



ปีการศึกษา 2531

ปริญญาโท

เรื่อง

เคื่องสังเอดาร์

โดย

นายมงคล ตัญญู

นายวริทธิ์ จำปาไชศรี

อาจารย์ที่ปรึกษา

นายกิตติชัย พาณิชวณิช



อธิบดีมหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

M023215

10.ต.พ.2532

ปริญญาโทปีการศึกษา 2531

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องส่งเรดาร์

ผู้จัดทำ

1. นายมงคล ตันยลักษณ์ 28.1176
2. นายวรวิทย์ จำปาไชยศรี 28.1197



(Handwritten signature)

(นายกิตติชัย พามิษฐ์ประมพงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

023215

เครื่องส่ง เรดาร์

มงคล ตันยลักษณ์

วรวิทย์ จำปาไชยศรี

กิตติชัย พาณิชปฐมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2531

บทคัดย่อ

ปฏิญานินทร์ฉบับนี้ เป็นการออกแบบและพัฒนาเครื่องส่งเรดาร์ ซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณอาร์เอฟพัลส์ (RF PULSE OSCILLATOR) ที่ได้จากหลอดแมกนีตรอน ในเตาอบไมโครเวฟ รวมทั้งได้ออกแบบสร้างสายอากาศแบบพาราโบลา (PARABOLOIDAL ANTENNA) ขึ้นมาเพื่อใช้ในการส่งสัญญาณเรดาร์ โดยสังเคราะห์ให้มีบีมวิดร์กว้างในระนาบแนวตั้ง และบีมวิดร์แคบในระนาบแนวนอน พร้อมทั้งได้ทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆของเครื่องส่งเรดาร์นี้ด้วย

RADAR TRANSMITTER

MONGKOL TANYALUX

VORAVIT CHAMPACHAISRI

KITTICHAJ PANICHPRATHOMPONG ADVISOR

1988

ABSTRACT

This thesis is the design and development of RADAR TRANSMITTER which consists of RF PULSE OSCILLATOR (from magnetron tube in microwave oven) and design PARABOLOIDAL ANTENNA for transmitting and receiving radar signal. This antenna has wide beam in vertical plane and narrow beam in horizontal plane which are the characteristics of radar antenna. The significant characteristics of this antenna have been tested.

สารบัญ

บทคัดย่อ	
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเรดาร์	3
2.2 ทฤษฎี และหลักการของระบบเครื่องส่งเรดาร์	5
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องส่งเรดาร์	
3.1 วงจรมอดดูเลเตอร์	25
3.2 การออกแบบระบบสายอากาศแบบพาราโบลา	26
3.3 การออกแบบไดเรกชันแนลคัมเพลกซ์ และวงจร ดีเทคเตอร์	34
บทที่ 4 การทดสอบเครื่องส่งเรดาร์	
4.1 การวัดแพทเทิร์นของท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด	38
4.2 การวัดแพทเทิร์นของระบบสายอากาศตัวสะท้อน แบบพาราโบลา	45
4.3 การวัดอัตราขยายของสายอากาศแบบพาราโบลา	52
4.4 การทดสอบการทำงานของหลอดแมกนีตรอน และ สัญญาณที่ได้จากหลอดแมกนีตรอนในเตาอบไมโครเวฟ	53
4.5 การทดสอบการทำงานของไดเรกชันแนลคัมเพลกซ์ และวงจรดีเทคเตอร์	55
บทที่ 5 บทวิเคราะห์และสรุป	
5.1 วิเคราะห์และวิจารณ์	59
5.2 สรุป	60
ภาคผนวก	62
กิตติกรรมประกาศ	70
หนังสืออ้างอิง	71

บทที่ 1

บทนำ

ด้วยในปัจจุบันนี้ เรดาร์ (Radar) ได้ถูกนำไปใช้ในกิจการต่างๆอย่างแพร่หลาย อาทิ เช่น

1. ด้านพลเรือน ใช้ในด้านการเดินเรือ การบิน เช่น ใช้ควบคุมการจราจรทางอากาศ หรือใช้ในการนำร่องให้เครื่องบินลงพื้นดินได้อย่างปลอดภัย ใช้ในการตรวจอากาศ ใช้ตรวจจับการเกิดหรือการเคลื่อนไหวของพายุ ใช้ในการเดินเรือโดยเฉพาะในยามที่ทัศนวิสัยไม่ดี

2. ด้านการทหารและตำรวจ ใช้ในการตรวจจับอากาศยาน หรือเรือของข้าศึก ใช้ควบคุมและติดตามการยิงของขีปนาวุธ ใช้ตรวจจับและติดตามจรวดนำวิถี ตลอดจนยานยนต์ต่าง ๆ

3. ด้านวิทยาศาสตร์ ใช้เป็นเครื่องมือวัดระยะทาง หรือ ตรวจจับปรากฏการณ์ต่าง ๆ บนท้องฟ้า และงานด้านดาราศาสตร์

สำหรับในโรงงานนี้ เป็นการศึกษา ออกแบบและพัฒนาระบบเครื่องส่งเรดาร์ที่มีความถี่ 2450 เมกกะเฮิรตซ์ ขึ้นมาใช้งานเอง โดยระบบนี้ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณอาร์เอฟพัลส์ และสายอากาศพาราโบลาแบบกิลิปัส (ELLIPTICALLY CUT PARABOLOIDAL ANTENNA) ที่มีพื้นผิวเป็นซี่ๆ (GRATING) หรือเป็นแผ่นสตริป (STRIP LINE) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษในด้านน้ำหนักเบา และต้านทานลมได้ดีกว่าสายอากาศพาราโบลาแบบอื่น ๆ

อย่างไรก็ตามในโรงงานนี้ จะเป็นการศึกษาเฉพาะ ระบบเครื่องส่งเรดาร์เท่านั้น โดยวิเคราะห์สัญญาณที่ได้โดยการทดลองส่งสัญญาณผ่านสายอากาศ และตรวจสอบสัญญาณที่ส่งออกไป แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปวิเคราะห์ เพื่อหาคุณสมบัติต่างๆ เช่น กำลังงานเอาท์พุทจากเตาอบไมโครเวฟ, แอทเทินของสายอากาศ, บีเอ็มวี, ไซดีโวลบ, บีดีโวลบ, ค่า VSWR และอัตราขยายของสายอากาศ เป็นต้น

ในปฏิทินฉบับนี้ ได้แบ่งเนื้อหาแยกแยะออกเป็นบทต่าง ๆ ดังนี้คือ

ในบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีทั่วไป เช่น ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเรดาร์ หลักการของระบบ

เครื่องส่งเรดาร์ ซึ่งกล่าวถึงหลอดแมกนีตรอน วงจรมอดูเลเตอร์ สายอากาศในระบบ-
เรดาร์ ตัวบ่อนสัญญาณแบบท่อนำคลื่นปลายเปิด นอกจากนี้ยังกล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการ
ออกแบบไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ กับวงจรเทคเตอร์อีกด้วย ส่วนในบทที่ 3 เป็นเรื่องของ
การออกแบบระบบเครื่องส่งเรดาร์ ได้แก่ การออกแบบวงจรมอดูเลเตอร์ การออกแบบ
ระบบสายอากาศแบบพาราโบลา การออกแบบตัวบ่อนสัญญาณ การออกแบบไดเรกชันแนล
คัปเปิลเลอร์และวงจรเทคเตอร์ เป็นต้น ส่วนในบทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบเครื่องส่ง
เรดาร์ ซึ่งได้แก่ การวัดแพทเทิร์นของระบบสายอากาศ การวัดอัตราขยายของสายอากาศ
การทดสอบการทำงานของหลอดแมกนีตรอน และสุดท้ายสำหรับบทที่ 5 เป็นส่วนของการ
วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเรดาร์

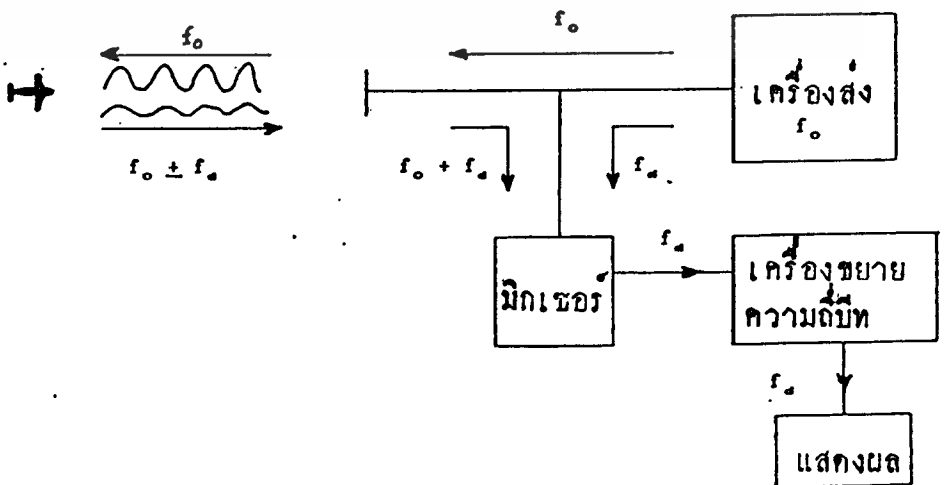
โดยทั่วไปแล้ว เรดาร์นั้นประกอบไปด้วยเครื่องส่ง (TRANSMITTER) เครื่องรับ (RECEIVER) และสายอากาศ (ANTENNA) เป็นส่วนสำคัญ โดยแต่ละส่วนจะทำหน้าที่ดังนี้

1. เครื่องส่ง (TRANSMITTER) ทำหน้าที่ผลิตคลื่นวิทยุ ซึ่งจะเป็นช่วงความถี่ช่วงไหนก็แล้วแต่ว่า จะเป็นเรดาร์ชนิดใด คลื่นที่ผลิตได้จะถูกส่งไปยังสายอากาศเพื่อส่งสัญญาณออกไป

2. เครื่องรับ (RECEIVER) ทำหน้าที่รับสัญญาณคลื่นสะท้อน (ECHO) จากสายอากาศ แล้วนำมาขยายสัญญาณและเข้าขบวนการ เพื่อนำสัญญาณมาแสดงแล้วนำไปวิเคราะห์

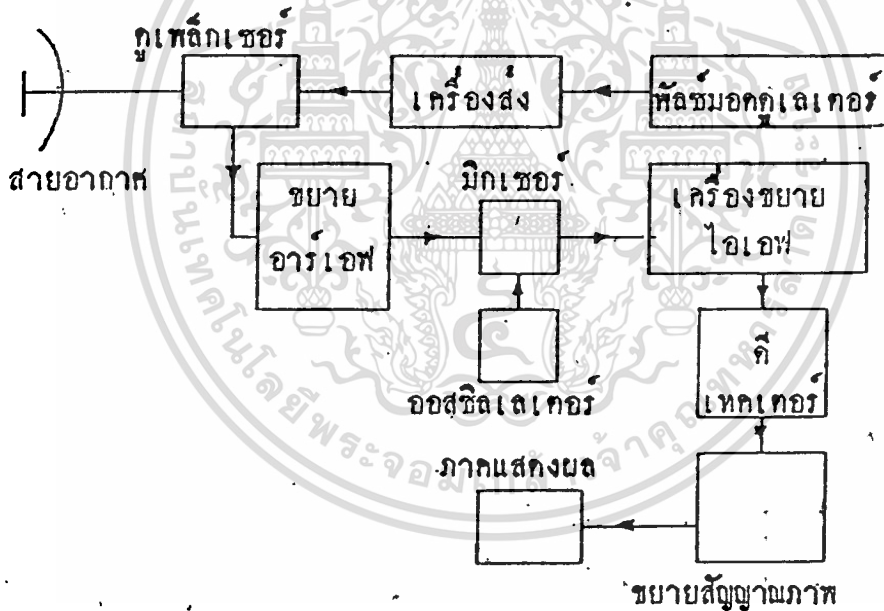
3. สายอากาศ (ANTENNA) ทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่น ออกไปในอากาศ และทำหน้าที่รับสัญญาณสะท้อนกลับมา แล้วผ่านสัญญาณไปยังเครื่องรับ โดยทั่วไปแล้วสายอากาศมักจะมีอัตราขยาย (GAIN) สูง เพื่อที่จะลดขนาดเรดาร์ให้มีกำลังส่งน้อยลง ระบบเรดาร์ที่เป็นที่รู้จักกันและใช้กันในปัจจุบัน แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

ก. เรดาร์ที่ส่งคลื่นแบบต่อเนื่อง (CONTINUOUS WAVE RADAR)



จากรูปที่ 2.1 เครื่องส่งจะผลิตคลื่นที่ยังไม่ถูกมอดดูเลท มีความถี่เท่ากับ f_0 ส่งไปยังสายอากาศเพื่อการกระจายสัญญาณออกไป คลื่นที่ถูกส่งออกไปจะปะทะกับเป้า (TARGET) และเกิดการกระเจิง (SCATTER) คลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมายังสายอากาศรับขณะเดียวกันถ้าเป้ามีความเร็ว v_r ซึ่งเป็นความเร็วสัมพันธ์กับเรดาร์ สัญญาณที่เข้ามาจะถูกเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่รู้จักกันดีเรียกว่า ปรากฏการณ์ของดอปเปลอร์ (DOPPLER EFFECT) เครื่องหมายบวก จะมีความสัมพันธ์กับความถี่ดอปเปลอร์ อธิบายได้ว่า ถ้าระยะทางระหว่างเป้ากับเรดาร์ลดลงความถี่ของสัญญาณรับจะมากกว่าความถี่ของสัญญาณส่ง เครื่องหมายลบแสดงว่า ระยะห่างระหว่างเป้ากับเรดาร์เพิ่มขึ้น ความถี่ของสัญญาณรับจะน้อยกว่าสัญญาณส่ง ดังนั้นจึงได้ว่าความถี่ของสัญญาณรับจะเท่ากับ $f_0 \pm f_d$ สัญญาณนี้ก็จะผ่านสายอากาศเข้าไปในส่วนต่างๆ ของเครื่องรับ

ข. เรดาร์ที่ส่งคลื่นแบบพัลส์ (PULSE RADAR)



รูปที่ 2.2 แสดงเรดาร์ที่ส่งคลื่นแบบพัลส์

จากรูปที่ 2.2 การทำงานของเรดาร์แบบพัลส์ ทำงานโดยวงจรพัลส์มอดดูเลเตอร์ (PULSE MODULATOR) ส่งพัลส์เข้าไปมอดดูเลทกับหลอดแมกนีตรอน ทำให้ได้คลื่นเรดาร์ออกมา ผ่านออกไปยังสายอากาศ ส่วนเครื่องรับก็รับคลื่นสะท้อนกลับมากการทำงานเหมือนกับเครื่องรับวิทยุโดยทั่วไป ซึ่งเป็นแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ สัญญาณขั้นสุดท้ายก็จะถูกนำมาแสดงผล เรดาร์แบบพัลส์จะต่างกับเรดาร์แบบคลื่นต่อเนื่องคือ มีการนำ

สัญญาณไปมอดดูเลทกับหลอดแมกนีตรอน ส่วนหลักการอื่นก็มีส่วนคล้ายกัน

2.2 ทฤษฎีและหลักการของระบบเครื่องส่งเรดาร์

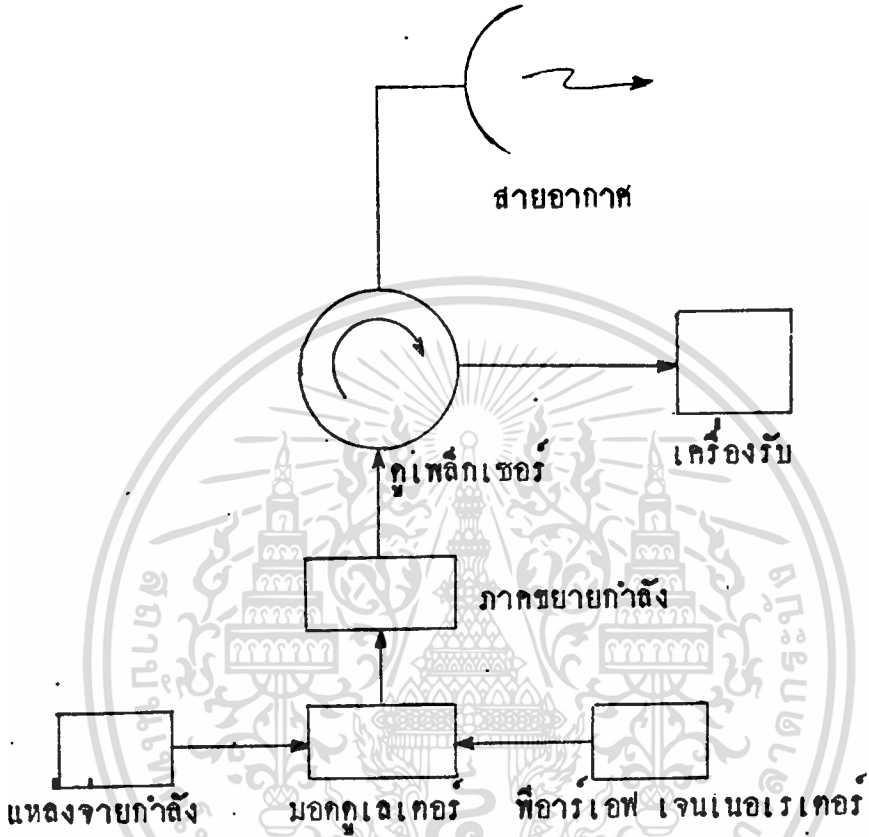
โดยทั่วไปแล้ว ระบบเรดาร์จะมีความสามารถในการใช้งานมากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น พลังงานที่จะสามารถแพร่ออกมาจากแหล่งกำเนิดว่ามีมากน้อยเพียงใด ตลอดจนขนาดของคลื่นและความถี่ที่ใช้ในการออกแบบให้เป็นพิเศษสำหรับระบบเรดาร์ ด้วยเหตุนี้การพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นในการออกแบบระบบการทำงานที่ดีต้องพิจารณาคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- กำลังงานที่วัดได้สูงสุด (PEAK POWER)
- กำลังงานเฉลี่ย (AVERAGE POWER)
- ความกว้างของพัลส์ (PULSE WIDTH)
- ความถี่ของพัลส์ (PULSE REPETITION FREQUENCY)
- แบนด์วิดท์ (BANDWIDTH)
- เสถียรภาพของขนาดและเฟส (AMPLITUDE AND PHASE STABILITY)
- ความเพี้ยน (DISTORTION)
- ประสิทธิภาพ (EFFICIENCY)
- ขนาดและน้ำหนัก
- ราคา (PRICE)
- อายุการใช้งาน
- การสูญเสียของคลื่น
- การปรับแต่ง (TUNABILITY)
- อัตราการขยาย (GAIN)
- ความเชื่อถือและการบำรุงรักษา

จากคุณสมบัติข้างต้น ในการออกแบบระบบเรดาร์ใดๆ มักจะถูกนำมาพิจารณาอยู่เสมอ เพราะเป็นสิ่งที่จะทำให้ระบบเรดาร์มีความสมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น ในการออกแบบเรดาร์ที่ดีต้องทำความเข้าใจกับระบบเครื่องส่งเรดาร์เสียก่อน ดังรูปที่ 2.3

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าพิวาร์เอฟเจเนเรเตอร์ (PRF GENERATOR) จะทำหน้าที่ผลิตสัญญาณพัลส์ แล้วส่งไปมอดดูเลทที่ภาคมอดดูเลเตอร์ ซึ่งสัญญาณพัลส์จะมีลักษณะอย่างไร ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบเรดาร์ชนิดนั้น ที่ภาคมอดดูเลเตอร์นี้จะทำ

หน้าที่นำสัญญาณที่ได้มาทำให้เป็นพัลส์ที่มีโวลเตจสูง (HIGH VOLTAGE PULSE) เพื่อนำไปมอดดูเลทกับคลื่นวิทยุความถี่สูง โดยจะทำการมอดดูเลทในหลอดแมกนีตรอนนั่นเอง แล้วสัญญาณที่ได้จะเข้าสู่ภาคขยายกำลัง เพื่อขยายกำลังอีกครั้ง โดยอาจจะเป็นหลอดที่ดับบลิวทรี



รูปที่ 2.3 แสดงระบบเครื่องส่งเรดาร์อย่างง่าย

(TWT = TRAVELING WAVE TUBE) ก่อนที่จะนำสัญญาณผ่านคูเพิลลิ่งเซอร์ แล้วออกไปสู่สายอากาศเพื่อแพร่คลื่นออกไปในอากาศ

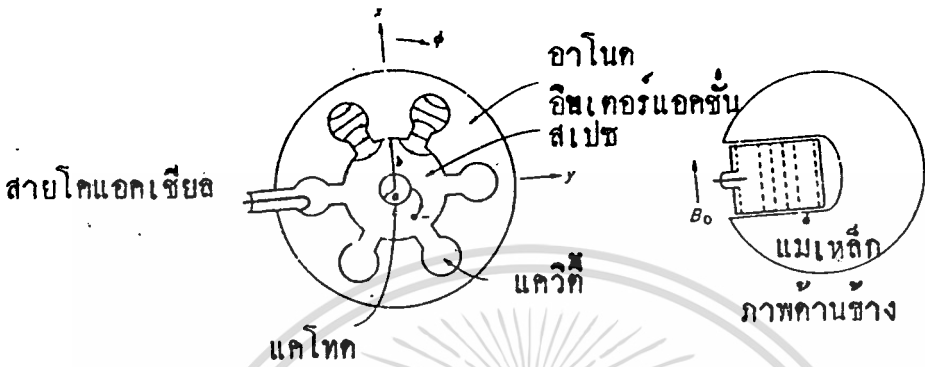
ในเครื่องส่งเรดาร์นั้น ส่วนที่สำคัญที่สุดก็คือ ภาคมอดดูเลเตอร์ เพราะเป็นส่วนที่ชี้คุณสมบัติของเรดาร์ เนื่องจากในวงจรมีแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่สูง เป็นหลอดแมกนีตรอน ดังนั้นก่อนจะทำความเข้าใจกับวงจรมอดดูเลเตอร์ จะขอกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของหลอดแมกนีตรอนเสียก่อน

2.2.1 หลอดแมกนีตรอน

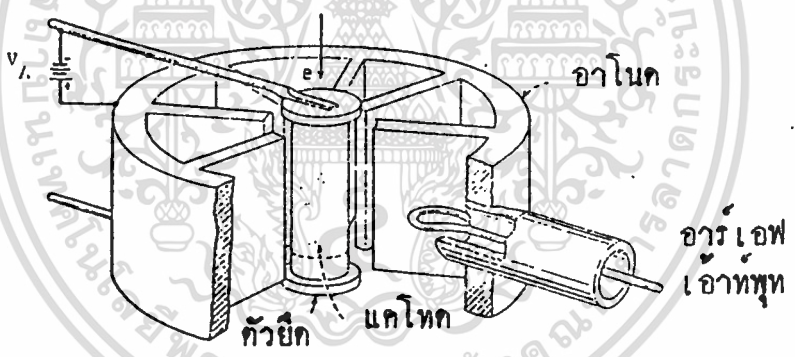
หลอดแมกนีตรอนเป็นหัวใจของเครื่องส่งเรดาร์ เพราะเป็นตัวสร้าง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาให้แก่เครื่องส่ง การทำงานของหลอดแมกนีตรอนนั้นเป็นทฤษฎีใน

ทางฟิสิกส์ ดังนั้นจะขอกล่าวถึงการทำงานพอสังเขปดังนี้ คือ หลอดแมกนีตรอนมีพื้นฐานการทำงานเหมือนหลอดไดโอด คือมีทั้งแคโทด และแอโนด ซึ่งทั้งสองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก และถูกจัดวางอยู่ดังรูปที่ 2.4 ก. และ รูปที่ 2.4 ข.



รูปที่ 2.4 ก. แสดงหลอดแมกนีตรอน



รูปที่ 2.4 ข. แสดงหลอดแมกนีตรอนอีกแบบหนึ่ง

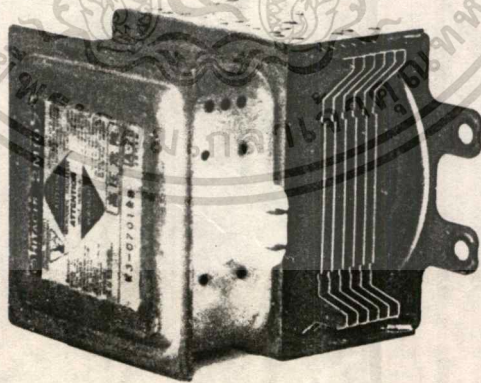
จากรูปที่ 2.4 ก. และรูปที่ 2.4 ข. จะเห็นได้ว่าทรงกระบอกแคโทด จะถูกล้อมรอบโดยแอโนด ที่มีลักษณะเป็นแควิตี เรียกว่าเรโซเนเตอร์แควิตี ซึ่งแควิตีหนึ่งมี คัปปลิงลูป (COUPLING LOOP) ต่ออยู่กับลวดตัวนำภายในของสายโคแอกเซียล เพื่อนำคลื่น อาร์เอฟที่ผลิตขึ้นออกมาจากหลอด ทั้งนี้เพราะว่าการทำงานของหลอดแมกนีตรอน จะทำงาน ภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

การทำงานของหลอดแมกนีตรอน เริ่มจากเมื่อมีพลังงานป้อนมาให้

หลอดแมกนีตรอน จะทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากแคโทด อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้

เข้าหาอาโนดโดยสนามไฟฟ้า แต่การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นเส้นโค้งอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งความโค้งนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก แต่สำหรับการทำงานของหลอดแมกนีตรอนในระบบเรดาร์นั้น สนามแม่เหล็กมีค่าแรงมากทำให้อิเล็กตรอนวิ่งวนกลับไปสู่แคโทด แทนที่จะวิ่งไปยังอาโนด การเดินทางของอิเล็กตรอนในลักษณะนี้จะเกิดการคายพลังงานให้แก่สนามอย่างมาก และเมื่อเดินทางมาถึงแคโทดก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ แล้วจะถูกผลักออกไปอีก เป็นลักษณะเช่นนี้เรื่อยไป การคายพลังงานของอิเล็กตรอนให้กับ แคโทดที่มันวิ่งผ่านนั้น ทำให้เกิดการออสซิลเลชัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากสนามดิซี (DC FIELD) ไปเป็นสนามเอซี (AC FIELD) ตัวกำหนดความถี่ของการออสซิลเลชันก็คือ เรโซเนเตอร์แควิตี นั้นเอง

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอินเตอร์แอคชันสเปซ (INTERACTION-SPACE) ภายใต้อาโนดแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้านั้น จะทำให้เกิดการเพิ่มพลังงานของคลื่นอาร์เอฟในแควิตี ทำให้เกิดการออสซิลเลชัน เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแคโทดไปยังเพลท หรืออาโนดผ่านวงจรแทงค์ ทำให้วงจรแทงค์รับพลังงานจากอิเล็กตรอนแล้วเกิดการออสซิลเลชัน



รูปที่ 2.5 แสดงหลอดแมกนีตรอนในเตาอบไมโครเวฟชนิดหนึ่ง

สำหรับในโครงงานนี้ หลอดแมกนีตรอนที่ใช้ เป็นหลอดแมกนีตรอนที่

ออกแบบมาใช้กับงานด้านการให้ความร้อนและพลังงานคือ เตาอบไมโครเวฟ ดังนั้นกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

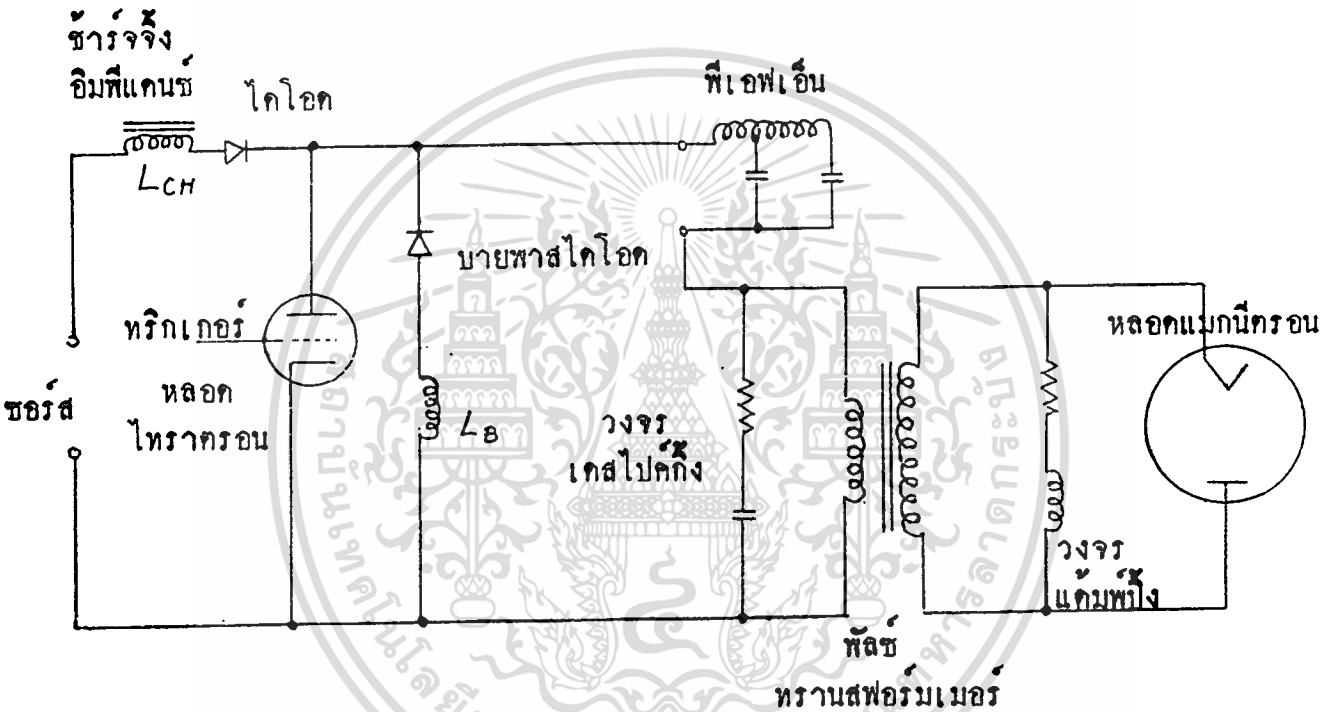
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าที่ใช้จึงค่อนข้างสูงประมาณ 1,000 วัตต์ ให้คลื่นอาร์เอฟที่มีพลังงานประมาณ 500 วัตต์ ดังนั้นด้วยเหตุที่ว่า หลอดแมกนีตรอนแต่ละแบบแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติการทำงาน ในช่วงโวลเตจ และกระแสที่แตกต่างกัน และก็มีช่วงที่เหมาะสมในแต่ละแบบอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงได้ทดสอบการทำงานของหลอดแมกนีตรอนไว้ด้วย ซึ่งจะอยู่ในบทที่ 3 ต่อไป

2.2.2 วงจรมอดดูเลเตอร์ (MODULATOR CIRCUIT)

วงจรมอดดูเลเตอร์ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป เป็นวงจรมอดดูเลเตอร์แบบ

ไลน์ (LINE TYPE MODULATOR) ซึ่งมีหลักการดังนี้



รูปที่ 2.6 แสดงวงจรมอดดูเลเตอร์แบบไลน์ อย่างง่าย

วงจรมอดดูเลเตอร์แบบไลน์ (PULSE FORMING NETWORK ; PFN) หรือดีเลย์ไลน์ (DELAY LINE) จะสะสมพลังงาน ซึ่งจะสร้างพัลส์รูปสี่เหลี่ยมตามจังหวะการทำงานของสวิตช์ โดยรูปร่างของพัลส์จะถูกกำหนดโดย PFN แต่เนื่องจากขอบข้างของพัลส์ถูกกำหนดโดยการคายประจุของ PFN ไปยังโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำให้ขอบข้างของพัลส์ไม่ตกลงมาทันที และเป็นกรยากที่จะทำให้ได้พัลส์ตามต้องการ

L_{en} และ C ในวงจร PFN รวมกันเป็นวงจรเรโซแนนท์ ซึ่งความถี่เรโซแนนท์ คือ

$$f_o = 1 / (2\pi \sqrt{L_{en} C})$$

สำหรับชาร์จิ้งไดโอด ที่ต่ออนุกรมอยู่กับ $L_{\Sigma n}$ จะเป็นตัวที่ทำให้ค่าความถี่ของพัลส์ (PULSE REPETITION FREQUENCY) มีค่าต่ำกว่าค่าความถี่เรโซแนนท์ f_0 ทั้งนี้เพราะไดโอดจะเป็นตัวคงค่าโวลเตจสูงสุด และเป็นตัวป้องกันการคายประจุจากดีเลย์ไลน์กลับมายังแหล่งกำเนิดจนกว่าหลอดไทรออดรอน จะถูกทริก

บายพาสไดโอด และชดลวด L_p ที่ต่อขนานอยู่กับหลอดไทรออดรอน จะเป็นตัวรับพลังงานจากประจุที่ยังหลงเหลืออยู่ใน C อันเนื่องมาจากการไม่แม็ทซ์ซึ่งประจุที่ยังหลงเหลือเหล่านี้จะทำให้โวลเตจมีค่าสูงขึ้นในทุกๆ ไซเคิลของการชาร์จ และสูงขึ้นเรื่อยๆ จนอาจทำให้ค่าโวลเตจรวม มีค่าเกินกว่าที่หลอดไทรออดรอนจะทำงานได้ นอกจากนี้การไม่แม็ทซ์ระหว่าง PFN กับหลอดแมกนีตรอน จะเป็นผลทำให้เกิดสไปค์ (SPIKE) ขึ้นที่ขอบขาขึ้นของพัลส์ ซึ่งก็สามารถแก้ไขได้โดยการใช่วงจรลดสไปค์ (DESPIKING) สำหรับวงจรแด้มป์บิง (DAMPING NETWORK) จะช่วยลดขอบขาลงของพัลส์ และช่วยป้องกันการรบกวนจากพัลส์ลูกที่ตามมา

สำหรับในโครงการนี้ ได้พยายามทดลองสร้างวงจรมอดดูเลเตอร์เพื่อนำมาใช้งานกับหลอดแมกนีตรอนของเตาอบไมโครเวฟ ปรากฏว่า วงจรที่ได้มีคุณสมบัติต่างๆ ไม่เหมาะสมกับหลอดแมกนีตรอนตัวนี้ ซึ่งจะได้อกล่าวไว้ในบทสรุปและวิจารณ์ ด้วยเหตุผลข้างต้น ในโครงการนี้จึงได้ทำการทดสอบสัญญาณของหลอดแมกนีตรอนที่ได้จากเตาอบดูว่ามีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งจะได้อกล่าวไว้ในบทที่ 3

2.2.3 สายอากาศในระบบเรดาร์

ในระบบเรดาร์ทั่วๆ ไปนั้น สายอากาศถือว่าเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่ง เพราะสายอากาศแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของมันเอง และมีความเหมาะสมที่จะใช้ในงานในแต่ละแบบ การเลือกใช้สายอากาศในระบบเรดาร์ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยทั่วไปแล้วสายอากาศในระบบเรดาร์จะมีบีมเป็นรูปพัด (FAN BEAM) นั่นคือมีความกว้างของบีมในแนวราบน้อย ในขณะที่มีความกว้างของบีมในแนวตั้งมีค่ามาก ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะเรดาร์มีความสามารถในการแยกแยะเป้าที่มุมอะซิมุท ได้ละเอียดที่สุด เพื่อจะได้สามารถบอกตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง

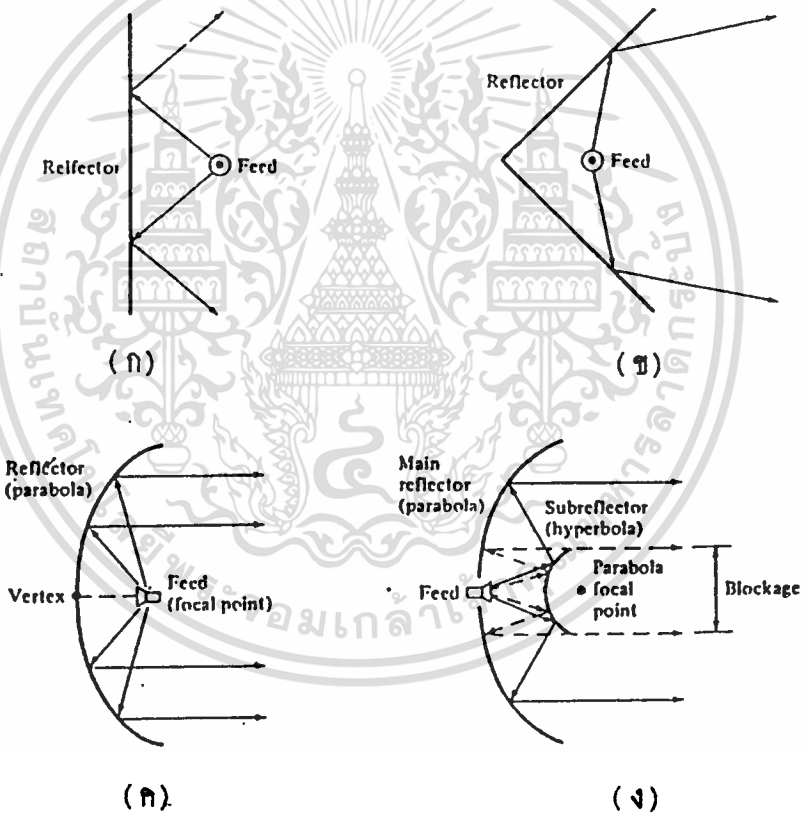
ในโครงการนี้ได้ออกแบบสายอากาศตัวสะท้อน (REFLECTOR ANTENNA) เป็นแบบ ELLIPTICAL GRATING CUT PARABOLOIDAL ANTENNA โดยมีตัวบ่อนสัญญาณ

(FEEDER) เป็นท่อนำคลื่นปลายเปิด (OPEN - ENDED WAVEGUIDE) ก่อนอื่นจะขอกล่าว

ถึงคุณลักษณะของสายอากาศแบบตัวสะท้อน โดยทั่วไปก่อน

สายอากาศแบบสะท้อนคลื่น (REFLECTOR ANTENNA)

เป็นสายอากาศที่ถือกำเนิดในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งถูกใช้มากในงานเรดาร์ทางทหาร จนกระทั่งมาแพร่หลายในงานด้านพลเรือน อาทิเช่น ด้านการสื่อสาร ไมโครเวฟ หรือดาวเทียม คุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้มีหลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับรูปร่าง และขนาดของแผ่นสะท้อน ตลอดจนระบบตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ สายอากาศแบบตัวสะท้อนคลื่นนี้แบ่งเป็น ประเภทต่างๆ ตามลักษณะรูปร่าง ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 แสดงสายอากาศสะท้อนคลื่นแบบต่างๆ

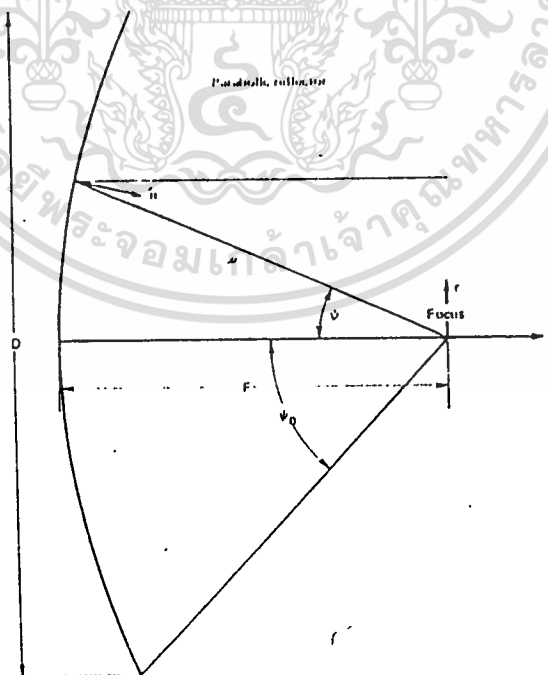
ก. ตัวสะท้อนคลื่นแบบระนาบตรง (PLANE REFLECTOR) เป็นตัวสะท้อนคลื่นที่มีโครงสร้างซึ่งทำได้ง่ายที่สุดในบรรดาตัวสะท้อนคลื่นทั้งหมด ดูได้จากรูปที่ 2.7 ระนาบของแผ่นสะท้อนเป็นเส้นตรง คลื่นที่เดินทางจากแหล่งกำเนิด ไปกระทบระนาบก็จะ

สะท้อนไปตามกฎของสเนลล์ คือมุมตกกระทบจะเท่ากับมุมสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ตัวสะท้อนแบบคอร์เนอร์เนอร์ (CORNER REFLECTOR) เป็นตัวสะท้อนคลื่นได้ดีกว่าแบบระนาบตรง เพราะสามารถทำให้คลื่นหรือพลังงานสะท้อนกลับไปในทางเดียวกันกับคลื่นที่ตกกระทบ ดังเห็นได้จากรูปที่ 2.7 ข. ทำให้ความเข้มของสนามในด้านหน้ามีมากกว่าคลื่นที่สะท้อนจากแผ่นสะท้อนระนาบตรง แผ่นสะท้อนแบบนี้สามารถสร้างได้ง่าย ส่วนใหญ่ใช้ในงานสื่อสารไมโครเวฟ โดยใช้เป็นตัวสะท้อนแบบพาสซีฟ โดยเฉพาะที่มุม 90° จะทำให้สะท้อนคลื่นกลับไปได้ดี

ค. ตัวสะท้อนแบบพาราโบลา (PARABOLIC REFLECTOR) เป็นตัวสะท้อนที่ใช้ในงานได้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีโครงสร้างที่ทำให้มีคุณสมบัติในการสะท้อนที่ดี ทำให้คลื่นที่ตกกระทบที่ผิวตัวสะท้อน สะท้อนออกไปเป็นแบบรังสีขนาน เมื่อแหล่งกำเนิดอยู่ที่จุดโฟกัสของพาราโบลา ดูจากรูปที่ 2.7 ค. อย่างไรก็ตามตัวสะท้อนแบบนี้แบ่งได้เป็น 2 แบบ ตามลักษณะการวางตำแหน่งของตัวบ่อนสัญญาณ แบบแรกเป็นแบบบ่อนสัญญาณข้างหน้า (FRONT FEED) แบบที่สองเป็นการบ่อนสัญญาณแบบคาสซีเกรน (CASSEGRAIN FEED) ดังรูปที่ 2.7 ง. ซึ่งมีแผ่นสะท้อนถึง 2 ตัว การจะบ่อนสัญญาณแบบใดก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 2.8 แสดงรูปพาราโบลานแกนโพลาไรซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงงานนี้ ได้ออกแบบตัวสะท้อนคลื่นแบบพาราโบลา ซึ่งเป็นแบบ ELLIPTICALLY GRATING CUT PARABOLOIDAL ANTENNA ซึ่งมีข้อได้เปรียบสายอากาศพาราโบลาแบบอื่น ดังนี้

1. น้ำหนักเบา
2. ทนแรงลมได้ดี
3. บีมเป็นรูปพัด
4. ค่าใช้จ่ายถูก

หลักการออกแบบสายอากาศแบบนี้ ก็มีลักษณะคล้ายๆ กับการออกแบบตัวสะท้อนแบบพาราโบลาเต็มใบทั่วไป แต่รูปร่างนั้นก็ยังมีปัจจัยอื่นเป็นตัวกำหนด ในการออกแบบใช้แกนโฟลาร์ ซึ่งสะดวกกว่าแบบโคออร์ดิเนต โดยที่

$$\rho = F / \cos^2(\psi / 2) \quad \dots(2.1)$$

- เมื่อ ρ เป็นระยะห่างจากจุดโฟกัสไปยังแกนพาราโบลา
- F เป็นความยาวโฟกัส
- ψ เป็นมุมที่กำกับแกนโฟกัส

ในการออกแบบตัวสะท้อนแบบพาราโบลานั้นต้องกำหนด F/D หรืออัตราส่วนระหว่างความยาวโฟกัสกับความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของพาราโบลาซึ่งกำหนดได้จาก

$$F = \frac{D}{4} \cot(\psi / 2) \quad \dots(2.2)$$

- เมื่อ D เป็นความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของพาราโบลา
- ψ เป็นมุมสับเทินด์ (SUBTEND ANGLE) ซึ่งเป็นมุมที่วัดจากแกนโฟกัสไปยังขอบตัวสะท้อนของพาราโบลา มุมนี้ยังมีความสัมพันธ์กับความกว้างบีมของตัวบ่อนสัญญาณอีกด้วย ซึ่งได้กล่าวไว้ตอนที่ 3

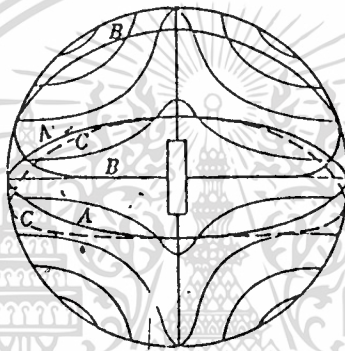
สำหรับการออกแบบตัวสะท้อนแบบพาราโบลาไม่เต็มใบนั้น ก็สามารถกระทำได้ว่า ต้องการรูปร่างแบบใด ในโครงงานนี้มีรูปร่างคล้ายวงรี ออกแบบได้โดยหา

เอกสารนี้มีความยาวของแกนหลัก และแกนรอง ซึ่งความยาวของแกนหลักนั้น เท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลาง ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแกนของตัวพาราโบลานั่นเอง ส่วนแกนรอนนั้นหาได้จากความสัมพันธ์ของความกว้างบีมของตัวบ่อนสัญญาณ ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

2.2.4 ตัวสะท้อนที่มีพื้นผิวเป็นซี่ (GRATING)

ในโครงการนี้ ได้ออกแบบตัวสะท้อนคลื่นแบบเป็นซี่ ซึ่งใช้หลักการพิจารณาช่องว่างระหว่างแผ่นสตริป (STRIP LINE) ที่เหมาะสมทำให้คุณสมบัติใกล้เคียงกับพื้นผิวบิด ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้สามารถลดน้ำหนัก และลดแรงต้านลมของตัวสะท้อนคลื่นลงได้ แต่ข้อเสียคือ ตัวสะท้อนแบบนี้มีความไวในเรื่องโพลาไรเซชันมาก ดังนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงหลักใหญ่ 2 อย่างดังนี้



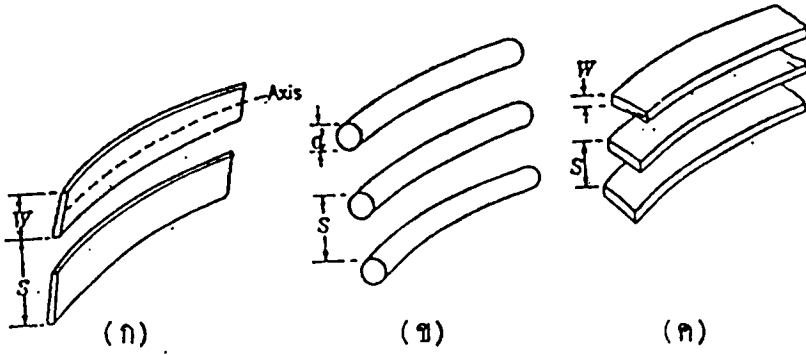
รูปที่ 2.9 แสดงการเลือกรูปร่างของพาราโบลานี้เติมใบแบบต่างๆ (CUT PARABOLOID)

- ก. สนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบ ต้องอยู่ในระนาบที่กำหนดโดยรังสีตกกระทบบกับแกนของแผ่นเกรตติ้งหรืออีกนัยหนึ่ง แผ่นเกรตติ้งต้องวางอยู่แนวเดียวกับโพลาไรซ์ของคลื่น
 - ข. ระยะห่างของแผ่นเกรตติ้ง วัดจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางจะน้อยกว่า $\lambda / (1 + \sin \theta)$ เมื่อ θ เป็นมุมระหว่างคลื่นตกกระทบบกับเส้นปกติซึ่งตั้งฉากกับแผ่นสะท้อน
- แผ่นเกรตติ้งที่ใช้กันมีอยู่ 3 แบบ ดังนี้

- a. แผ่นยาวบาง (FLAT STRIP FLAT WISE) ดังรูปที่ 2.10 ก.
- b. ท่อกลมยาว (ROUND BAR) ดังรูปที่ 2.10 ข.
- c. แผ่นยาวหนา (FLAT STRIP EDGE WISE) ดังรูปที่ 2.10 ค.

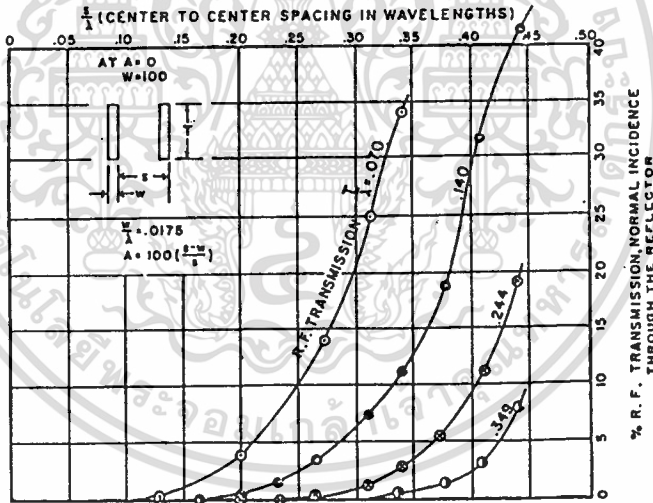
ในโครงการนี้เลือกแผ่นเกรตติ้งแบบแผ่นยาวบาง เพราะสะดวกในการขึ้นเป็นพาราโบล่า อย่างไรก็ตามในการออกแบบต้องคำนึงถึงความหนาของแผ่นแต่ละแผ่น

ด้วยว่ามีความหนาน้อยเพียงใด เพราะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพของแผ่นสะท้อน
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิอวกาศ (สอภอ.) หากมีการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงแผ่นเกรตติงแบบต่างๆ

เปลี่ยนแปลงด้วยเหตุผลที่ว่า กำลังของคลื่นส่งจะเกิดการสูญเสียในแผ่นสะท้อนไปบางส่วน ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นสกริป ดังจะเห็นจากรูปที่ 2.11 อย่างไรก็ตามกราฟนี้เป็นกราฟที่เหมาะสมและทดลองกับแผ่นเกรตติงแบนแผ่นยาวหนา ในโครงการจริงถือเป็นกราฟอ้างอิง เพื่อช่วยในการออกแบบ โดยละความสนใจในเรื่องความหนาไป



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงการสูญเสียพลังงานในตัวสะท้อนแบบเกรตติง

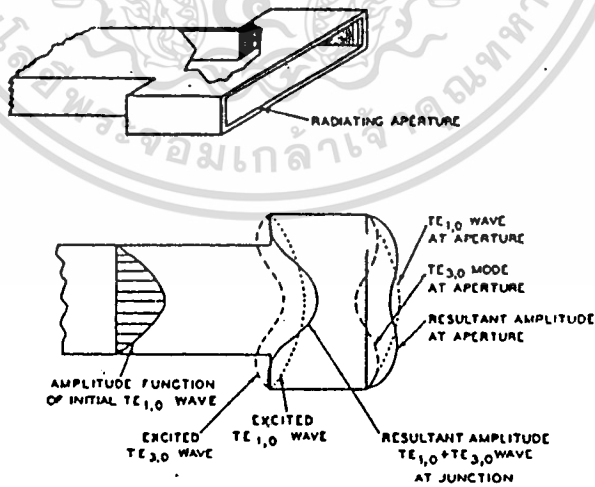
2.2.5 ตัวบ่อนสัญญาณแบบท่อนำคลื่นปลายเปิด

ระบบบ่อนสัญญาณ ในสายอากาศแบบแผ่นสะท้อนคลื่น จะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่น เพื่อให้คลื่นไปตกกระทบบนพื้นผิวของตัวสะท้อน ระบบสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลานั้น มีวิธีการบ่อนสัญญาณได้หลายวิธี เช่น ใช้ฮอร์นแบบปิรามิด, (PYRAMIDAL HORN) ไดโพล หรือ ฮอร์นแบบกรวย (CONICAL HORN) ฯลฯ ซึ่งแต่ละแบบจะมีแพทเทิร์นเป็นรูปพัด มีความกว้างของแพทเทิร์นในแนวตั้งกว้าง และความกว้างของแพทเทิร์นใน

แนวราบแคบ ซึ่งเป็นลักษณะของบีมที่ใช้ในงานเรดาร์

ท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด เป็นอีกวิธีหนึ่งในการบ่อนสัญญาณให้กับตัวสะท้อนแบบพาราโบลา ท่อนำคลื่นแบบนี้มีคุณสมบัติการกระจายคลื่นขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง ตลอดจนโหมด ของการเดินทางของคลื่นในท่อนำคลื่น ท่อนำคลื่นแบบ $TE_{1,0}$ นั้น ได้ถูกใช้โดยทั่วไป โดยคุณลักษณะพิเศษทางด้านคุณสมบัติของเฟส ที่ปากของอเพอร์เจอร์ (APERTURE) ค่อนข้างดีกว่าแบบอื่น ตลอดจนการควบคุมไดเรกทิวิตี (DIRECTIVITY) ก็ทำได้ง่าย และก็เหมาะสมกับสายอากาศแบบพาราโบลาที่มีรูปร่างไม่เต็มใบ

ในโครงการนี้ ได้ออกแบบท่อนำคลื่นแบบสองโหมด ซึ่งมีคลื่นโหมด $TE_{1,0}$ และ $TE_{3,0}$ ลักษณะของการออกแบบก็เป็นการนำเอาท่อนำคลื่นโหมด $TE_{1,0}$ กับท่อนำคลื่นโหมด $TE_{3,0}$ มาต่อกัน จากทฤษฎีพบว่าท่อนำคลื่นโหมด $TE_{3,0}$ จะให้คลื่นออกมาถึง 3 โหมด คือ $TE_{1,0}$ กับ $TE_{3,0}$ ส่วน $TE_{2,0}$ ไม่เกิดขึ้น เพราะการสมมาตรที่จุดศูนย์กลางของระนาบจุดเด่นของท่อนำคลื่นแบบนี้คือ คลื่นทั้ง 2 โหมดมารวมกันที่ปากเพอร์เจอร์ ทำให้แอมพลิจูดของคลื่นสม่าเสมอ โดยอาศัยหลักการที่ว่าคลื่นทั้งสองเดินทางในท่อนำคลื่น ด้วยความเร็วที่ต่างกันตาม ระยะทางของความยาวท่อนำคลื่น และเมื่อเฟสมีความแตกต่างกัน 180 องศา ก็จะทำให้ คลื่นทั้งสองรวมกันเป็นสนามที่มีเฟสเดียวกัน (UNIPHASE FIELD) ตรงปากอเพอร์เจอร์พอดี ดังรูปได้จากรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงท่อนำคลื่นแบบสองโหมด

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของคลื่นทั้งสอง สามารถหาได้

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อแจกจ่ายแก่บุคลากรในหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานที่ผิด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{90} / A_{10} = \{ (b^2 - 1) * \cos \frac{3\pi b}{2} \} / \{ (9b^2 - 1) * \cos \frac{\pi b}{2} \} \quad \dots (2.3)$$

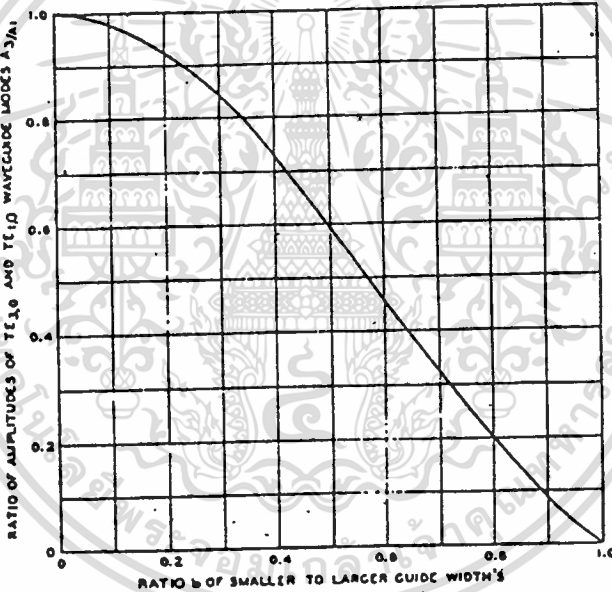
เมื่อ A_{90} เป็นค่าแอมพลิจูดของ TE_{90}

A_{10} เป็นค่าแอมพลิจูดของ TE_{10}

b เป็นอัตราส่วนระหว่างความกว้างของท่อนำคลื่นที่แคบกว่า
ต่อท่อนำคลื่นที่กว้างกว่า

จากสมการที่ 2.3 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของโหมดทั้ง

สองกับอัตราส่วน b



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง A_{90} / A_{10} กับอัตราส่วน b

เพื่อที่ว่าเฟสของโหมดทั้งสอง จะมีความแตกต่างกัน 180 องศา

ดังนั้นจึงหาได้จากความยาวที่เหมาะสมโดยหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$L / \lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 / 2(\lambda_1 - \lambda_2) \quad \dots (2.4)$$

- เมื่อ L เป็นระยะทางที่คลื่นทั้งสองเดินทางต่างกัน 180 องศา (เมตร)
- λ เป็นความยาวคลื่นในอากาศ (เมตร)
- λ_1, λ_2 เป็นความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (เมตร)

จากสมการที่ (2.4) สามารถทำให้อยู่ในรูปอย่างง่าย ดังนี้

$$L / \lambda = 1 / \{ \sqrt{4 - (3\lambda/W)^2} \} - \{ \sqrt{4 - (\lambda/W)^2} \} \dots (2.5)$$

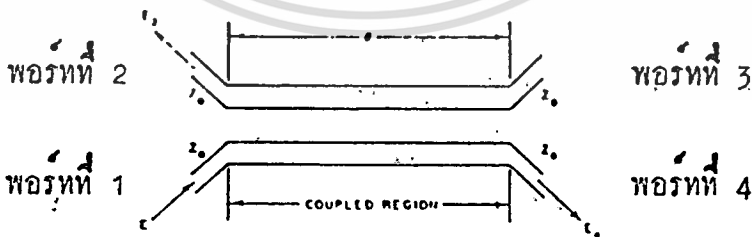
เมื่อ W คือ ความกว้างของท่อนำคลื่น TE_{10}

2.2.6 โดเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ (DIRECTIONAL COUPLER)

คัปเปิลเลอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นแบบ SHIELD COUPLED-STRIP TRANSMISSION LINE คือเป็นแผ่นโลหะ 2 แผ่น วางขนานกันอยู่ดังรูปที่ 2.14

จากรูปจะเห็นได้ว่ามีด้วยกัน 4 พอร์ต จำแนกได้ดังนี้

- พอร์ตที่ 1 เป็นพอร์ตอินพุท (INPUT PORT)
- พอร์ตที่ 4 เป็นพอร์ตเอาท์พุท (OUTPUT PORT)
- พอร์ตที่ 2 เป็นพอร์ตคัปปลิงอินพุท (INPUT-COUPLING PORT)
- พอร์ตที่ 3 เป็นพอร์ตคัปปลิงเอาท์พุท (OUTPUT-COUPLING PORT)



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของคัปเปิลเลอร์

ถ้ากำหนดให้พลังงานที่เข้าไปยังพอร์ตที่ 1 เป็น P_1 และพลังงานที่ออกจากพอร์ตที่ 2, 3 และ 4 เป็น P_2, P_3 และ P_4 ตามลำดับแล้วจะ

เอกสารได้ว่า ค่าคัปปลิงและค่าโดเรคทิวิตีของคัปเปิลเลอร์เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{คํบปลั่ง} = 10 \cdot \log (P_1 / P_2) \quad \dots(2.6)$$

$$\text{ไคเรคตริวิตี้} = 10 \cdot \log (P_2 / P_3) \quad \dots(2.7)$$

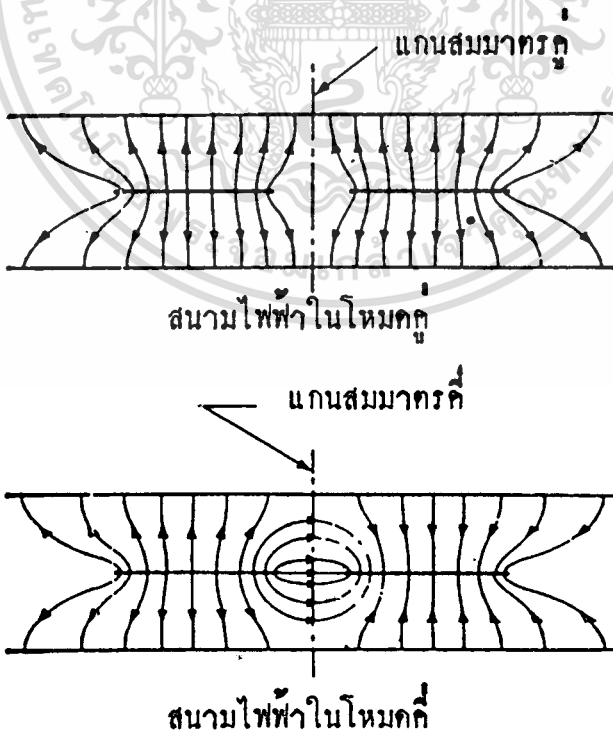
ใการออกแบคํบเปลลอร์ สมการทใซมดั่งนั้

$$Z_{oo} \cdot Z_{oo} = (Z_o)^2 \quad \dots(2.8)$$

$$E_2 / E = (j \cdot k \cdot \sin \theta) / \{ \sqrt{(1-k^2)} \cdot \cos \theta + j \cdot \sin \theta \} \quad \dots(2.9)$$

$$E_4 / E = \sqrt{(1-k^2)} / \{ \sqrt{(1-k^2)} \cdot \cos \theta + j \cdot \sin \theta \} \quad \dots(2.10)$$

$$k = \{ (Z_{oo} / Z_{oo}) - 1 \} / \{ (Z_{oo} / Z_{oo}) + 1 \} \quad \dots(2.11)$$



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการกระจายของคลื่นใน โหมคคู้และ โหมคคี่

- เมื่อ Z_{oo} เป็นคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ในโหมดคี่
(ODD-MODE CHARACTERSTIC IMPEDANCE)
- Z_{oe} เป็นคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ในโหมดคู่
(EVEN-MODE CHARACTERSTIC IMPEDANCE)
- k เป็นตัวกำหนดค่าคัปปลิง (COUPLING FACTOR)
- θ เป็นความยาวของแผ่นโลหะ

จากสมการที่ (2.9) เพื่อที่จะให้ E_2/E_1 มีค่ามากที่สุด

$\sin \theta = 1$
 $\theta = \pi/2$ (ทางไฟฟ้า)
 นั่นคือความยาวของแผ่นโลหะ $= \theta$
 $= \lambda/4$ ของความถี่คลื่นใช้งาน

จากสมการที่ (2.8)

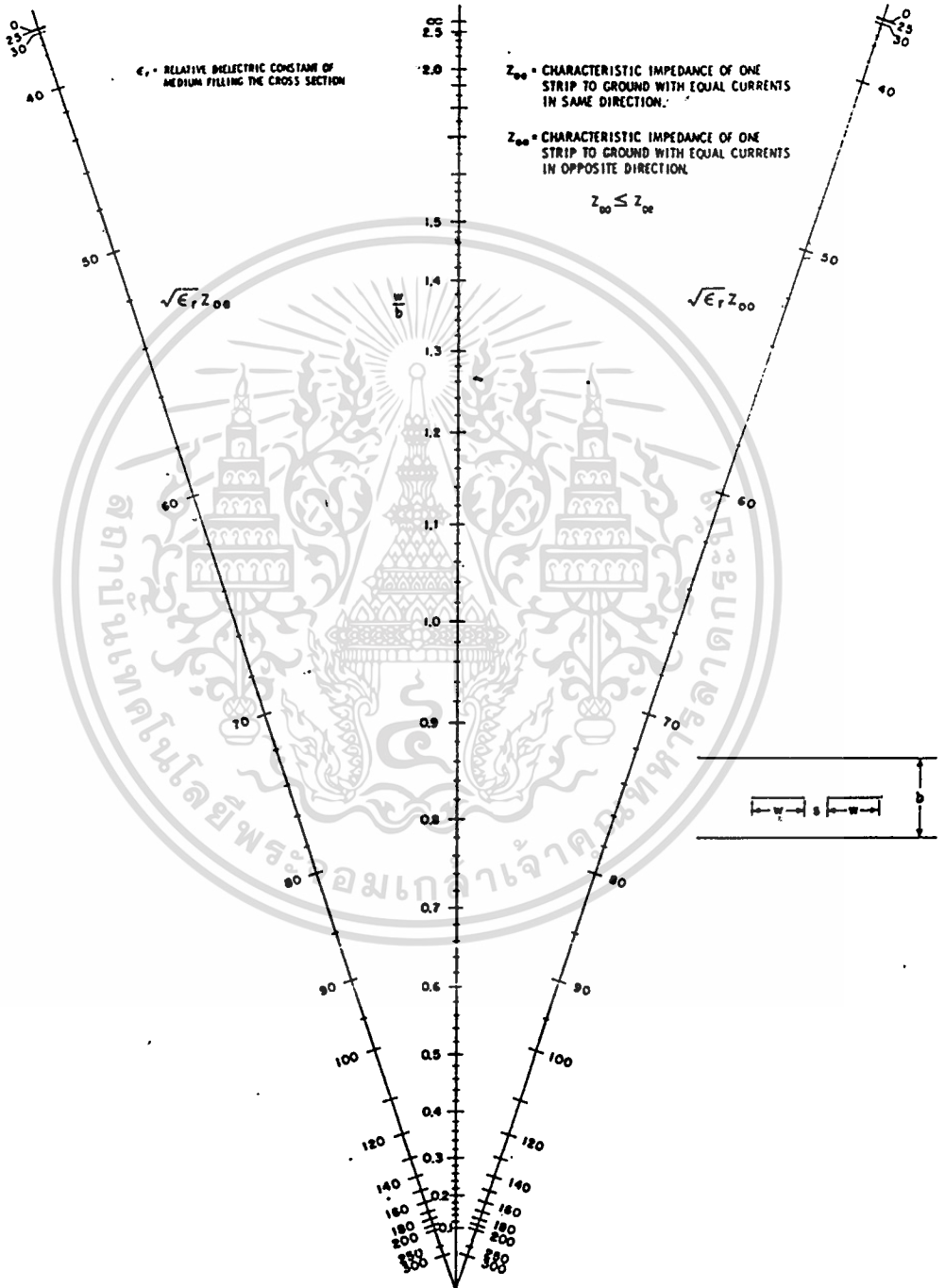
$$Z_{oe} = (Z_o)^2 / Z_{oo}$$

แทนลงในสมการที่ (2.11) จะได้

$$Z_{oo} = Z_o \cdot \sqrt{(1 - k)/(1 + k)} \quad \dots(2.12)$$

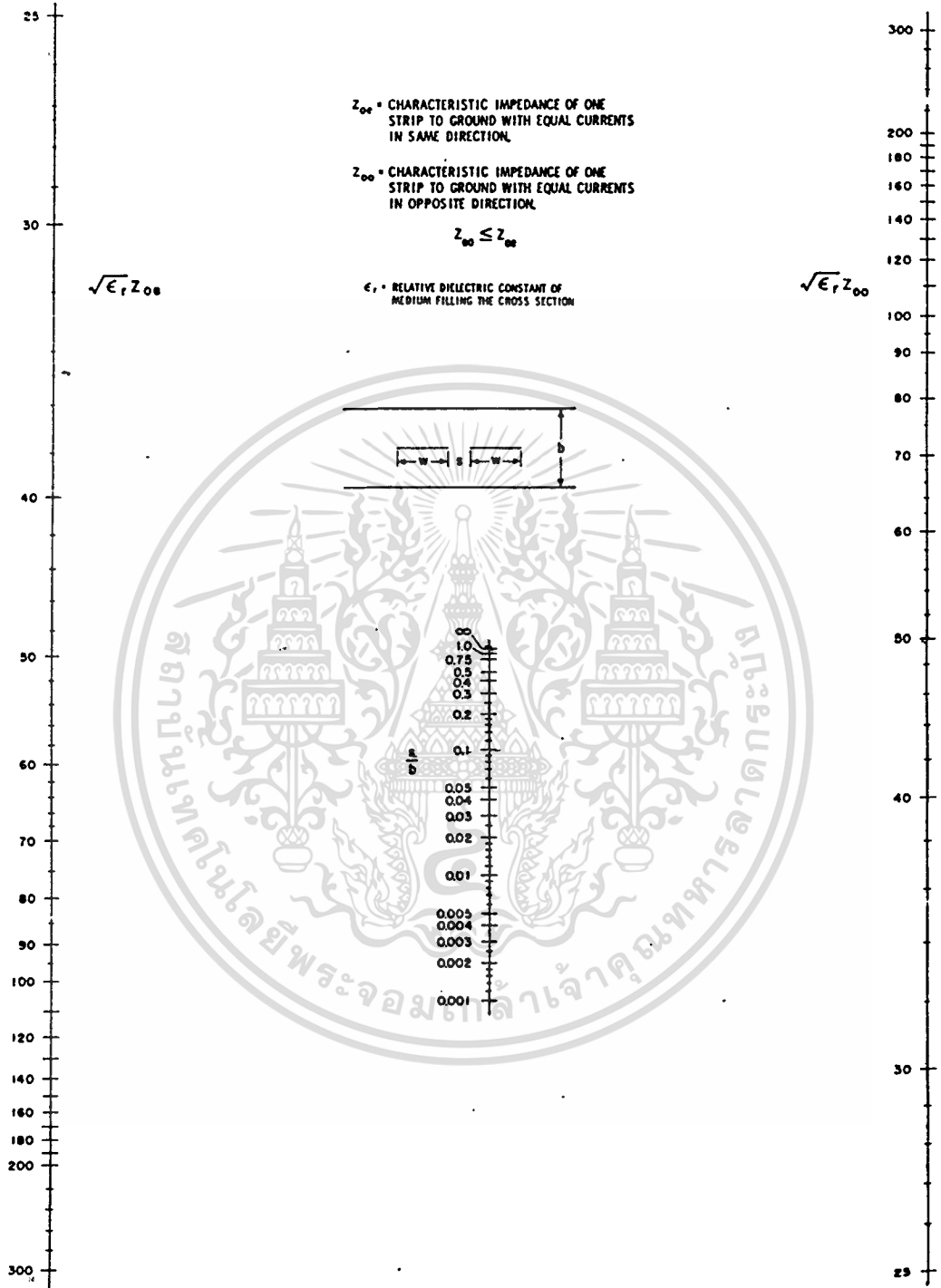
เช่นเดียวกัน เมื่อแทนค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ของมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ก. แสดงการหาค่า w/b จากโนโมแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการใช้งานที่มิชอบหากท่านใดได้พบโดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ข. แสดงการหาค่า s/b จากโนโมแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.11) จะได้

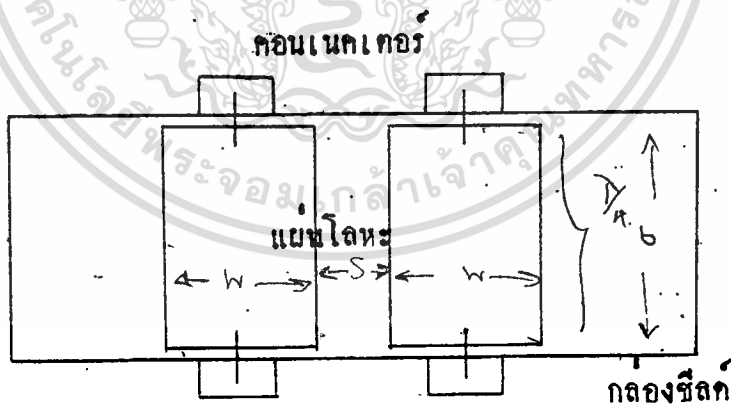
$$Z_{00} = Z_0 \cdot \sqrt{(1+k)/(1-k)} \quad \dots(2.13)$$

เมื่อแทนค่า k ลงในสมการที่ (2.12) และ (2.13) ก็จะได้ค่า Z_{00} และ Z_{00} ตามลำดับ จากค่า Z_{00} และ Z_{00} นำไปใช้หาขนาดความกว้าง และความห่างของแผ่นโลหะทั้งสองได้จาก รูปที่ 2.16 ก. และ รูปที่ 2.17 ข. โดยที่ ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (RELATIVE DIELECTRIC CONSTANT) ของตัวกลางระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง ซึ่งในที่นี้คืออากาศ ($\epsilon_r = 1$)

จากค่า w/b และ s/b ที่ได้จากรูปทั้งสองเมื่อกำหนดให้ b คงที่ ก็จะได้ค่า w และ s ตามลำดับ

จากค่า θ , w , s และ b ก็จะสามารถสร้างคัปเปิลอร์ ที่มีค่าคัปปลิ่งตามที่กำหนดได้

หมายเหตุ. แผ่นโลหะทั้งสอง ต้องตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม และจัดวางดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงการจัดวางแผ่นโลหะ

ทั้งนี้เพื่อเหตุผลทางการแม็ทซ์ซิ่ง (MATCHING) เพราะจากการทดลองตัดโลหะเป็นรูปลักษณะต่างๆ และจัดวางในลักษณะต่างๆ กันพบว่าจะทำให้ไม่แม็ทซ์ซิ่ง โดยมี

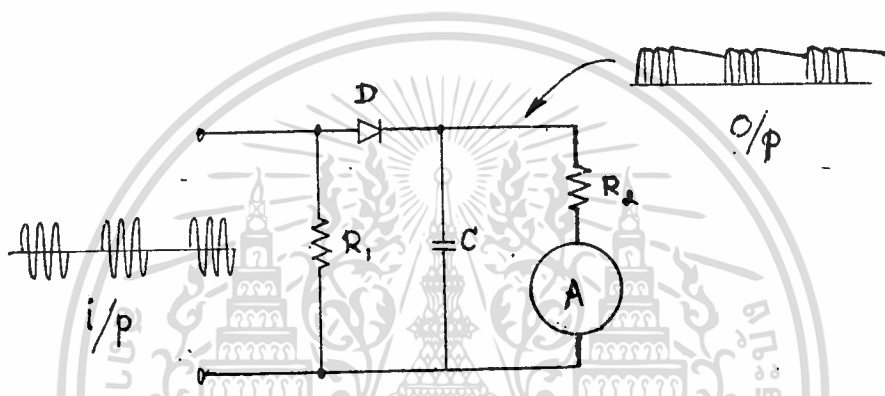
$$\text{ค่า } V_{SWR} > 3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 วงจรดีเทคเตอร์ (DETECTOR CIRCUIT)

วงจรดีเทคเตอร์ที่ใช้มีลักษณะเดียวกันกับวงจรเอเอ็ม ดีมอดคูเลเตอร์ หรือเอ็เวิลอปปี้ดีเทคเตอร์ (ENVELOPE DETECTOR) ซึ่งประกอบด้วย ไดโอด ตัวต้านทาน คาปาซิเตอร์ และแอมป์มิเตอร์ ดังรูปที่ 2.18

การทำงานของวงจรเป็นดังนี้ คือ เมื่อมีคลื่นความถี่อินพุตเข้ามา คลื่นความถี่นี้จะถูกขลิบให้เหลือแต่สัญญาณครึ่งบวกเมื่อผ่านไดโอด จากนั้นคาปาซิเตอร์จะทำการชาร์จ สลับกับดิสชาร์จ ทำให้รูปร่างของเอาต์พุตที่ได้ในตอนสุดท้าย มีค่าเป็นไฟกระแสตรง ดังรูปที่ 2.18 และค่าไฟกระแสตรงนี้จะแสดงผลออกมาทางแอมป์มิเตอร์



รูปที่ 2.18 แสดงวงจรดีเทคเตอร์

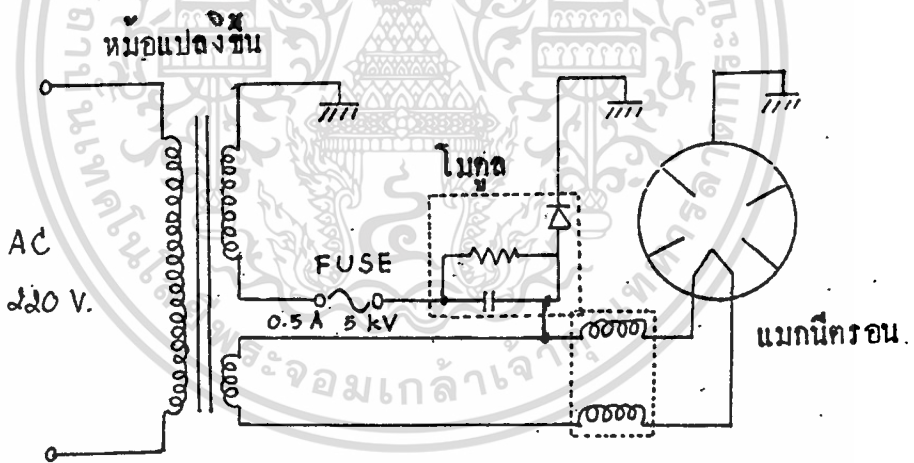
บทที่ 3

การออกแบบเครื่องส่งเรดาร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการสร้างระบบเครื่องส่งเรดาร์ ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรมอดูเลเตอร์ สายอากาศแบบพาราโบลา และเครื่องมือวัดได้แก่ ไตเรคชันแนลคัปเปิลเลอร์ และวงจรถิเทคเตอร์ สิ่งทีกล่าวมานี้ส่วนใหญ่ ออกแบบขึ้นเอง มีบางส่วนที่ดัดแปลงมาใช้งานซึ่งจะได้กล่าวต่อไปนี้

3.1 วงจรมอดูเลเตอร์

วงจรมอดูเลเตอร์ ในโครงงานนี้ เป็นการดัดแปลงสัญญาณที่ได้จาก วงจรมอดูเลเตอร์ ในเตาอบไมโครเวฟ ซึ่งให้คลื่นมีความถี่ 2,450 เมกกะเฮิรต์ แต่ให้พัลส์ที่มีความถี่ 50 เฮิรต์ ซึ่งเท่ากับความถี่ที่ได้จากไฟฟ้ากระแสสลับของไฟบ้าน วงจรมอดูเลเตอร์ของเตาอบ ปรากฏดังรูปที่ 3.1

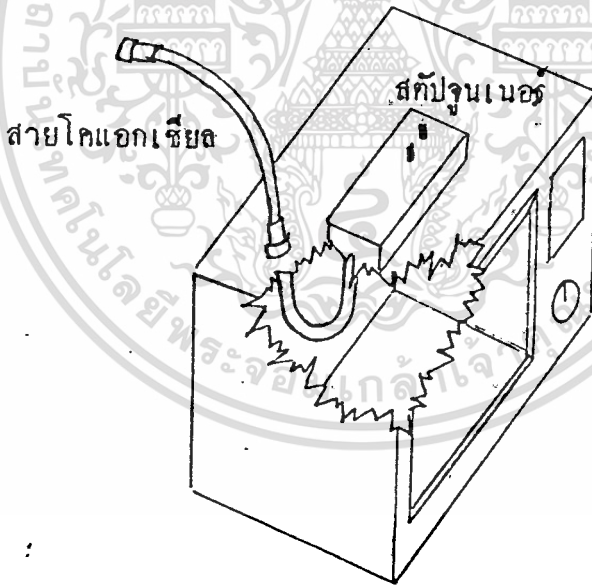


รูปที่ 3.1 แสดงวงจรมอดูเลเตอร์ในเตาอบไมโครเวฟ

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบของวงจรอยู่ที่ หม้อแปลงขึ้น โมดูลของตัวเก็บประจุ ที่มีไดโอดกับความต้านทานรวมอยู่ด้วย และหลอดแมกนีตรอน การทำงานของเตาอบก็เริ่มด้วยมีไฟเลี้ยงกระแสสลับ 220 โวลต์ เข้ามาที่หม้อแปลงซึ่ง ด้านเข้าที่พหุมี 2 ขด ขดแรกเป็นขดที่มีโวลเตจต่ำใช้สำหรับเผาข้าวหลอดอีกขดเป็นขด โวลเตจสูง ใช้สำหรับทริกหลอด สัญญาณที่ผ่านเข้ามาให้หลอดแมกนีตรอน จะผ่านเข้ามาที่ โมดูลของตัวเก็บประจุ ไดโอด และตัวต้านทานก่อน ทำให้โวลเตจของสัญญาณที่ผ่านออกมา มี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะสัญญาณครึ่งลบเท่านั้น หลังจากนั้นสัญญาณนี้ก็จะผ่านไปกระตุ้นหลอดเพื่อให้หลอดผลิตคลื่นออกมา

ในการนำสัญญาณจากเตาอบมาใช้เป็นวิธีการค่อนข้างยาก ต้องมีการคัปปลิงสัญญาณโดยวิธีการทำเวฟไกด์ทูโคแอก (WAVEGUIDE TO COAXIAL) ซึ่งทำค่อนข้างยาก เนื่องจากปัญหาเรื่องอิมพีแดนซ์ของโพรบ (PROBE) และหลอดแมกนีตรอนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการไม่แม็ทซ์ ทำให้สัญญาณที่ออกมามีน้อย และสะท้อนกลับไปยังหลอดแมกนีตรอน อาจทำให้เกิดการเสียหายได้ง่าย การแก้ไขจึงกระทำโดยวิธีการทำสตัปคูล์ ทำให้สามารถนำสัญญาณส่วนใหญ่ออกมาจากเตาอบได้ ถึงแม้ว่าจะมีบางส่วนสะท้อนกลับไปยังก็ตามก็ถือว่า มีค่าเล็กน้อย ซึ่งรูปร่างของสเปกตรัมจะดูได้จากผลการทดลอง



รูปที่ 3.2 แสดงการนำสัญญาณจากเตาอบมาใช้งาน

3.2 การออกแบบระบบสายอากาศแบบพาราโบลา

ในการออกแบบได้ทำการสร้างตัวสะท้อนเป็นรูปพาราโบลา ซึ่งจะต้อง

เอกสารกำหนดอัตราส่วนระหว่างรับ F/D ขึ้นเอง แต่ในโครงงานนี้ได้ออกแบบตัวสะท้อนพาราโบลา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบไม่เต็มใบ ดังนั้นการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงบีมของท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด ซึ่งเป็นตัวบ่อนสัญญาณด้วย ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศนี้จึงต้องออกแบบตัวบ่อนสัญญาณเสียก่อน

3.2.1 การออกแบบตัวบ่อนสัญญาณ

ตัวบ่อนสัญญาณในระบบสายอากาศนี้ เป็นแบบท่อนำคลื่นปลายเปิด ซึ่งเป็นออร์ันแบบสองโหมด ดังนั้นการออกแบบจึงเป็นการออกแบบท่อนำคลื่นสองโหมดมาต่อกัน การคำนวณขนาดของท่อนำคลื่นทั้งสองโหมดกระทำได้ ดังนี้

ก) การหาขนาดของท่อนำคลื่นโหมด TE_{10}

จากความถี่ที่ใช้งาน 2,450 เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีความยาวคลื่นเท่ากับ 12.24 ซม. จากความสัมพันธ์ของความยาวคลื่น กับความกว้าง และความยาวของท่อนำคลื่นที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป เป็นดังนี้

$$a = 0.8 \cdot \lambda \quad \dots(3.1)$$

$$b = 0.4 \cdot \lambda \quad \dots(3.2)$$

เมื่อ a เป็นความกว้างของปากท่อนำคลื่น

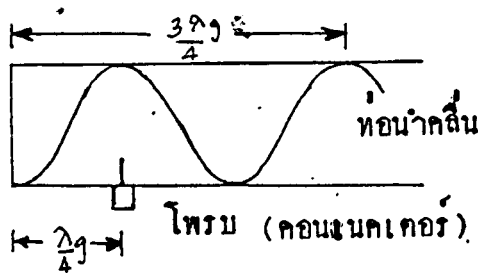
เมื่อ b เป็นความยาวของปากท่อนำคลื่น

$$\text{ดังนั้นจะได้ } a_{10} = 0.8 * 12.24 = 9.792 \text{ ซม.}$$

$$b_{10} = 0.4 * 12.24 = 4.896 \text{ ซม.}$$

จากนั้นทำการหาความยาวของท่อนำคลื่นโหมด TE_{10} ที่เหมาะสม

เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการทำเวฟไกด์ทีโคแอกอะแดปเตอร์ จากทฤษฎีจะทราบว่ที่ระยะห่างจากผนังเท่ากับ $\lambda_g/4$ จะให้ค่าโวลเตจของคลื่นสูงสุด เมื่อ λ_g เป็นความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น



ดังนั้นความยาวของท่อนำคลื่น $TE_{10} = 3 \cdot \lambda_g / 4$

โดยที่ $\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \dots (3.3)$

แทนค่า $\lambda_g = 12.24 / \sqrt{1 - (12.24/2 \cdot 9.792)^2} = 15.68 \text{ ซม.}$

จะได้ความยาวของท่อนำคลื่นโหมด $TE_{10} = 3 \cdot 15.68 / 4 = 11.76 \text{ ซม.}$

ดังนั้นขนาดของท่อนำคลื่น TE_{10} เป็นดังรูปที่ 3.4

ข) การหาขนาดของท่อนำคลื่นโหมด TE_{30}

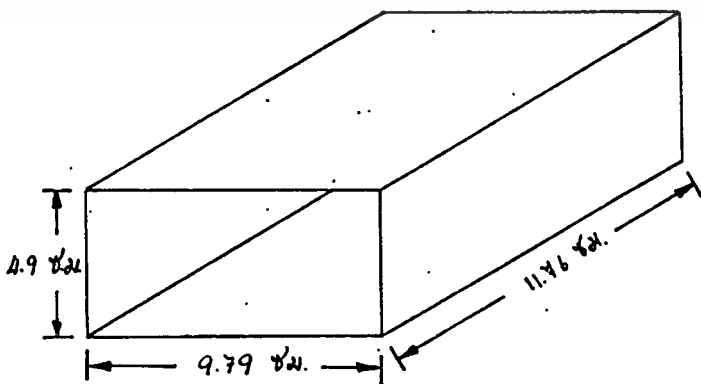
ขนาดของท่อนำคลื่นโหมด TE_{30} หาได้จากความสัมพันธ์ของรูปที่ 2.13 กราฟนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแอมพลิจูดของคลื่นทั้งสองโหมดกับอัตราส่วน b ในโครงงานนี้เลือกค่า $b = 0.5$ ซึ่งทำให้แอมพลิจูดของ TE_{30} ต่อ $TE_{10} = 0.58$ ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสม ไม่ทำให้ขนาดของท่อนำคลื่นใหญ่หรือเล็กจนเกินไป

จากความสัมพันธ์ของ b ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความกว้างท่อนำคลื่น TE_{10} ต่อ TE_{30}

จะได้ $b = a_{10} / a_{30} = 0.5$

เมื่อ a_{10} และ a_{30} เป็นความกว้างของท่อนำคลื่นโหมด TE_{10}

และ TE_{30} ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของท่อนำคลื่นโหมด TE_{10}

$$\begin{aligned}
 a_{g0} &= 2 * a_{10} \\
 &= 2 * 9.792 \\
 &= 19.584 \text{ ซม.}
 \end{aligned}$$

และ $b_{g0} = 4.896 \text{ ซม.}$

หาความยาวของท่อนำคลื่นโหมด TE_{g0} ได้จากสมการที่ (2.5)

$$L / \lambda = 1 / \{ \sqrt{4 - (3\lambda/W)^2} - \sqrt{4 - (\lambda/W)^2} \} \dots (3.4)$$

แทนค่า $\lambda = 12.24 \text{ ซม.}$ และ $W = a_{g0} = 19.584$

จะได้ $L = -0.833 \cdot \lambda$

(ไม่ใช่ค่าลบ เพราะถือว่าค่าที่ได้เป็นอัตราส่วน)

จะได้ $L = 0.833 * 12.24$
 $= 10.20 \text{ ซม.}$

ดังนั้นขนาดและรูปร่างของท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด เมื่อนำท่อกึ่งสองมา

ต่อกันจะได้ดังรูปที่ 3.5

3.2.2 การออกแบบตัวสะท้อนแบบพาราโบลา

การออกแบบเริ่มต้นด้วยการกำหนด F/D เสียก่อน จากสมการที่ (2.2)

$$F = \frac{D}{4} \cot(\psi_0 / 2) \dots (3.5)$$

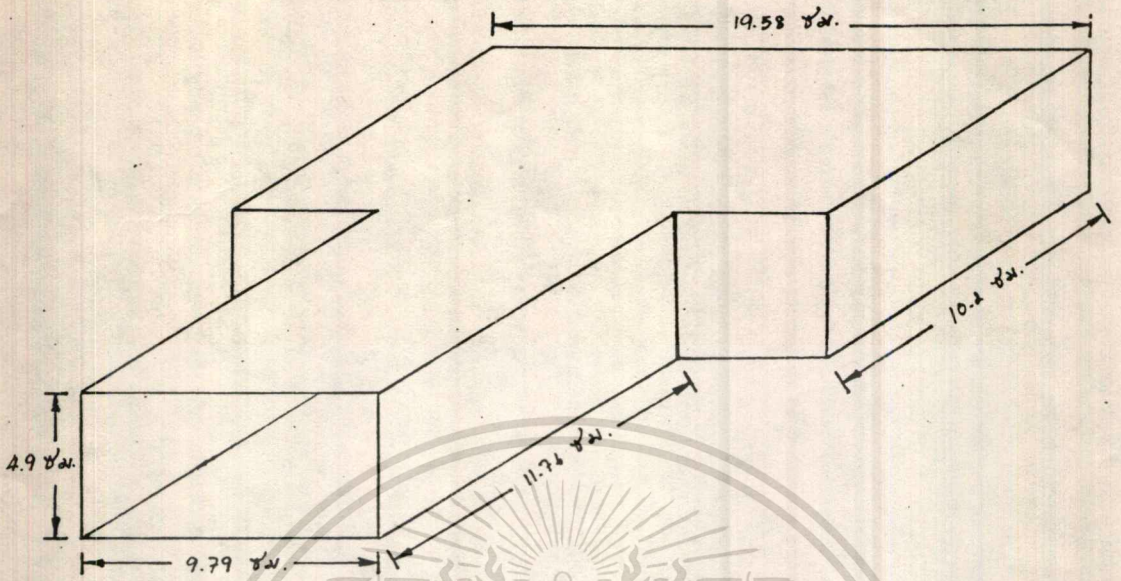
แทนค่า ψ_0 ด้วยมุมของบีมในระนาบ E ที่ประมาณ -5 เดซิเบล ใช้ค่าเท่ากับ 60° ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของมุมที่วัดได้ (120°) แต่โดยทั่วไปแล้ว ส่วนใหญ่มักจะใช้ในช่วงที่มุมวัดที่ประมาณ -10 เดซิเบล แต่ค่า -10 เดซิเบลของตัวบ่อนสัญญาณตัวนี้มีค่ามุมมากเกินไป จะมีผลต่อค่า F/D ซึ่งใช้กันอยู่ระหว่าง $0.25 - 0.5$

แทนค่า ψ_0 ลงในสมการที่ (3.5)

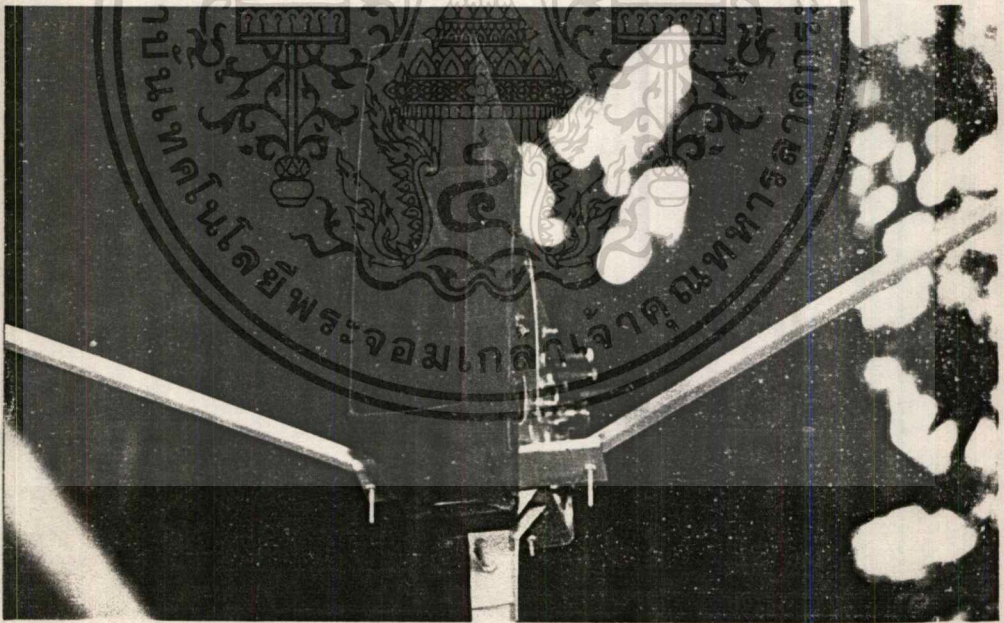
$$F = 0.438 * D$$

ในโครงการนี้ได้กำหนดให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจานพาราโบลามีค่าเท่ากับ 1.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ดัดแปลงให้กับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ก. แสดงขนาดและรูปร่างของท่อนำคลื่น



รูปที่ 3.5 ข. แสดงตัวบ่อนสัญญาณแบบท่อนำคลื่นปลายเปิดพร้อมสลับ

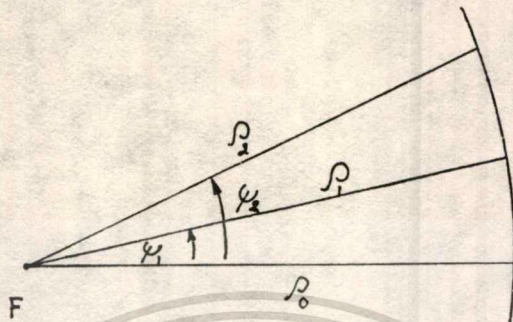
นำค่าความยาวโฟกัส F แทนลงในสมการที่ (2.1)

$$\rho = 0.645 / \text{Cos}^2(\psi/2) \quad \dots(3.6)$$

แทนค่ามุม ψ ตั้งแต่ 0 - 60 องศา จะได้ค่า ρ ของแต่ละมุม

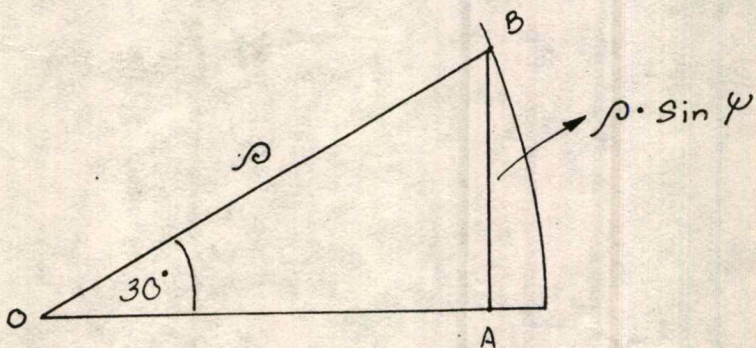
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในโครงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังวงนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าเหล่านี้ไปพล็อตลงบนแกนโพลาร์ ก็จะได้รูปจาพาราโบลา ที่มีความยาวโฟกัส 64.5 ซม. ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงพาราโบลานบนแกนโพลาร์

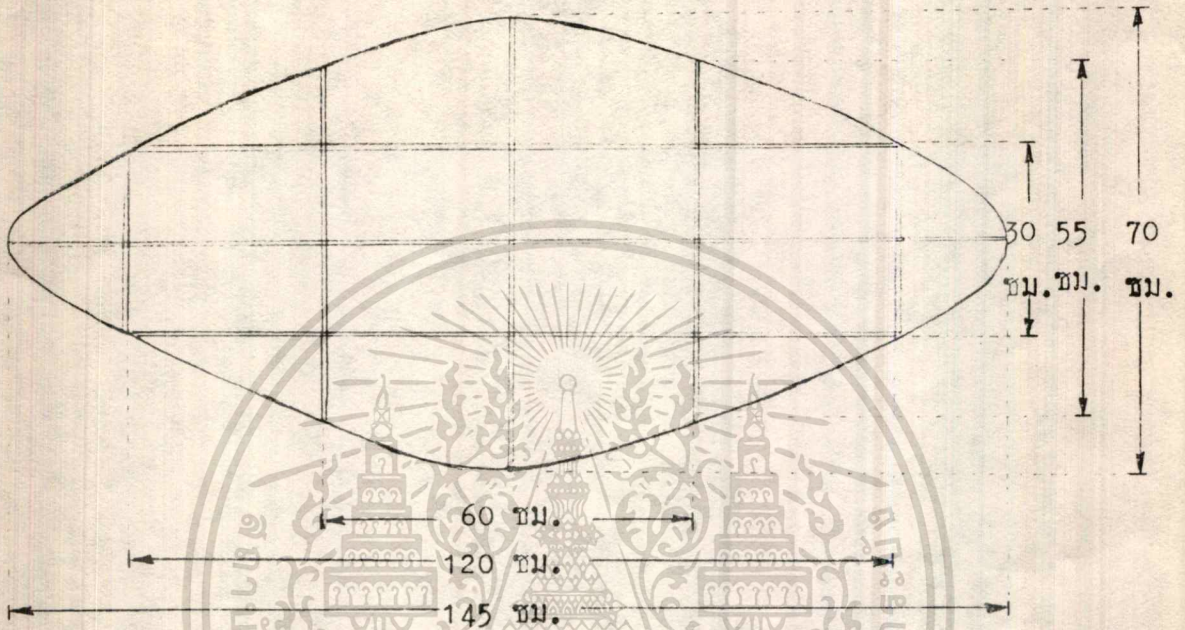
เมื่อออกแบบตัวสะท้อนแบบพาราโบลามีเต็มใบได้แล้ว ก็จะสามารถออกแบบตัวสะท้อนพาราโบลานแบบไม่เต็มใบได้โดยกำหนดแกนหลัก (MAJOR AXIS) ซึ่งมีค่าเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวสะท้อน (D) ส่วนแกนรอง (MINOR AXIS) หาได้โดยแทนค่าลงในสมการที่ (2.1) เมื่อมุม $\psi = 30^\circ$ ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของมุมที่วัดจากความกว้างของบีมในระนาบ H (วัดที่ -10 ถึง -12 เดซิเบล มีค่าประมาณ 60°)



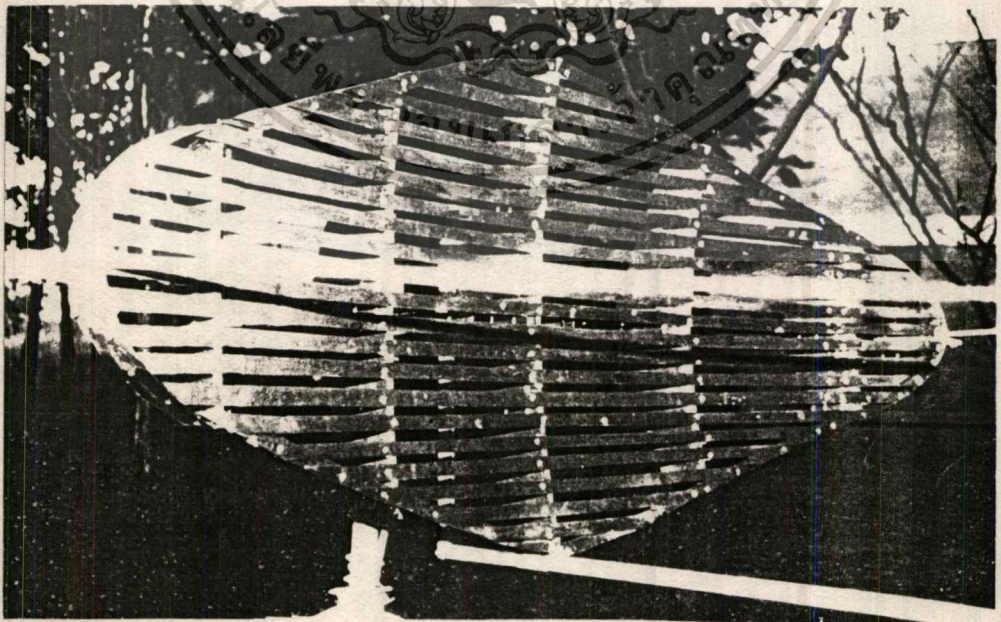
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากต้องการนำออกเผยแพร่ กรุณาติดต่อฝ่ายประชาสัมพันธ์ โทร. 0-2254-3000 หรือ 0-2254-3001

จากรูปที่ 3.7 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \text{แกนรอง ; } AB &= r \cdot \sin \psi \\
 &= 0.697 \cdot \sin 30^\circ \\
 &= 35 \quad \text{ซม.}
 \end{aligned}$$

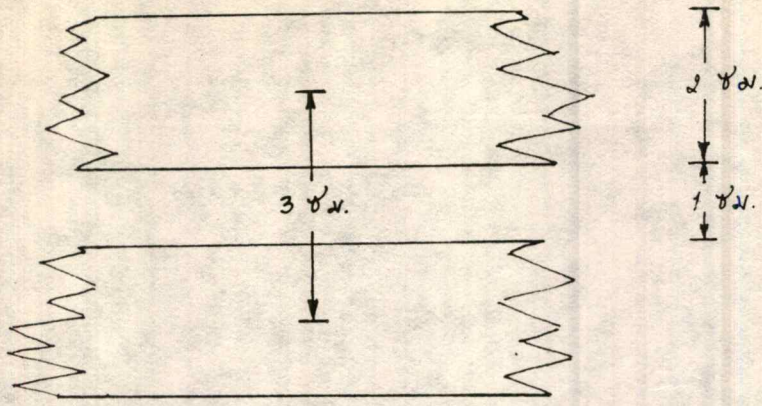


รูปที่ 3.8 ก. แสดงรูปร่างของตัวสะท้อนไม้เต็มใบที่มีลักษณะเป็นรูปวงรี

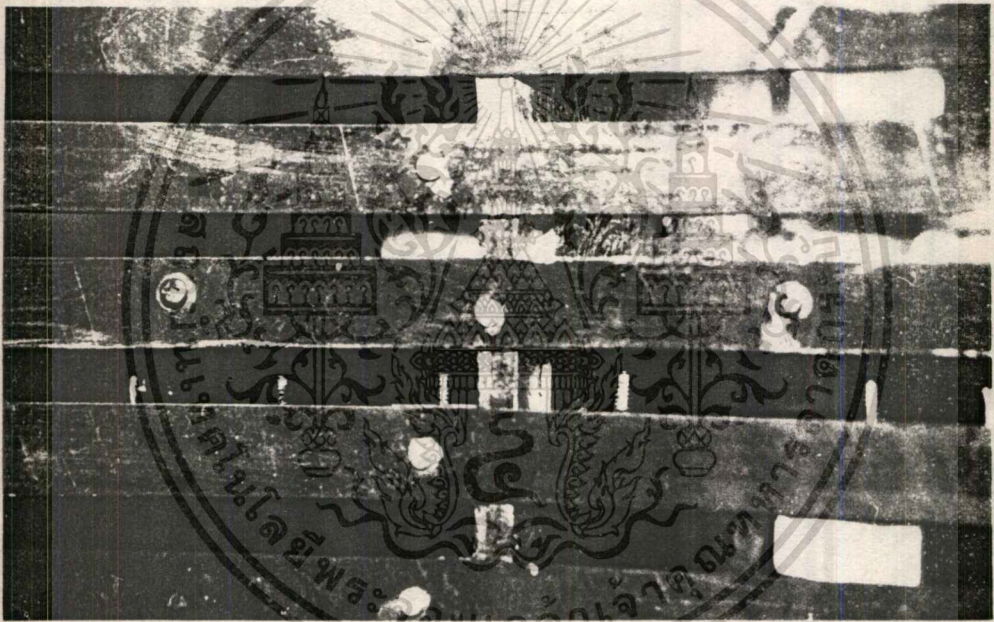


รูปที่ 3.8 ข. แสดงรูปถ่ายของตัวสะท้อนไม้เต็มใบที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ก. แสดงระยะห่างของแผ่นเกรทตัง



รูปที่ 3.9 ข. แสดงรูปถ่ายของเกรทตังที่สร้างขึ้น

ดังนั้นแกนรองจะมีค่า $= 2 * 35 = 70$ ซม. ส่วนแกนอื่นที่เล็กลงมาก็จะลดลงตามโครงสร้างที่ออกแบบให้อยู่ในรูปวงรี โดยให้มีลักษณะใกล้เคียงมากที่สุด ซึ่งขนาดและรูปร่างเป็นดังรูปที่ 3.8

หลังจากออกแบบตัวสะท้อนได้แล้ว ก็มาถึงวิธีการออกแบบพื้นที่ผิวของตัวสะท้อนที่มีพื้นผิวเป็นซี่ หรือแบบสตริป โดยใช้กราฟจากรูปที่ 2.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์การสูญเสียของพลังงานในตัวสะท้อนแบบเกรทตัง

จากกราฟ เลือกค่า $T/\lambda = 0.07$ เพื่อให้ใกล้เคียงกับขนาดของความหนาของแผ่นทองแดงที่มีใช้อยู่ซึ่งมีค่า $T/\lambda = 0.016$ เนื่องจากไม่สามารถที่จะหาแผ่นทองแดงที่หนาขนาดนี้ได้ ดังนั้นจะได้

$$W/\lambda = 0.175$$

เมื่อ W เป็นความกว้างของแผ่นเกรทที่ตั้ง

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } W &= 0.175 * \lambda \\ &= 0.175 * 12.24 \\ &= 2.14 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

$$\text{และ } S/\lambda = 0.25$$

เมื่อเลือกที่การสูญเสียของคลื่นประมาณ 10% และ S เป็นระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแผ่นทั้งสอง

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } S &= 0.25 * 12.24 \text{ ซม.} \\ &= 3.06 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ลักษณะของเกรทตั้งดังรูปที่ 3.9

3.3 การออกแบบไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ และวงจรถติเทคเตอร์

ในโครงงานนี้เราใช้ คัปเปิลเลอร์ เพื่อวัดกำลังงานจากเตาไมโครเวฟ (INCIDENT POWER) และกำลังงานที่สะท้อนกลับจากสายอากาศ (REFLECTED POWER) ดังรูปที่ 3.10

โดยวัดเป็นค่าสัมพัทธ์ต่อกันว่าในขณะเวลาหนึ่ง มีกำลังงานสะท้อนจากสายอากาศมากน้อยแค่ไหน เมื่อเทียบกับกำลังงานที่ออกจากเตาไมโครเวฟ เนื่องจากเตาไมโครเวฟมีกำลังงานเข้าที่พว 500 วัตต์ จึงทำการออกแบบคัปเปิลเลอร์ที่มีค่าคัปปลิ่ง 40 เดซิเบล (ซึ่งให้ค่ากำลังงานที่อินพุท-คัปปลิ่งพอร์ท ประมาณ 50 มิลลิวัตต์)

เมื่อแทนค่า $k = 10^{-4}$ ลงในสมการที่ (2.12) และ (2.13) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} (Z_{in}) &\approx Z_{out} \approx Z_0 \approx 50 \text{ โอห์ม} \\ \text{ได้ค่า } w/b &= 1.442 \dots (3.8) \end{aligned}$$

$$\text{และ } 1 < s/b < \infty \quad (\text{ลองพิจารณาจากรูป 2.16})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ทำให้ไม่สามารถกำหนดได้ว่า s/b มีค่าเท่าใดแน่ แต่เนื่องจากค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

s/b มีค่าเกือบเป็น 1 ดังนั้นจึงลองกำหนดให้ s/b = 1 แล้วนำมาทำการสร้างคัปเปิลอร์ โดยกำหนดค่า b คงที่ มีค่าเท่ากับ 2.5 ซม.

จาก w/b = 1.442 ... (3.9)

เพราะฉะนั้น w = 1.442 * 2.5

w = 3.605 ซม.

จาก s/b = 1 ... (3.10)

เพราะฉะนั้น S = 1 * 2.5

= 2.5 ซม.

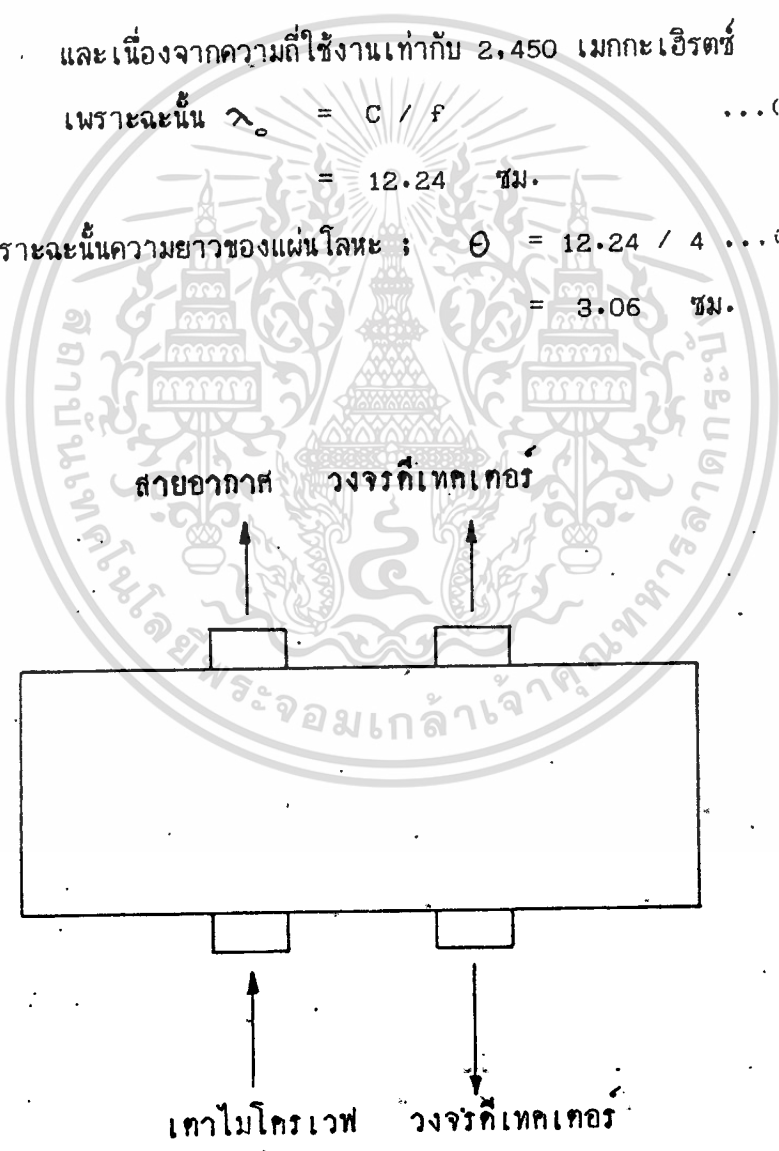
และเนื่องจากความถี่ใช้งานเท่ากับ 2,450 เมกกะเฮิรตซ์

เพราะฉะนั้น $\lambda_0 = c / f$... (3.11)

= 12.24 ซม.

เพราะฉะนั้นความยาวของแผ่นโลหะ ; $\theta = 12.24 / 4$... (3.12)

= 3.06 ซม.



รูปที่ 3.10 แสดงการต่อใช้งานคัปเปิลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

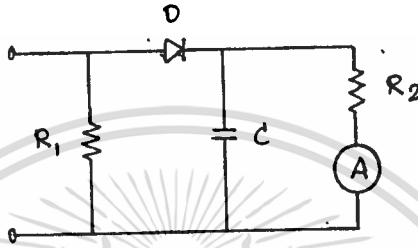
จากการทดสอบคัปเปิลอร์ที่ความถี่ใช้งาน 2,450 เมกกะเฮิรตซ์

พบว่า ค่า VSWR = 1.6

ค่าคัปปลิ่ง = 36 เดซิเบล

ค่าไดเรคทิวิตี้ = 8 เดซิเบล

สำหรับส่วนของวงจรถติเทคเตอร์ ซึ่งมีวงจрдังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงวงจรถติเทคเตอร์

D : ไดโอดที่ใช้เป็นแบบสวิตซ์ไดโอด เบอร์ BAW - 56

C : คาปาซิเตอร์แบบเซรามิก มีค่า 10 nF

R_1, R_2 : ตัวต้านทานแบบคาร์บอน มีค่า 180 โอห์ม และ 3.9 กิโลโอห์ม ตามลำดับ

สำหรับค่า C และ R_2 นั้นถูกกำหนดจากค่าไทม์คอนสแตนท์ (TIME CONSTANT = RC) โดยจะต้องให้มีค่ามาก ๆ ทั้งนี้เพื่อจะทำให้โวลเตจที่ตกคร่อมโหลด R_2 มีค่าค่อนข้างคงที่ (ทำให้กระแสแสดงที่แอมป์มิเตอร์ คงที่ด้วย) สำหรับค่า R_1 ถูกกำหนดขึ้นจากการทดลอง โดยในตอนแรกเมื่อไม่มี R_1 กระแสแสดงที่แอมป์มิเตอร์มีค่า ๆ หนึ่ง เมื่อลองใส่ตัวต้านทานแบบเปลี่ยนค่าได้ลงไปก็ตำแหน่ง R_1 (เพื่อทำการเม็ทซ์อย่างง่าย) แล้วเปลี่ยนค่าตัวต้านทานไปเรื่อย ๆ พบว่าที่ค่าประมาณ 100 โอห์มเศษ ทำให้ได้กระแสแสดงที่แอมป์มิเตอร์มีค่าสูงสุด ดังนั้นจึงใช้ $R_1 = 180$ โอห์ม.



รูปที่ 3.12 แสดงรูปถ่ายของจานสายอากาศที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบเครื่องส่งเรดาร์

ในโครงการนี้ ได้ทดสอบระบบเครื่องส่งเรดาร์ โดยได้ทดลองคุณสมบัติของอาร์เอฟพัลส์ สายอากาศ ตลอดจนไดเรกชันแนลคัมเพลอร์ และดีเทคเตอร์ ซึ่งจะได้กล่าวดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 4.1

การวัดแพทเทิร์นของท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด

จุดประสงค์

เพื่อดูแพทเทิร์นของท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด ว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร โดยวัดทั้งระนาบ E และ H

วิธีการทดลอง

ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ ส่งคลื่น 2,450 เมกกะเฮิรตซ์ ผ่านสายอากาศแบบฮอร์นแล้วใช้ท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด รับและนำสัญญาณเข้าสเปกตรัมแอนาไลเซอร์ (SPECTRUM ANALYZER)

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงระดับสัญญาณที่วัดได้ในระนาบ H

มุม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพัทธ์ (เดซิเบล)
0	0
10	-1
20	-6
30	-14
40	-25
50	-15
60	-14

(ตารางที่ 4.1 ต่อ)

มุม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพันธ์ (เดซิเบล)
70	-14
80	-18
90	-30
100	-26
110	-20
120	-18
130	-26
140	-20
150	-14
160	-13
170	-11
180	-15
190	-21
200	-14
210	-22
220	-22
230	-24
240	-26
250	-26
260	-28
270	-26
280	-19

(ตารางที่ 4.1 ต่อ)

มุม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพัทธ์ (เดซิเบล)
290	-16
300	-13
310	-14
320	-24
330	-13
340	-5
350	-2

ตารางที่ 4.2 แสดงระดับสัญญาณที่วัดได้ในระนาบ E

มุม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพัทธ์ (เดซิเบล)
0	0
10	0
20	-1
30	-2
40	-2
50	-4
60	-4

(ตารางที่ 4.2 ต่อ)

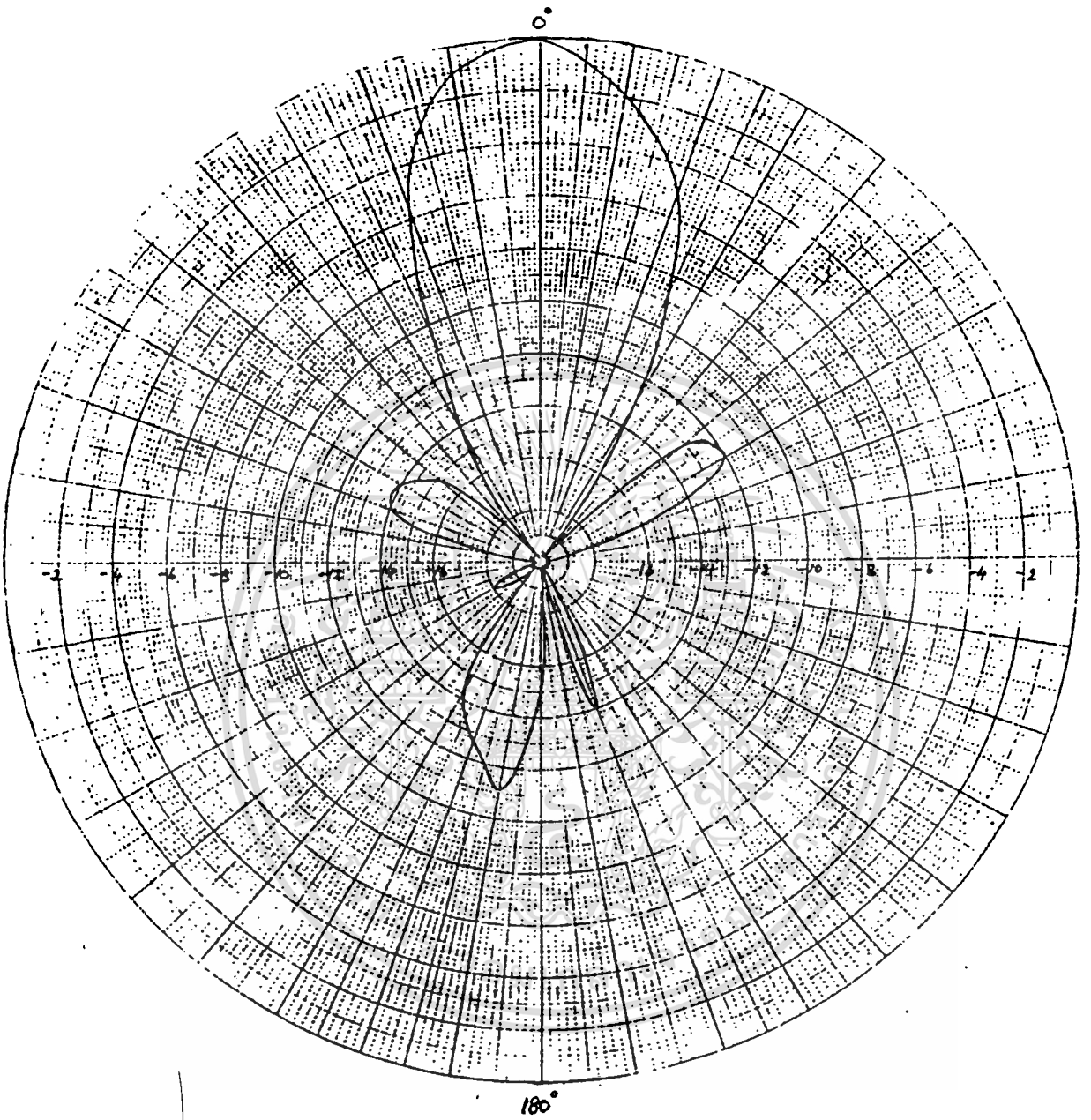
มุม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพัทธ์ (เดซิเบล)
70	-6
80	-5
90	-7
100	-8
110	-7
120	-8
130	-9
140	-8
150	-9
160	-8
170	-7
180	-6
190	-6
200	-5
210	-8
220	-8
230	-7
240	-11
250	-8
260	-12
270	-8
280	-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

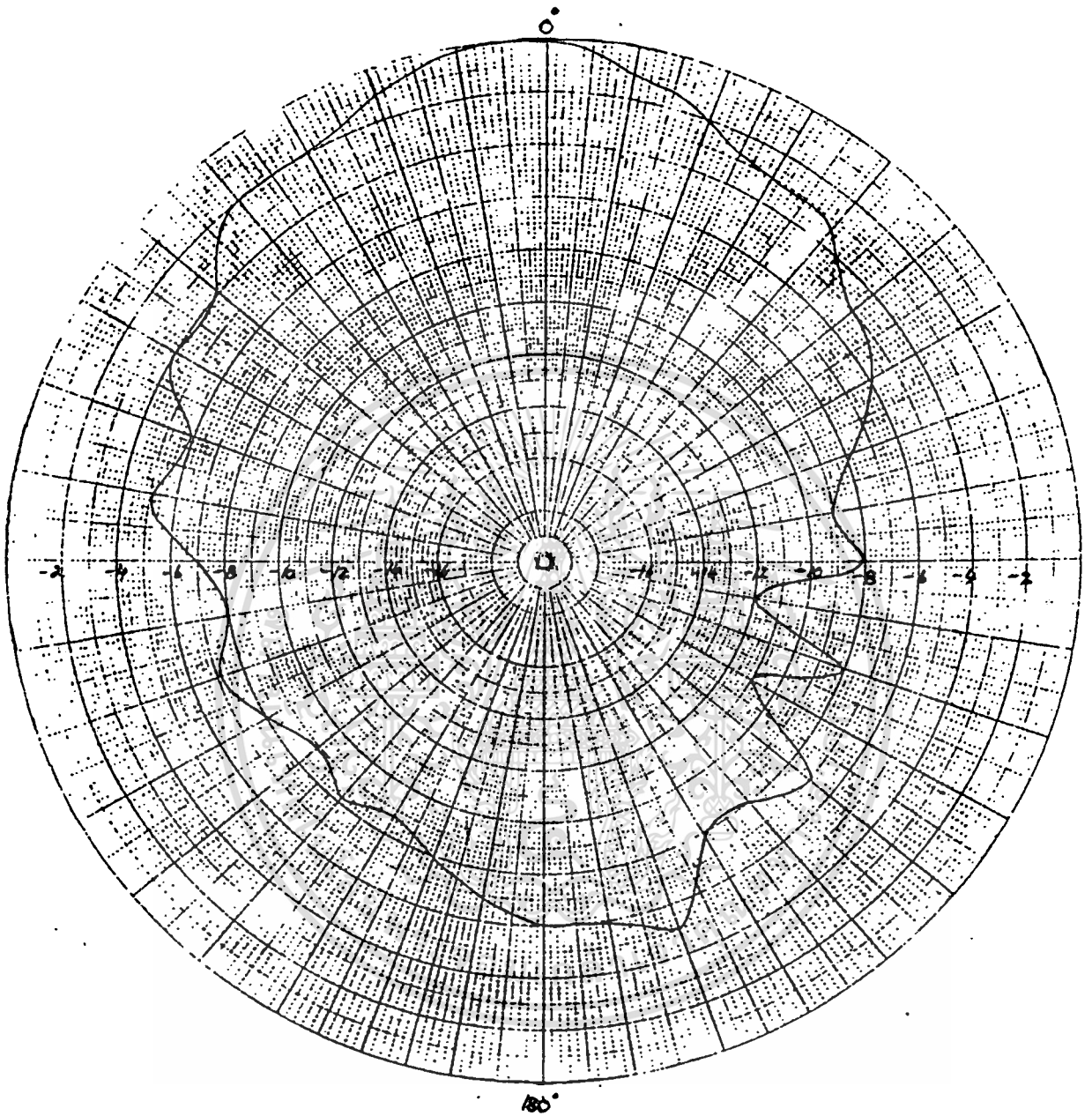
(ตารางที่ 4.2 ต่อ)

มุม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพัทธ์ (เดซิเบล)
290	-8
300	-6
310	-5
320	-3
330	-3
340	-2
350	-1

นำระดับสัญญาณที่ได้ไปพล็อตลงบนโพลาร์กราฟ ดังปรากฏในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงแพทเทิร์นในระนาบ H ของท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด



รูปที่ 4.2 แสดงแพทเทิร์นในระนาบ E ของท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 4.2 การวัดแพทเทิร์นของระบบสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา

จุดประสงค์ เพื่อดูแพทเทิร์นของระบบสายอากาศ เมื่อมีตัวบ่อนสัญญาณเป็นแบบ
ท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด

วิธีการทดลอง

ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณส่งคลื่นความถี่ 2,450 เมกกะเฮิรตซ์ ผ่านสาย
อากาศแบบฮอร์น แล้วใช้สายอากาศแบบพาราโบลาจับและนำสัญญาณ
เข้าสู่สเปคตรัม แอนาไลเซอร์

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 แสดงระดับสัญญาณที่วัดได้เมื่อแกนหลักขนานกับพื้นโลก

มุม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพัทธ์ (เดซิเบล)
0	0
5	-10
10	-22
20	-20
30	-18
40	-20
50	-23
60	-21
70	-21
80	-18
90	-18
100	-17
110	-18
120	-23

(ตารางที่ 4.3 ต่อ)

มม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพัทธ์ (เดซิเบล)
130	-23
140	-26
150	-24
160	-23
170	-21
180	-28
190	-28
200	-28
210	-20
220	-20
230	-23
240	-20
250	-18
260	-18
270	-21
280	-23
290	-18
300	-23
310	-23
320	-18
330	-20
340	-20

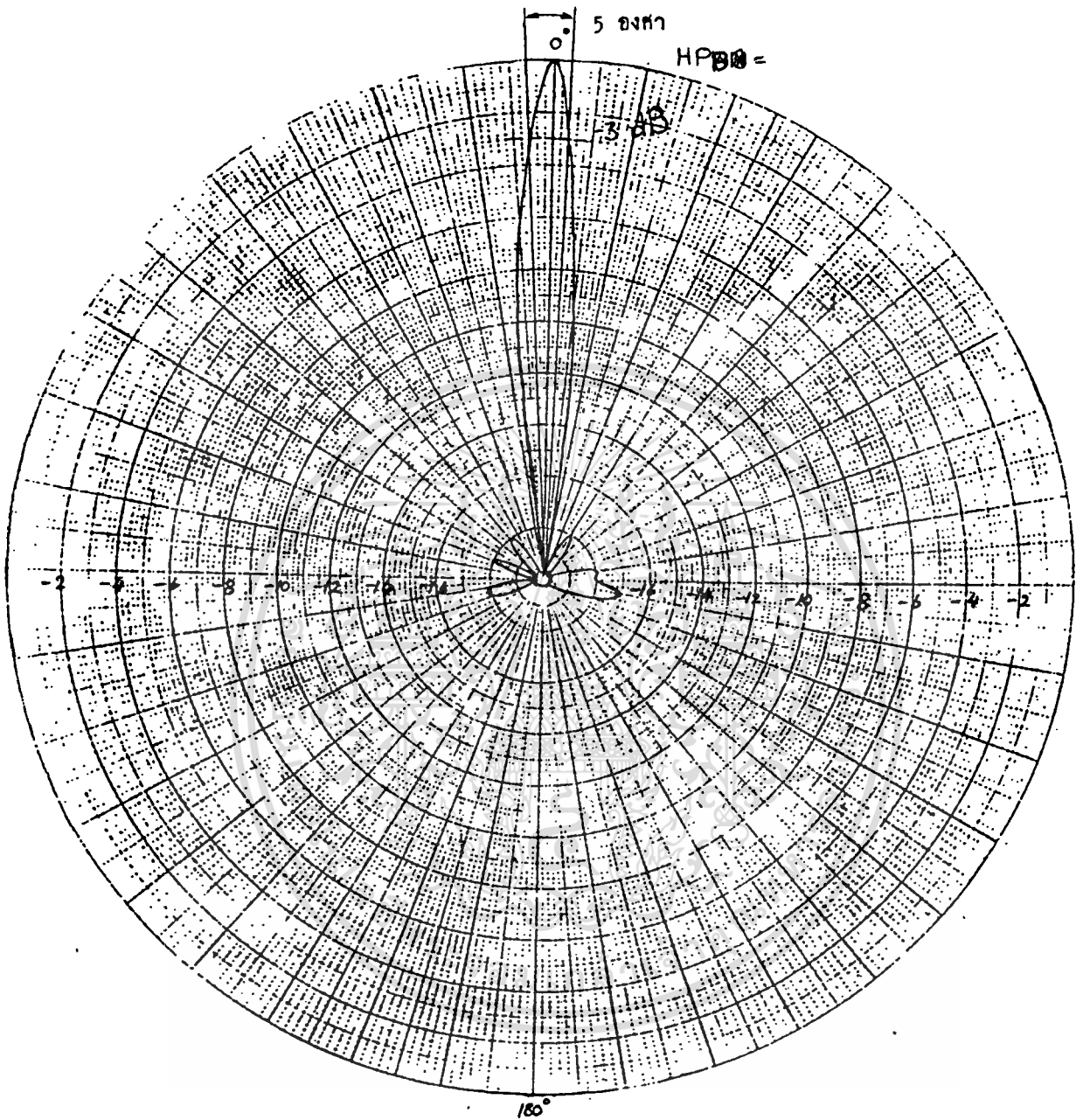
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ตารางที่ 4.3 ต่อ)

มุม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพัทธ์ (เดซิเบล)
350	-23
355	-6

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 นำไปพล็อตบนโพลาร์กราฟ ได้ตามรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่า ความกว้างของบีมหลัก วัดที่ -3 เดซิเบล (HPBW) มีค่า 5 องศาและอัตราส่วน $F/B = 21$ เดซิเบล





รูปที่ 4.3 แสดงแพทเทิร์นของสายอากาศ เมื่อแกนหลักขนานกับพื้นโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงระดับสัญญาณที่วัดได้ เมื่อแกนหลักตั้งฉากกับพื้นโลก

มุม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพัทธ์ (เดซิเบล)
0	0
5	-1
10	-4
15	-8
20	-22
30	-16
40	-16
50	-16
60	-16
70	-22
80	-22
90	-22
100	-22
110	-16
120	-18
130	-14
140	-18
150	-20
160	-22
170	-22
180	-22
190	-20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

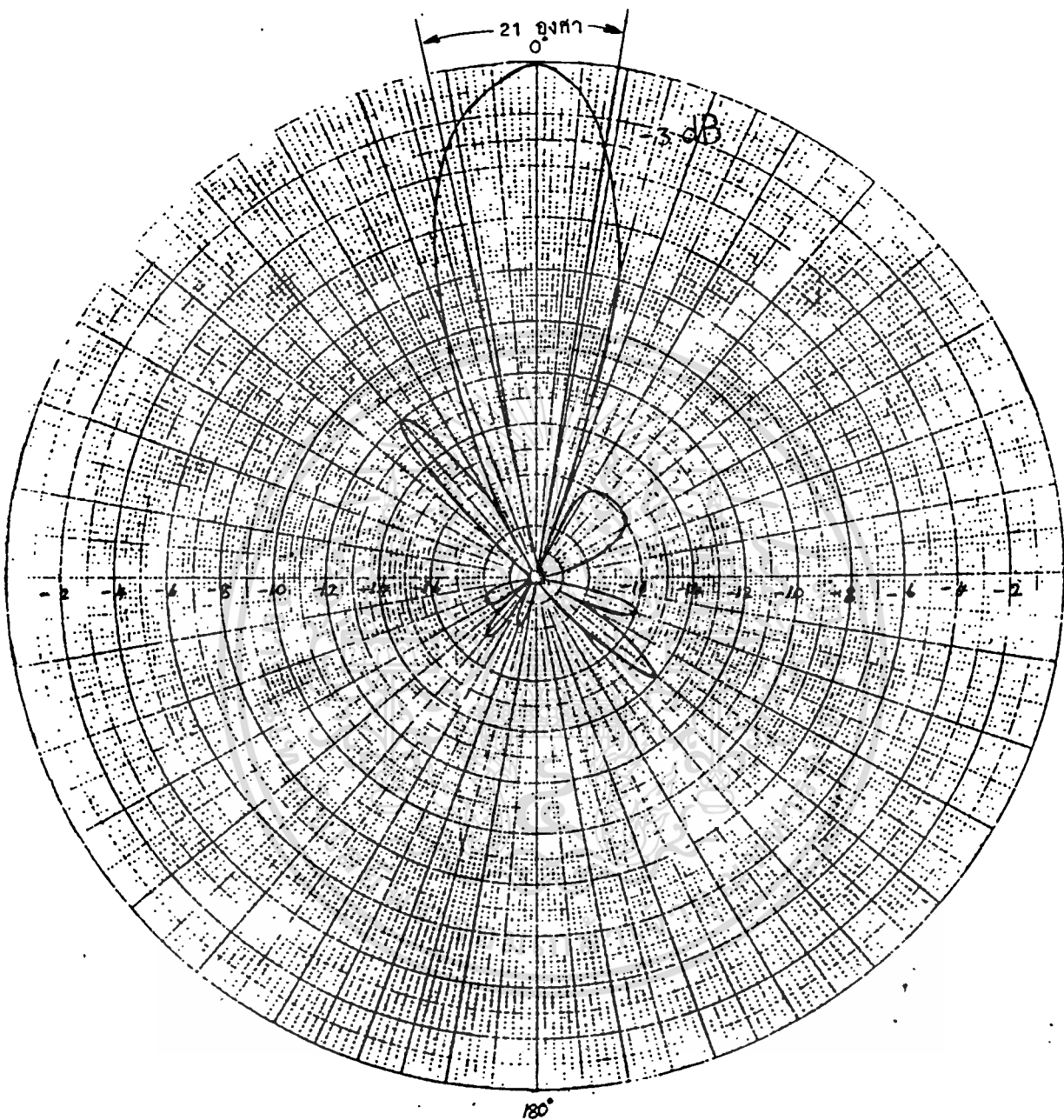
(ตารางที่ 4.4 ต่อ)

มุม (องศา)	ระดับสัญญาณสัมพัทธ์ (เดซิเบล)
200	-18
210	-20
220	-17
230	-20
240	-18
250	-18
260	-20
270	-20
280	-20
290	-20
300	-20
310	-18
320	-12
330	-16
340	-10
345	-5
350	-2
355	-1

จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 นำไปพล็อตบนโพลาร์กราฟ ได้ตามรูปที่ 4.4

ซึ่งพบว่า ความกว้างของมุมบีมหลักวัดที่ -3 เดซิเบล (HPBW) มีค่า 21 องศาและ

เอกสารนี้ อีตราส่วนที่ F/B ไว้สำหรับ 22 การเดซิเบล การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงแพทเทิร์นของสายอากาศ เมื่อแกนหลักตั้งฉากกับพื้นโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 4.3

การวัดอัตราขยายของสายอากาศแบบพาราโบลา

จุดประสงค์

เพื่อวัดอัตราขยายของสายอากาศว่ามีค่าเท่าใดเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบฮอร์น

วิธีการทดลอง

ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณส่งคลื่นความถี่ 2,450 เมกกะเฮิร์ตซ์ ผ่านสายอากาศแบบ LOG - PERIODIC แล้วใช้สายอากาศแบบฮอร์นรับ ผ่านสัญญาณ เข้าสู่เครื่องสเปคตรัม แอนาไลเซอร์ หลังจากนั้นเปลี่ยนสายอากาศรับ เป็นสายอากาศแบบพาราโบลา (ให้ตำแหน่งของ ปากท่อนำคลื่นแบบปลายเปิด อยู่ห่างจากตัวสะท้อนพาราโบลา มีค่าเท่ากับ 72.5 ซม. ซึ่งให้ค่าอัตราการขยายสูงสุด)



รูปที่ 4.5 แสดงวิธีการทดลองที่ 4.3

ผลการทดลอง

ปรากฏว่าสายอากาศแบบพาราโบลา (ซึ่งได้ทำการแมทซ์ซึ่ง แล้ววัด VSWR มีค่าเท่ากับ 1.13 : 1) มีอัตราขยายมากกว่าสายอากาศแบบฮอร์น (ซึ่งวัด VSWR ได้มีค่าเท่ากับ 1.38 : 1) อยู่ 4 เดซิเบล ดังนั้นในการหาอัตราขยายของสายอากาศแบบพาราโบลา ก็ต้องทราบอัตราขยายของสายอากาศแบบฮอร์นเสียก่อน จะเห็นว่า VSWR ของสายอากาศทั้งสองต่างกันอยู่ = 0.25 ซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศเปลี่ยนไป 2 - 3 เปอร์เซนต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก จึงถือว่าคำนวณเปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นจากการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศแบบฮอร์นได้ = 16.25 เดซิเบล ด้วยเหตุนี้ สายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา จะมีอัตราขยาย = 16.25 + 4 = 20.25 เดซิเบล นำไปใช้

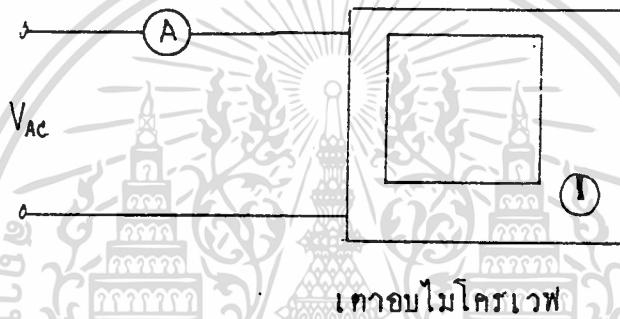
การทดลองที่ 4.4 การทดสอบการทำงานของหลอดแมกนีตรอน และสัญญาณที่ได้จากหลอดแมกนีตรอนในเตาอบไมโครเวฟ

จุดประสงค์ เพื่อทดสอบการทำงานของหลอดแมกนีตรอนว่าต้องใช้กำลังไฟเท่าไร และสัญญาณที่ได้มีลักษณะอย่างไร

วิธีการทดลอง

1. ทำการทดลองดังรูปที่ 4.6 เพื่อวัดโวลเตจ และกระแส
2. ทำการทดลองดังรูปที่ 4.7 เพื่อวัดระดับสัญญาณที่ได้จากหลอดแมกนีตรอน

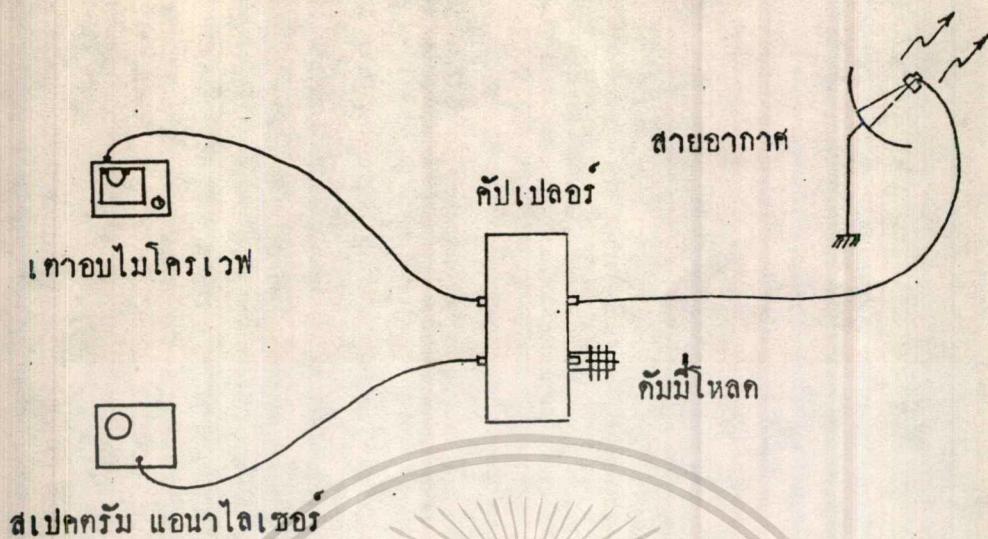
ผลการทดลอง



รูปที่ 4.6 แสดงวิธีการของการทดลองที่ 4.4 ตอนที่ 1

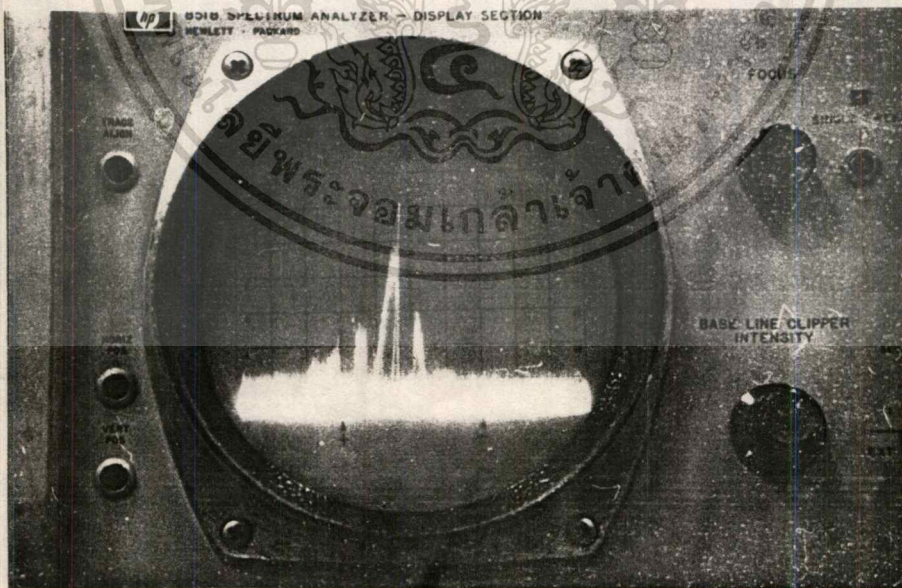
ตารางที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของ โวลเตจ, กระแส และกำลังงานของเตาอบไมโครเวฟ

โวลเตจ (โวลท์)	กระแส (แอมแปร์)	กำลังงาน (วัตต์)
170	0	0
180	2.8	504
190	3.9	741
200	4.0	800
210	4.0	840
220	4.0	880



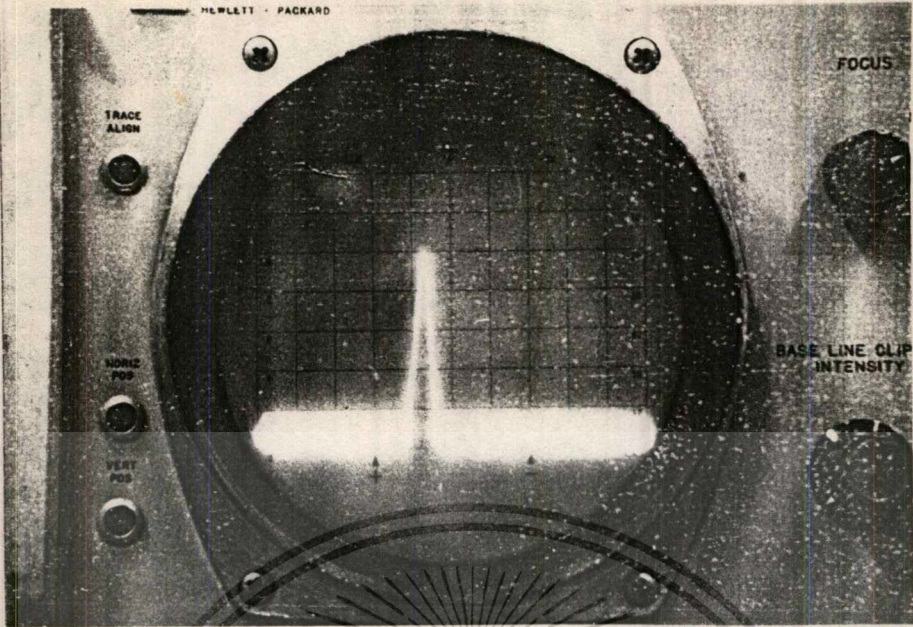
รูปที่ 4.7 แสดงวิธีการของการทดลองที่ 4.4 ตอนที่ 2

ลักษณะสัญญาณที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 4.8 ก.



รูปที่ 4.8 ก. แสดงลักษณะของสัญญาณจากเตาอบไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

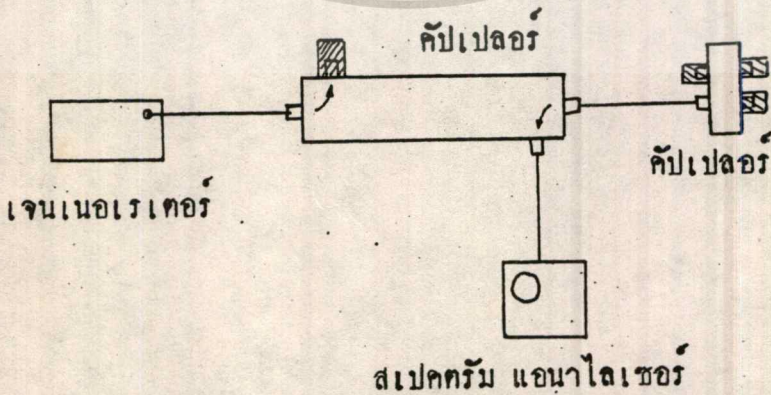


รูปที่ 4.8 ข. แสดงลักษณะของสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ

การทดลองที่ 4.5 การทดสอบการทำงานของไดเรคชั่นแนลคัปเปิลเลอร์ และวงจรถัดเตอร์ เพื่อวัดค่าคัปปลิง , ไดเรคตีวิตี และค่า VSWR ของคัปเปิลเลอร์ และเปรียบเทียบกำลังงานที่ออกจากเตาไมโครเวฟ กับกำลังงานที่สะท้อนกลับมาจากสายอากาศ โดยใช้วงจรถัดเตอร์

วิธีการทดลอง

1. ทำการหาค่า VSWR ของคัปเปิลเลอร์ โดยการทดลองตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงวิธีการของการทดลองที่ 4.5 ตอนที่ 1

2. ทำการหาค่าคัปปลิงและค่าไดเรคทีวิตี โดยการทดลองตามรูปที่ 4.10 โดยทำการวัดกำลังงานจากทั้ง 3 พอร์ต ที่ละพอร์ต ซึ่งอีก 2 พอร์ตที่เหลือจะถูก TERMINATE ด้วย DUMMY LOAD

3: ทำการทดลองตามรูปที่ 4.11 เพื่อดูกระแสที่วัดได้จากวงจรดีเทคเตอร์

ผลการทดลอง

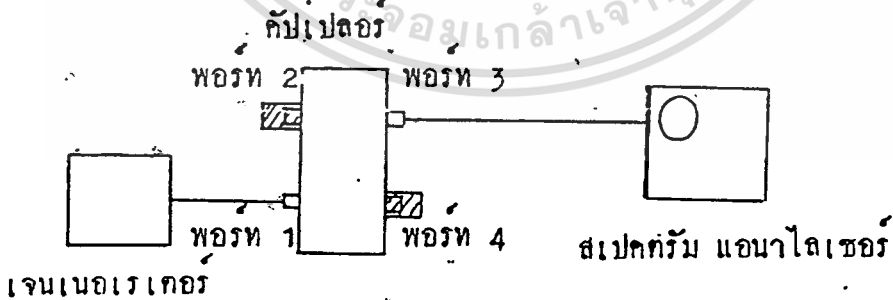
จากรูปที่ 4.9 วัดค่า RETURN LOSS ได้ 12 เดซิเบล

$$\text{จาก } R = -20 \cdot \log |T| \quad \dots (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } 12 &= -20 \cdot \log |T| \\ &= 0.25 \end{aligned}$$

$$\text{และจาก } VSWR = (1+|T|) / (1-|T|) \quad \dots (4.2)$$

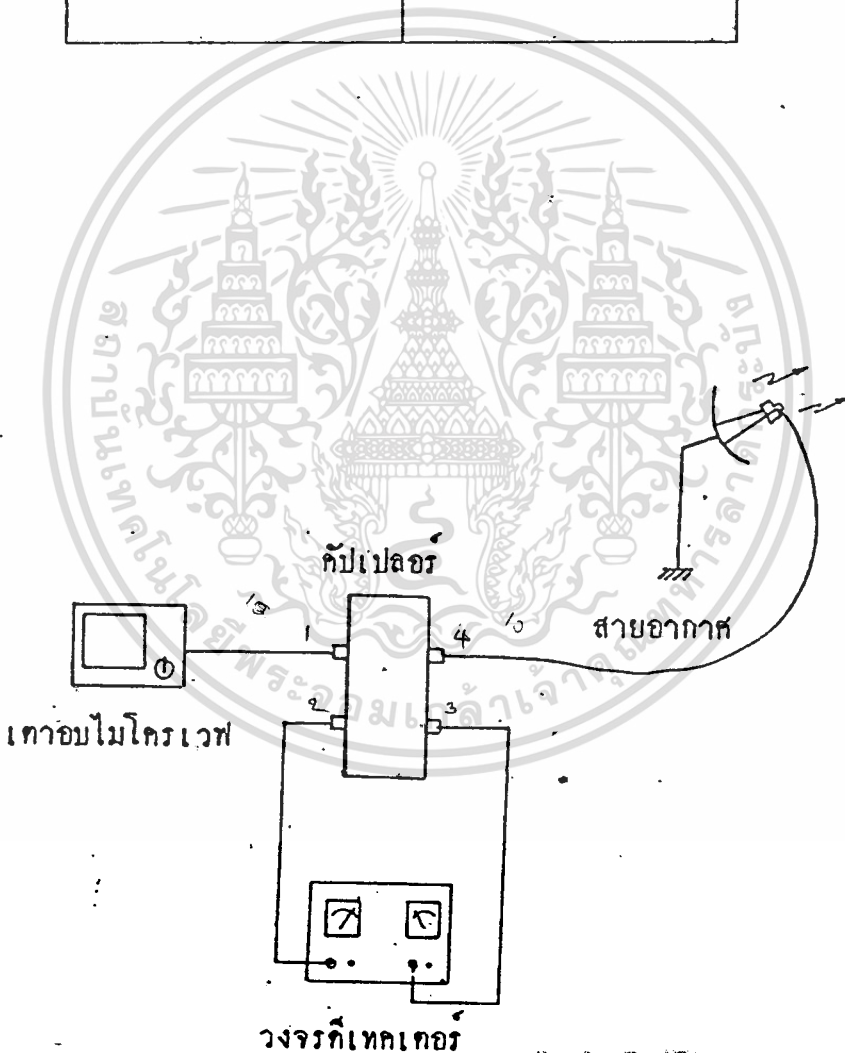
$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} &= (1+0.25) / (1-0.25) \\ \text{เพราะฉะนั้น } VSWR &= 1.67 \end{aligned}$$



รูปที่ 4.10 แสดงวิธีการของการทดลองที่ 4.5 ตอนที่ 2

ตารางที่ 4.6 แสดงกำลังงานที่วัดได้จากแต่ละพอร์ตของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์

พอร์ตที่	กำลังงาน (เดซิเบล) (กำลังสัมพัทธ์)
2	-36
3	-44
4	0

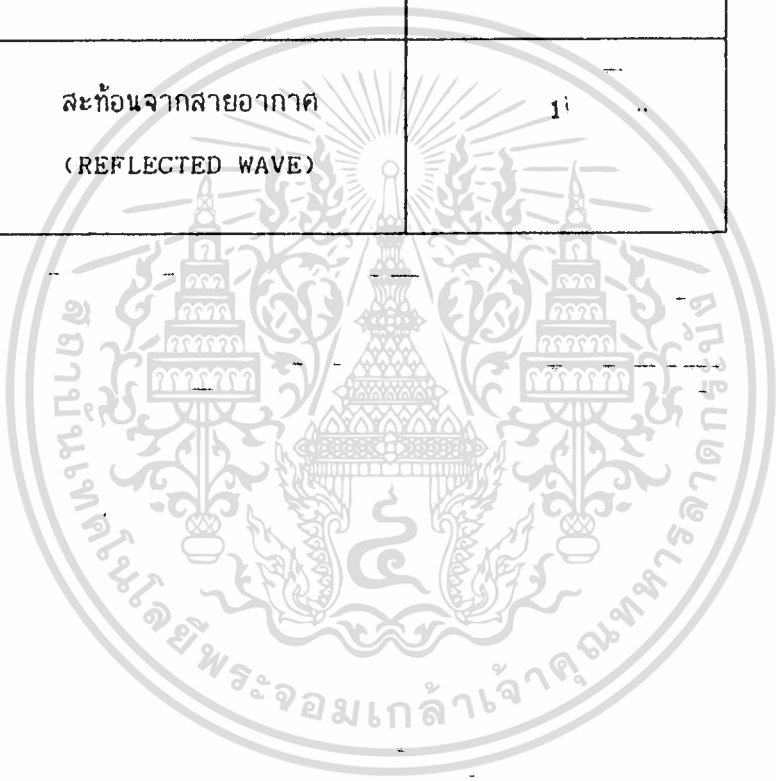


รูปที่ 4.11 แสดงวิธีการของการทดลองที่ 4.5 ตอนที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงกระแสที่วัดได้จากวงจรตีเทคเตอร์

ตำแหน่งวัด	กระแส (ไมโครแอมป์)
จาก เตาไมโครเวฟ (INCIDENT WAVE)	3
สะท้อนจากสายอากาศ (REFLECTED WAVE)	1



บทที่ 5

บทวิเคราะห์ และสรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ตลอดจนแนวทางแก้ปัญหาก็ได้ กระทำมาตั้งแต่ต้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา และแก้ไขระบบเครื่องส่งเรดาร์ และ เครื่องรับต่อไป

5.1 วิเคราะห์และวิจารณ์

ปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ที่ประสบอยู่ในโครงการนี้ สามารถแยกแยะ เป็นข้อๆ ได้ดังนี้

5.1.1 ปัญหาเกี่ยวกับข้อมูลของหลอดแมกนีตรอนที่ใช้ในโครงการนี้ เนื่องจากไม่มีข้อมูลใดๆ ที่บ่งบอกคุณสมบัติต่างๆ ของหลอดแมกนีตรอนตัวนี้เลย เช่น ใช้กระแส เท่าใด โวลเตจที่ใช้อยู่ในช่วงใด ประสิทธิภาพของหลอดเป็นอย่างไร ตลอดจนอิมพีแดนซ์ ของหลอด ซึ่งเป็นอุปสรรคในการใช้งาน ด้วยเหตุที่ว่า จะมีผลกระทบกับการออกแบบ วงจรมอดดูเลเตอร์ แม้ว่าจะพยายามติดต่อไปยังบริษัทผู้ผลิต และ ค้นคว้าในที่ต่างๆ ก็ไม่ ปรากฏว่าพบข้อมูลใดๆ เลย ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้ทำการทดลองต่างๆ เพื่อประเมินค่า หากคุณสมบัติบางอย่างของหลอดแมกนีตรอนไปพร้อมๆ กับการออกแบบและสร้างวงจรมอดดูเล-เตอร์ ซึ่งภายหลังพบว่า วงจรมอดดูเลเตอร์ที่ได้ออกแบบมา ไม่มีความเหมาะสมกับ หลอดแมกนีตรอนตัวนี้

5.1.2 ปัญหาในการออกแบบวงจรมอดดูเลเตอร์ ซึ่งก่อนที่จะตัดสินใจนำเอา สัญญาณจากเตาอบไมโครเวฟ มาใช้งานเลยนั้น ได้ทำการออกแบบวงจรมอดดูเลเตอร์ ขึ้น ใช้งานถึง 2 แบบ คือวงจรมอดดูเลเตอร์ แบบที่ใช้เอสซีอาร์ และวงจรมอดดูเลเตอร์แบบ ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ ในขั้นแรกได้ศึกษาและออกแบบวงจรมอดดูเลเตอร์แบบเอสซีอาร์ ปรากฏ ว่ามีปัญหาในการควบคุมความกว้างของพัลส์เนื่องจาก PFN (PULSE FORMING NETWORK) ซึ่งเป็นวงจรควบคุมความกว้างของพัลส์ ไม่สามารถทำงานได้ตามความต้องการได้ ประกอบ กับหม้อแปลงขึ้นซึ่งเป็น หม้อแปลงแบบพัลส์ (PULSE TRANSFORMER) มีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้พัลส์ที่ด้านเข้าที่พทกว้างเกินไปไม่เหมาะกับระบบเครื่องส่งเรดาร์ จึงได้เปลี่ยนการ เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบมาเป็นวงจรมอดูเลเตอร์แบบที่ใช้ทรานซิสเตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมความกว้างของพัลส์ได้ง่าย และให้รูปร่างพัลส์ที่ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตาม วงจรนี้สามารถให้กำลังงานประมาณ 100 - 200 วัตต์ (เท่าที่ทรานซิสเตอร์จะสามารถทนได้) แต่หลอดแมกนีตรอนที่ใช้ ต้องการพลังงานต่ำสุดประมาณ 500 วัตต์ ทำให้วงจรมอดูเลเตอร์นี้ไม่สามารถใช้ได้ เพราะจ่ายกำลังไม่พอ หลอดแมกนีตรอนจึงไม่สามารถทำงานได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้ต้องหันไปทบทวนวงจรมอดูเลเตอร์ แบบที่ใช้เอสซีอาร์ อีกครั้ง แต่ก็ประสบปัญหาเหมือนอย่างที่เคยพบในตอนแรก ด้วยเหตุนี้ จึงได้นำสัญญาณจากเตาอบไมโครเวฟมาใช้แทนเลย

5.1.3 ปัญหาในการออกแบบและสร้างสายอากาศแบบพาราโบลา อุปสรรคที่พบ นอกจากปัญหาในการขึ้นรูปตัวสะท้อน และการตัดแผ่นเส้นทองแดงให้โค้งแล้ว ยังมีปัญหาในเรื่องการวัดคุณสมบัติของสายอากาศ เช่น อัตราขยาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วต้องวัดเทียบกับสายอากาศแบบไดโพล แต่เนื่องจากการทำสายอากาศแบบไดโพล ในย่านความถี่นี้ทำได้ค่อนข้างยาก จึงใช้สายอากาศแบบฮอร์นเป็นตัวเปรียบเทียบ ดังนั้นในการวัดอัตราขยายของสายอากาศแบบพาราโบลานี้จึงเป็นการวัดที่ไม่ถูกต้องนัก แต่ก็ใกล้เคียงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้

5.1.4 ปัญหาและอุปสรรคในการออกแบบไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ และวงจรดีเทคเตอร์ ในกรณีของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ เนื่องจากคัปเปิลเลอร์แบบ SHIELD-STRIP TRANSMISSION LINE นี้เหมาะกับการออกแบบเมื่อค่าคัปปลิ่งมีค่าระหว่าง 3-20 เดซิเบล แต่ในการใช้งานต้องการค่าคัปปลิ่ง 30-40 เดซิเบล จึงได้ทำการทดลองออกแบบดู ปัญหาที่พบคือค่า s/b ไม่สามารถกำหนดแน่นอนลงไปได้ ต้องใช้ค่าประมาณ แต่จากการประมาณค่า s/b นี้ คัปเปิลเลอร์ที่สร้างขึ้นก็มีค่าคัปปลิ่งใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ นอกจากนี้ยังมีปัญหาในเรื่องแมทซ์ซึ่ง ซึ่งได้กล่าวเอาไว้ในตอนต้นแล้ว ในส่วนของวงจรดีเทคเตอร์ เนื่องจากเราไม่มีข้อมูลของไดโอดที่ใช้งานอย่างเพียงพอ จึงทำให้ไม่สามารถออกแบบวงจรแมทซ์ซึ่งได้ แต่ก็ไม่ใช่ปัญหาสำคัญมากนัก เพราะจุดประสงค์ของการใช้งานวงจรดีเทคเตอร์ก็คือต้องการวัดกำลังงานสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งในขั้นนี้ก็ใช้งานได้ดีแล้ว

5.2 สรุป

สำหรับเครื่องส่งเรดาร์ในโครงการนี้ ได้ทดลองส่งสัญญาณออกไปปรากฏว่า สามารถใช้งานได้ แม้ว่าสัญญาณที่รับได้ค่อนข้างกระเพื่อม ซึ่งมีสาเหตุมาจาก สัญญาณที่ได้จากเตาอบไมโครเวฟนั่นเอง และในส่วนของสายอากาศ ก็สามารถทำงานได้ดีเช่นกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่จนดานการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะสายอากาศตัวไม่มีค่า VSWR ประมาณ 1.13:1 ซึ่งทำให้คลื่นสะท้อนกลับไปยังเครื่องส่งมีค่าน้อย นอกจากนี้ สำหรับส่วนของเครื่องมีอวัต ซึ่งประกอบไปด้วยไดเรกชันแนลคัมเพลกซ์ และวงจรถิเทคเตอร์ ก็สามารถทำงานได้ ถึงแม้ว่าพลังงานของสัญญาณที่ออกมาจากเตาอบไมโครเวฟจะมีค่าค่อนข้างสูงก็ตาม ซึ่งพิจารณาโดยรวมแล้ว โครงการนี้เห็นว่าสามารถกระทำตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้พอสมควร ถึงแม้ว่าจะมีบางส่วนบกพร่องไปบ้างก็ตาม ซึ่งก็หวังว่าสิ่งต่างๆ ที่ได้จากโครงการนี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องส่งเรดาร์ให้ดีขึ้นต่อไป รวมถึงการออกแบบเครื่องรับที่จะนำมาใช้กับระบบเครื่องส่งชุดนี้ด้วย.



2N2646 (SILICON)

-63-

2N2647



Silicon annular PN unijunction transistors designed for use in pulse and timing circuits, sensing circuits and thyristor trigger circuits.

CASE 22A
(TO-18 Modified)
(Lead 3 connected to case)

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
RMS Power Dissipation*	P_D	300*	mW
RMS Emitter Current	I_e	50	mA
Peak Pulse Emitter Current**	I_e	2.0**	Amp
Emitter Reverse Voltage	V_{B2E}	30	Volts
Interbase Voltage	V_{B2B1}	35	Volts
Operating Junction Temperature Range	T_J	-65 to +125	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

* Derate 3.0 mW/ $^\circ\text{C}$ increase in ambient temperature. The total power dissipation (available power to Emitter and Base-Two) must be limited by the external circuitry.

** Capacitor discharge — 10 μF or less, 30 volts or less.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (I_B = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Intrinsic Standoff Ratio (V _{BZB1} = 10 V) (Note 1)	η	0.56 0.68	—	0.75 0.82	—
Interbase Resistance (V _{BZB1} = 3 V, I _E = 0)	R _{BB}	4.7	7.0	9.1	K ohms
Interbase Resistance Temperature Coefficient (V _{BZB1} = 3 V, I _E = 0, T _A = -55°C to +125°C)	αR_{BB}	0.1	—	0.8	%/°C
Emitter Saturation Voltage (V _{BZB1} = 10 V, I _E = 50 mA) (Note 2)	V _{EB1(sat)}	—	3.5	—	Volts
Modulated Interbase Current (V _{BZB1} = 10 V, I _E = 50 mA)	I _{B2(mod)}	—	15	—	mA
Emitter Reverse Current (V _{BZB1} = 30 V, I _{B1} = 0)	I _{EO}	—	0.005 0.005	12 0.2	μ A
Peak Point Emitter Current (V _{BZB1} = 25 V)	I _p	—	1.0 1.0	5.0 2.0	μ A
Valley Point Current (V _{BZB1} = 20 V, R _{B2} = 100 ohms) (Note 2)	I _v	4.0 8.0	6.0 10	— 18	mA
Base-One Peak Pulse Voltage (Note 3, Figure 3)	V _{OB1}	3.0 6.0	5.0 7.0	— —	Volts

NOTES

- Intrinsic standoff ratio, η , is defined by equation:

$$\eta = \frac{V_p - V_{(EB1)}}{V_{BZB1}}$$
 Where V_p = Peak Point Emitter Voltage
 V_{BZB1} = Interbase Voltage
 V_(EB1) = Emitter to Base-One Junction Diode Drop
 (-0.5 V @ 10 μ A)
- Use pulse techniques: PW ~ 300 μ s duty cycle < 2% to avoid internal heating due to interbase modulation which may result in erroneous readings
- Base-One Peak Pulse Voltage is measured in circuit of Figure 3. This specification is used to ensure minimum pulse amplitude for applications in SCR firing circuits and other types of pulse circuits

FIGURE 1 — UNIJUNCTION TRANSISTOR SYMBOL AND NOMENCLATURE

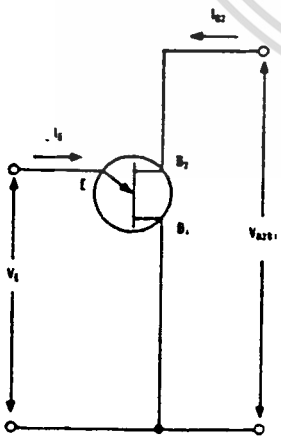


FIGURE 2 — STATIC EMITTER CHARACTERISTIC CURVES (Exaggerated to Show Details)

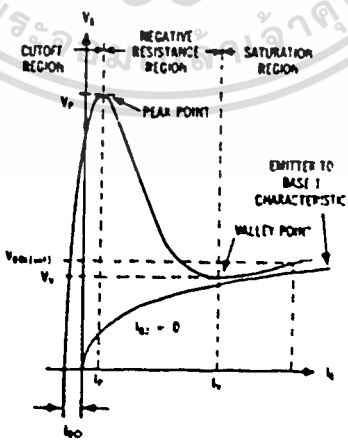
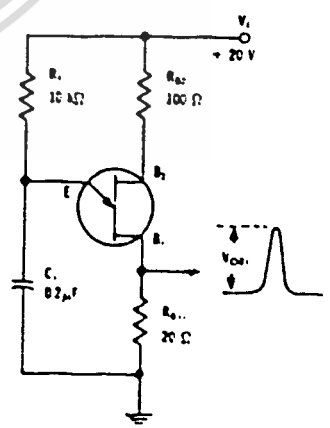


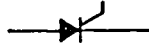
FIGURE 3 — V_{OB1} TEST CIRCUIT (Typical Relaxation Oscillator)



2N4441 (SILICON)

thru

2N4444



PLASTIC THYRISTORS

... designed for high-volume consumer phase-control applications such as motor speed, temperature, and light controls and for switching applications in ignition and starting systems, voltage regulators, vending machines, and lamp drivers requiring:

- Small, Rugged, Thermopad Construction – for Low Thermal Resistance, High Heat Dissipation, and Durability.
- Practical Level Triggering and Holding Characteristics – $I_{GT} = 7.0 \text{ mA}$, $I_H = 6.0 \text{ mA}$ (Typ) @ 25°C
- Low "On" Voltage – $V_F = 1.0 \text{ Volt}$ (Typ) @ 5.0 Amps @ 25°C
- High Surge Current Rating – $I_{TSM} = 80 \text{ Amps}$

PLASTIC SILICON CONTROLLED RECTIFIERS

**8.0 AMPERES RMS
50 thru 600 VOLTS**

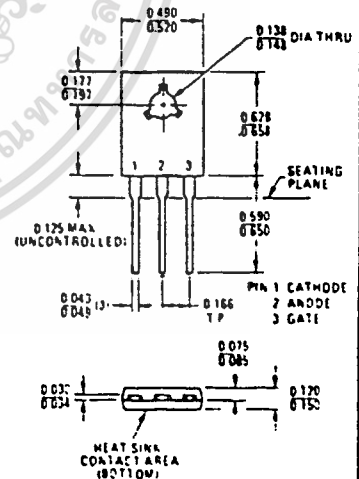
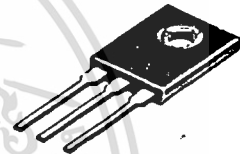
MAXIMUM RATINGS ($T_J = 100^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
*Peak Reverse Blocking Voltage (Note 1)	V_{RRM}		Volts
2N4441		50	
2N4442		200	
2N4443		400	
2N4444		600	
*Non-Repetitive Peak Reverse Blocking Voltage ($t = 5.0 \text{ ms}$ (max) duration)	V_{RSM}		Volts
2N4441		75	
2N4442		300	
2N4443		600	
2N4444		700	
*Forward Current RMS (All Conduction Angles)	$I_T(\text{RMS})$	8.0	Amps
*Peak Forward Surge Current (1/2 cycle, 60 Hz)	I_{TSM}	80	Amps
Circuit Fusing Considerations ($T_J = -40$ to $+100^\circ\text{C}$, $t = 1.0$ to 8.3 ms)	I^2t	25	A^2s
*Peak Gate Power	P_{GM}	5.0	Watts
*Average Gate Power	$P_{G(\text{AV})}$	0.5	Watt
*Peak Gate Current	I_{GM}	2.0	Amps
*Peak Gate Voltage	V_{GM}	10	Volts
*Operating Junction Temperature Range	T_J	-40 to $+100$	$^\circ\text{C}$
*Storage Temperature Range	T_{stg}	-40 to $+150$	$^\circ\text{C}$
Mounting Torque (6-32 screw) (Note 2)	-	8.0	in lb

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Typ	Max	Unit
*Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	-	25	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	40	-	$^\circ\text{C/W}$

*Indicates JEDEC Registered Data



ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
*Peak Forward Blocking Voltage ($T_J = 100^\circ\text{C}$) Note 1	V_{DRM}				Volts
2N4441		50	-	-	
2N4442		200	-	-	
2N4443		400	-	-	
2N4444		600	-	-	
Peak Forward Blocking Current (Rated V_{DRM} @ $T_J = 100^\circ\text{C}$, gate open)	I_{DRM}	-	-	2.0	mA
Peak Reverse Blocking Current (Rated V_{DRM} @ $T_J = 100^\circ\text{C}$, gate open)	I_{RRM}	-	-	2.0	mA
Gate Trigger Current (Continuous dc) (Anode Voltage = 7.0 Vdc, $R_L = 100$ ohms) $T_C = 25^\circ\text{C}$ * $T_C = -40^\circ\text{C}$	I_{GT}	-	7.0	30 60	mA
Gate Trigger Voltage (Continuous dc) (Anode Voltage = 7.0 Vdc, $R_L = 100$ ohms) $T_C = 25^\circ\text{C}$ *(Anode Voltage = 7.0 Vdc, $R_L = 100$ ohms) $T_C = -40^\circ\text{C}$ *(Anode Voltage = Rated V_{FOM} , $R_L = 100$ ohms) $T_J = 100^\circ\text{C}$	V_{GT}	-	0.75	1.5 2.5	Volts
Forward "On" Voltage ($I_F = 5.0$ A peak) *($I_F = 15.7$ A peak)	V_T	-	1.0	1.5 2.0	Volts
Holding Current (Anode Voltage = 7.0 Vdc, gate open) $T_C = 25^\circ\text{C}$ * $T_C = -40^\circ\text{C}$	I_H	-	6.0	40 70	mA
Turn-On Time ($I_F = 5.0$ A, $I_{GT} = 20$ mA)	t_{on}	-	1.0	-	μs
Turn-Off Time ($I_F = 5.0$ A, $I_R = 5.0$ A) ($I_F = 5.0$ A, $I_R = 5.0$ A, $T_J = 100^\circ\text{C}$)	t_{off}	-	15 20	-	μs
Forward Voltage Application Rate ($T_J = 100^\circ\text{C}$)	dv/dt	-	50	-	V/ μs

*Indicates JEDEC Registered Data

Note 1. Ratings apply for zero or negative gate voltage but positive gate voltage shall not be applied concurrently with a negative potential on the anode. When checking forward or reverse blocking capability, thyristor devices should not be tested with a constant current source in a manner that the voltage applied exceeds the rated blocking voltage.

Note 2. Torque rating applies with use of torque washer (Shake-proof WD19522 #6 or equivalent). Mounting torque in excess of 8 in. lbs does not appreciably lower case-to-sink thermal resistance. Anode lead and heatsink contact pad are common.

For soldering purposes (either terminal connection or device mounting), soldering temperatures shall not exceed $+225^\circ\text{C}$.

FIGURE 1 - MAXIMUM FORWARD VOLTAGE

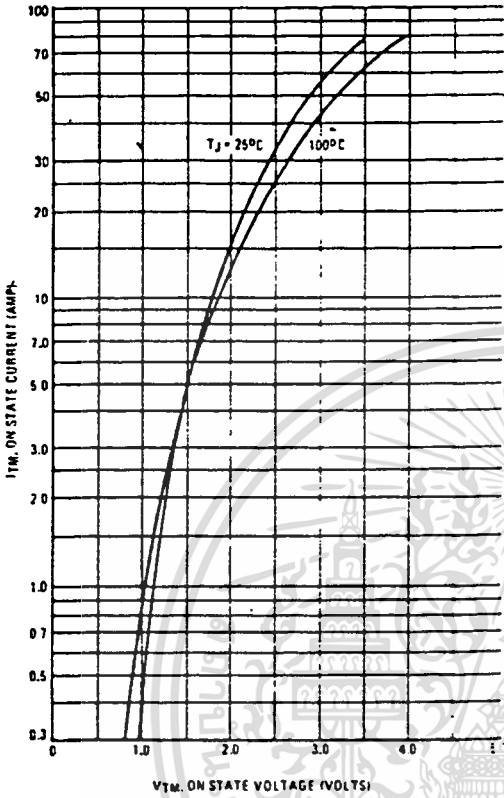


FIGURE 2 - POWER DISSIPATION

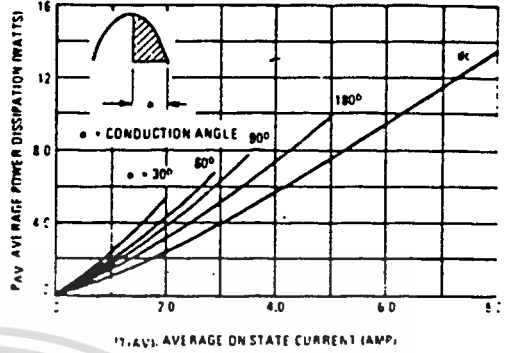


FIGURE 3 - AVERAGE CURRENT DERATING

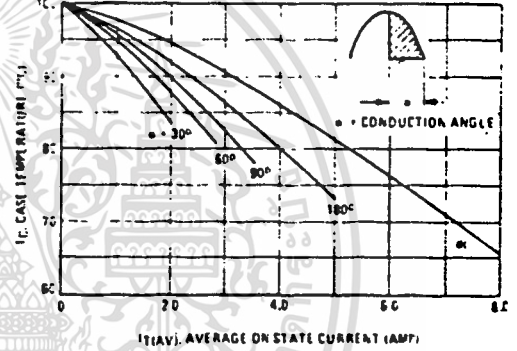
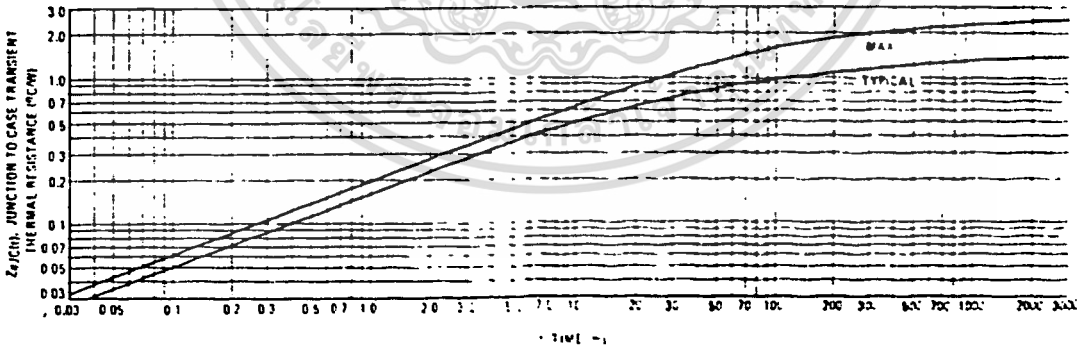


FIGURE 4 - THERMAL RESPONSE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIGURE 5 - MAXIMUM ALLOWABLE SURGE CURRENT

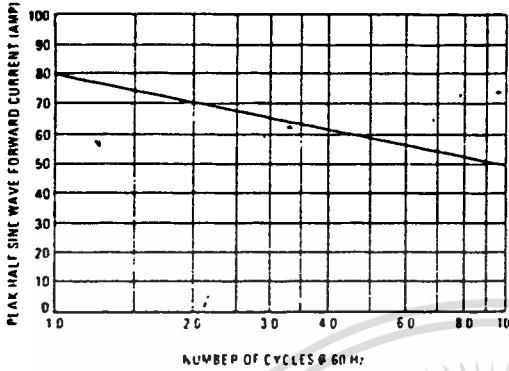


FIGURE 6 - TYPICAL HOLDING CURRENT

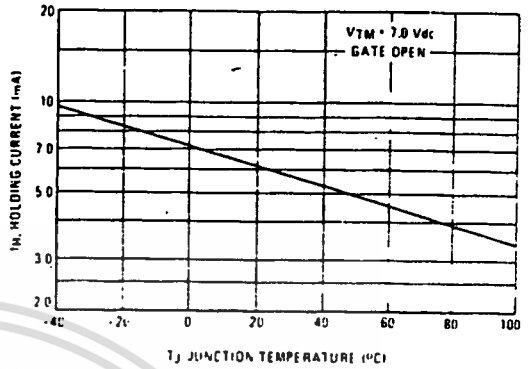


FIGURE 7 - TYPICAL GATE TRIGGER CURRENT

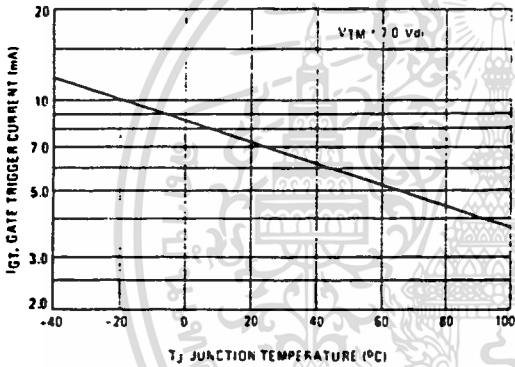
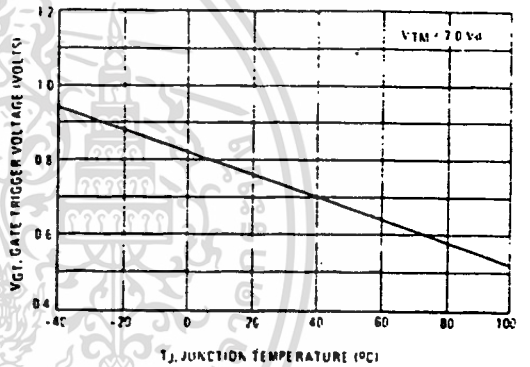


FIGURE 8 - TYPICAL GATE TRIGGER VOLTAGE



SELECTED THYRISTOR TRIGGER APPLICATION NOTES

- AN-240 - SCR Power Control Fundamentals
- AN-290A - Mounting Procedure for, and Thermal Aspects of, Thermopad Plastic Power Devices
- AN-295 - Suppressing RFI in Thyristor Circuits
- AN-422 - Testers for Thyristors and Trigger Diodes
- AN-453 - Zero Point Switching Techniques

To obtain copies of these notes list the AN numbers¹ on your company letterhead and send your request to:

Technical Information Center
 Motorola Semiconductor Products, Inc.
 P.O. Box 20924
 Phoenix, Arizona 85036

- A_{FE} Gain
- f_T Transition frequency
- I_C Collector current
- I_b Continuous drain current
- I_F Forward current
- I_R Reverse current
- P_{tot} Total power dissipation
- t_{r01} Reverse recovery time
- V_{CBO} Collector-base reverse voltage
- V_{CEO} Collector-emitter reverse voltage
- V_{CES} Collector-emitter voltage
- V_{DS} Drain-source voltage
- V_F Forward voltage
- V_R Reverse voltage

Diodes

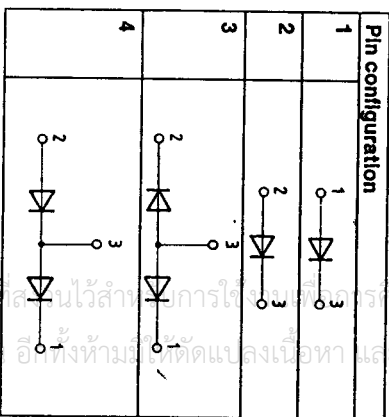
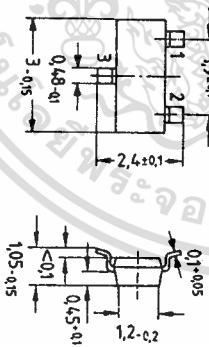
Dual diodes

Type	V_R	V_F $I_F = 200 \text{ mA}$	I_R at V_R	t_r	pin con-figuration No.	Ordering code	Min. qty.	500 to 499	1000 to 999	3000 to 9999
BAV 99 ¹⁾	70	$\leq 0,71$	$\leq 2,5$	≤ 6	4	Q6800-A549	100			
BAW 56 ²⁾	70	$\leq 0,71$	$\leq 2,5$	≤ 6	3	Q62702-A688	100			

Planar switching diodes

Type	V_R	I_F	P_{tot}	t_r	Pin con-figuration No.	Ordering code	Min. qty.	500 to 499	1000 to 999	3000 to 9999
▲ BAL 74	50	150	180	≤ 2	1	Q62702-A718	100			
▼ BAR 74	50	150	180	≤ 2	2	Q62702-A704	100			

BAV 99, BAW 56, BAL 74, BAR 74
Plastic package SOT 23 (TIO 236)



¹⁾ Code letter "A7" or "JE".
²⁾ Code letter "A1" or "JD".

กิติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้โดยได้รับคำแนะนำ และความช่วยเหลือ
เป็นอย่างดีจาก

อาจารย์ กิตติชัย พาณิชปฐมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

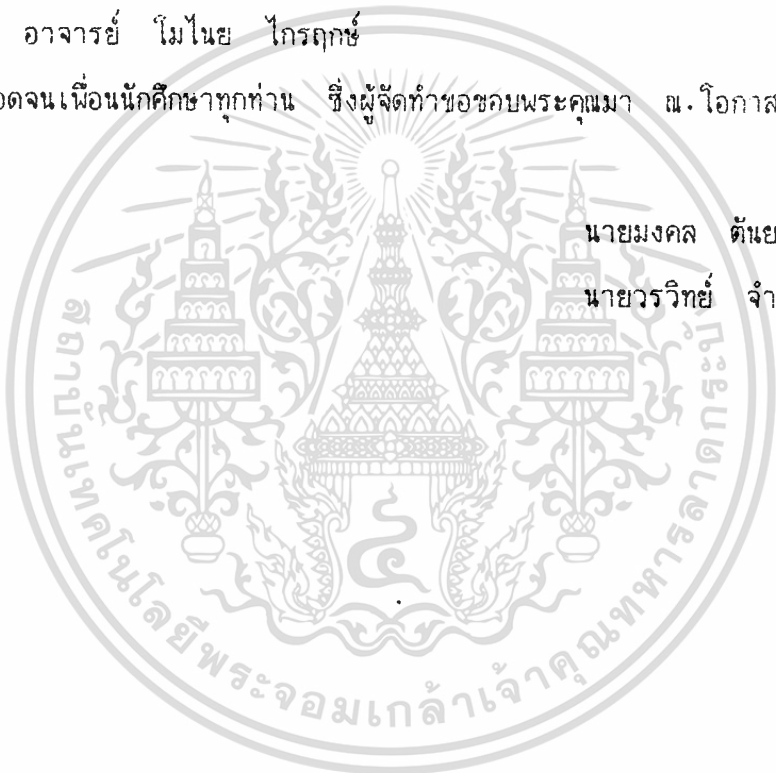
อาจารย์ สมพล โกศลวิตร

อาจารย์ ไม่นาย ไกรฤกษ์

ตลอดจนเพื่อนนักศึกษาทุกท่าน ซึ่งผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ. โอกาสนี้ด้วย

นายมงคล ดันยลักษณ์

นายวรวิทย์ จำปาไชยศรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. Samuel Siver , "Microwave Antenna Theory and Design"
McGraw-Hill Book Company, NewYork, 1949, pp 449-450.
2. Camden N.J., "Point to Point Radio Reley System"
RCA Service Company, NewYork, 1954, pp 75-77.
3. A.W. Lone, "Reflector Antenna", The Institute of
Electrical and Electronics Engineering Inc., NewYork,
1978, pp 22-23.
4. Victor F. Veley, "Microwave Technology", Prentice-Hall
Inc., NewJersy, 1987, pp 113.
5. Merril L. Skonik, "Introduction to Radar System",
McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1986, pp 5-6,70-72.
6. George W.Encll, "Radar Transmitter", McGraw-Hill Book
Company, NewYork, 1981, pp 1-3.
7. John D. Kraus, "Electromagnetics", McGraw-Hill Book
Company, Singapore, 1984, pp 534-560.
8. Constantine A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and
Design", Harper & Row Publishers, NewYork, 1982, pp 594-609
9. Thomas A. Milligan, "Modern Antenna Design", McGraw-Hill
Book Company, NewYork, 1985, pp 220-221
10. Leo Young, "Parallel Coupled Lines and Directional
Couplers", Artech House Inc., Massachusetts, 1972, pp 27-36.

QA 76.6 486p