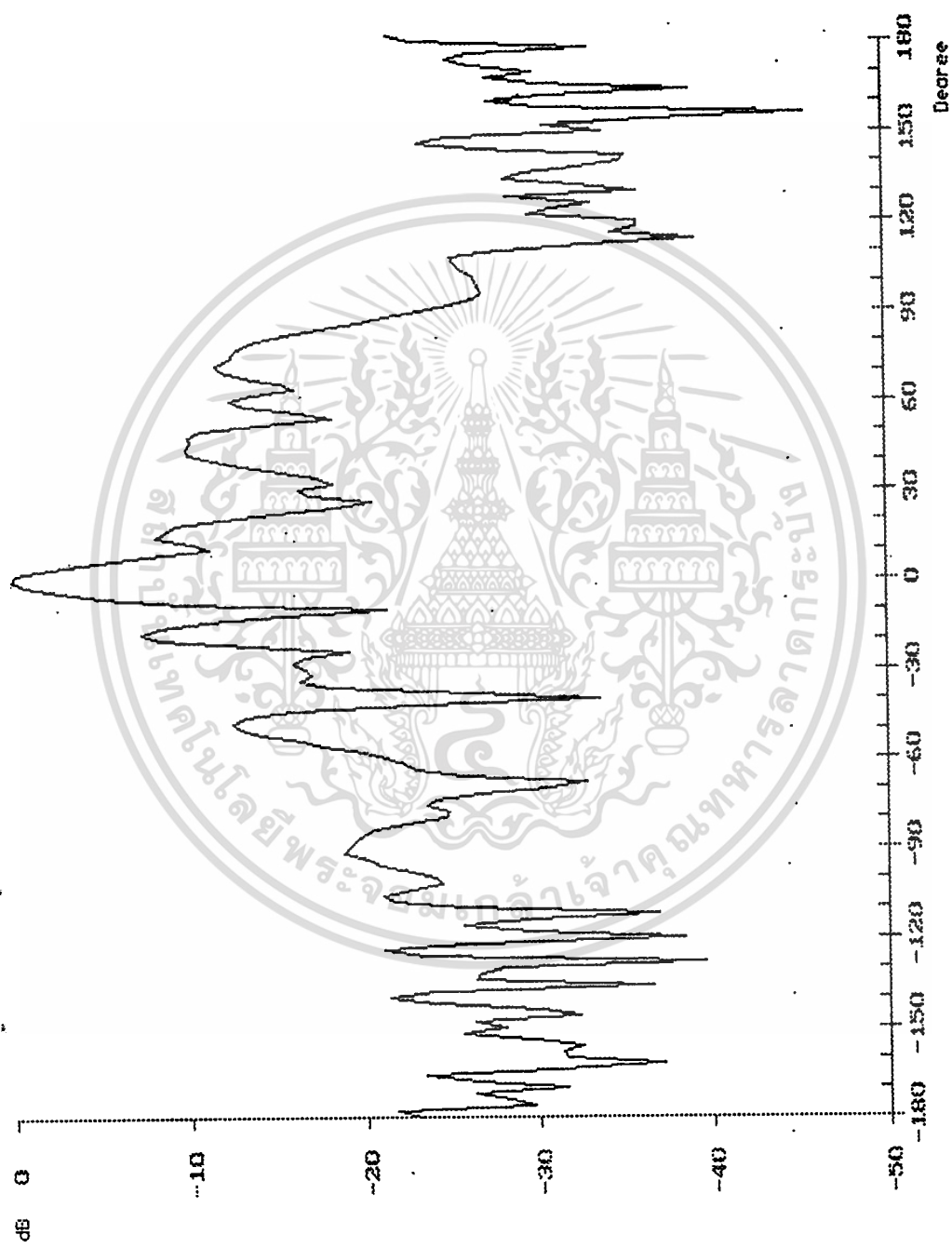
STOP 12.5000 GHz

ภาพแสดงผลการวัดค่า Impedance ของสายอากาศ



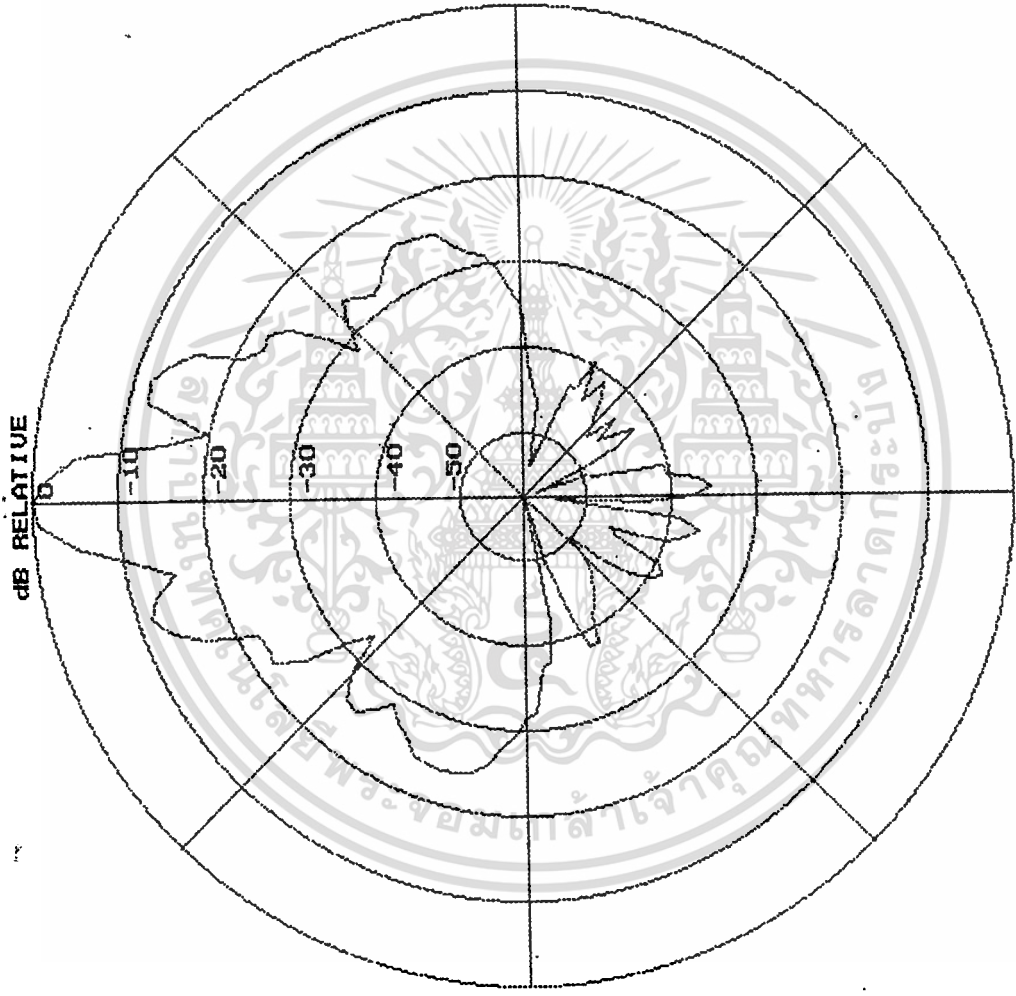
ภาพแสดงแพทเทิร์นสายอากาศในระนาบ E-plane ที่ความถี่ออกแบมคือ 11.990947 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



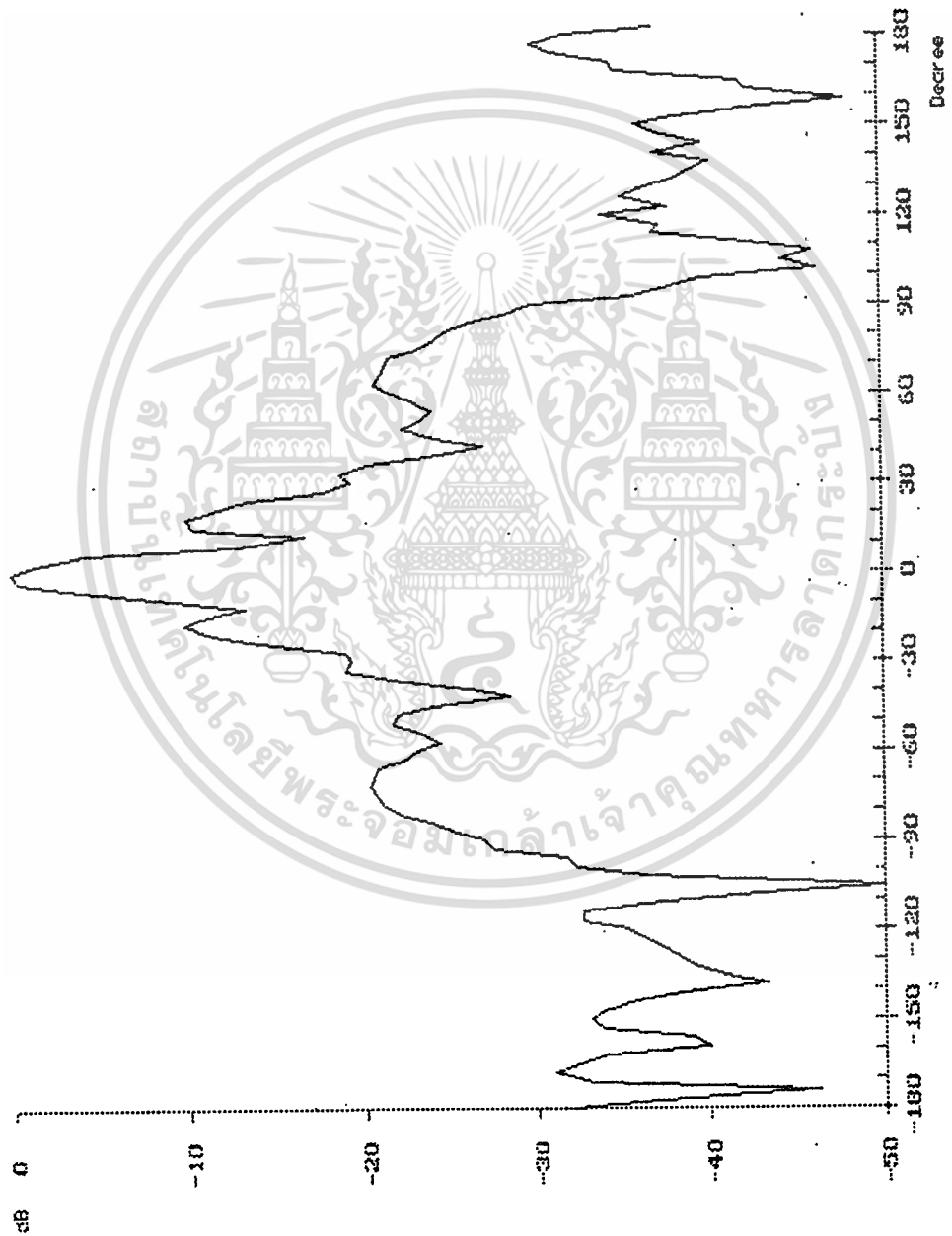
ภาพแสดงแพทเทิร์นสายอากาศในระนาบ E-plane ที่ความถี่ที่ออกแบมเบคือ 11.990947 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



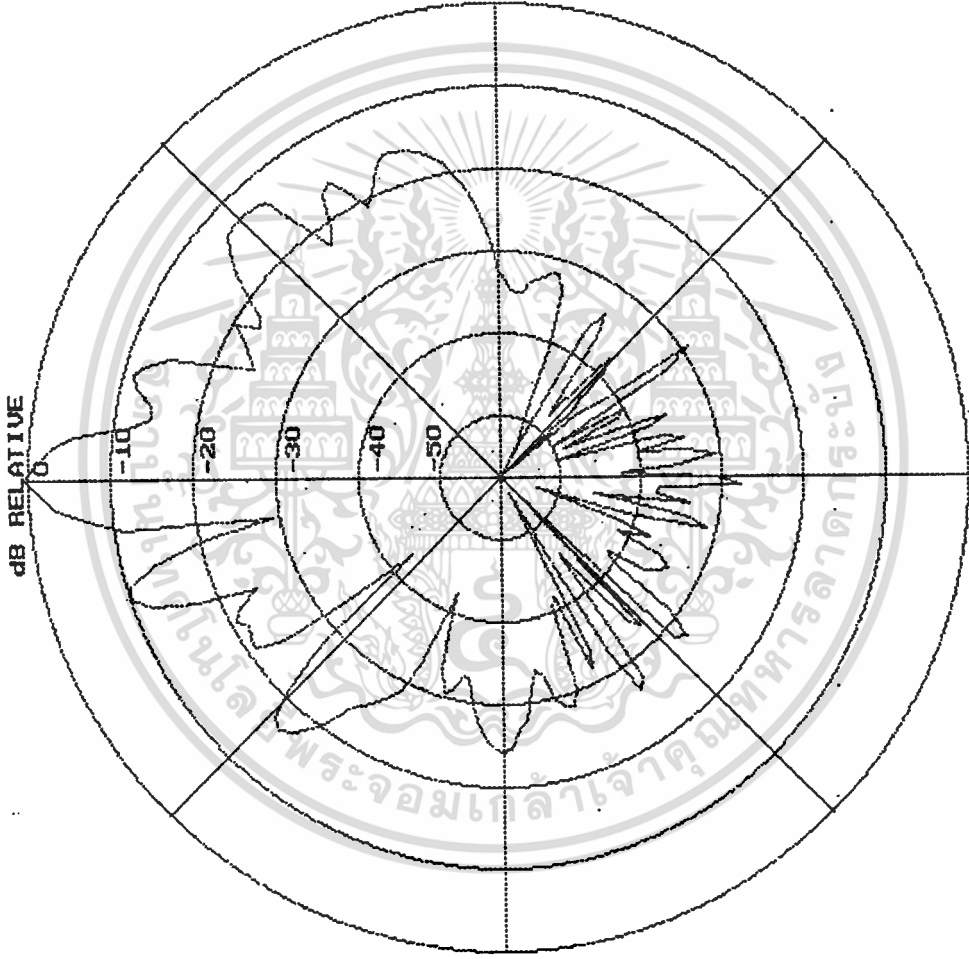
ภาพแสดงแพทเทิร์นสายอากาศในระนาบ H-plane ที่ความถี่ออกแบบคือ 1.990947 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



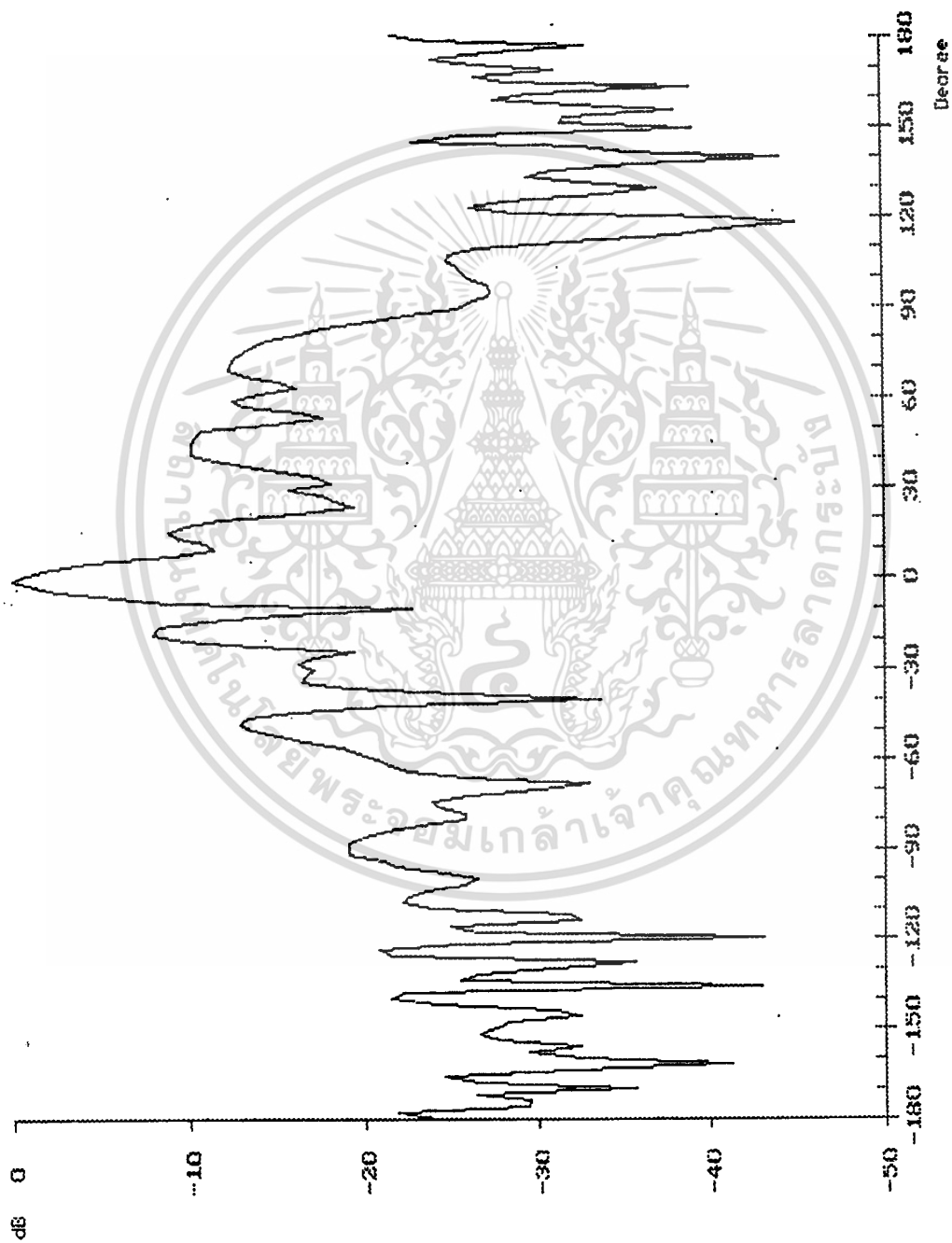
ภาพแสดงแพทเทิร์นสายอากาศในระนาบ H-plane ที่ความถี่ 11.990947 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

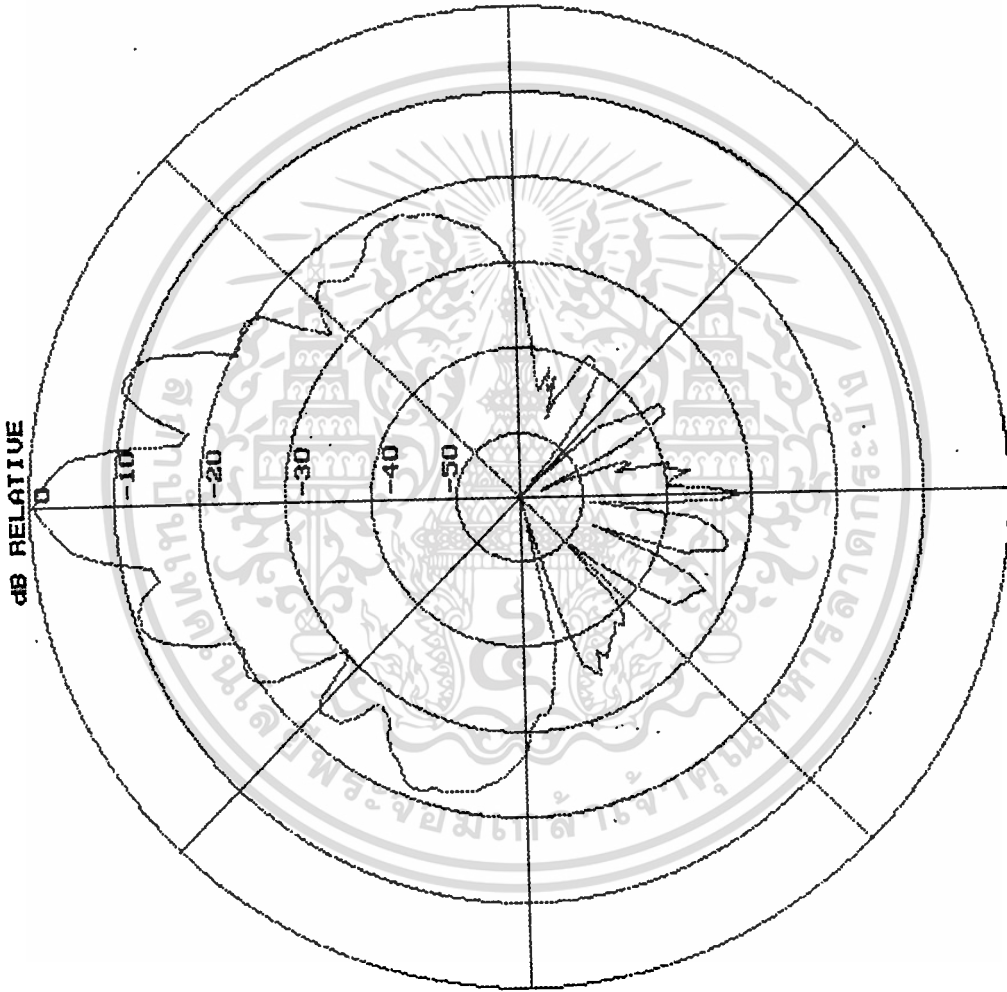


ภาพแสดงแพทเทิร์นสายอากาศในระนาบ E-plane ที่ความถี่เรโซแนนซ์คือ 12.12 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

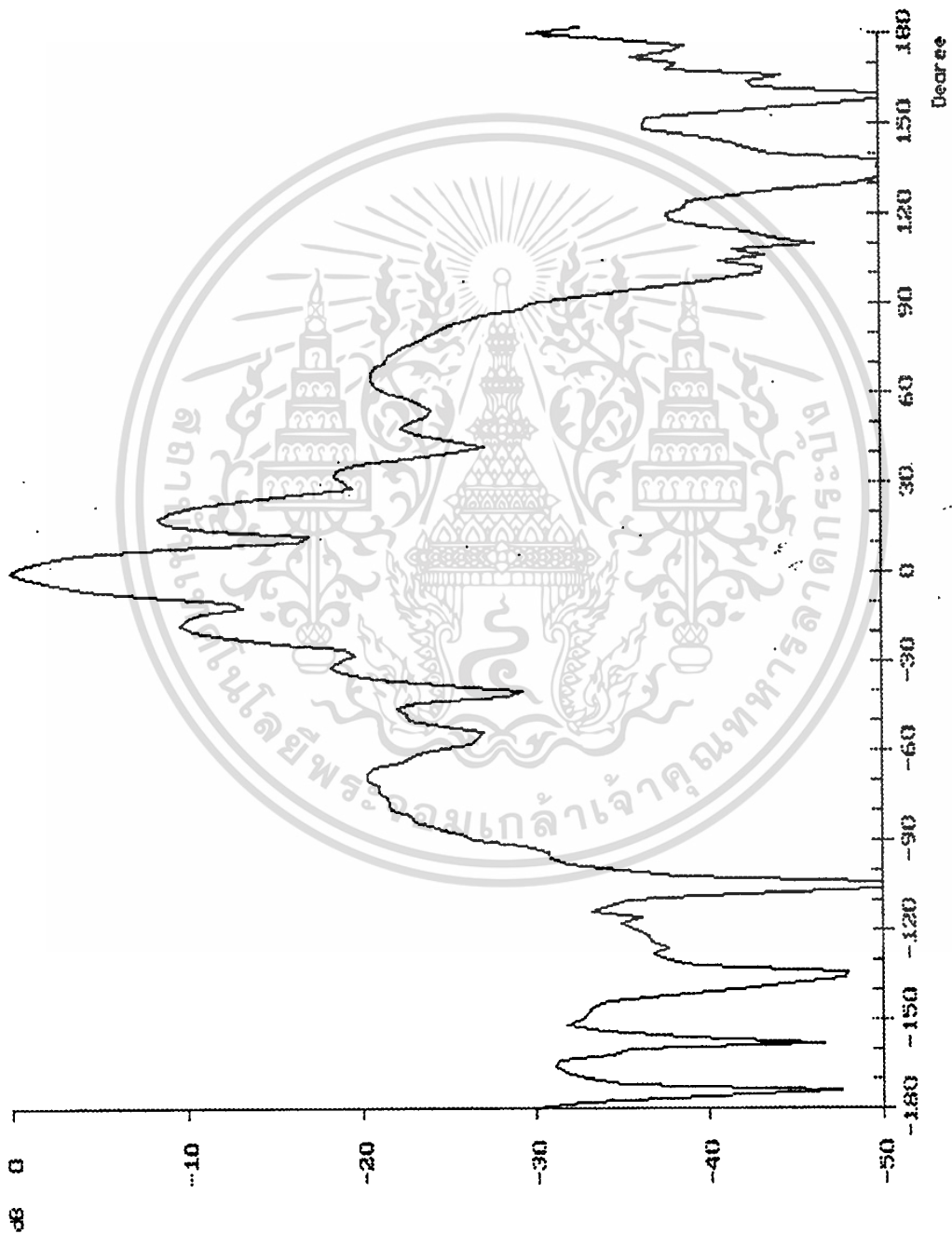


ภาพแสดงแพทเทิร์นสายอากาศในระนาบ E-plane ที่ความถี่โพแนวน์คือ 12.12 GHz



ภาพแสดงแพทเทิร์นสายอากาศในระนาบ H-plane ที่ความถี่เรโซแนนซ์คือ 12.12 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงแพทเทิร์นสายอากาศในระนาบ H-plane ที่ความถี่เรโซแนนซ์คือ 12.12 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าเกณฑ์เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไอโซโทรปิก ซึ่งเป็นสายอากาศเปรียบเทียบในทางทฤษฎี

และค่าเกณฑ์ของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศปากแตรแบบคอร์รูเกต (corrugated conical horn) ซึ่งมีค่าเกณฑ์ความถี่ 12.12 GHz เท่ากับ 16.7 dB จะเป็นดังนี้

$$G_o = 25.85 + 16.7 = 42.55 \text{ dB}$$

ค่าเกณฑ์ (gain) ที่ได้จากการวัด

เราได้ทำการวัดรีเลทีฟเกน (relative gain) ของสายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์เทียบกับสายอากาศปากแตรแบบคอร์รูเกต (corrugated conical horn) ซึ่งมีค่าเกณฑ์ ดังนี้

ที่ความถี่ 11.990947 GHz เกณฑ์เท่ากับ 16.6 dB

ที่ความถี่ 12.12 GHz เกณฑ์เท่ากับ 16.7 dB

จากนั้นทำการวัดค่าระดับของสัญญาณที่สายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์รับได้ดังนี้

ที่ความถี่ 11.990947 GHz ระดับสัญญาณที่รับได้ -65.7 dBm

ที่ความถี่ 12.12 GHz ระดับสัญญาณที่รับได้ -64.8 dBm

และทำการวัดค่าระดับของสัญญาณที่สายอากาศปากแตรแบบคอร์รูเกตรับได้ ดังนี้

ที่ความถี่ 11.990947 GHz ระดับสัญญาณที่รับได้ -79.7 dBm

ที่ความถี่ 12.12 GHz ระดับสัญญาณที่รับได้ -79.2 dBm

จะได้ค่าความแตกต่างของระดับสัญญาณดังนี้

ที่ความถี่ 11.990947 GHz ค่าความแตกต่างของระดับสัญญาณ 14.0 dBm

ที่ความถี่ 12.12 GHz ค่าความแตกต่างของระดับสัญญาณ 14.4 dBm

เพราะฉะนั้น ค่ารีเลทีฟเกนของสายอากาศพลาสมาสล็อตอาร์เรย์ เมื่อเทียบกับสายอากาศปากแตรแบบคอร์รูเกต จะเป็นดังนี้

ที่ความถี่ 11.990947 GHz ค่ารีเลทีฟเกนเท่ากับ 30.6 dB

ที่ความถี่ 12.12 GHz ค่ารีเลทีฟเกนเท่ากับ 31.1 dB

### เกน (gain) ของสายอากาศ

ค่าเกน (gain) ที่ได้จากการคำนวณ

เราทำการคำนวณเกนของสายอากาศพลาแนลสล็อตอาร์เรย์โดยประมาณ จากค่าฮาร์ฟพาวเวอร์บีมวิทท์ (half-power beamwidth) ของแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane และ H-plane ดังนี้

$$D_o \cong \frac{32,400}{\theta_{d1}\theta_{d2}} \quad \dots(8.1)$$

และ  $G_o = e_t D_o \quad \dots(8.2)$

เมื่อ  $D_o$  คือค่าไดเรกทิวิตี (Directivity) ของสายอากาศ

$\theta_{d1}$  คือค่าฮาร์ฟพาวเวอร์บีมวิทท์ ในระนาบ E-plane (องศา)

$\theta_{d2}$  คือค่าฮาร์ฟพาวเวอร์บีมวิทท์ ในระนาบ H-plane (องศา)

$e_t$  คือประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ

$G_o$  คือเกนของสายอากาศ

จากแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่ความถี่ไอแซนน์ท์ (12.12 GHz) จะได้ค่าฮาร์ฟพาวเวอร์บีมวิทท์ในระนาบ E-plane และ H-plane ดังนี้

$$\theta_{d1} \cong 8 \text{ องศา}$$

$$\theta_{d2} \cong 10 \text{ องศา}$$

คำนวณค่าไดเรกทิวิตีได้ดังนี้

$$D_o \cong \frac{32,400}{8 \times 10} = 405$$

จากนั้นคำนวณค่าเกนของสายอากาศ เมื่อประสิทธิภาพรวมของสายอากาศมีค่าประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ เพราะผลรวมของสัญญาณสะท้อนกลับเนื่องจากอิมพีแดนซ์มิสมแมช (mismatch) มีน้อยมาก

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่วัดได้ประมาณ  $49.699 \Omega$  ใกล้เคียงกับคาแรกเตอร์ริสติกอิมพีแดนซ์ (characteristic impedance) ของสายนำสัญญาณ ซึ่งมีค่า  $50 \Omega$  และค่า SWR ที่วัดได้มีค่าประมาณ 1.016

ดังนั้น ค่าเกนของสายอากาศในหน่วย dB จะเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} G_o &= 10 \log(0.95 \times 405) \\ &= 25.85 \quad \text{dB} \end{aligned}$$

### สรุป

1. ค่าเกณฑ์ได้จากการคำนวณโดยประมาณจากฮาร์ฟพาวเวอร์บีมิวิตซ์ของแพทเทิร์นการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane และ H-plane เปรียบเทียบกับทางทฤษฎีกับสายอากาศปากแตรแบบคอร์รูเกทที่มีค่าประมาณ 42.55 dB

2. ค่าเกณฑ์ได้จากการวัดโดยเปรียบเทียบกับสายอากาศปากแตรแบบคอร์รูเกท ซึ่งเป็นสายอากาศตัวเดียวกับกรณีที่พิจารณาในทางทฤษฎี และค่าเกณฑ์ได้มีค่าประมาณ 31.1 dB



## แนวทางการพัฒนา

ในส่วนของโปรแกรมซึ่งเกี่ยวกับการคำนวณความยาวสล็อตและระยะออฟเซตที่จะทำการเจาะบนท่อนำคลื่นย่อยซึ่งมีการคิดผลจากมิววลคัปปลิง การคำนวณดังกล่าวใช้วิธีนิวเมอริคอลแบบสตีพเพสท์เดสเซนท์ (Steepest Descent Method) ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างนานมาก ดังนั้นต่อไปหากประสงค์จะสร้างสายอากาศชนิดเดียวกันนี้ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพัฒนาอัลกอริทึมรวมทั้งวิธีนิวเมอริคอลที่มีความเร็วในการทำงานมากกว่านี้อย่างมาก หรืออาจจำเป็นจะต้องนำไปโปรแกรมไปรันในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าพีซีคอมพิวเตอร์ เช่น เครื่องเวิร์คสเตชัน หรือซูเปอร์คอมพิวเตอร์

ในส่วนของ การสร้างชิ้นงาน ควรจะมีการศึกษาการทำงานของเครื่อง CNC เป็นอย่างดี รวมทั้งโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดการต่าง ๆ ของเครื่อง เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการเจาะสล็อต และอัตราการกัดที่ใช้ในการเจาะสล็อตนั้น มีค่าน้อยมากทำให้ใช้เวลาในการเจาะมาก ทั้งนี้เพราะว่ามีปัญหาเกี่ยวกับความแข็งแรงของหัวเอ็น-มิล (end-mill) ซึ่งเป็นตัวจำกัดอัตราการกัดไม่ให้มากเกินไป ถ้าอัตราการกัดมีมากเกินไป จะทำให้หัวเอ็น-มิล หักได้ง่าย ดังนั้นควรเลือกชนิดของหัวเอ็น-มิลที่มีลักษณะเหมาะสมกับวัสดุที่เป็นท่อนำคลื่น และในส่วนของ การเชื่อมต่อท่อนำคลื่นนั้นได้ใช้วิธีการเชื่อมแบบแก๊ส โดยใช้ลวดเงิน ควรจะทำการเชื่อมต่อท่อนำคลื่นที่ละอัน ไม่ควรที่จะเชื่อมต่อท่อทั้งหมดพร้อมกัน เพราะผิวผนังของท่อจะเกิดความร้อนสูงทำให้หดตัว มีผลทำให้ระนาบของปลานานั้นไม่ได้รับระดับเสมอกัน ซึ่งชิ้นงานจะไม่เป็นไปตามลักษณะที่ออกแบบไว้ ก่อให้เกิดข้อผิดพลาดเมื่อนำไปทำการทดสอบสายอากาศ ทำให้แพทเทิร์นของการแพร่กระจายคลื่น (radiation pattern) ที่ได้ผิดเพี้ยนไปจากที่ออกแบบไว้

### บรรณานุกรม

- [1] R.S. Elliott \* Antenna Theory and Design \* Prentice Hall Inc 1985
- [2] R.S. Elliott \* Antenna Handbook Theory Applications and Design \* Prentice Hall Inc. 1981
- [3] C.A. Balanis \* Antenna Theory Analysis and Design \* Harper and Row Inc. 1982
- [4] V.M. Pandharipande and B.N. Das \*Equivalent Circuit of & Narrow-Wall Waveguide Slot Coupler \* IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , pp. 800 , Sep. 1978
- [5] B.N. Das , P.S. Deshmukh and V.M. Pandharipande \* Excitation of Planar Slot Array from Rectangular Waveguide \* Proc. IEEE , vol. 131 , pp. 99-101. , 1984
- [6] V.M. Pandharipande and B.N.Das \* Slot-Coupled Tee Junction in Rectangular Guide E Plane \* IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , pp. 65-69 , an. 1979
- [7] โมไนย ไกรฤกษ์ และวิวัฒน์ กิรานนท์ \* วิทยุสายอากาศ \* กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2536

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากความร่วมมือของหลายฝ่ายด้วยกัน

ขอขอบคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาโทรคมนาคมและวิศวกรรมศาสตร์ รวมทั้งเพื่อนนักศึกษาทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและขอขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับ

- อาจารย์ สมผล โกศลย์วิตร ที่ให้คำแนะนำ และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการประกอบชิ้นงาน
- นาย จิตรกร พิรุณ นักศึกษาชั้นปีที่ 4 ภาควิศวกรรมเครื่องกล ในการให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ C.N.C. สำหรับการเจาะสลีต
- พีคมศักดิ์ เมฆสุนทร รุ่นพี่ปริญญาโท รวมทั้งน้อง ๆ ปี 3 ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำชิ้นงาน
- ศูนย์วิจัยคอมพิวเตอร์และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่อง C.N.C. , เครื่อง MILLING และอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการทำชิ้นงาน
- สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ (CISC) ที่ให้การอนุเคราะห์ห้อง EMC และอุปกรณ์ ในการทดสอบสายอากาศ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งเป็นผู้ที่มีความสำคัญที่สุดที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อัลกอริทึมของวิธี Steepest Descent Method

1. กำหนดสมการในการหาค่า Local minimize ให้อยู่ในรูป  $f_1(x_1)=0, f_2(x_2)=0, \dots, f_n(x_n)=0$

2. กำหนด Error ฟังก์ชันให้มีค่าเท่ากับผลบวกของกำลังสองของทุกสมการในข้อหนึ่ง

$$Erf(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = (f_1)^2 + (f_2)^2 + \dots + (f_n)^2$$

3. กำหนดค่า initial ของ  $x_1, x_2, \dots, x_n$  และค่า tolerance (ค่าความผิดพลาดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้)

4. แทนค่า  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ลงใน  $Erf(x_1, x_2, \dots, x_n)$  แล้วนำค่านี้เก็บในตัวแปร Erf1

หาค่า  $Z = \nabla Erf(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ซึ่งจะได้ออกมา  $n$  ค่าแล้วนำค่าทั้งหมดมายกกำลังสอง, บวกกันแล้วหารากที่สอง จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเก็บในตัวแปร  $Z_0$

5. ถ้า  $Z_0 = 0$  แสดงว่าได้คำตอบที่ถูกต้องแล้วให้หยุดการคำนวณ

6. กำหนดใหม่ให้  $Z = Z/Z_0$  และกำหนด  $\alpha_1 = 0, \alpha_3 = 1$  แล้วหาค่าของ Erf3 เมื่อ  $Erf3 = Erf(X - (\alpha_3 * Z))$

7. ถ้าค่าสัมบูรณ์ของ Erf3  $\geq$  ค่าสัมบูรณ์ของ Erf1 ให้ทำขั้นตอนที่ 8 และ 9 จนกว่าค่าสัมบูรณ์ของ Erf3 จะน้อยกว่าค่าสัมบูรณ์ของ Erf1

8. กำหนดค่า  $\alpha_3 = \alpha_3/2$  แล้วหาค่าของ Erf3 เมื่อ  $Erf3 = Erf(X - (\alpha_3 * Z))$

9. ถ้า  $\alpha_3 < tol/2$  แสดงว่าไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องได้มากกว่านี้อีกแล้ว และจะให้คำตอบสุดท้ายออกมา

10. กำหนด  $\alpha_2 = \alpha_3/2$  แล้วหาค่า Erf2 = Erf(X - ( $\alpha_2 * Z$ ))

11. กำหนด  $h_1 = (Erf2 - Erf1)/\alpha_2$        $h_2 = (Erf3 - Erf2)/(\alpha_3 - \alpha_2)$

$$h_3 = (h_2 - h_1)/\alpha_3$$

12. กำหนดให้  $\alpha_0 = 0.5(\alpha_2 - h_1/h_3)$  แล้วหาค่า Erf0 = Erf(X - ( $\alpha_0 * Z$ ))

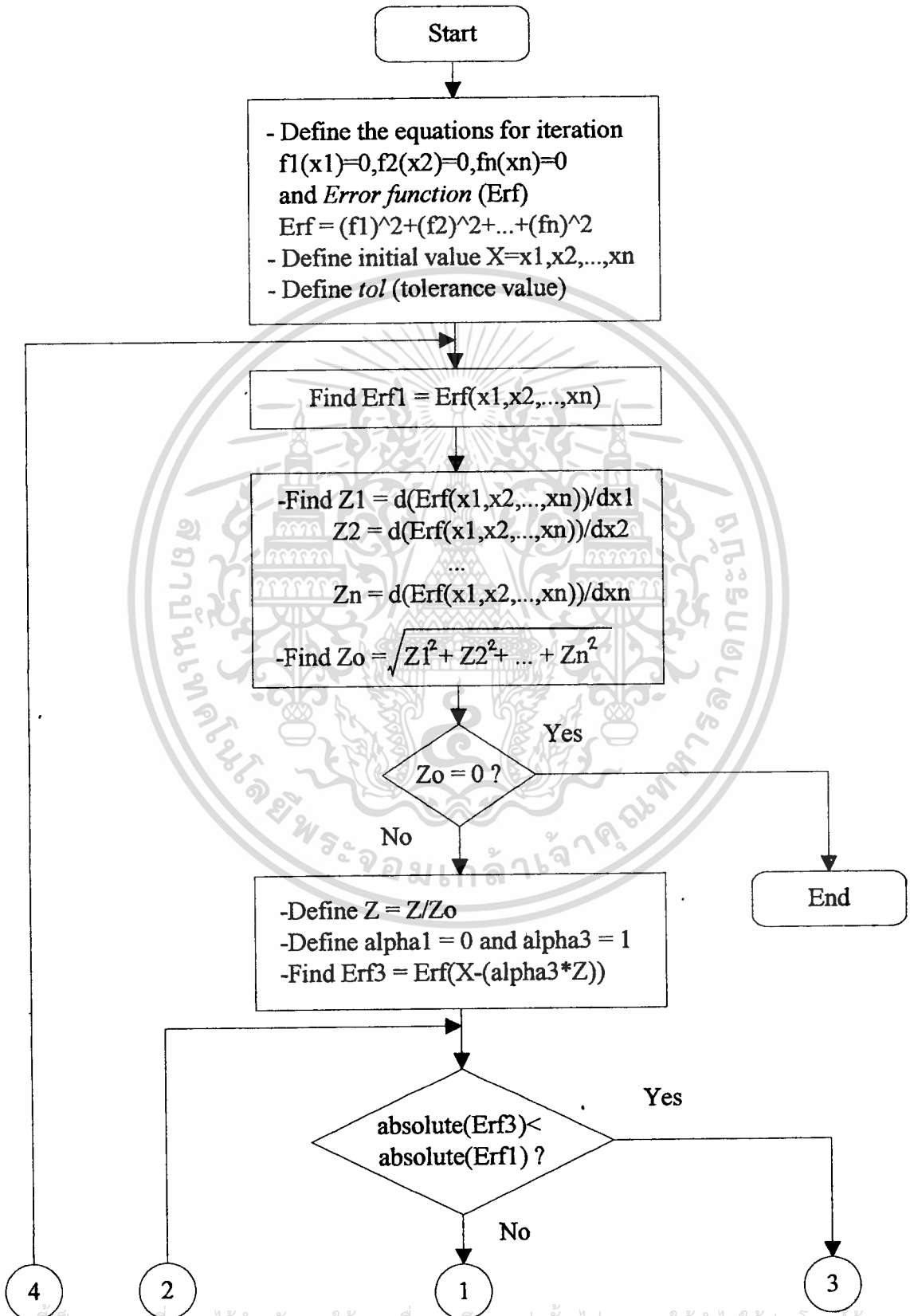
13. หาค่า  $\alpha$  โดยเลือกเอามาจาก  $\alpha_0$  หรือ  $\alpha_3$  ที่ให้ค่า Erf ต่ำสุด

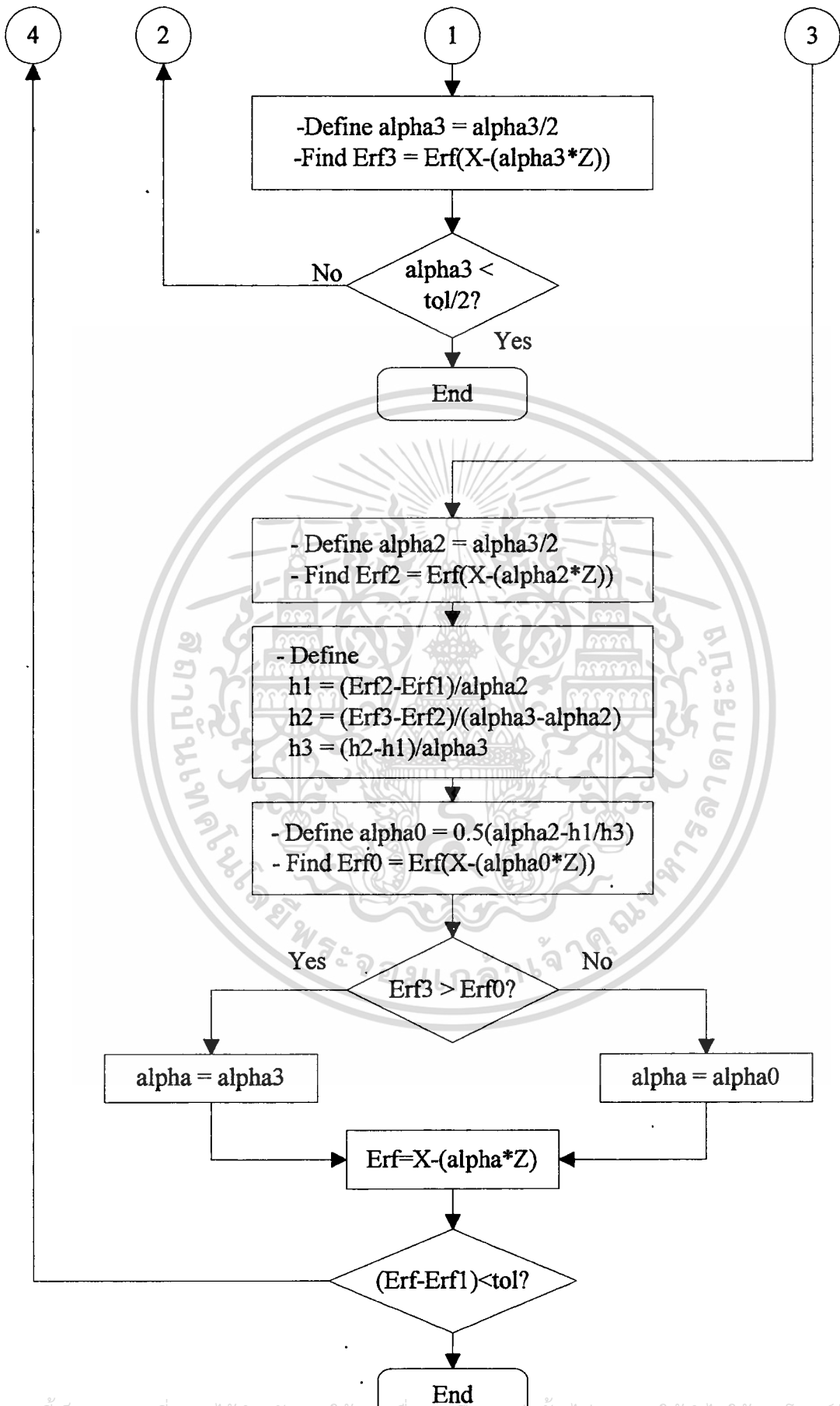
14. กำหนด Erf = X - ( $\alpha * Z$ )

15. ถ้าค่าสัมบูรณ์ของ Erf - Erf1 มีค่าน้อยกว่า tol แสดงว่าการคำนวณสิ้นสุดแล้วได้ค่า  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ที่ใกล้เคียงที่สุด

16. ย้อนกลับไปยังข้อ 4.

# Flow Chart of Steepest Descent Method





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Mutual coupling calculation for Planar Slotted Array Antenna

Version 1.2 (GUI version)

```
#include <process.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#include <graphics.h>
```

```
// Define constants for GUI (Graphics User Interface)
```

```
#define frame_thick 4
#define menu_bar_thick 22
#define first_button 200
#define button_width 35
#define button_length 550
#define buttons_gab 20
// Define constants for calculation
#define endmill_radius 1
```

```
//-----Declare function-----
```

```
// Main function
```

```
void Findzbn(void); // find Zbn
double Integrate_Z(char cmpx,double l1,double l2,double y,double z);
double funcR(double l1,double l2,double y,double z,double x); // (7.155)
double funcI(double l1,double l2,double y,double z,double x); // (7.156)
double h1(double y); // function h1(y) --> (8.99)
double h2(double y); // function h2(y) --> (8.100)
double gx(double x); // function g(x) --> (8.101)
double vx(double x); // function v(x) --> (8.102)
double fxy(double x,double y); // function f(x,y) --> (8.96)
double yg(double x,double y,int co); // function Y/Go (8.108)
double yz(double x,double y,int count); // (8.109-8.110)
double diff(double X,int i); // find the gradient of error function
double fu1(double x,int i); // This function is used by function diff
double ee1(void);
double ee2(void);
double ee3(void);
double ee(void);
// Interface function
void graphic_initialize(void); // Initialize graphics mode
void display_result(void);
// Display every values (x,y,Y/Go,Error,iteration)
void button(int x1,int y1,int x2,int y2,int thick,int push,char topic[],int topic_color);
// Draw a 3D button
void Win(int x1,int y1,int x2,int y2,char title[]); // Draw a window
void BackGround(int color); // Set background color in Graphics mode
void Delay(int time); // Delay the time
void frame(int x1,int y1,int x2,int y2); // Draw a 3D frame
```

```

void clear_bar(int number); // Erase every values on screen (x,y,Y/Go,...)
void title_dialog(void); // Title dialog
void outtext3d(int x,int y,char str[],int font,int font_size,int fore_color,int bk_color);

//-----Define global variable-----
double vn[72],z[72]; // vn[] = voltage ratio of the slots
// z[n] = x[n] or y[n]
// if n = odd no., z[n] = x (slot's offset)
// if n = even no., z[n] = y (l/r)
double Y[72],Rbn[64],lbn[64];
// Y[] = arbitrary variable = a copy set of z[]
// Rbn + j lbn = Zbn
double freq,lamda,a,b,pi,k,K2,lamdaG,B,t;
// Frequency, lamda, a and b demension of waveguide,
// Pi, k=2Pi/lamda, K2=(8.86),lamdaG ,B=2Pi/lamdaG
// and thickness of waveguide
int Mm,Nn; // Slots per waveguide and number of waveguides
long int roundmax,round,Wnum; // Max. round of iteration and number of round
int iterationMax[7] ;

//-----Functions -----
void main(void)
{
double tol,error0,error1,error2,error3,error;
// tolerance, erf0, erf1, erf2, erf3 and erf
double alpha,alpha0,alpha2,alpha3;
// ALPHA, ALPHA0, ALPHA1, ALPHA2 and ALPHA3
double h1,h2,h3,z0,z1[50];
// h1,h2 and h3 will used to find ALPHA0
// z1[] = Z1, Z2, Z3, ...
// = d(erf)/d(x1), d(erf)/d(y1), d(erf)/d(x2),...
int i,j,x,y; // arbitrary variable
char num[3]; // arbitrary variable ( for setting up GUI )
int iteration,branchcount; // number of iteration

clrscr();
// Initialization for calculation
pi =M_PI; // pi = pi of Borland C library
Mm = 6; // nummber of slots per waveguide (2,4 or 6)
Nn = 6; // number of waveguides (1,2,4 or 6)
freq = 11.9909*pow(10,9); // frequency
lamda = 299792458/freq*100/2.54; // lamda = c/frequency (inches)
a = 0.6519685; // a-demention of waveguide (inches)
b = 0.2755905; // b-demention of waveguide (inches)
t = 1.26/25.4; // thickness of waveguide (inches)
lamdaG = lamda/sqrt(1-pow(lamda/(2*a),2));
k = 2*pi/lamda;
B = 2*pi/lamdaG;
K2 = (292*a/b)/(0.61*pi*B/k); // (8.86)

// Voltage ratio for all slots
vn[1] = 1; vn[2] = 1; vn[3] = 1; vn[4] = 1; vn[5] = 1; vn[6] = 1;

```

```

vn[7] = 1; vn[8] = 1; vn[9] = 1; vn[10] = 1; vn[11] = 1; vn[12] = 1;
vn[13] = 1; vn[14] = 1; vn[15] = 1; vn[16] = 1; vn[17] = 1; vn[18] = 1;
vn[19] = 1; vn[20] = 1; vn[21] = 1; vn[22] = 1; vn[23] = 1; vn[24] = 1;
vn[25] = 1; vn[26] = 1; vn[27] = 1; vn[28] = 1; vn[29] = 1; vn[30] = 1;
vn[31] = 1; vn[32] = 1; vn[33] = 1; vn[34] = 1; vn[35] = 1; vn[36] = 1;

```

```

// Initial for iteration
roundmax = 900000; // max. number of iteration's round
tol = 0.000000000000001; // error tolerance
iteration = 1; // initial number of iteration
iterationMax[1] = 5;
iterationMax[2] = 5;
iterationMax[3] = 5;

```

```

// Initial x and y of Mm*Nn/2 slots

```

```

z[1] = 0.14330962; z[2] = 1.00831101;
z[3] = -0.14593234; z[4] = 1.00789013;
z[5] = 0.14690003; z[6] = 1.00855635;
z[7] = -0.14166519; z[8] = 1.00981114;
z[9] = 0.14819680; z[10] = 1.01020839;
z[11] = -0.14731818; z[12] = 1.00773072;

```

```

z[13] = 0.13507236; z[14] = 1.01571322;
z[15] = -0.10246282; z[16] = 1.01034742;
z[17] = 0.14945737; z[18] = 1.02277579;
z[19] = -0.10581821; z[20] = 1.01020204;
z[21] = 0.14335698; z[22] = 1.02130649;
z[23] = -0.11632241; z[24] = 1.00724255;

```

```

z[25] = 0.12287000; z[26] = 1.00640909;
z[27] = -0.18115000; z[28] = 1.02223382;
z[29] = 0.10599999; z[30] = 1.00481704;
z[31] = -0.17338100; z[32] = 1.02320899;
z[33] = 0.10713999; z[34] = 1.00350455;
z[35] = -0.15103000; z[36] = 1.01876715;

```

```

// Prelude

```

```

graphic_initialize(); // Initialize graphics mode
BackGround(7); // Set Background color to GRAY

```

```

// Setup background interface

```

```

Win(0,0,640,480,"Planar Slotted Array Designer"); // Make main window
setfillstyle(SOLID_FILL,3);
bar(5,26,635,475);

```

```

// Title Dialog

```

```

title_dialog();

```

```

// Setup user interface

```

```

frame(15,36,212,75);
frame(221,36,625,75);
frame(15,83,316,408);
frame(325,83,625,408);

```

```

frame(15,418,625,465);

```

```

// Setup panels

```

```

settextstyle(0,0,0);
setcolor(8);
outtext3d(29,440,"Status",0,0,14,8);
outtext3d(24,53,"Branch",0,0,14,8);
outtext3d(97,53,"Iteration",0,0,14,8);
outtext3d(237,53,"Error",0,0,14,8);
outtext3d(437,53,"Y/Go",0,0,14,8);
setcolor(14);
button(75,44,91,66,2,1,"",15); // Branch number
button(172,44,202,66,2,1,"",15); // Iteration
button(285,44,419,66,2,1,"",15); // Error Bar
button(477,44,611,66,2,1,"",15); // Y/Go Bar
button(76,109,172,402,2,1,"",15); // Left offset bar
button(196,109,292,402,2,1,"",15); // Left length bar
button(388,109,484,402,2,1,"",15); // Right offset bar
button(508,109,604,402,2,1,"",15); // Right length bar
button(90,430,604,455,2,1,"",15); // Status bar
// Clear bar
for(i=1;i<=8;i++)
    clear_bar(i);
// Display text "Slot", "Offset" and "l/r"
outtext3d(29,93,"Slot",0,0,12,0);
outtext3d(103,93,"Offset",0,0,12,0);
outtext3d(221,93,"length",0,0,12,0);
outtext3d(341,93,"Slot",0,0,12,0);
outtext3d(414,93,"Offset",0,0,12,0);
outtext3d(533,93,"length",0,0,12,0);
// Display number of slot
setcolor(14);
settextstyle(0,0,0);
for(i=1;i<=36;i++)
{
    if ((i/10) == 0)
    {
        num[0] = '';
        num[1] = i+48;
    }
    if ((i/10) == 1)
    {
        num[0] = '1';
        num[1] = (i%10)+48;
    }
    if ((i/10) == 2)
    {
        num[0] = '2';
        num[1] = (i%20)+48;
    }
    if ((i/10) == 3)
    {
        num[0] = '3';
        num[1] = (i%30)+48;
    }
}

```

```

num[2] = '0';
if (i<=18) outtext3d(37,(i*16)+99,num,0,0,14,6);
if (i>18) outtext3d(349,((i-18)*16)+99,num,0,0,14,6);
}

// Show status = Calculating ...
settextstyle(0,0,0);
setcolor(7);
outtextxy(99,439,"Calculating...");

// Start iteration !!!
for(round = 1; round<=roundmax ; round++)
{
if (Nn==1) branchcount = 1;
else branchcount = Nn/2;
for(Wnum=1;Wnum<=branchcount;Wnum++)
{
for(iteration=1;iteration<=iterationMax[Wnum];iteration++)
{
// FIND erf or erf1 (erf = erf1 because ALPHA1 = 0)
for(i=1;i<=Mm*Nn;i++)
Y[i] = z[i]; // copy all x and y to Y[] for calculation
for(i=2*Mm*Nn-1,j=1;i>=Mm*Nn+1;i-=2,j+=2)
{
Y[i] = -Y[j];
Y[i+1] = Y[j+1];
}
Findzbn();
error1 = ee();

// FIND Z1, Z2, Z3, ... ( Z1 = d(erf)/d(x1) )
// z1[] = Z1,Z2,Z3,...

for(i=(2*(Wnum-1)*Mm)+1;i<=2*Mm*Wnum;i++)
z1[i] = diff(Y[i],i);

// FIND z0 = ũ(Z1ý+Z2ý+Z3ý+...)
z0 = 0.0;
for(i=(2*(Wnum-1)*Mm)+1;i<=2*Mm*Wnum;i++)
z0 = z0+pow(z1[i],2); // Find Z1ý+Z2ý+Z3ý+...
z0 = sqrt(z0); // and then find the square root or them

// z0 means the length of vector which its coordinate is (Z1,Z2,Z3,...)
// If z0 (distance of gradient) = 0,
// it means that we meet the satisfy point
if (z0==0.0)
{
clear_bar(8);
outtextxy(99,439,"Zero Gradient. Procedure complete and may have minimum ...");
printf("\007\007\007");
exit(1);
}
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// Define z1[] = z1[]/z0 ;example Z1 = Z1/z0
for(i=(2*(Wnum-1)*Mm)+1;i<=2*Mm*Wnum;i++)
    z1[i] = z1[i]/z0;

// Set ALPHA1 = 0 and ALPHA3 = 1
alpha0 = 0.0;
alpha3 = 1;

// FIND erf3
for(i=(2*(Wnum-1)*Mm)+1;i<=2*Mm*Wnum;i++)
    Y[i] = z[i] - (alpha3*z1[i]); // prepare X - (alpha3 * z1[])
                                // X = x1,y1,x2,y2,x3,y3,...
for(i=2*Mm*Nn-1,j=1;i>=Mm*Nn+1;i-=2,j+=2)
{
    Y[i] = -Y[j];
    Y[i+1] = Y[j+1];
}
Findzbn(); // find new Zbn for alpha3
error3 = ee(); // find erf2

// Check !!! --> erf3 or erf1 is max.
// If erf3 < erf1 then we divide ALPHA3 by 2 (ALPHA3 = ALPHA3/2),
// then find the new erf3 and compare with erf1 again.
// If erf3 still more than erf1, divide ALPHA3 by 2 and find new erf3
// until erf3 < erf1
// NOTE: 1.If erf3 < (tol/2), we may very very close to the answer.
// 2.We compare absolute value of erf3 and absolute value of
// erf1, not erf3 and erf1
while(fabs(error3) >= fabs(error1))
{
    alpha3 = alpha3/9;
    for(i=(2*(Wnum-1)*Mm)+1;i<=2*Mm*Wnum;i++)
        Y[i] = z[i]-(alpha3*z1[i]);
    for(i=2*Mm*Nn-1,j=1;i>=Mm*Nn+1;i-=2,j+=2)
    {
        Y[i] = -Y[j];
        Y[i+1] = Y[j+1];
    }
    Findzbn();
    error3 = ee();
    if (alpha3 < (tol/2))
    {
        display_result();
        clear_bar(8);
        outtextxy(99,439,"Alpha 3 is less than half of tolerance, no improvement");
        printf("\007\007\007");
        exit(1);
    }
}

// Define ALPHA2 = ALPHA3 divided by 2
alpha2 = alpha3/2;
for(i=(2*(Wnum-1)*Mm)+1;i<=2*Mm*Wnum;i++)
    Y[i] = z[i] - alpha2*z1[i];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for(i=2*Mm*Nn-1,j=1;i>=Mm*Nn+1;i-=2,j+=2)
{
    Y[i] = -Y[j];
    Y[i+1] = Y[j+1];
}
Findzbn();
error2 = ee();

// FIND ALPHA0
h1 = (error2 -error1)/alpha2;
h2 = (error3 -error2)/(alpha3-alpha2);
h3 = (h2 - h1)/alpha3;
alpha0 = 0.5*(alpha2 - (h1/h3));

// FIND erf0
for(i=(2*(Wnum-1)*Mm)+1;i<=2*Mm*Wnum;i++)
    Y[i] = z[i] - alpha0*z1[i];
for(i=2*Mm*Nn-1,j=1;i>=Mm*Nn+1;i-=2,j+=2)
{
    Y[i] = -Y[j];
    Y[i+1] = Y[j+1];
}
Findzbn();
error0 = ee();

// COMPARE erf0 and erf3, which one is minimum.
// Then define ALPHA = ALPHA of minimum erf (ALPHA0 or ALPHA3)
// and find erf of ALPHA
if(error0 < error3)
    alpha = alpha0;
else
    alpha = alpha3;
for(i=(2*(Wnum-1)*Mm)+1;i<=2*Mm*Wnum;i++)
    Y[i] = z[i] - alpha*z1[i];
for(i=2*Mm*Nn-1,j=1;i>=Mm*Nn+1;i-=2,j+=2)
{
    Y[i] = -Y[j];
    Y[i+1] = Y[j+1];
}
Findzbn();
error = ee();

// Copy all value of Y[] back to z[] (all new x and new y)
for(i=(2*(Wnum-1)*Mm)+1;i<=2*Mm*Wnum;i++)
    z[i] = Y[i];
for(i=2*Mm*Nn-1,j=1;i>=Mm*Nn+1;i-=2,j+=2)
{
    z[i] = -z[j];
    z[i+1] = z[j+1];
}

// Display number of iteration, error, x,y and Y/G0
// on the screen
gotoxy(23,4);
printf("%3d",iteration);
// Display waveguide number to iterate

```

```

gotoxy(11,4);
printf("%d",Wnum);
// display error
gotoxy(37,4);
printf("%16.10f",error);
// display Y/G0
gotoxy(61,4);
printf("%16.10fn",sqrt(ee30)+Nn);
display_result();

// Now, compare erf and erf1, or we can say compare new erf
// and old erf. If erf-erf1 < tol, we have found the answer !
if ( fabs(error-error1) < tol )
{
    clear_bar(8);
    outtextxy(99,439,"Error did not improve more than tolerance, may got answers");
    printf("\007\007\007");
    exit(1);
}
}
}
//iteration++; // Increase the number of iteration
} // end for-round
} // END OF MAIN

void display_result(void)
{
    int i;
    for(i=1;i<=2*Mm*Nn;i+=2)
    {
        // x ( x may be + or - )
        if (i<=Mm*Nn/2)
        {
            if (i<=36)
            {
                if (z[i]>=0) gotoxy(12,7+((i+1)/2));
                else gotoxy(11,7+((i+1)/2));
            }
            else
            {
                if (z[i]>=0) gotoxy(51,7+((i-35)/2));
                else gotoxy(50,7+((i-35)/2));
            }
            printf("%.8f",z[i]*25.4);
            // y ( only + )
            if (i<=36) gotoxy(26,7+((i+1)/2));
            else gotoxy(65,7+((i-35)/2));
            printf("%.8f",2*25.4*z[i+1]*(vx(z[i])/k));
        }
        if (i>Mm*Nn/2)
        {
            if (i<=36)
            {
                if (Y[i]>=0) gotoxy(12,7+((i+1)/2));
                else gotoxy(11,7+((i+1)/2));
            }

```

```

else
{ if (Y[i]>=0) gotoxy(51,7+((i-35)/2));
  else gotoxy(50,7+((i-35)/2));
}
printf("%.8f",Y[i]*25.4);
// y ( only + )
if (i<=36) gotoxy(26,7+((i+1)/2));
else gotoxy(65,7+((i-35)/2));
printf("%.8f",2*25.4*Y[i+1]*(vx(Y[i])/k));
}
}
}

```

```

// function g(x)
double gx(double x)
{ double GX;
  GX = 1.177*pow(sin((pi*x)/a),2);
  return(GX);
}
// end of function g(x)

```

```

// function v(x)
double vx(double x)
{ double VX;
  VX = 1.517+1.822*pow(x,2);
  return(VX);
}
// end of function v(x)

```

```

// function h1
double h1(double y)
{ double H1;
  H1 = 1-275*pow(y-1,2);
  return(H1);
}
// end of function h1

```

```

// function h2
double h2(double y)
{ double H2;
  H2 = -14*(y-1);
  return(H2);
}
// end of function h2

```

```

// function f(x,y)
double fxy(double x,double y)
{ double F;
  F = (cos((B/k)*y*vx(x)) - cos(y*vx(x)))*sin(pi*x/a)/sin(y*vx(x));
  return(F);
}
// end of function f(x,y)

```



```

E1 = ee1();
E2 = ee2();
E3 = ee3();
E = E1+E2+E3;
return(E);
}

```

```

double Integrate_Z(char cmpx,double l1,double l2,double y,double z)
// This function is used to determining Z coupling which is
// complex numbers. Unfortunately, normal C compilers cannot perform
// complex numbers calculating; so we must separately determine R
// and I, which are parts of Z,  $Z = R + jI$ . We have therefore setup
// the variable named 'cmpx' to distinguish weather this function
// to used to determine R or I.
// ( If cmpx = R then this function is used to determine R else
// if cmpx = I then this function is used to determine I. )

```

---

```

//
// ALGORITHM SIMPSON (xi,fi,j = 0,1,...,2n)
//
// This algorithm computes the integral  $J = \int_a^b f(x)dx$  from given values
//
//  $f_i = f(x_i)$  at equidistant  $x_0 = a, x_1 = x_0 + h, \dots, x_{2n} = x_0 + 2nh = b$ 
// by Simpson's rule, where  $h = (b-a)/2n$ .
//
// INPUT: a,b,n,f0,...,f2n
// OUTPUT: Approximate value J' of J
// Compute  $s_0 = f_0 + f_{2n}$ 
//  $s_1 = f_1 + f_3 + \dots + f_{2n-1}$ 
//  $s_2 = f_2 + f_4 + \dots + f_{2n-2}$ 
//  $h = (b-a)/2n$ 
//  $J' = (h/3)(s_0 + 4s_1 + 2s_2)$ 
// OUTPUT J' Stop.
// End SIMPSON
{ double R12 = 0.0; // defind & initial J'
double s0=0.0, s1=0.0, s2=0.0; // defind & initial s0,s1,s2
double n,h; // defind n,h
int i; // arbitrary variable

```

```

n = 2; // 2n = number of subintervals
h = l2/n; //  $h = (a-b)/2n = (l2 - (-l2))/(2*n)$ 
// find s0 -----

```

```

if (cmpx=='R') // If this function used to find Real value
s0 = funcR(l1,l2,y,z,-l2)+funcR(l1,l2,y,z,l2);
else if (cmpx=='I') // If this function used to find Imaginary value
s0 = funcI(l1,l2,y,z,-l2)+funcI(l1,l2,y,z,l2);
// find s1 -----

```

```

if (cmpx=='R')
for(i=1;i<=(2*n-1);i+=2)
s1 += funcR(l1,l2,y,z,-l2+(h*i));

```

```

else if (cmpx=='I')
for(i=1;i<=(2*n-1);i+=2)

```

```

        s1 += funcI(l1,l2,y,z,-l2+(h*i));
// find s2 -----
if (cmpx=='R')
    for(i=2;i<=(2*n-2);i+=2)
        s2 += funcR(l1,l2,y,z,-l2+(h*i));
else if (cmpx=='I')
    for(i=2;i<=(2*n-2);i+=2)
        s2 += funcI(l1,l2,y,z,-l2+(h*i));
// find answer = (h/3)(s0 + 4s1 + 2s2) -----
R12 = (h/3)*(s0+(4*s1)+(2*s2));
R12 = R12*(30/(sin(k*l1)*sin(k*l2)));
return(R12);
}

```

```

double funcR(double l1,double l2,double y,double z,double x)
// This function is the integral part in equation 7.155-(real part)
// Note: This function is used with function 'Integrate_Z' determining
// the value of f0, f1, ... ,f2n-1 <see SIMPSON>.
{ double r12,r,r1,r2;
  r = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x,2)); // (7.151)
  r1 = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x-l1,2)); // (7.152)
  r2 = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x+l1,2)); // (7.153)
  r12= (sin(k*r1)/r1)+(sin(k*r2)/r2)-(2*cos(k*l1)*sin(k*r)/r);
  r12= r12*sin(k*(l2-fabs(x)));
  return(r12);
}

```

```

double funcI(double l1,double l2,double y,double z,double x)
// This function is the integral part in equation 7.156-(imaginary part)
// Note: This function is used with function 'Integrate_Z' determining
// the value of f0, f1, ... ,f2n-1 <see SIMPSON>.
{ double r12,r,r1,r2;
  r = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x,2)); // (7.151)
  r1 = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x-l1,2)); // (7.152)
  r2 = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x+l1,2)); // (7.153)
  r12= (cos(k*r1)/r1)+(cos(k*r2)/r2)-(2*cos(k*l1)*cos(k*r)/r);
  r12= r12*sin(k*(l2-fabs(x)));
  return(r12);
}

```

```

void Findzbn(void)
{
  int ii,jj,i,j,count,offset;
  double x[101],l[101],lr[101],mulz,muly,y0,yd,z0,zd,yy,zz;
  double Rb[11][11],Ib[11][11],Rinte,Iinte;

```

```

  offset = 1.26/25.4; // thickness of waveguide
  count =1;
  for( i=1 ; i<=Mm*Nn ; i++)
  { x[i] = Y[2*i-1];
    lr[i] = vx(x[i])/k;

```

```

l[i] = Y[2*i]*lr[i];
}
// Reference slot antenna
for( i=1 ; i<=Nn/2 ; i++ ) // i : the order of waveguide
{ // begin for1 Findzbn
for( j=1 ; j<=Mm ; j++ ) // j : the order of slot
{ // begin for2 Findzbn

if ( i == 1 ) muly = 0.0;
else muly = i-1;
if ( j == 1 ) mulz = 0.0;
else mulz = j-1;
y0 = x[(i-1)*Mm+j]+(offset+a)*muly;
z0 = (lamdaG/2)*mulz;

Rb[i][j] = 0.0; // Real part of mutual coupling of slot[i][j]
Ib[i][j] = 0.0; // Imaginary part of mutual coupling of slot[i][j]

for(ii=1;ii<=Nn;ii++) // ii : the order of waveguide
{ // begin for3 Findzbn
for(jj=1;jj<=Mm;jj++) // jj : the order of slot
{ // begin for4 Findzbn think at the order of slot
if ( (ii==i) && (jj==j) ) goto step;
if ( ii == 1 ) muly = 0.0;
else muly = ii-1;
if ( jj == 1 ) mulz = 0.0;
else mulz = jj-1;
yd = x[jj+(ii-1)*Mm]+(offset+a)*muly;
zd = (lamdaG/2)*mulz;

yy = fabs(yd - y0); // distance of width of waveguide
// between reference slot with the other slot
zz = fabs(zd - z0); // distance of length of waveguide
// between reference slot with the other slot
Rinte = Integrate_Z('R',l[j+(i-1)*Mm],l[jj+(ii-1)*Mm],yy,zz);
Iinte = Integrate_Z('I',l[j+(i-1)*Mm],l[jj+(ii-1)*Mm],yy,zz);
Rb[i][j] = Rb[i][j]+Rinte*vn[jj+(ii-1)*Mm]
*sin(k*l[jj+(ii-1)*Mm])/(vn[j+(i-1)*Mm]
*sin(k*l[j+(i-1)*Mm]));
Ib[i][j] = Ib[i][j]+Iinte*vn[jj+(ii-1)*Mm]
*sin(k*l[jj+(ii-1)*Mm])/(vn[j+(i-1)*Mm]
*sin(k*l[j+(i-1)*Mm]));
step : Wnum = Wnum + 0;
} // end for4 Findzbn
} // end for3 Findzbn
Rbn[count] = Rb[i][j];
Ibn[count] = Ib[i][j];
count=count+1;
} // end for2 Findzbn
} // end for1 Findzbn
} // end Findzbn

```

เรที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

double diff(double X,int i)
{ int n;
  double TOL,H,MAX,D[21],E[21],R[21];
  TOL = 0.0005; // tolerance
  H = 1; // initial diff. range value
  MAX = 20;
  D[0] = 0.5*(fu1(X+H,i)-fu1(X-H,i))/H;
  for( n=1 ; n<=2 ; n++)
  { H = H/2;
    D[n] = 0.5*(fu1(X+H,i)-fu1(X-H,i))/H;
    E[n] = fabs(D[n] - D[n-1]);
    R[n] = 2*E[n]/(fabs(D[n])+fabs(D[n-1])+TOL);
  }
  n = 1;
  while( ((E[n]>E[n+1]) || (R[n]>=TOL)) && (n<MAX) )
  { H = H/2;
    D[n+2] = 0.5*(fu1(X+H,i)-fu1(X-H,i))/H;
    E[n+2] = fabs(D[n+2]-D[n+1]);
    R[n+2] = 2*E[n+2]/(fabs(D[n+2])+fabs(D[n+1])+TOL);
    n++;
  }
  return(D[n-1]);
}

double fu1(double x,int i)
{ double FU1;
  int bb;
  for(bb=1;bb<=Mm*Nn;bb++)
    Y[bb] = z[bb];
  Y[i] = x;
  FU1 = ee();
  return(FU1);
}

void graphic_initialize(void)
{
  int GraphDriver; // The Graphics device driver
  int GraphMode; // The Graphics mode value
  int ErrorCode; // Reports any graphics errors
  int xasp, yasp; // Used to read the aspect ratio
  GraphDriver = DETECT; // Request auto-detection
  initgraph( &GraphDriver, &GraphMode, "" );
  ErrorCode = graphresult(); // Read result of initialization
  if( ErrorCode != grOk ){ // Error occurred during init
    printf(" Graphics System Error: %s\n", grapherrormsg( ErrorCode ) );
    exit(1);
  }
}

void Background(int color)
// set backgournd of screen

```

สำหรับการปฏิบัติงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

หากมีข้อสงสัย ติดต่อหาเรา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

setfillstyle(SOLID_FILL,color);
setcolor(color);
bar(0,0,640,480);
}

void Win(int x1,int y1,int x2,int y2,char title[])
// make window frame include title bar text, all buttons
{
    int i;
    int X1,Y1,X2,Y2;

    // check
    i=0;
    while(title[i]!='\000')
        i++;
    if ((x2-x1)<(2*frame_thick+3*menu_bar_thick+4+i))
    {
        closegraph();
        clrscr();
        printf("Error by programmer !!!\nWrong Win size!!!\n\007");
        exit(1);
    }

    // make frame
    setlinestyle(0,0,1);
    setcolor(BLACK);
    for(i=0;i<=frame_thick;i+=frame_thick)
    {
        line(x1+i,y1+i,x2-i,y1+i);
        line(x1+i,y1+i,x1+i,y2-i);
        line(x1+i,y2-i,x2-i,y2-i);
        line(x2-i,y2-i,x2-i,y1+i);
    }
    // make title bar
    setfillstyle(SOLID_FILL,BLUE);
    bar(x1+frame_thick+1,y1+frame_thick+1,x2-frame_thick-1,y1+frame_thick+menu_bar_thick);
    // set window area color
    setfillstyle(SOLID_FILL,WHITE);
    bar(x1+frame_thick+1,y1+frame_thick+menu_bar_thick,x2-frame_thick-1,y2-frame_thick-1);
    // Make title text
    X1 = ((x1+x2)/2)-(i/2)-menu_bar_thick-125;
    Y1 = y1+frame_thick-3;
    setcolor(15);
    settextstyle(7,0,1);
    outtextxy(X1,Y1,title);
}

```

```

void button(int x1,int y1,int x2,int y2,int thick,int push,char topic[],int topic_color)

```

```

{
    struct PTS {

```

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 } poly[7];  
 ไม่มีการแก้ไขทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int color,X1,Y1;

// make button's highlight or vise versa
if (push==1) color=8;
else color=15;
setfillstyle(SOLID_FILL,color);
bar(x1,y1,x2,y2);
// make button's shadow or vise versa
poly[0].x = x1;
poly[0].y = y2;
poly[1].x = x1+thick;
poly[1].y = y2-thick;
poly[2].x = x2-thick;
poly[2].y = y2-thick;
poly[3].x = x2-thick;
poly[3].y = y1+thick;
poly[4].x = x2;
poly[4].y = y1;
poly[5].x = x2;
poly[5].y = y2;
if(push==1) color = 15;
else color=8;
setfillstyle(SOLID_FILL,color);
fillpoly(6,(int far*)poly);
// make button's surface
setfillstyle(SOLID_FILL,7);
bar(x1+thick,y1+thick,x2-thick,y2-thick);
// make button's frame
setcolor(BLACK);
setlinestyle(0,0,1);
rectangle(x1,y1,x2,y2);
// make topic text on button
settextstyle(7,0,1);
setcolor(topic_color);
X1 = (x1+x2)/2-248;
Y1 = (y1+y2)/2-11;
if(push==1) X1--;
outtextxy(X1,Y1,topic);
}

```

```

void Delay(int time)
{
    int j;
    for(;time>=0;time--)
        for(j=0;j<=12500;j++);
}

```

```

void frame(int x1,int y1,int x2,int y2)
{
    int i;
    setlinestyle(0,0,1);
    for(i=0;i<=1;i++)

```

```

{
    setcolor(8+(i*3));
    line(x1+i,y1+i,x2+i,y1+i);
    line(x2+i,y1+i,x2+i,y2+i);
    line(x2+i,y2+i,x1+i,y2+i);
    line(x1+i,y2+i,x1+i,y1+i);
}
}

```

```

void clear_bar(int number)

```

```

{
    setfillstyle(1,0);
    switch(number)
    {
    case 1:bar(78,47,88,63);
        bar(175,47,199,63);
        break; // Branch number bar & Iteration bar
    case 2:bar(288,47,416,63);break; // Error Bar
    case 3:bar(480,47,608,63);break; // Y/Go Bar
    case 4:bar(79,112,169,399);break; // Left offset bar
    case 5:bar(199,112,289,399);break; // Left length bar
    case 6:bar(391,112,481,399);break; // Right offset bar
    case 7:bar(511,112,601,399);break; // Right length bar
    case 8:bar(93,433,601,452);break; // Status bar
    }
}

```

```

void WinTitle(void)

```

```

{
    long int i;
    int x,y,j;
    Win(50,90,590,376,"Mutual Coupling Calculator"); // Make introduction window
    Delay(300);
    settextstyle(7,0,1);
    setcolor(9);
    outtextxy(260,222,"Version 1.1");
    settextstyle(0,0,0);
    setcolor(8);
    outtextxy(85,285,"This program is part of Planar Sloted Array Antenna Project");
    button(85,315,555,345,3,2,"",15);
    setcolor(LIGHTRED);
    settextstyle(0,0,0);
    outtextxy(220,327,"Press any key to continue");
    setfillstyle(SOLID_FILL,WHITE);
    settextstyle(8,0,2);
    for(i=13;i<=28;i++)
    {
        setcolor(i);
        outtextxy(93,130,"Welcome to Mutual Coupling Calculator");
        outtextxy(122,164,"For Planar Sloted Array Antenna");
        sound((i-12)*150);
        Delay(70);
    }
}

```

```

}
Delay(200);
nosound();
Delay(300);
for(i=1;i<=4;i++)
{
    sound(70);
    Delay(80);
    nosound();
    Delay(60);
}
getch();
// Push button
button(85,315,555,345,3,1,"",15);
setcolor(LIGHTRED);
settextstyle(0,0,0);
outtextxy(220,327,"Press any key to continue");
sound(2000);delay(70);nosound();delay(50);
button(85,315,555,345,3,2,"",15);
setcolor(LIGHTRED);
settextstyle(0,0,0);
outtextxy(220,327,"Press any key to continue");
delay(200);
// Fade out
setfillstyle(SOLID_FILL,LIGHTGRAY);
setcolor(7);
setlinestyle(1,0,3);
for ( i=0 ; i < 10000; ++i )
{
    x = random(590);
    y = random(376);
    bar(x,y,x+16,y+16);
    sound(12000-i-8000);
    sound(12000-i-4000);
}
nosound();
}

```

```

void outtext3d(int x,int y,char str[],int font,int font_size,int fore_color,int bk_color)
{
    setttextstyle(font,0,font_size);
    setcolor(bk_color);
    outtextxy(x+1,y+1,str);
    setcolor(fore_color);
    outtextxy(x,y,str);
}

```

```

void title_dialog(void)
{
    frame(70,120,570,380);
    button(73,123,567,377,2,1,"",0);
    outtext3d(99,140,"Mutual Coupling Calculation",1,4,15,0);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

outtext3d(310,190,"for",1,2,15,0);
outtext3d(154,220,"Planar Slotted Array Antenna",1,3,15,0);
outtext3d(129,280,"King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang",0,0,15,0);
button(129,310,511,350,2,0,"",0);
outtext3d(219,326,"Press any key to continue",0,0,12,0);
getch();
button(129,310,511,350,2,1,"",0);
outtext3d(220,327,"Press any key to continue",0,0,12,0);
sound(1000);delay(50);nosound();delay(100);
button(129,310,511,350,2,0,"",0);
outtext3d(219,326,"Press any key to continue",0,0,12,0);
delay(250);
setfillstyle(SOLID_FILL,3);
bar(5,26,635,475);
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้