

การวิเคราะห์หาวัสดุเรการ



เรืออากาศเอก วารินทร์ เจริญรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาโทบริหาร

ศาสตรบัณฑิต สาขาบริหารการพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

พ.ศ. ๒๕๒๖

หอสมุด

กองห้องสมุด

**THEORETICAL ANALYSIS
OF
ANTI-RADAR MATERIALS CLASSIFICATION**

Capt. Varin Charoenrat

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Mahidol University

1983

Copyright by Mahidol University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... *Signature*

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์

..... *Signature* ประธานกรรมการ

..... *Signature* กรรมการ

..... *Signature* กรรมการ

..... กรรมการ

อาจารย์ผู้ควบคุมการวิจัย อาจารย์ ดร. วุทธิพันธุ์ ประชุมฤทธิ์

อธิการบดีของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์หาวัสดุเรคาร์
ชื่อ เรืออากาศเอก วารินทร์ เจริญรัตน์
ปีการศึกษา ๒๕๒๖

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์นี้ เพื่อจะศึกษาหาวัสดุที่มีโซอยู่ในประเทศ มาประกอบ
อากาศยานที่มีสมรรถนะสูง เพื่อป้องกันการทำจ็อบของเรคาร์ จะลดความสูญเสียชีวิตและ
อากาศยาน และเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายของประเทศ การดำเนินการวิจัยใช้วิธีสร้าง
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้แทนระบบจริงแล้วนำมาวิเคราะห์หาวัสดุ แล้วพิจารณา
จากการทดลองโดยไมโครเวฟ ในการวิจัยครั้งนี้พบว่าวัสดุตัวอย่าง เช่น ไฟเบอร์
(glass fiber) ที่มีค่าไดอิเล็กตริกคงที่ ๔.๐ - ๔.๕ และค่าความแข็งแรงของ
ไดอิเล็กตริก (Dielectric Strength, volt 1 mil ๑๕๐ - ๔๐๐ และค่า
ความอ่อนตัว (attenuation coefficient) สามารถนำมาใช้กับอากาศยานโดยการ
ติดตั้งให้ติดกับผิวของอากาศยานที่ความหนาที่เหมาะสม ที่ทำให้สามารถหักล้างคลื่นเรคาร์ได้
ทั้งนั้นการวิจัยครั้งนี้ สนับสนุนการหาวัสดุที่มีโซอยู่ในประเทศ เพื่อที่จะนำมาใช้ และจะต้อง
สอดคล้องกับหลักพลศาสตร์ทุกประการ

Thesis title : Theoretical Analysis of Anti-radar materials classification.

Name : Varin Charoenrat

Academic Year : 1983

Abstract

The objective of this analysis is to find out materials available in Thailand that can be used to protect high-performance aircraft from radar detecting, thus will save lives, the aircraft and the budget of the country. The method of this analysis is to bring the simulation mathematical model to find out the materials and figure it out from the microwave experiment.

This research is about a glass fiber with a di-electric constant of 4.0 - 4.5, and di-electric strength, volt mil 150-400 and its attenuation coefficient.

All these quantites can be used to attach with the surface of the aircraft which is thick enough to neutralized the searching of radar wave.

This research encouraged to use the available materials in the country, that must also be in line with the aerodynamic principle.

พิธีกรรมประกาศ

วิธานิพนธ์นี้มีค่าเรื่อควมความกรุณาของอาจารย์ กร. วุทธิพันธุ์ ปรินิพนธ์
ซึ่งให้การปรึกษา คำแนะนำ และตลอดจนให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่ง จึงขอขอบพระคุณ
ท่านไว้ ณ ที่นี้

ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ พลอากาศเอก กร. ศิริสุทธิ์ ฤทธาคนี
ที่ท่านได้กรุณาช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา

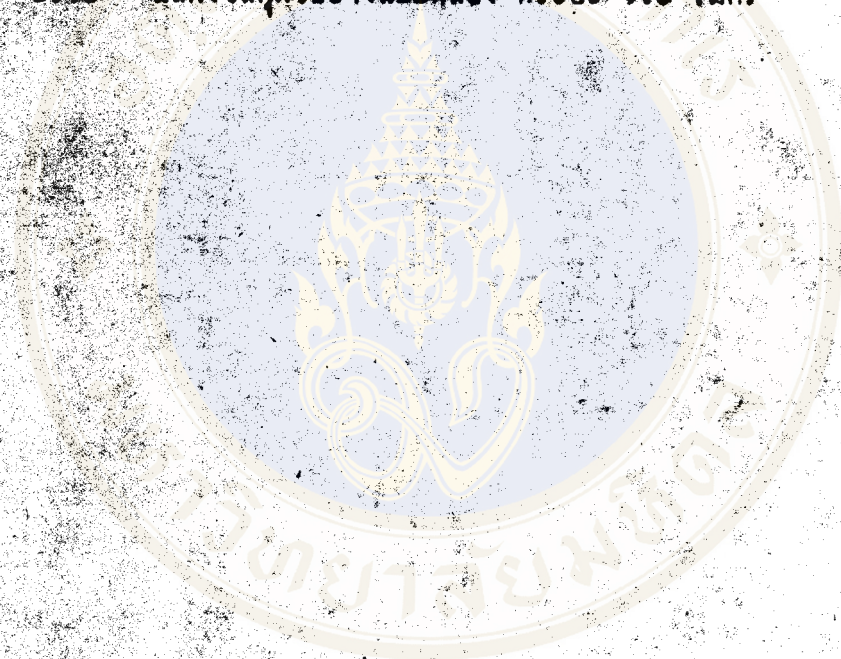


รายการตารางประกอบ

ตารางที่

หน้า

๔.๑๓	แสดงวัสดุตัวอย่างแบบแรก ที่ระยะ ๐ เมตร	๕๓
๔.๑๔	แสดงวัสดุตัวอย่างแบบแรก ที่ระยะ ๐.๕ เมตร	๕๔
๔.๑๕	แสดงวัสดุตัวอย่างแบบที่สอง ที่ระยะ ๐ เมตร	๕๔
๔.๑๖	แสดงวัสดุตัวอย่างแบบที่สอง ที่ระยะ ๐.๕ เมตร	๖๐



รายการรูปประกอบ

รูปที่

หน้า

๑	แสดงหลักการทำงานของระบบเรเคอร์	๓
๒.๓	แสดงการหักเห	๑๕
๒.๔	การสะท้อนและการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวของ ไดอิเล็กตริก	๑๖
๒.๗	แสดงการสะท้อนแสงของฟิล์มบาง	๑๘
๒.๘	แสดงการสะท้อนกลับหมดของคลื่นหักเห	๒๑
๔.๑ ก	แสดงรีเฟลคซ์โคลสตรอน	๓๓
๔.๑ ข	รีเฟลคซ์โคลสตรอน	๓๘
๔.๒	แสดงเวฟมิเตอร์	๔๐
๔.๓	แสดงแอทเทนูเอเตอร์	๔๑
๔.๔	แสดง Rotary Vane Attenuator	๔๓
๔.๕	แสดงตัวตรวจวัดคลื่นสติก	๔๔
๔.๖	แสดง Directional Coupler	๔๖
๔.๗	แสดง SWR - Meter	๔๘
๔.๘	แสดงเครื่องตรวจจับคลื่น	๔๙
๔.๑๐	แสดงการศึกษาความถี่โคลสตรอน	๕๓
๔.๑๒	แสดงการวัดคลื่นสติกโดยใช่	๕๖

สารบัญ

บทคัดย่อ	ภาษาไทย	หน้า
บทคัดย่อ	ภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ		จ
รายการตารางประกอบ		ฉ
รายการรูปประกอบ		ช
บทที่		ซ

๑. บทนำ

- ๑.๑ ประวัติและที่มาของเรคาร์
- ๑.๒ ส่วนประกอบของเรคาร์
- ๑.๓ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
- ๑.๔ วัตถุประสงค์การวิจัย
- ๑.๕ ประโยชน์ของการวิจัย
- ๑.๖ ขอบเขตการวิจัย
- ๑.๗ เนื้อหาในแต่ละบท มีโดยสังเขปดังนี้

๒. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการวิจัย

- ๒.๑ สมการของแมกซ์เวลล์ ที่อธิบายถึงปรากฏการณ์ของคลื่น
- ๒.๒ การหักเหของคลื่น
- ๒.๓ กฎของสเนลล์ และคัมน์หักเห
- ๒.๔ การสะท้อนและการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวของไดอิเล็กตริก
- ๒.๕ การเปลี่ยนเฟสของคลื่นเนื่องจากการสะท้อน
- ๒.๖ การหาความยาวคลื่นในควักลางต่าง ๆ
- ๒.๗ การสะท้อนแสงของฟิล์มบาง
- ๒.๘ การหาขนาดความหนาของวัสดุที่ทำให้เกิดคลื่นสติด

	หน้า
๓. การจำลองแบบปัญหาระบบงาน	๒๓
๓.๑ การจำลองแบบแบบปัญหา	๒๓
๓.๒ การสร้างรูปแบบปัญหาของการจำลองแบบปัญหา	๒๓
๓.๓ จุดประสงค์การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	๒๔
๓.๔ การสร้างแบบจำลอง การเคลื่อนที่เรคาร์ที่กระทบเป้า	๒๖
๓.๕ การสร้างแบบจำลองของคลื่นเรคาร์ที่สะท้อนเป้า เมื่อเทียบกับ คลื่นตกกระทบเป้าที่ผิวของเป้า	๒๗
๓.๖ การสร้างแบบจำลองของคลื่นเรคาร์ที่หักเห (ทะลุ) เข้าไปในเป้า เทียบกับคลื่นตกกระทบเป้า	๒๘
๓.๗ การสร้างแบบจำลองของคลื่นเรคาร์ที่หักเหเข้าไปในวัตถุเมื่อเกิด การสะท้อนกลับหมด	๒๘
๓.๘ การสร้างแบบจำลอง เพื่อให้ความหนาของวัสดุที่เหมาะสม ที่จะให้ คลื่นทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุแล้วสะท้อนกลับ มาหักล้างกับคลื่นเรคาร์ ที่สะท้อนที่ผิวของวัสดุ	๓๐
๓.๙ ความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ใน Computer	๓๐
๓.๑๐ การเขียน Program Computer	๓๑
๔. ส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์และการทดลอง	๓๕
๔.๑ รีฟลักซ์ไคลสตรอน (Reflex Klystron)	๓๖
๔.๒ เวฟไมเตอร์	๓๘
๔.๓ แอทเทนูเอเตอร์	๔๑
๔.๔ Rotary Vane Attenuator	๔๒
๔.๕ ทิวทรวจวัคคลื่นสติก	๔๔
๔.๖ เครื่องต่อให้เป็นไปตามทิศทาง	๔๕
๔.๗ เครื่องทรวจวัคคลื่นสติก	๔๗

	หน้า
๔.๔ เครื่องตรวจวัดคลื่น	๔๔
๕.๕ การเตรียมสารตัวอย่าง	๕๐
๕.๖๐ การศึกษาเรื่องความถี่แอมพลิจูดของ Klystron ที่ใช้ความถี่ สูงจากหลอดซีโคไดรอน	๕๖
๕.๖๑ การวัดคลื่นสถิติ	๕๕
๕.๖๒ การวัดค่าอัตราส่วนรองคลื่นสถิติบนวัสดุตัวอย่าง โดยใช้อุปกรณ์ SWR - Meter	๕๕
๕. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ	๖๐
ภาคผนวก	๖๓



บทที่ ๑

บทนำ

๑.๑ ประวัติและที่มาของเรกาท

การพัฒนาการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อจกตั้งเรกาท เริ่มค้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. ๑๘๓๓ โดยแมกซ์เวลล์ (Maxwell) อธิบายปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าว่าจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง เมื่ออยู่ในสุญญากาศ หลังจากนั้นในปี ค.ศ. ๑๘๘๖ Hertz ก็ทำการทดลอง ซึ่งมีผลยืนยันไว้ว่าคลื่นมีการเคลื่อนที่ (propagate) จริง ต่อจากนั้นในปี ค.ศ. ๑๙๐๑ มาร์โคนี (Marconi) ประสบผลสำเร็จในการส่ง สัญญาณวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกได้เป็นครั้งแรก ต่อมาในปี ค.ศ. ๑๙๐๒ Kennelly และ Heaviside ก็อธิบายถึงการส่งสัญญาณที่มีระยะทางไกลผ่านชั้นที่มีการสะท้อนกลับ (reflecting layer) ในชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้นไปก็คือ ชั้นไอโอโนสเฟียร์นั่นเอง ในปี ค.ศ. ๑๙๓๑ Karl G. Jansky ซึ่งทำงานอยู่ที่ Bell Laboratories ได้สังเกตเห็นหลังจากทำการวัด noise ที่ชั้นบรรยากาศ สรุปว่า noise สามารถทะลุทะลวง (penetrate) ผ่านชั้นบรรยากาศชั้นนอกสุดเข้ามาได้ ซึ่งทำให้เป็นการเริ่มต้นของ radio astronomy

Sir Robert Watson - Watt ซึ่งเป็นผู้อำนวยการแผนกวิทยุของ Nation Physical Laboratory ได้สรุปว่า การทำลายควมคลื่นวิทยุ นั้นจะต้องใช้พลังงานจำนวนมาก จึงจะทำลายได้ ในขณะที่การค้นหาวัดที่ระยะไกลมีความควรแก่การพิจารณามากกว่า ในเดือน ก.พ. ๑๙๓๕ เขาได้เตรียมบันทึกซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นการเริ่มต้นของเรกาทก็ว่าได้ ซึ่งในบันทึกนั้นได้แนะนำให้จกตั้งเป็น zone โดยใช้ short wave illumination เพื่อว่าเครื่องบินที่กำลังบินเข้ามาสามารถที่จะถูกค้นพบโดย reflecting wave ที่ระยะสูงสุด ๖๐ ไมล์ และอาจจะขยายออกไปเป็น ๒๐๐ ไมล์ ก็ได้

ในปี ค.ศ.๑๙๔๐ ความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์ ในเรื่องของ microwave ได้เกิดขึ้น เมื่อ J. T. Randall และ H.A.H. Boot ได้คิด magnetron ขึ้น ซึ่งจะให้ out-put power ที่เป็น pulse ถึง 1 K.W. มีความยาวคลื่น ๑๐ ซม. นี่เป็นการปรับปรุงครั้งหนึ่งที่ใช้ state-of-the-art -ruling และถือว่าเป็นการพัฒนาที่สำคัญที่สุดอันหนึ่งในการใช้ microwave ในเรดาร์

ในปี ค.ศ.๑๙๔๑ ราชนาวิสหรัฐ ได้อาศัยคลื่นวิทยุ (radio wave) เข้าช่วยคือ เครื่องส่งวิทยุจะกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไป เมื่อคลื่นวิทยุถูกขัดขวางหรือไปกระทบเป้า แล้วคลื่นจะสะท้อนกลับไปยังเครื่องรับ โดยวิธีการนี้จึงเกิดเป็นคำว่า RADAR เป็นคำอธิบายถึงหน้าที่ของเครื่องมือที่ใช้สำหรับ Radio Detection And Ranging นั่นเอง เราก็คงจะพิจารณาถึงส่วนประกอบของเรดาร์

๑.๒ ส่วนประกอบของเรดาร์

ระบบการทำงานของเรดาร์นั้น เป็นระบบที่ต้องการความถูกต้อง และความแม่นยำอย่างมาก จึงประกอบด้วยส่วนสำคัญ ๖ ส่วนดังนี้

๑. Timer เป็นตัวคอย supply สัญญาณ synchronize ซึ่งเวลาในการส่ง pulse และตัว Indicator ซึ่งทำให้การทำงานของระบบทำงานได้อย่างเหมาะสม

๒. Transmitter เป็นตัวที่ทำให้เกิด radio - frequency energy ในแบบของ short powerful pulse

๓. Antenna System นำ radio - frequency energy จากตัว transmitter ให้ radiate ไปในทิศทางอย่างแรง, ใ้รับเสียง echo และผ่านเสียง echo เข้าเครื่องรับ

*Reintjes and Coate, "Principles of Radar" McGraw-Hill Book Company, Inc. 1952.

๔. Receiver ใช้ขยายสัญญาณ radio - frequency pulse ที่อ่อนลงในขณะกลับมาจาก target และผลิตสัญญาณใหม่ ให้กับเครื่อง Indicator โดยทำเป็นสัญญาณ video pulse

๕. Indicator ผลิตเอา visual indication ของ echo pulse ในลักษณะที่เป็น information เรียบร้อยแล้ว

b. Power supply ใช้ในการจัดหา a-c และ d-c voltages ทั้งหมดในความจำเป็นสำหรับการทำงานของระบบเรดาร์ อธิบายได้ดังรูป ๑

จากนั้นเป็นต้นมาได้พัฒนาถึงระบบการใช้ไมโครเวฟ ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีแถบของความถี่เริ่มจากค่าประมาณ 10^5 เฮิรตซ์ (Hertz) ไปจนถึงค่าความถี่ประมาณ 10^{12} เฮิรตซ์ ถ้าเรานิยามเป็นความยาวคลื่น จะเริ่มประมาณ ๓.๐ ม.ม. ลงไปจนถึงความยาวคลื่น ๐.๓ ม.ม. ในแถบความถี่ที่กล่าวถึงข้างต้นแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ อีก แต่ละส่วนมีชื่อเรียกเพื่อสะดวกในการใช้งาน เช่น แถบเอ็กซ์มีความถี่อยู่ระหว่าง ๘.๒ ถึง ๑๒.๔ จิกะเฮิรตซ์

ในการส่งไมโครเวฟ จากตำแหน่งหนึ่งไปสู่อีกตำแหน่งหนึ่ง เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงาน เราจึงนิยมส่งไปตามสายส่ง (Transmission line) ซึ่งทำด้วยโลหะที่มักใช้กัน มี ทองเหลือง ทองแดง อะลูมิเนียม ในบางครั้งผิวของโลหะจะเคลือบด้วยเงิน หรือทองคำ สายส่งที่ใช้กันทั่ว ๆ ไป ได้แก่ ท่อนำคลื่น (wave guide) ประโยชน์ของไมโครเวฟส่วนมากใช้ในการคมนาคม ในเดือนกรกฎาคมปี ๑๙๖๒ ชาวยุโรปได้รับการถ่ายทอดสครายการจากสหรัฐอเมริกา โดยดาวเทียมดวงแรกที่ใช้ในการถ่ายทอดไมโครเวฟชื่อเทลสตาร์ (Telstar) จากนั้นเป็นต้นมา ความก้าวหน้าทางวิทยาการได้พัฒนามาเป็น microwave radar จนถึงปัจจุบัน

ในปัจจุบัน เรดาร์ส่วนมากยังคงทำงานบนหลักการพื้นฐานอันเดียวกัน แต่พัฒนาความถูกต้องขึ้นไปอีก ความก้าวหน้าที่สำคัญอีกอันหนึ่งก็คือการนำ signal processing ซึ่งมีการปรากฏ (appearance) เป็นแบบ electronic

computer ที่มีความสำคัญมากอีกอย่างหนึ่งก็คือ mapping radio ซึ่งจะใ้ภาพเหมือนกับภาพจริง (photograph-like picture) ที่สามารถรับใ้จาก information ที่ microwave radar จักหาข้อมูลใ้

๑.๓ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การป้องกันภัยทางอากาศ เป็นภารกิจของกองทัพอากาศของทุกประเทศในโลก โดยอาศัยเครื่องมือหลัก คือ การทำงานของระบบเรดาร์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ เช่นเกี่ยวกับอาวุธยุทโธปกรณ์อื่น ๆ ในสงครามทางอากาศศวรรษหน้า การสู้รบระหว่าง เครื่องบินกับเครื่องบินจะไม่มีใ้เห็นอีกต่อไป เพราะใ้วยระบบอาวุธปล่อยพิสัยปานกลาง แบบใหม่ ๆ นักบินไม่จำเป็นต้องรบตักพันกันเหมือนใ้ก่อน เมื่อระบบเรดาร์ของนักบิน จับใ้เครื่องบินข้าศึกใ้ได้ นักบินก็จะถ่มระเบิดออกุททันที ซึ่งอาวุธจะถ่มนำใ้วยเรดาร์ ใ้เข้าสู่ใ้หมาย เพื่อการลดความสูญเสียชีวิตและเครื่องบิน เราควรหาทางแก้ไขและ พัฒนาเครื่องบินของเราไม่ใ้ตกเป็นใ้ของเรดาร์ของฝ่ายตรงข้าม ซึ่งมีหลายวิธีที่กระทำใ้ได้ อาทิเช่น การพ่นสีพรางและป้องกันเรดาร์ ซึ่งเป็นหนทางหนึ่งใ้ที่ใ้ไขงบประมาณสูง กังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นใ้ให้เห็นว่า การใ้จะลดการใ้จ่ายงบประมาณของ กองทัพอากาศ โดยการหาวัสดุที่มีใ้อยู่ในประเทศมาประกอบอากาศยานที่มีสมรรถนะสูง เพื่อ ป้องกันการตรวจจับของเรดาร์ เพื่อลดความสูญเสียชีวิตและอากาศยานของเรา

๑.๔ วัตถุประสงค์การวิจัย

- ๑. เพื่อพัฒนาทฤษฎีของการหักล้างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า บนวัสดุชนิดต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการทำงานของระบบเรดาร์
- ๒. เพื่อสร้างแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปลี่ยนใ้เป็น computer program โดยใ้ภาษา BASIC แทนระบบจริงของเรดาร์

๑.๕ ประโยชน์ของการวิจัย

๑. เพื่อประหยัดงบประมาณ และการสูญเสียชีวิตและอากาศยาน จากการหาวัสดุที่มีขีดความสามารถแทนการพันสีพรางและป้องกันเรดาร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย มีคุณภาพสูง ที่มีขายในประเทศ
๒. เพื่อพัฒนาและปรับปรุงระบบป้องกันภัยทางอากาศ เมื่อฝ่ายตรงข้ามใช้อากาศยานที่ป้องกันเรดาร์ รุกล่าอธิปไตยเข้ามา

๑.๖ ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาทางทฤษฎี โทษทฤษฎีการหักล้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ถูกพัฒนาขึ้นจะคำนวณและแสดงผลด้วย computer program ที่แทนระบบจริงของเรดาร์ เพื่อพิสูจน์ว่าทฤษฎีที่ได้นี้เป็นจริง จะทำการทดลองโดยใช้วัสดุตัวอย่างที่หามาได้คือ glass fiber กับชิ้นส่วนของอากาศยานหลักคือ อะลูมิเนียม 2024 T2

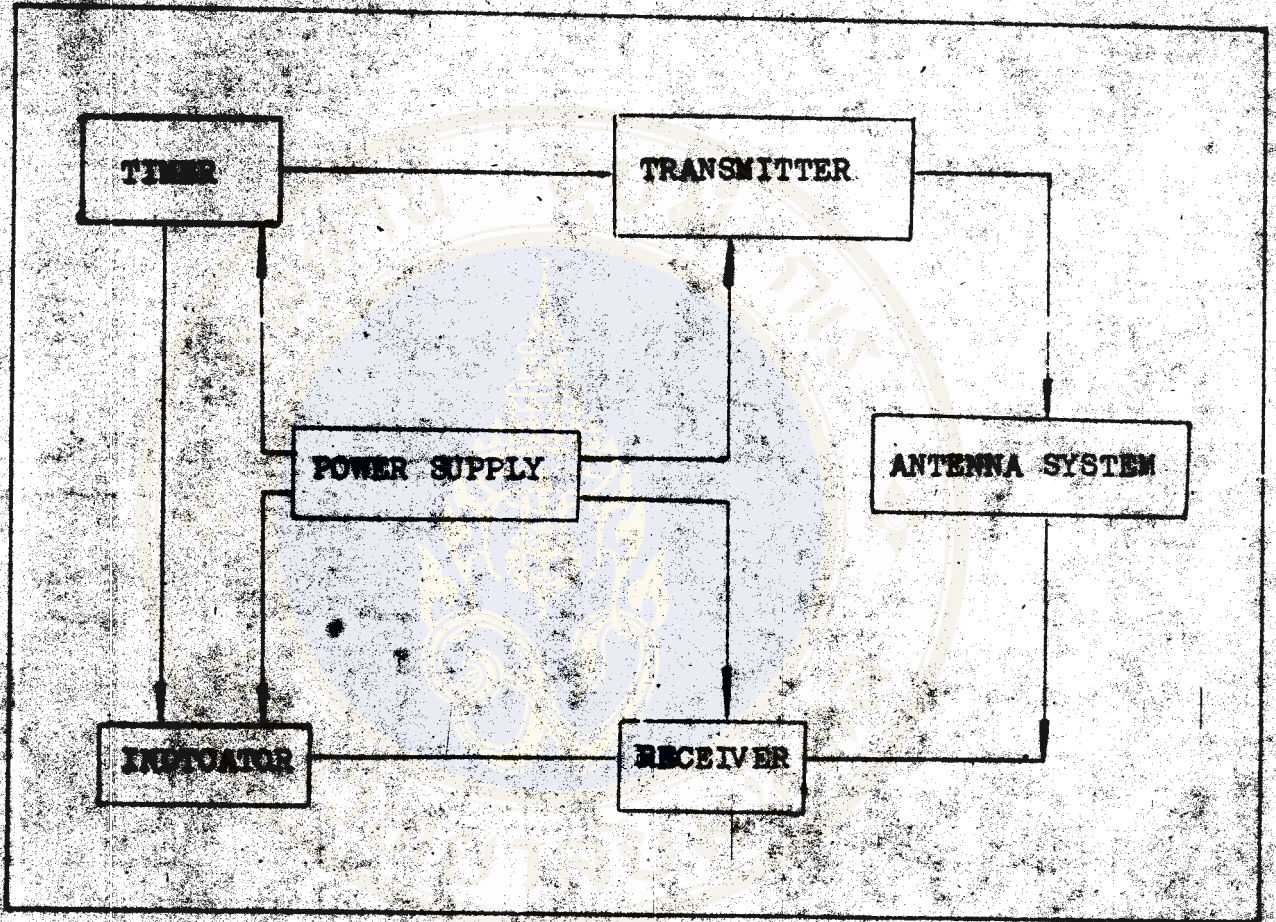
๑.๗ เนื้อหาในแต่ละบท มีโดยสังเขปดังนี้

ในบทที่ ๒ เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ได้แก่ สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) และการแผ่กระจายของคลื่นในสสาร (Propagation of plane electromagnetic waves in matter) กฎของการสะท้อนและการหักเหของแสง (The laws of Reflection and Snell's law of Refraction) การสะท้อนและการหักเหของคลื่นที่ผิวระหว่างสองไดอิเล็กทริก (Reflection and Refraction at the interface Between two Dielectric) อาศัยหลักการสะท้อนของแสง โดยฟิล์มบาง (Reflection of the light on film)

บทที่ ๓ เป็นการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ ของการเคลื่อนที่ของคลื่นเรการ์ ออกไปอยู่เป็นหลายและสะท้อนกลับมากสู่เครื่องรับ เพื่อนำมาสู่การหาวิสัย โทมิใช้ ตรรกวิทยา (logic) และโปรแกรมเมอร์ (process generators) ซึ่งเป็นเทคนิคของการจำลอง (simulation technique) แล้วแปลงเป็น computer program ภาษา BASIC

บทที่ ๔ ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องมือ และการใช้วัสดุตัวอย่างในการวัดค่า จาก standing waves meter

บทที่ ๕ บทสรุปการวิจัยทั้งหมด และข้อเสนอแนะที่ควรกระทำเพิ่มเติม เพื่อ พิจารณาองค์ประกอบของประเทศไทย เจริญก้าวหน้าต่อไป



รูปที่ ๑ แสดงหลักการทำงานของระบบเรดาร์

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

จากหลักการทำงานของเรา อาศัยหลักที่ว่าคลื่นที่ส่งออกไปจากเครื่องส่ง กระแทกกับวัตถุ จะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเข้าสู่เครื่องรับ ดังนั้นทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) และการแผ่กระจายของ คลื่นในสสาร (Propagation of plane electromagnetic waves in matter) เป็นการบรรยายปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการแผ่กระจายของคลื่นจากแหล่งกำเนิดที่จะบอก ปริมาณขั้ว (displacement) ของคลื่นในทิศทางและเวลา ตามกฎการสะท้อน และการหักเหของสเนลล์ (The laws of Reflection and Snell's law of Refraction) จะบอกทิศทางของคลื่นที่ตกกระทบวัตถุ และคลื่นสะท้อนตลอดจนคลื่น ที่ส่งผ่านเข้าไปในวัตถุ เมื่อเรารู้ทิศทางเราจะหาขนาดของคลื่นที่สะท้อน และคลื่นที่ ส่งผ่านเข้าไปในวัตถุ มีค่าเท่าใดที่ผิวทั้งสองของสสารโดยใช้การสะท้อน และการหักเห ของคลื่นที่มีระหว่างสองไดอิเล็กทริก (Reflection and Refraction at the interface Between two Dielectrics) เราพบว่าแสงเป็นคลื่น และอาศัยหลักการสะท้อนของแสงโดยฟิล์มบาง (Reflection of the light on film) เพื่อที่จะหาขนาดของวัสดุที่จะทำให้คลื่นเกิดการหักล้างกันหมดไป

ในการที่เราใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องนี้ เราคำนึงคลื่นตกตั้งฉากกับวัตถุ ซึ่งเราใช้ วัตถุเป็นแผ่นเรียบเป็นหลัก เพราะว่าการที่คลื่นตกตั้งฉากกับวัตถุนี้เป็นจุดหรือตำแหน่ง ที่เรารับภาพได้ชัดมากยิ่งขึ้น แล้วนำไปสู่การจำลองผลของระบบ (System Simulations)

๒.๑ สมการของแมกซ์เวลล์ที่อธิบายถึงปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สัญลักษณ์ที่ใช้อธิบายสมการ

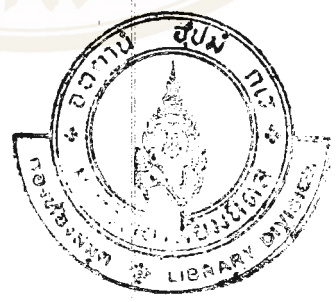
- \underline{B} = สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (Magnetic induction)
- \underline{D} = การขจัดทางไฟฟ้า (Electric displacement)
- \underline{E} = ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity)
- \underline{J} = ความหนาแน่นของกระแสที่ไหลในปริมาตร (Volume current density)
- K = จำนวนคลื่น (Wave number)
- k_1 = ค่าคงที่ของการอ่อนตัว (Attenuation constant)
- ϵ = เพอร์มิททิวิตีของตัวกลาง (Permittivity of medium)
- μ = ความซำบซึมในตัวกลาง (Permeability of medium)
- ρ = ความหนาแน่นของประจุทั้งปริมาตร (Volume charge density)
- σ = ความหนาแน่นของประจุผิว (Surface charge density)
- $j = \sqrt{-1}$

โดยความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\underline{B} = \mu \underline{H}$$

$$\underline{D} = \epsilon \underline{E}$$

$$\underline{J} = \sigma \underline{E}$$



* Corson and Lorrain, "Introduction to Electromagnetic Fields and Waves", W.H. Freeman and Company, 1962.

เราเริ่มต้นจากสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \cdot \underline{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \underline{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \underline{E} + \frac{\partial \underline{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \underline{H} - \frac{\partial \underline{D}}{\partial t} = \underline{J} \quad (2.4)$$

เมื่อเราเขียนสมการของแมกซ์เวลล์ในรูป \underline{E} กับ \underline{H} โดยแทนความสัมพันธ์เข้าไปจาก (2.1) ถึง (2.4) เขียนใหม่ได้ว่า

$$\nabla \cdot \epsilon \underline{E} = \rho \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \mu \underline{H} = 0 \quad (2.6)$$

$$\nabla \times \underline{E} + \frac{\partial \underline{H}}{\partial t} = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \underline{H} - \epsilon \frac{\partial \underline{E}}{\partial t} = \underline{J} \quad (2.8)$$

เราอาศัยคุณสมบัติที่ว่า

$$\nabla \times \nabla \times \underline{A} = \nabla(\nabla \cdot \underline{A}) - \nabla^2 \underline{A}$$

เราใส่เกร็ด ($\text{curl} = \nabla \times$) ในสมการ

$$\nabla \times \nabla \times \underline{E} + \mu \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \underline{H} = 0$$

$$\nabla(\nabla \cdot \underline{E}) - \nabla^2 \underline{E} + \mu \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \underline{H} = 0$$

และใช้สมการ (2.8) ในการกำหนดสมการการเคลื่อนที่ของ \underline{E} เพียงอย่างเดียว เราจะได้ว่า

$$\nabla(\nabla \cdot \underline{E}) - \nabla^2 \underline{E} + \epsilon \mu \frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial t^2} + \sigma \mu \frac{\partial \underline{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

โดยแทนค่าในตัวแปรแรกไว้

$$\nabla^2 \underline{H} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \underline{H}}{\partial t^2} - \sigma\mu \frac{\partial \underline{H}}{\partial t} = 0 \quad (2.10)$$

เราจะแก้สมการที่ (2.9) เรากำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นไปใน + z และ
เริ่มที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านไปในสูญสุญากาศ ซึ่งเราจะถือว่า $\nabla \cdot \underline{H} = 0$ ดังนั้นสมการที่ (2.9)

จะเหลือเพียง ($\underline{H} = \underline{H}_z$)

$$\begin{aligned} -\frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial z^2} + \epsilon\mu \frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial t^2} + \sigma\mu \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial z^2} &= \epsilon\mu \frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial t^2} + \sigma\mu \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.11)$$

เราจะหาวิธีแก้สมการนี้โดยใช้วิธี Separation of Variables

เราพบว่า \underline{H}_z เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับ z และ t

$$\underline{H}_z = \underline{H}_z(z, t)$$

กำหนดให้

$$\underline{H}_z = T(t) \cdot Z(z) \quad (2.12)$$

$$\text{หรือ } = T \cdot Z$$

เรานำ $\underline{H}_z = T \cdot Z$ แทนใน (2.11)

$$\frac{\partial^2 (T \cdot Z)}{\partial z^2} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 (T \cdot Z)}{\partial t^2} + \sigma\mu \frac{\partial (T \cdot Z)}{\partial t}$$

$$T \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = \epsilon\mu Z \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \sigma\mu Z \frac{\partial T}{\partial t}$$

เรขาคณิตของ ทารกออก

$$\frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z^2} z = \frac{\mu \epsilon}{T} \frac{\partial}{\partial t^2} T + \frac{\mu \sigma}{T} \frac{\partial T}{\partial t}$$

เรขาคณิตของชายมือเท้ากับทางขวา

ทรงชายมือเท้า เป็นฟังก์ชัน (function) ของ z

ทรงชายมือเท้า เป็นฟังก์ชัน (function) ของ t

ดังนั้นเรากำหนดค่า

$$\frac{1}{z} \frac{\partial^2 z}{\partial z^2} = -k^2 \quad (2.13)$$

$$\frac{\mu \epsilon}{T} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\mu \sigma}{T} \frac{\partial T}{\partial t} = -k^2 \quad (2.14)$$

สมการ (2.13) แยกตัวประกอบได้ Auxiliary equation

$$z(z) = A e^{jkz} + B e^{-jkz}$$

เราสามารถหาค่าของสมการ (2.14)

$$\frac{\mu \epsilon}{T} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\mu \sigma}{T} \frac{\partial T}{\partial t} = -k^2$$

ผลคูณของ T

$$\mu \epsilon \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial T}{\partial t} + k^2 T = 0 \quad (2.15)$$

เรขาคณิตของชายมือเท้าในรูปแบบ sinusoidal

$$z(z) = A e^{jkz} + B e^{-jkz}$$

สมมติว่าคลื่นในสมการที่ (2.15) กระจายเหมือนค่าคอมแบทในรูป sinusoidal

เรากำหนดให้

$$T(t) = C e^{j\omega t}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} T(t) = j\omega C e^{j\omega t}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} T(t) = -\omega^2 C e^{j\omega t}$$

แทนค่าที่กำหนดไว้ในสมการ (2.15)

$$-\mu\epsilon\omega^2 C e^{j\omega t} + j\omega\mu\sigma C e^{j\omega t} + k^2 C e^{j\omega t} = 0$$

เราสามารถถอดค่า $C e^{j\omega t}$

$$-\mu\epsilon\omega^2 + j\omega\mu\sigma + k^2 = 0$$

$$k^2 = \mu\epsilon\omega^2 - j\omega\mu\sigma$$

เราสามารถหา

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$$\lambda = \frac{c}{\omega}$$

ดังนั้นเราจึงได้ว่า

$$k^2 = \frac{\mu_r \epsilon_r}{\lambda^2} - j \frac{\sigma \mu_r \epsilon_r}{\epsilon_r^2 \omega}$$

จะเห็นว่า k เป็นลอเรนซ์คอน

$$k = k_r - jk_i$$

$$k_r = \frac{1}{\lambda} (\mu_r \epsilon_r)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 + \left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$k_i = \frac{1}{\lambda} (\mu_r \epsilon_r)^{\frac{1}{2}} \left\{ -1 + \left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

ซึ่งในกรณีสูญากาศ ($k_i = 0$)

$$k_r = k$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda}$$

เราจะใส่ค่าของวาคสมการ (2.11)

$$E_z = AC e^{j(\omega t - kz)} + BC e^{j(\omega t + kz)}$$

จะพบว่า AC และ BC เป็นค่าคงที่

เราทราบว่าเมื่อคลื่นของเรา เคลื่อนที่ถึงฉากกับวัตถุ

$$\text{เราจะได้ว่า } AC = BC = E_0$$

ดังนั้น

$$E_z = E_0 (e^{j(\omega t - kz)} + e^{j(\omega t + kz)})$$

ในส่วนของเควินกัน เราสามารถคำนวณหาสนามแม่เหล็กได้

ซึ่งเราทราบว่า \mathbf{E} และ \mathbf{H} ตั้งฉากซึ่งกันและกัน เราจะไม่แสดงวิธีการคำนวณหาสนามแม่เหล็ก

$$H_y = \frac{\omega \epsilon_0}{k} H_0 (e^{j(\omega t - kz)} + e^{j(\omega t + kz)})$$

๒.๒ การหักเหของคลื่น (Refraction of Wave)

อัตราเร็วของคลื่นในตัวกลางต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ในสูญญากาศคลื่นจะมีอัตราเร็วเท่ากับแสง ซึ่งสูงกว่าอัตราเร็วในน้ำหรือในแก้ว เมื่อคลื่นผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ที่ผิวของตัวกลางทั้งสองนี้ คลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ โดยทำมุมตกเท่ากับมุมสะท้อน คลื่นอีกส่วนหนึ่งจะผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สอง โดยทิศทางของคลื่นจะหักเหจากแนวเดิม ปรากฏการณ์นี้เราเรียกว่า การหักเห

๒.๓ กฎของสเนลล์และดัชนีหักเห

เมื่อคลื่นผ่านจากตัวกลางที่ ๑ ไปยังตัวกลางที่ ๒ ถ้า v_1 และ v_2 เป็นอัตราเร็วของคลื่นในตัวกลางที่ ๑ และ ๒ NO เป็นเส้นปกติที่จุดตกกระทบ θ_1 และ θ_2 เป็นมุมตกกระทบและมุมหักเห เราจะได้สมการ

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

เราจะใช้สมการนี้ว่ากฎของสเนลล์ (Snell's law)

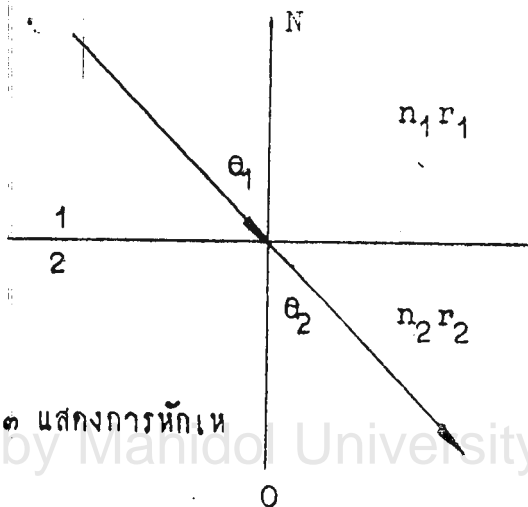
เราจะจำกัดความดัชนีหักเห (Refractive index) ของตัวกลางใด ๆ ว่าเป็นอัตราส่วนของอัตราเร็วของคลื่นในสูญญากาศ และในตัวกลางนั้น ๆ

$$n = \frac{c}{v}$$

เราเขียนใหม่ว่า $n_1 = c/v_1$

$$n_2 = c/v_2$$

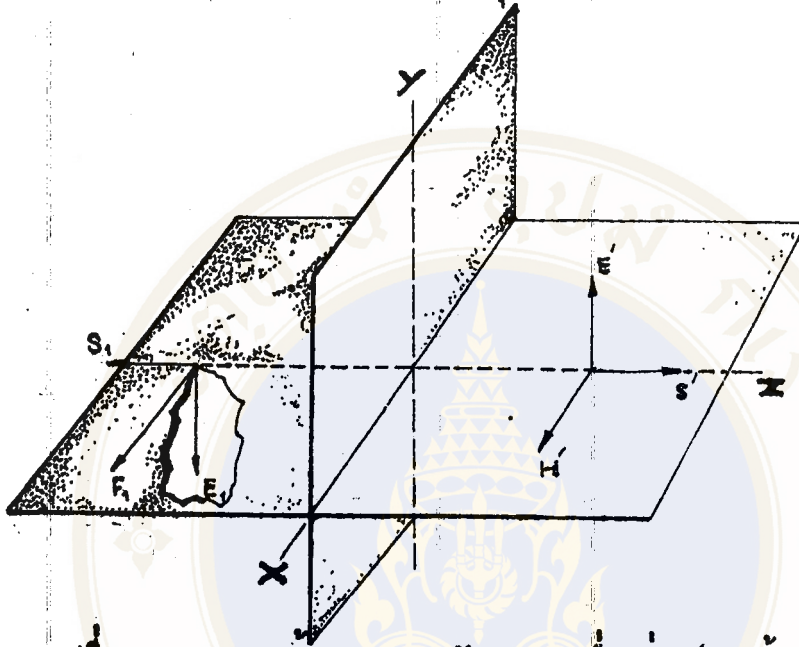
$$\therefore \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



รูปที่ ๒.๓ แสดงการหักเห

๒.๘ การสะท้อนและการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวของไดอิเล็กตริก

โดยพิจารณาคลื่นตกตั้งฉากกับวัสดุเป็นหลัก



รูปที่ ๒.๘ การสะท้อนและการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวของไดอิเล็กตริก

จาก Fundamentals of Optics ทำให้เราทราบว่า

n = คณิตการหักเหของคลื่นในตัวกลาง

c = ความเร็วของคลื่นในสุญญากาศ

$$= 1/(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2}$$

$$= 3.0 \times 10^8 \text{ เมตร/วินาที}$$

v = ความเร็วของคลื่นในตัวกลาง

$$= 1/(\epsilon \mu)^{1/2}$$

ϵ_r = ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก = $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$

$$n = \frac{c}{v} = \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^{1/2} = \epsilon_r^{1/2}$$

S = ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

E = คลื่นตกกระทบ

E_1 = คลื่นสะท้อน

E' = คลื่นหักเห

เราทราบว่า $\sqrt{\epsilon} E = \sqrt{\mu} H$

หรือ $H = n \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} E$

เราจะใช้ความสัมพันธ์ที่ผิวรอย dielectric

$$E - E_1 = E' \quad (1)$$

$$H + H_1 = H'$$

$$n_1 E + n_1 E_1 = n_2 E' \quad (2)$$

(1) $\times n_1$:

$$n_1 E - n_1 E_1 = n_1 E' \quad (3)$$

(2) + (3) :

$$2 n_1 E = (n_2 + n_1) E'$$

$$E' = \frac{2 n_1}{n_2 + n_1} E$$

 (4)

(1) $\times n_2$ - (2)

$$2 n_1 E_1 = (n_2 - n_1) E'$$

แพทช์ B'

$$E_1 = \frac{(n_1 - n_2) E}{2 n_1}$$

$$E_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_2 + n_1} E$$

(5)

๒.๕ การเปลี่ยนแปลงเฟสของคลื่น เนื่องจากตาสะท้อน

เมื่อคลื่นสะท้อนที่ผิวตัวกลาง ซึ่งหนาแน่นกว่า (ดัชนีการหักเหยากกว่า) เฟสของคลื่นจะเปลี่ยนไป 180° แต่สำหรับการสะท้อนที่ผิวตัวกลางซึ่งบางกว่า พบว่าเฟสของคลื่นสะท้อนจะไม่เปลี่ยน

ตัวอย่างเช่น

- ๑) เมื่อคลื่นในอากาศสะท้อนที่ผิวแล้ว เฟสของคลื่นจะเปลี่ยน 180°
- ๒) เมื่อคลื่นในแก้วสะท้อนที่ผิวอากาศ เฟสของคลื่นจะไม่เปลี่ยน

๒.๖ การหาความยาวคลื่นในตัวกลางต่าง ๆ

จาก

$$n = \frac{c}{v}$$

$$v = \frac{c}{n}$$

$$\frac{v}{\lambda_n} = \frac{c}{\lambda_0}$$

$$\frac{v}{\lambda_n} = \frac{c}{\lambda_0} = \text{ความยาวของคลื่นในสุญญากาศ}$$

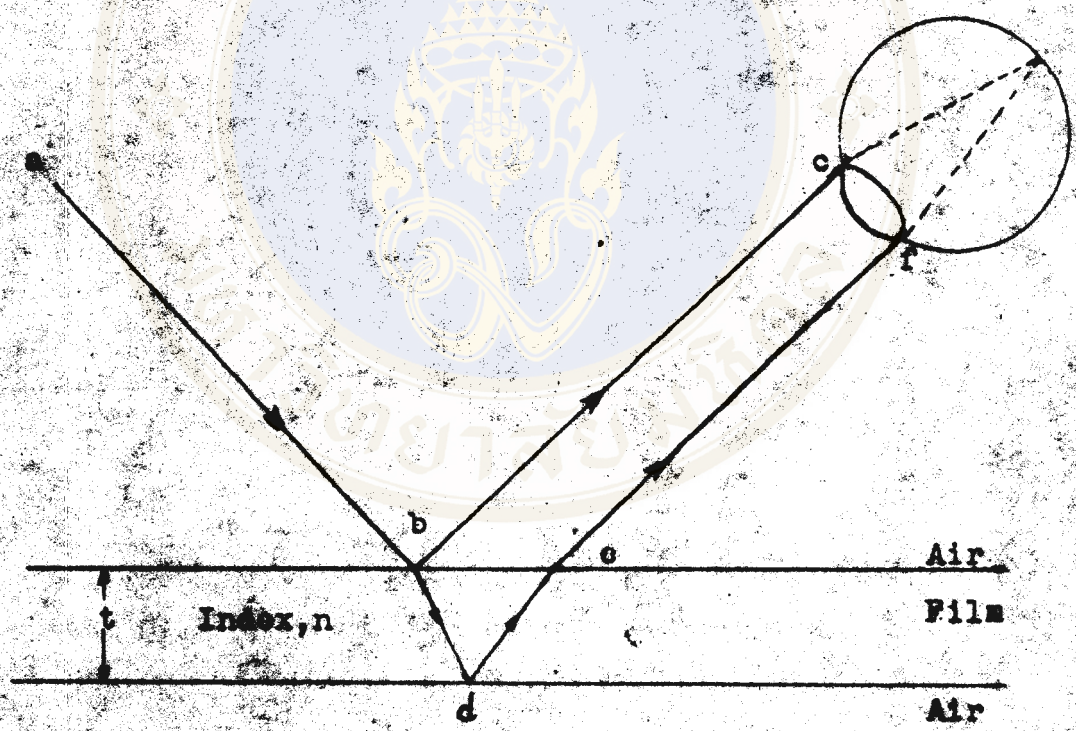
$$\frac{c}{n} = \lambda_n = \text{ความยาวของคลื่นในตัวกลาง}$$

เราจะได้

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n}$$

๒.๗ การสะท้อนแสงของฟิล์มบาง (Reflection of the light on Thin film)

เมื่อฉายแสงเข้าหาฟิล์มบางซึ่งหนา t และมีดัชนีหักเห N รังสีบางส่วน (bc) จะสะท้อนที่ผิวบน แต่รังสีบางส่วนจะหักเหเข้าไปในฟิล์ม และสะท้อนกลับออกมาอีกครั้งหนึ่ง (cd) เมื่อมองดูทั้งรังสี bc และ cd จะแทรกสอดกันที่บริเวณของตา เราจะเห็นแสงสว่างก็ต่อเมื่อรังสีทั้งสองที่เรตินามีเฟสตรงกัน แต่ถ้ารังสีทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180° เราจะมองไม่เห็นแสงในทิศทางนั้น



รูปที่ ๒.๗ แสดงการสะท้อนแสงของฟิล์มบาง

รังสีสะท้อนที่ b จะมีเฟสเปลี่ยนไป 180° แต่รังสีในแนว b d e จะไม่มีการเปลี่ยนเฟส จะไม่มีการเปลี่ยนเฟสเนื่องจากการสะท้อน (การสะท้อนที่ d เฟสจะไม่เปลี่ยน เพราะอากาศเป็นตัวกลาง บางกว่าฟิล์ม) แต่จะมีการเปลี่ยนเฟสเนื่องจากระยะทาง เฟสของรังสีที่ c จะต่างจากเฟสของรังสีตกกระทบที่ b อยู่เท่ากับ $360 (bd + de) / \lambda_n$ องศา

ถ้าแสงตกกระทบฟิล์มในแนวตั้ง สำหรับการมองในแนวตั้ง เฟสของแสงที่ b และ c จะต่างกัน ($\Phi =$ เฟส)

$$\begin{aligned}\Delta \Phi &= 360 \left(\frac{t}{\lambda_n} + t \right) - 180^\circ \\ &= 360 \left(\frac{2t}{\lambda_n} - \frac{1}{2} \right)\end{aligned}$$

โดยที่ $bd = dc = t$ เราจะเห็นแสงสว่างที่สุดเมื่อ $\Delta \Phi = 0$ หรือเท่ากับจำนวนเต็มของ 360°

$$360 \left(\frac{2t}{\lambda_n} - \frac{1}{2} \right) = m (360) ; m = 0, 1, 2$$

$$(\max) \quad 2t = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda_n ; m = 0, 1, 2 \quad *$$

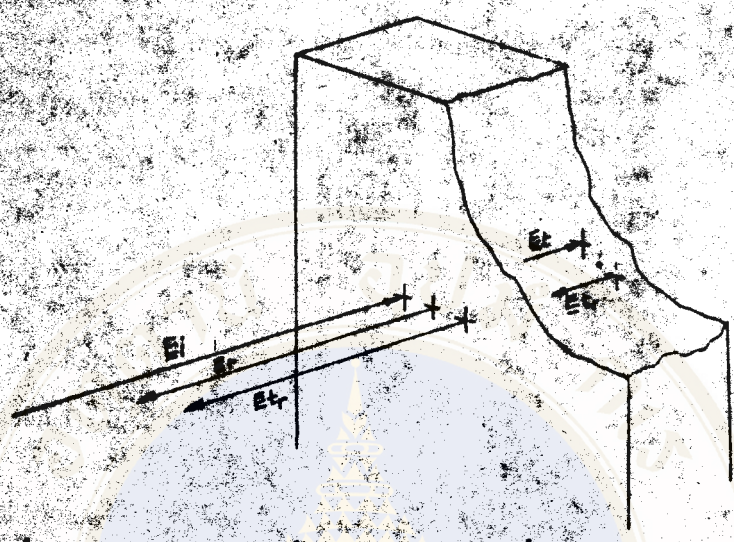
เราจะเห็นแสงมืดหรือสว่างน้อยที่สุดเมื่อ $\Delta \Phi = 180^\circ, 3(180^\circ), 5(180^\circ)$

$$360 \left(\frac{2t}{\lambda_n} - \frac{1}{2} \right) = 180^\circ$$

$$(\min) \quad 2t = m \lambda_n ; m = 1, 2, 3 \quad **$$

* Jenkins and White, "Fundamentals of Optics" McGraw-Hill

๒.๔ การสะท้อนของคลื่นไฟฟ้าในคลื่นสถิต



รูป ๒.๔ แสดงการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการไฟฟ้า

$$E_i = E_{oi} \exp \{j(\omega t - k_1 z)\}$$

$$E_r = E_{or} \exp \{j(\omega t + k_1 z)\}$$

$$E_t = E_{ot} \exp \{j(\omega t - k_2 z)\}$$

เราพิจารณาคอนดิชันที่รอยต่อที่ทำให้ E_t

$$E_{tr} = E_{otr} \exp \{j(\omega t + k_2 z)\}$$

ทำให้

$$E_r + E_{tr} = 0 \quad (\text{เกิดคลื่นสถิต})$$

เมื่อ เหยียดกัณฑ์สองข้างกับ π

$$(k_1 + k_2)z = \pi$$

ในกรณี $z = 2D$

$$(k_1 + k_2) 2D = \pi$$

เมื่อ $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2}$$

$$2\pi \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) 2D = \pi$$

$$\left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) 2D = 1$$

$$4D = \frac{1}{\left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

$$= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

$$= \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_2}{\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \lambda_2 + \lambda_2 \right)}$$

$$= \frac{\lambda_1 \lambda_2^2}{\lambda_1 + 2\lambda_2}$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

$$= \frac{N_2 \cdot \lambda_2^2}{\lambda_2 (N_2 + 1)}$$

$$= \frac{N_2 \cdot \lambda_2}{(N_2 + 1)}$$

$$D = \frac{N_2 \cdot \lambda_2}{4(N_2 + 1)}$$

บทที่ ๓

การจำลองแบบปัญหาของระบบงาน (System Simulation)

๓.๑ การจำลองแบบปัญหา (Simulation)

การจำลองแบบปัญหามีความหมายถึงขบวนการ หรือวิธีการออกแบบจำลองของระบบงาน (model) ซึ่งจะสามารถใช้แทนระบบงานจริง (real system) และดำเนินการทดลองใช้แบบจำลองนั้น ในการศึกษาพฤติกรรมของระบบงานจริง และการวิเคราะห์หาข้อมูลอันเกิดจากการใช้ยุทธวิธี (strategies) ต่าง ๆ ในการดำเนินงานของระบบงาน

วัตถุประสงค์ในการใช้การจำลองแบบปัญหา อาจสรุปได้ดังนี้

๑. ใช้อธิบายและศึกษาพฤติกรรมของระบบงาน
๒. เพื่อสร้างทฤษฎีหรือสมมติฐานของการเกิดพฤติกรรมต่าง ๆ ในระบบงาน
๓. ใช้ทฤษฎีที่ก่อให้เกิดการคาดคะเนพฤติกรรม ซึ่งจะเกิดขึ้นในอนาคต (โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อม หรือส่วนประกอบของระบบงาน)

๓.๒ การสร้างของรูปแบบปัญหาของการจำลองแบบปัญหา (Building of simulation models)

ก่อนที่จะได้ศึกษาถึงขบวนการสร้างรูปแบบปัญหา ก็ควรที่จะเข้าใจถึงลักษณะของโครงสร้างของรูปแบบปัญหา ซึ่งโดยทั่วไป รูปแบบปัญหาต่าง ๆ อาจเขียนในรูปแบบปัญหาเชิงคณิตศาสตร์ได้ เช่น



$$E = f(X_1, Y_1)$$

โดยที่

- E = ผลอันเนื่องมาจากความสามารถในการดำเนินงานของระบบงาน
 X_1 = ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ ซึ่งเราสามารถควบคุมได้
 Y_1 = ตัวแปรหรือพารามิเตอร์ ซึ่งเราไม่สามารถควบคุมได้
 f = ความสัมพันธ์ระหว่าง X_1 กับ Y_1 ซึ่งจะทำให้เกิด E

จากรูปแบบปัญหาทางคณิตศาสตร์ เพียงแค่แสดงให้เห็นว่าผลอันเนื่องมาจากความสามารถในการดำเนินงานของระบบนั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรหรือพารามิเตอร์ ทั้งที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ อย่างไรก็ตามในรูปแบบปัญหาที่ ๆ ไปนั้น จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

๑. ส่วนประกอบ (Components)
๒. ตัวแปร (Variables)
๓. พารามิเตอร์ (Parameters)
๔. ความสัมพันธ์ (Function relationships)
๕. ขอบข่าย (Constraints)
๖. ฟังก์ชันเป้าหมาย (Criterion functions)

การสร้างรูปแบบปัญหาโดยการจำลองแบบปัญหานั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการเรียนรู้ และเข้าใจปัญหาที่เกิดขึ้น ความเข้าใจในลักษณะการทำงาน ค่าดำเนินงานของระบบงาน และส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบงาน อีกทั้งความสามารถที่จะเลือกใช้ หรือแปลงข้อสมมุติต่าง ๆ ที่จะช่วยให้รูปแบบปัญหาเป็นตัวแทนของระบบงานจริงได้ โดยใกล้เคียงที่สุด

ประโยชน์ประการหนึ่งของการจำลองแบบปัญหาก็คือ เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการศึกษา และอบรมฝึกหัดเกี่ยวกับระบบงาน เพราะผู้ทำการทดลองสามารถ

ทราบความเป็นไป และความเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ภายในระบบงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะสิ่งแวดล้อม และส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบงาน ซึ่งจะมีผลช่วยให้เข้าใจถึงปัญหาต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับระบบงานต่าง ๆ ในระบบงาน รวมทั้งผลที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการนำเอาวิธีการใหม่เข้าไปใช้ในกรดำเนินงานของระบบ ทำให้การวางแผนในการดำเนินงานมีประสิทธิภาพดีขึ้น

๓.๓ จุดประสงค์การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากระบบของเรคาร์ ซึ่งเรคาร์คือเครื่องมือที่ส่งพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีกำลังส่งสูงมากออกไปเป็นลำ พลังงานดังกล่าวจะกระทบเป้าแล้วสะท้อนกลับไปยังจอเรคาร์ เพื่อแสดงถึงสิ่งต่าง ๆ คือ ระยะห่าง ระยะสูง ทิศทาง ความเร็ว หรือองค์ประกอบอื่น ๆ

ในการที่จะทำลายพลังงานที่กระทบเป้าแล้วสะท้อนกลับมายังจอเรคาร์นั้น เราต้องใช้พลังงานมาก แต่ถ้าวเราต้องการให้เกิดการหักล้างของพลังงานเอง เราคงหาวิธีที่จะทำให้เกิดการหักล้างของพลังงาน

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อที่จะนำไปหาวิธีที่ทำให้เกิดการหักล้างของคลื่นเรคาร์ ก็จะไม่สามารสะท้อนกลับมายังจอเรคาร์ได้ ซึ่งการจำลองผลใช้ minicomputer (OKI) ทำการจำลองผลในรอบ ๒๒๐๐ โดยใช้อินพุตที่สำคัญคือ ความถี่ที่ออกจากระบบของเรคาร์ และดัชนีของการหักเหของวัสดุ

๓.๖ การสร้างแบบจำลอง การเคลื่อนที่ของคลื่นเรกการที่กระทบเป้า

จากการทำงานของเรกการ อาศัยการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปกระทบเป้า จะมีคลื่นส่วนหนึ่งที่สะท้อนจากเป้า และคลื่นส่วนหนึ่งทะลุผ่านเข้าไป ซึ่งคลื่นทั้งสามแบบขึ้นอยู่กับ $E_0 =$ ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่มีวของโลหะ (เป้า) จาก

$$E = E_0 (e^{j(\omega t - kz)} + e^{j(\omega t + kz)})$$

เรากำหนดให้ E ขนานกับแกน X
 H ขนานกับแกน Y
 $+ Z$ ทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เพื่อสะดวกในการคำนวณ จะให้การเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าในรูปของ cosine ซึ่งเคลื่อนที่ในอากาศ (สมมุติว่าสูญญากาศ) ก่อนที่กระทบเป้า

เราจะได้ $E_1 =$ คลื่นที่ส่งออกไปกระทบเป้า

$$= \cos(\omega t - k_1 Z)$$

กำหนดให้ $t =$ เวลา (time) $= \frac{1}{f}$

$$\omega = \text{ความถี่เชิงมุม}$$

$$= 2\pi f$$

$$k_1 = \text{จำนวนคลื่น (wave number) ในตัวกลาง}$$

$$= 2\pi / \lambda_1$$

$$Z = \text{ระยะทางการเคลื่อนที่ของคลื่น}$$

$$= \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^{10}}{f}$$

เซนติเมตร/วินาที

ปัจจัยสำคัญจึงขึ้นอยู่กับความถี่

f = ความถี่ (frequency)

เริ่มเขียน program ภาษา BASIC เพื่อใช้กับ mini computer
ไคว

$$E(1) = \cos(\omega \cdot t - k \cdot z(I))$$

๓.๔ การสร้างเป็นจำลองของคลื่นระลอกที่สะท้อนเป่า เมื่อเทียบกับคลื่นตกกระทบเป่า
ที่ผิวของเป่า

เราจะให้คลื่นเรดาร์ตกตั้งฉากกับเป่า ทำให้คลื่นสะท้อนจากเป่า เป็นจุด
ที่ขยับไปมาตามรับของคลื่นเรดาร์ที่ถี่ที่สุด

$$E_1 = \cos(\omega t - kz)$$

จากกฎของการสะท้อน

$$\begin{aligned} \text{มุมตกกระทบ} &= \text{มุมสะท้อน} \\ &= 0 \text{ องศา} \end{aligned}$$

จากกฎของสเนล สามารถหาขนาดของสะท้อนกับคลื่นตกกระทบได้
เมื่อคลื่นเรดาร์ตกตั้งฉากเป่า

$$E_r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} E_i$$

n_1 = ดัชนีการหักเหของตัวกลางที่ 1 (อากาศ)

n_2 = ดัชนีการหักเหของตัวกลางที่ 2 (เป่า)

E_r = คลื่นสะท้อนจากเป่า

เราเริ่มเขียน program ภาษา BASIC เพื่อใช้กับ mini computer
ไคว

$$E(Z) = (N_1 - N_2(j)) * E(1) / (N_2(j) + N_1)$$

ซึ่ง $E(2)$ จะเป็นตัวหลักในการพิจารณา

๓.๖ การสร้างแบบจำลองของคลื่นเรการที่หักเห(ทะเล)เข้าไปในเป่าเทียบกับคลื่นตกกระทบเป่า ที่ผิวของเป่า

จากกฎของสเนล สามารถหาขนาดของคลื่นหักเหกับคลื่นตกกระทบได้ เมื่อคลื่นเรการตกตั้งฉากกับเป่า

$$E_t = \left\{ \frac{2N_1}{N_2 - N_1} \right\} E_i$$

เราสามารถเขียนเป็น program ภาษา BASIC เพื่อใช้ mini computer ได้

$$\begin{aligned} E_3(1) &= (2 * N_1) * E(1) / (N_2(j) - N_1) \\ &= \text{คลื่นที่หักเห(ทะเล)เข้าไปในเป่า} \end{aligned}$$

๓.๗ การสร้างแบบจำลองของคลื่นเรการที่หักเหเข้าไปในวัตถุเมื่อเกิดการสะท้อนกลับหมด

เราจะใช้คลื่นหักเหที่เข้าไปในวัตถุมีค่า

$$E_t = E_{ot} \exp \left\{ j \omega t - k_2 z \right\}$$

พิจารณาถ้าวัตถุนั้นมีการทำให้คลื่นสามารถอ่อนตัวลงไถ่นั้น คือ

$$k_2 = k_r - j k_i$$

โดยที่

$$k_r = \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2\pi}{\lambda} = k_1$$

$$\therefore E_1 = \exp \left\{ j \omega t - (k_1 - jk_1) z \right\}$$

$$= \exp k z \cdot \exp \left\{ j \omega t - k_1 z \right\}$$

$$= \exp k_1 z \cdot E_1$$

การส่ง Z ที่เราพิจารณา เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของวัสดุ
เราระลึกว่าเป็นความหนาของวัสดุ

$$\therefore E_2 = \exp (-k_1 D) E_1$$

เมื่อคลื่นจะผ่านไปทะลุระยะ D ในปี 2024 T2 เกิดการสะท้อนกลับหมด
เพราะคลื่นไม่สามารถจะผ่านเข้าไปในอะลูมิเนียม 2024 T2 แต่จะมีการ
สะท้อนกลับหมดโดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน เช่นการสะท้อนปกติ

$$E_2 = \exp (-k_2 D) \cdot E_1$$

เราสามารถเขียนเป็น program ภาษา BASIC เพื่อใช้
mini computer ได้ว่า

$$E_3(2) = \exp(-Beta(L)*D*.01)*E(1)$$

Beta = ค่าคงที่ของการอ่อนตัว (attenuation's constant)

D = ความหนาของวัสดุ (thickness of material)

๓.๔ การสร้างแบบจำลองเพื่อให้ความหนาของวัสดุที่เหมาะสม ที่จะให้คลื่นทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุแล้วสะท้อนกลับ มาที่กลางด้วยคลื่นเรกการที่สะท้อนที่ผิวของวัสดุ

ซึ่งจะทำให้เกิดการหักล้างของคลื่นระหว่าง E(2) กับ E(3) ขึ้นอยู่กับเฟสที่ต่างกัน 180° การที่เฟสจะต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ

$$D = \frac{N_2 \lambda_2}{4(N_2 + 1)}$$

เราสามารถเขียน program ภาษา BASIC เพื่อใช้ mini computer ได้ว่า

$$D = (N_2(J) * Alpha_2 / (4 * (N_2(J) + 1)))$$

๓.๕ ความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้ใน Computer

- Alpha1 = Wave Length of Medium1 (ความยาวคลื่นในตัวกลางที่ ๑)
 Alpha2 = Wave Length of Medium2 (ความยาวคลื่นในตัวกลางที่ ๒)
 Beta = Attenuation Constants of Material (ค่าการอ่อนตัวของสาร)
 D = Thickness of Material (ความหนาของสาร)
 E(1) = Incident Wave (คลื่นตกกระทบ)
 E(2) = Reflected Wave (คลื่นสะท้อน)
 E(3) = Refracted Wave (คลื่นหักเห)
 F = Frequency of Microwave Radar (ความถี่ของเรดาร์ไมโครเวฟ)
 N1 = Dielectric Constants of Air (ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ)
 N2 = Dielectric Constants of Material (ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสาร)
 Omega = Angular Frequency (ความถี่เชิงมุม)
 T = Time (เวลา)
 Z = Distance of Wave Propagation (ระยะทางการแพร่กระจาย)

๗.๑๐ การเขียน Program Computer

```

10 DIM Z(1001),E(3),E3(2),N2(10), BETA(10),T(11)
20 CLS
30 LOCATE 20,0 : PRINT "*****"
40 LOCATE 20,1 : PRINT "**           Wave Propagation in Mediums           **"
50 LOCATE 20,2 : PRINT "**           Written by Flt. Varin Chareonrat           **"
60 LOCATE 20,3 : PRINT "**           Dept. of App. Math., Mahidol University           **"
70 LOCATE 20,4 : PRINT "*****"
80 LOCATE 20,6 : PRINT "ALPHA1 = WAVE LENGTH OF MEDIUM1"
82 LOCATE 20,7 : PRINT "ALPHA2 = WAVE LENGTH OF MEDIUM2"
84 LOCATE 20,8 : 8 : PRINT "BETA = ATTENUATION CONSTANTS OF MATERIAL"
86 LOCATE 20,9 : 9 : PRINT "D = THICKNESS OF MATERIAL"
88 LOCATE 20,10 : PRINT "E(1) = INCIDENTED WAVE"
90 LOCATE 20,11 : PRINT "E(2) = REFLECTED WAVE"
92 LOCATE 20,12 : PRINT "E(3) = REFRACTED WAVE"
94 LOCATE 20,13 : PRINT "F = FREQUENCY OF MICROWAVE RADAR"
96 LOCATE 20,14 : PRINT "N1 = DIELECTRIC CONSTANTS OF AIR"
98 LOCATE 20,15 : PRINT "N2 = DIELECTRIC CONSTANTS OF MATERIAL"
100 LOCATE 20,16 : PRINT "OMEGA = ANGULAR FREQUENCY"
102 LOCATE 20,17 : PRINT "T = TIMW"
104 LOCATE 20,18 : PRINT "Z = DISTANCE OF WAVE PROPAGATION"
120 CLS
130 FOR J = 1 TO 8
135 LOCATE 1,20 : PRINT "N2      Z      D      BETA      E1
           E2      E3      F"

```

```

140 FOR IFR = 1 TO 10
150 LPRINT : APRINT : LPRINT
160 LPRINT " N2      Z      D      BETA      E1      E2
           E2      F"
170 NPO = 101 + (IFR-1)*50
180 FOR I = 1 TO NPO
190 Z(I) = (5/(NPO-1)-I*5/(NPO-1))
200 NEXT I
210 F = IFR*1E+10
220 T = 1/F
230 ALPHA1=3E+10/F
240 OMAGA =2*3.14159*F
250 K=2*3.14159/ALPHA1
260 N1=1
270 FOR I = 1 TO 8
280 N2(I) = 2+(I-1)
290 NEXT I
300 ICOL = 4
310 IJ = 0
320 FOR I = 1 TO NPO
330 E(1) = COS(OMAGA*T-K*Z(I))
340 E(2) = (N1-N2(J)*E(1))/(N2(J)+N1)
350 IF E(2) < 0 THEN E(2) = -(N1-N2(J))*COS(OMAGA*T+K*Z(I))/(N2(J)+N1)
360 IF E(2) > 0 THEN E(2) = (N1-N2(J))+COS(OMAGA*T-K*Z(I))/(N2(J)+N1)

```

```

370 E3(1) = 2*N1*COS(OMAGA*T-K*Z(I))/(N2(J)+N1)
380 ALPHA2 = ALPHA1/N2(J)
390 D=N2(J)*ALPHA2/(4*(N2(J)*1))
400 BETA(IJ)=.01+.01*(IJ-1)
410 E3(2)=EXP(-BETA(IJ)*D*.01)*COS(OMAGA*T-K*Z(I))
420 E(3)=E3(2)-E3(1)
450 IF E(3)+E(2) =1E-11 THEN 520
480 LOCATE 10,21 : PRINT "
      "
490 PRINT USING " ## ";N2(J); : PRINT USING " ##.### ";Z(I)
      ; : PRINT USING " #.### ";D; : PRINT USING " #.### "; BETA(IJ)
      ; : PRINT USING " #.### ";E(1); : PRINT USING " ##.### ";
      E(2); : PR
500 PRINT USING " #.## ";F
530 LINE (30,10)-(30,370),PSET,1
540 SYMBOL (24,10), CHR$(154),2,2,1,0
550 LINE (30,180)-(600,180);PSET,1
560 SYMBOL (600,155), CHR$(157),3,3,1,0
580 IF Z(I) = 0 THEN 620
590 LINE (X1,Y1)-(30+100*ABS(Z(I)),180+100*E(1)),PSET,1
600 LINE (X2,Y2)-(30+100*ABS(Z(I)),180+100*E(2)),PSET,2
610 LINE (X3,Y3)-(30+100*ABS(Z(I)),180+100*E(3)),PSET,3
620       X1=30+100*ABS(Z(I)) : Y1=180+100*E(1)
630       X2=30+100*ABS(Z(I)) : Y2=180+100*E(2)

```

```

640      X3=30+100*ABS(Z(I)) : Y3=180+100*E(3)
650 NEXT I
660 Z1=0 : Z2=5
670 STL=(Z2-Z1)/50
680 FOR II=1 TO 5
690 FOR JJ=1 TO 10
700 LINE (30+100*Z1,180)-(30+100*Z1,175),PSET,4
710 Z1=Z1+STL : NEXT JJ
720 LINE (30+100*Z1,180)-(30+100*Z1,170),PSET,4
730 NEXT II
740 YAX1=1 : YAX2 = -1
750 DTL=(YAX1-YAX2)/20
760 FOR II=1, TO 21
770 LINE (30,180-100*YAX2)-(35,180-100*YAX2),PSET,4
780 YAX2=YAX2+STL
790 NEXT II
800 LINE (30+100*ABS(Z(NPO)),80)-(30+100*ABS(Z(NPO)),280),PSET,4
810 LINE (30+100*ABS(Z(NPO))+200*D,80)-(30+100*ABS(Z(NPO))+200*D,280)
      ,PSET,ICOL
820 SYMBOL(15+100*ABS(Z(NPO)),260),CHR$(157),2,2,3,0
830 SYMBOL (30+100*ABS(Z(NPO))+200*D,260),CHR$(156),2,2,3,0
840 SYMBOL (50+100*ABS(Z(NPO))+200*D,270),"D",2,1,1,0
850 SYMBOL (45,10), "E", 2,1,1,0
860 SYMBOL (600,200), "Z",2,1,1,0

870 BEEP : BEEP : BEEP
880 IF ICOL >= 7 THEN ICOL = 1
890 ICOL = ICOL + 1
900 CLS 20, 4 : COPY 1 : CLS
910 NEXT IFR : CLS
920 NEXT J

```

ส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์และการทดลอง

จากการจำลองผลทางคณิตศาสตร์ เราจะหาวัสดุตัวอย่างจาก Handbook of Applied Science for Engineering ที่เราได้

Material	Dielectric constant, 10^6 cycles	Dielectric strength, volts 1mil	volume resistivity, ohms-cm.	Loss-factor
Polyester molding materials (glass fiber fill filler)	4.0 - 4.5	150-400	10^{12} - 10^{14}	0.015-0.020

เราจึงเลือก glass fiber การเลือกวัสดุตัวอย่างนี้จะต้องเลือกจาก

๑. วัสดุที่เป็นตัวอย่างจะต้องสอดคล้องกับการจำลองผลทางคณิตศาสตร์
๒. วัสดุที่มีขายหรือหาได้ง่ายภายในประเทศ
๓. วัสดุที่เลือกนี้จะต้องสอดคล้องกับทางด้านอากาศพลศาสตร์ทุกประการ
๔. วัสดุนี้จะต้องแข็งแรงสามารถที่จะมาประกอบกับอากาศยานภายนอกได้

เมื่อเราได้วัสดุตัวอย่าง และเรานำวัสดุหลักคือ Al 2024 T2 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนของอากาศยาน นำไปทดสอบกับเครื่อง microwaves ที่มีส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

ส่วนต่าง ๆ ของเครื่องมือ

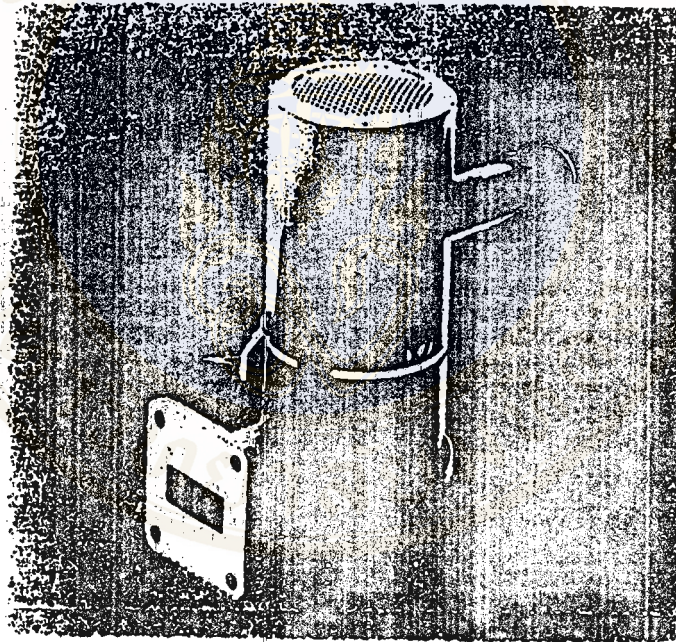


๔.๑ รีเฟลคซ์ไคลสตรอน (Reflex Klystron)

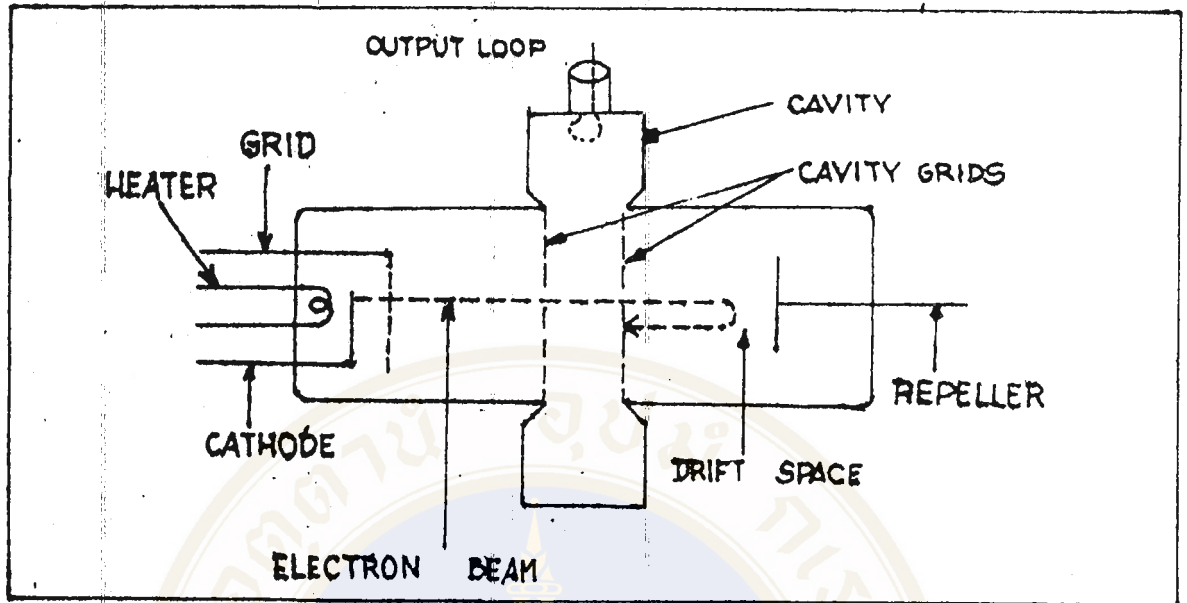
รีเฟลคซ์ไคลสตรอนเป็นหลอดออสซิลเลเตอร์ (Oscillator tube) อย่างหนึ่งภายในหลอดมีโพรงอยู่เพียงอันเดียว โพรงอันนี้เป็นตัวการสำคัญในการที่จะทำให้อิเล็กตรอนมีการรวมกลุ่มกัน และในขณะที่เคลื่อนยังใช้เส้นทางออกของกำลังอีกประการหนึ่ง เพื่อให้เข้าใจการทำงานของเครื่อง จากรูปที่ โดยการสมมุติว่า ในครั้งแรกภายในโพรงมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังสั้นไปมา การสั่นนั้นเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้มีสนามไฟฟ้าสลับคร่อมโพรง เมื่ออิเล็กตรอนถูกยิงออกมาจากคาโทด โดยความต่างศักย์ระหว่างคาโทดกับโพรง ในลักษณะเป็นลำ จะถูกสยามกึ่งกลางหลักบ้างถูกบ้างแล้วแต่จังหวะการสลับและถูก จะทำให้อิเล็กตรอนที่ผ่านโพรงรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ๆ ออกมา วิ่งตรงไปยังขั้วผลึก วิธีนี้เรียกว่า โมดูเลชันของความเร็ว (velocity modulation) กลุ่มของอิเล็กตรอนจะวิ่งตรงไปยังขั้วผลึก ซึ่งมีความต่างศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับคาโทด และจะถูกขั้วผลึก ถ้ากลุ่มของอิเล็กตรอนถูกผลักกลับเข้ามาในโพรง ในเวลาอันพอเหมาะมันจะสร้างสยามแม่เหล็กไฟฟ้าเสริมขึ้นในโพรง และเราจะสามารถนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้ไปใช้งานได้ แต่ถ้าเวลาการกลับมาของกลุ่มอิเล็กตรอนไม่พอเหมาะ จะไม่เกิดการสั่นของสยามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในโพรงเลย จังหวะของการกลับของกลุ่มอิเล็กตรอนและความถี่ของคลื่นที่ไ้จะขึ้นกับขนาดของโพรง ดังนั้นจึงอาจสร้างไมโครเวฟที่มีความถี่ต่าง ๆ ได้โดยเปลี่ยนขนาดของโพรง ไมโครเวฟที่ไ้จะถูกส่งออกไปตามท่อนำคลื่นเพื่อใช้งานต่อไป

* Conner, F.R. 1972, Wave Transmission, London : Arnold.

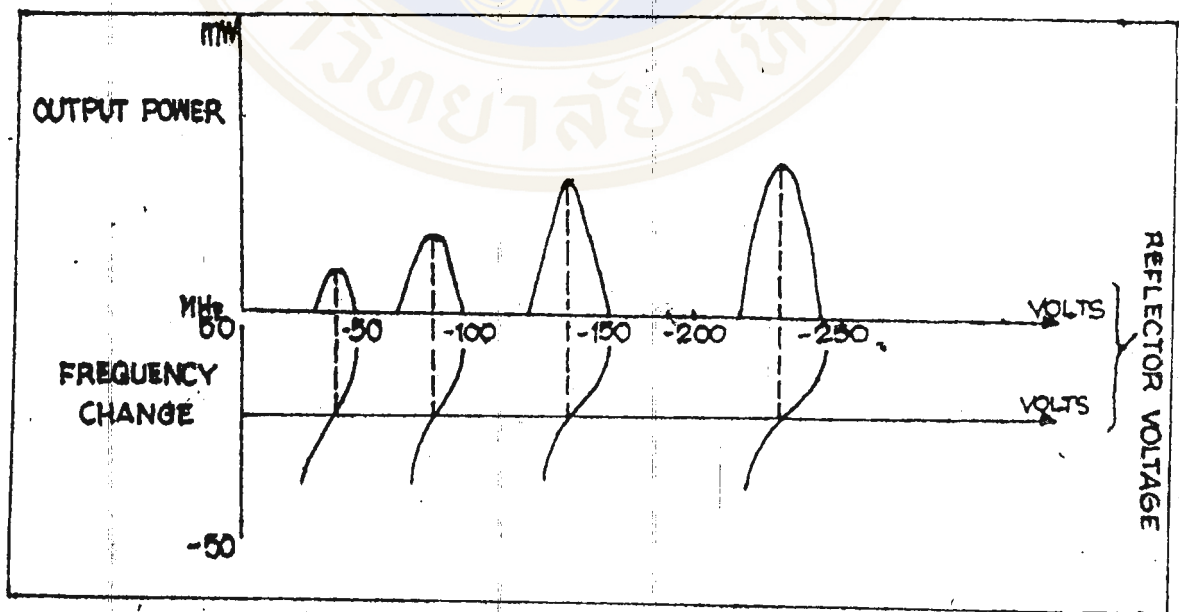
ในการที่จะให้ไคโมคที่เหมาะสมเพื่อใช้งาน เราอาจเลือกไคโดยการปรับค่าศักดาของขั้วฉลัด ตามรูปที่ ๔.๑ จะสังเกตเห็นว่าค่าของศักดาของขั้วฉลัดบางค่าจะไม่ได้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา แต่บางค่าก็ให้ออกมา เฉพาะค่าของศักดาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา เมื่อศักดาไฟฟ้าของขั้วฉลัดมากขึ้นจะให้โมคที่มีกำลังมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ค่าของศักดาของขั้วฉลัดยังทำให้แถบของความถี่มีการเปลี่ยนแปลงไปไคอีกเล็กน้อย ถ้าต้องการให้ความถี่เปลี่ยนค่าไปไคคราวละมาก ๆ จะต้องปรับค่าปริมาตรของโพรง วิธีการอันนี้เรียกว่าการปรับค่าแบบเชิงกล (mechanical tuning) ส่วนวิธีการอันแรกคือ การปรับค่าแบบเชิงไฟฟ้า (electrical tuning) ดังรูปที่ ๔.๑ ก



รูปที่ ๔.๑ ก แสดงรีเฟลคซ์โคลสตรอน



(ก)



(ข)

รูปที่ ๕.๑ รีเฟลกทริคเคลททอน

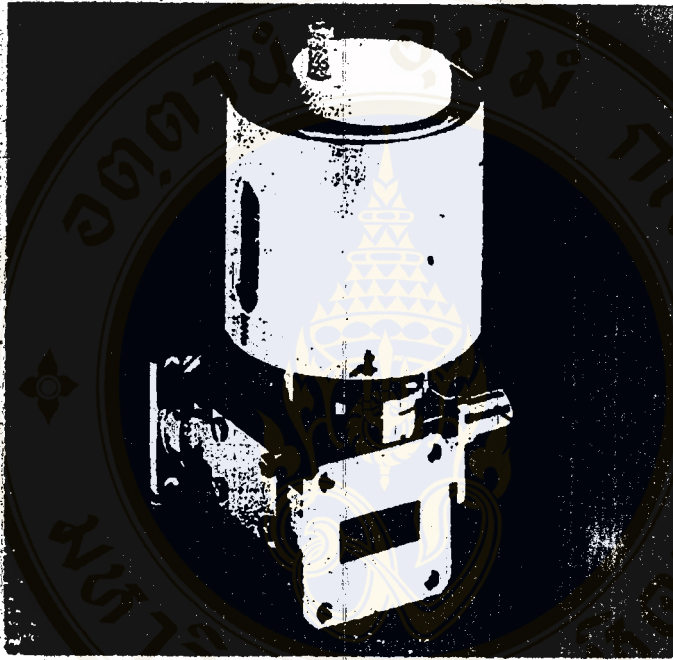
๔.๒ เวฟมิเตอร์ (Wave meter)

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าของความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงไมโครเวฟ เรียกว่า เวฟมิเตอร์ ซึ่งก็คือโพรงกลมนั่นเอง ดังแสดงไว้ตามรูปที่ ๔.๒ เวฟมิเตอร์ ติดตั้งไว้ครอบห่อหน้าคลื่น เมื่อต้องการวัดความถี่ของสัญญาณก็ปรับค่าปริมาตรของ เวฟมิเตอร์ โดยอาศัยหลักของการเกิดการอภินาทจะทำให้ทราบค่าของความถี่ของ สัญญาณที่เข้ามาได้ แต่เมื่อไม่ต้องการวัดก็เปลี่ยนค่าของปริมาตรไปอีกค่าหนึ่ง โดยไม่ต้องถอดเวฟมิเตอร์ออกจากชุดของเครื่องมือ ในการปรับหาความถี่ของสัญญาณ ถ้า ปริมาตรของเวฟมิเตอร์มีค่าพอเหมาะกับการที่จะทำให้เกิดการอภินาทแล้ว เวฟมิเตอร์ ก็จะจับกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเอาไว้ ส่วนของที่ถูกจับเอาไว้นี้จะสังเกตเห็นโคบนจอร์ ของฮอสซิลโลสโคป ปกติแล้วจะใช้กับโมค T5₁₀ เพราะโมคนี้ไม่ให้กระแสไหล บนผนังและผนังอันล่าง แต่มีกระแสไหลวนอยู่เฉพาะด้านข้างของเวฟมิเตอร์เท่านั้น เวฟมิเตอร์มีส่วนประกอบดังนี้

- (๑) โพรงอภินาท
- (๒) พลันเจอร์ที่ปรับค่าได้ (tuning plunger)
- (๓) สกรูบังคับ (a driving screw mechanism)

ก้านในของโพรงอภินาทรูปทรงกระบอก หรือโพรงกลมทำด้วยโลหะที่มีความนำไฟฟ้าได้ดี ทั้งนี้เพื่อให้มีการสูญเสียพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้น้อยที่สุด โพรงกลมติดตั้งไว้ บนส่วนหนึ่งของท่อเหลี่ยม ขนาดปริมาตรของโพรงปรับเปลี่ยนค่าโดยการปรับพลันเจอร์ ซึ่งติดอยู่กับสกรูบังคับ

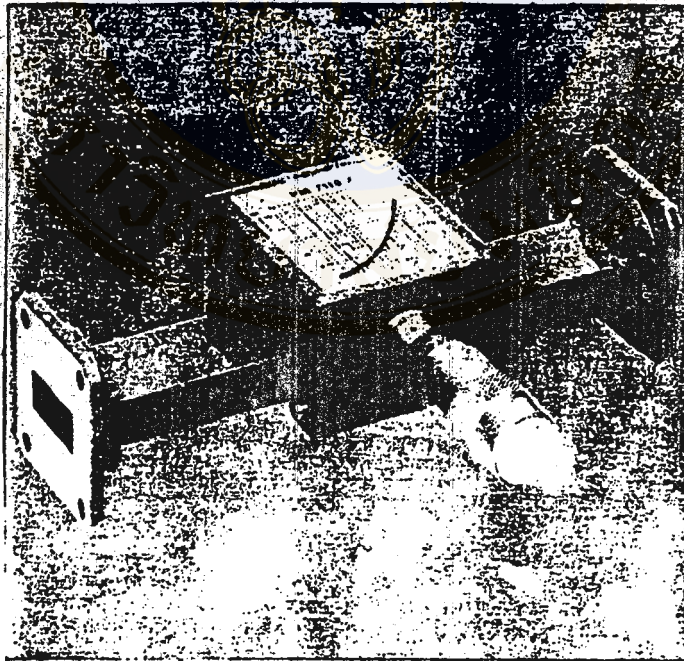
* Conner, F.R. 1972, Wave Transmission, London : Arnold.



รูปที่ ๘.๒ แสดงวาล์วมิเตอร์

๘.๓ แอทเทนูเอเตอร์ (Attenuator)

เมื่อต้องการที่จะลดกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งกำลังแผ่ออกไปตามหน้าคลื่น เราใช้เครื่องมือที่เรียกว่า แอทเทนูเอเตอร์ ต่อแทรกเข้าไปในซอกของเครื่องมือ แอทเทนูเอเตอร์มีอยู่หลายชนิด แต่ในการใช้งานทั่ว ๆ ไปมักใช้แอทเทนูเอเตอร์แบบมี แวน (vane) ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ ๘.๓ ส่วนประกอบที่สำคัญของแอทเทนูเอเตอร์ ก็คือแวนแกวซึ่งหุ้มไว้ด้วยวัสดุที่ต้านคลื่น เช่น นิเกิล หรือ โครเมียม แวนแกวอันนี้จะอยู่ ภายในและอยู่ในตำแหน่งที่ขนานกับสนามไฟฟ้า สามารถปรับให้คลื่นที่ไปมาโคโยหมุนปุม (A) ซึ่งยึดกับแกนกลมมีมาตราส่วนบางไว้เป็นมิลลิเมตร ความลึกของแวนที่เข้าไป เป็นมิลลิเมตรยังสามารถวัดค่าออกมาเป็นเดซิเบล (DB) ซึ่งอ่านโคโยตรงบนแผนภูมิ (B) กำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลดลงไ้มากที่สุดเมื่อแวนอยู่ตรงกึ่งกลางของหน้า คลื่น ทั้งนี้เพราะว่าความเข้มของกำลังของคลื่นตรงกึ่งกลางมีค่ามากที่สุดนั่นเอง



รูปที่ ๘.๓ แสดงแอทเทนูเอเตอร์

* Conner, F.R. 1972, Wave Transmission, London : Arnold.

๔.๔ Rotary Vane Attenuator

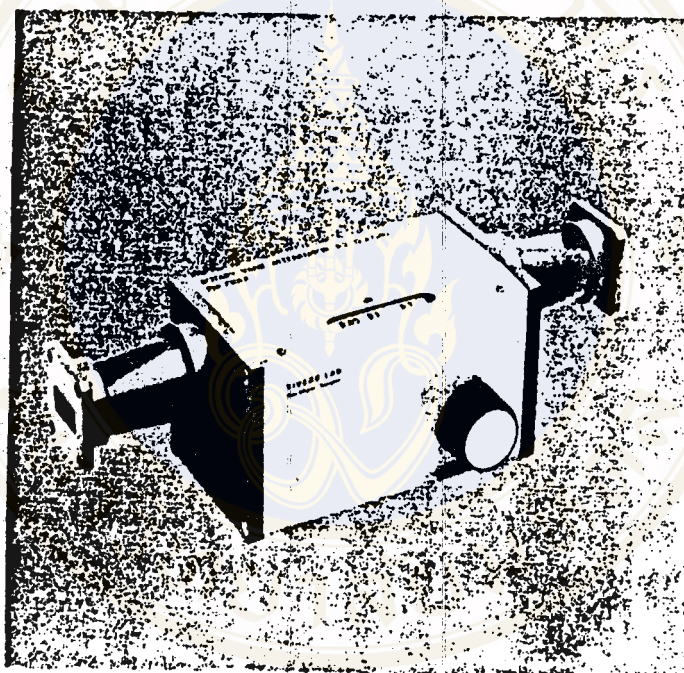
ตามหลักของ Rotary Vane นำมาใช้ทำให้ attenuator มีความถูกต้อง จะทำให้ attenuator ไม่ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความชื้น และปลอดภัยจากการสั่นสะเทือนในการเคลื่อนย้ายเปลี่ยนที่ เหนื่อยานเบาบาง

Attenuator ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลง ๒ สถานะ จากสี่เหลี่ยมมุมฉากไปสู่ท่อนำคลื่นรูปทรงกลม ซึ่งถูกแยกโดยการหมุน ชั้นทรงกลมของท่อนำคลื่นในแต่ละส่วนบรรจุแผ่นต้านทานไว้ การเปลี่ยนแปลงสถานะของแผ่นถูกคิกตั้งไว้กลับที่ ค้างฉากกับสนามไฟฟ้า แผ่นต้านทานในส่วนวงกลมสามารถจะถูกหมุนไถ่ระหว่าง $0 - ๕๐^{\circ}$ ในการเปลี่ยนสถานะของแผ่นต้านทาน สเตลมีความยาว ๒๐ ซม. mular tape สปริงบรรจุตัวขับเคลื่อน ซึ่งมีความถูกต้องและความสามารถในการตั้งใหม่ ใกล้เคียง

ท่อนำคลื่นและตัวทำตัวอเนกนิยัม ท่อนำคลื่นด้านในและตัวทำตัวภายนอกจะเคลื่อนด้วยฮีเทอ กังรูปที่ ๔.๔

พิสัยความถี่ (Frequency range)	:	8.2 - 12.4 GHz
พิสัยความถี่ (Attenuation range)	:	0 - 60 dB
ความถูกต้อง (Accuracy)	:	0 - 10 dB : 0.1 dB
10 - 40 dB	:	1 % จากที่ผ่านไถ่
40 - 50 dB	:	2 % จากที่ผ่านไถ่
50 - 60 dB	:	3 % จากที่ผ่านไถ่
(UP TO 10.5 GHz)		
การสูญเสียการทอ (Insertion Loss)	:	0.75 dB
VSWR	:	1.10
กำลังสูงสุดเฉลี่ย (Max average power)	:	10 W

ท่อนำคลื่น (Waveguide) : R 100 (WR 90, WG 16)
Fränge : Mates UBR 100
น้ำหนัก (Weight) : 1350 g

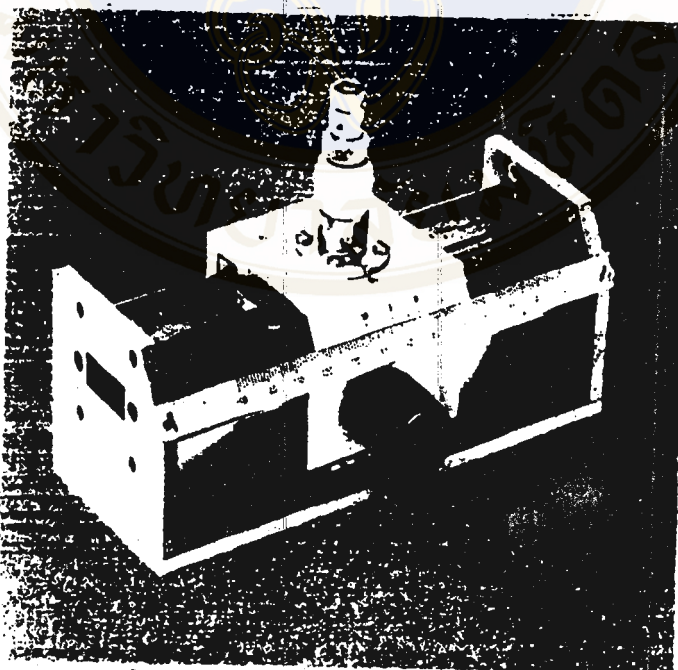


รูปที่ ๔.๔ แสดง Rotary Vane Attenuator

* PHILIPS, : "Education in Applied Microwaves", Sivers Lab.

๔.๕ ตัวตรวจวัดคลื่นสถิต (Standing wave detector)

เมื่อใส่สัญญาณเข้าไปในท่อนำคลื่น ความยาวคลื่นของคลื่นที่อยู่ภายในท่อนำคลื่น เราทำการตรวจวัดได้โดยอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่าตัวตรวจวัดคลื่นสถิต ตัวตรวจวัดคลื่นสถิตนี้คือส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นรูปเหลี่ยม หรือท่อเหลี่ยม ดังรูปที่ ๔.๕ บนผนังบนเจาะรูทะลุเป็นรูแคบ (Potted Pine) มีความยาวไปตามความยาวของท่อนำคลื่น และบนผนังอื่นนี้จะติดตั้งกลไกที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามแนวความยาวของรูได้ ภายในกลไกยังประกอบด้วยแท่งโลหะเรียวยาวเล็กสอดยื่นทะลุลงไป แท่งโลหะเรียวยาวเล็กนี้เรียกว่าโพรบ (probe) เมื่อโพรบอยู่ในสภาวะไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ในโพรบจะมีการเคลื่อนที่ไปมา จึงเป็นผลทำให้กระแสสลับขึ้น ดัดจากโพรบขึ้นมาเป็นผลึกไดโอด (crystal diode) ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง จากนั้นพลังงานก็จะไหลไปตามสายไปสู่ฮอสซิลโลสโคป ตัวตรวจวัดคลื่นสถิตสามารถวัดความยาวคลื่นของสัญญาณได้ใน ช่วงสองถึงสามความยาวคลื่น นอกจากนี้ยังใช้ในการวัดค่าอื่น ๆ ได้อีกด้วย



รูปที่ ๔.๕
ตัวตรวจวัดคลื่นสถิต

* PHILIPS, : "Education in Applied Microwaves" Sivers Lab.

๔.๖ เครื่องค่อให้เป็นไปตามทิศทาง (Directional Coupler)

เครื่องค่อที่มีหลายช่อง (hole) แบบ PM 7241X เป็นที่รวบรวมของคลื่นที่นำ ๒ ส่วน ซึ่งมาจากแขนหลัก(main arm) และ แขนย่อย(auxiliary arm) ของช่องเครื่องค่อ(coupling hole) จะถูกเจาะนำไปในผนังบอร์คธรรมดา ก้านท้ายของแขนย่อยจะเป็นจุดประจุ (คู่ประจุ) และก้านท้ายของอีกแขนหนึ่งเป็นขอบยื่นออกมาเรียบ ๆ อำนาจการไหล (Power flowing) ในทิศทางหนึ่งจะผ่านแขนหลักออกมาทางก้านที่เป็นขอบยื่นออกมา ซึ่งในขณะที่อีกทิศทางหนึ่งหรือก้านอื่นจะไม่ให้สัญญาณออกมาเลย

เครื่องค่อ (10 dB) ระหว่างแขน ๒ แขน (the coupling factor) จะถูกกำหนดจำนวน ขนาด และที่ตั้งที่ผนังธรรมดา ๆ เครื่องตัวนี้ภายในเป็นแผ่นทองเหลือง ภายนอกฉาบสีมอ ๆ ไว้ (ให้กลมกลืนกับผนัง) ดังรูปที่ ๔.๖

คุณลักษณะของเครื่องแบบ PM 7241 X (Specifications)

- ส่วนของความถี่ (Frequency range) : 8.2 - 12.4 GHz
- Mean Coupling Accuracy : ± 0.4 dB
- Coupling : 10 dB
- Coupling Variation : ± 0.5 dB
- Directivity : 40 dB
- VSWR in main arm : 1.05
- ท่อนำ (Waveguide) : R 100 (WR 90, WG 16)
- Flange : mates UBR 100
- น้ำหนัก (Weight) : 800 g.

* PHILIPS, : "Education in Applied Microwaves", Sivers Lab.



รูป ๔.๖ ๘๘๘ Directional Coupler

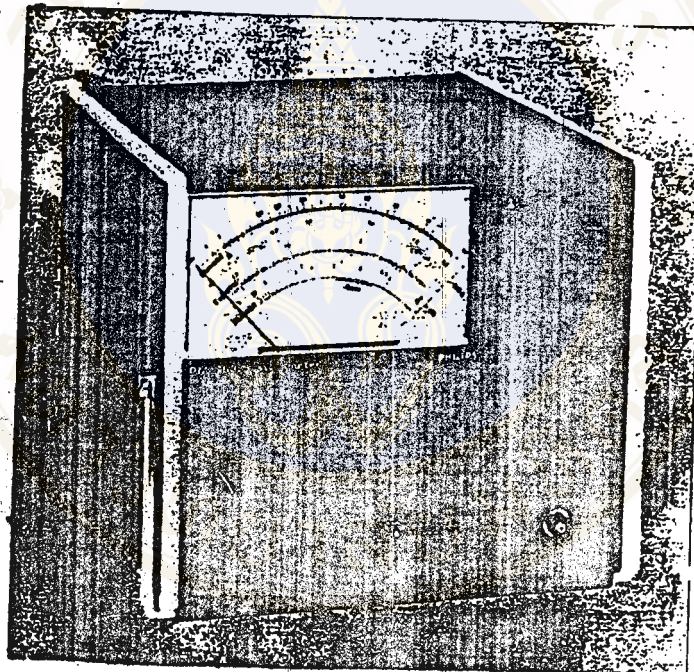
๔.๗ เครื่องตรวจวัดคลื่นสติก (SWR - meter)

เครื่อง SWR ที่ใช้แบบ PM 7832 สามารถรับความถี่ต่ำกว่า 1000 Hz ซึ่งมีหน่วยในการวัด amplifier/voltmeter และมีคุณสมบัติการหลีกเลี่ยงจากคลื่นที่สะท้อนจากพื้น (ground loop) จึงสามารถวัดความถูกต้องได้จาก main ground ตามรูปที่ ๔.๗

ลักษณะเฉพาะของเครื่อง PM 7832 (Specifications PM7833)

ความถี่ที่เข้าได้ (input frequency)	: 1000 Hz, ปรับค่าได้ $\pm 5\%$
ความกว้างของช่องการรับ (Bandwidth)	: 20 Hz หรือ 100 Hz
ความไวในการรับ (Sensitivity)	: 1 μ V rms สำหรับเต็มสเกล
ความเข้มเสียง (Noise)	: สามารถวัดได้ต่ำกว่า 6 dB ที่ช่องคลื่นมากที่สุด
การต่อสัญญาณเข้า (Input connector)	: ต่อเข้ากับ BNC female
พิสัย (Range)	: 70 dB ใน ๖ ชั้นคอนและปรับขยายได้ใน 10 dB
การปรับกำลังขยาย (Adjustable gain)	: ทำได้ 10 dB โดย coarse control ประมาณ 0.5 dB โดย fine control
ความแม่นยำ (Accuracy)	: ± 0.1 dB/10 dB ที่เต็ม ค่าผิดพลาด ± 0.2 dB ± 0.5 dB เมื่อเปิดปิด Normal Expand
มิเตอร์สเกล (Meter scales)	: สเกลแบ่งเป็น SWR 1-4/3.2-10 (Normal) 1-1.3 (Expand) dB 0-10 (Normal) dB 0-2.5 (Expand)
ผลที่ได้ออก (out put)	: เมื่อสเกลขั้นเต็ม AC 70 mV rms from 100 Ω DC 100 mV from 400 Ω

พิสัยอุณหภูมิ (Temperature range) :	D ... + 45° C
กำลัง (Power) :	100 - 130/200 - 260 V
	50 - 400 Hz Battery
ขนาด (Dimensions) :	217 × 260 × 190 mm.
น้ำหนัก (Wight) :	4.2 Kg



รูปที่ ๘.๗ แสดง SWR - Meter

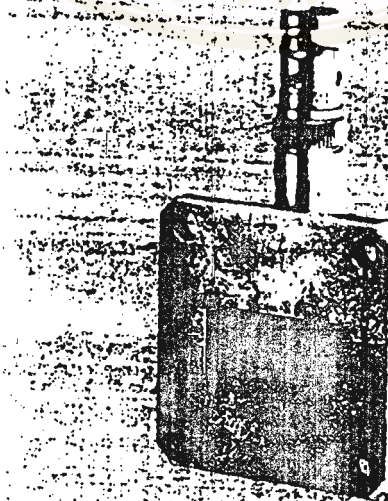
* PHILIPS, : " Education in Applied Microwaves ", Sivars Lab.

๘.๘ เครื่องตรวจจับคลื่น (Detector)

เครื่องนี้ออกแบบสำหรับการค้นหาคลื่นในระบิตค่า ไคโอคจะถูกติดตั้งไว้ตรงกลางของท่อนำ ซึ่งอยู่ก้านหน้าของวงจรหลัก มีที่ปรับคลื่น ๒ ย่านที่เหมือนกัน ระหว่างไคโอคและจานทำให้เสียงสะท้อนกลับไปมาราบเรียบ และลดลงเป็นไปตามการตอบรับของ VSWR การออกแบบเป็นรุ่นที่ PM 7197 X ตามรูปที่ ๘.๘

ลักษณะเฉพาะของ PM 7197 X (Specifications)

พิสัยความถี่ (Frequency range)	:	8.2 - 12.4 GHz
ความไวในการรับ (Sensitivity)	:	0.4 mV/μW
ความกว้างของช่อง (Flatness)	:	± 0.3 dB
VSWR	:	1.4
กำลังสูงสุดในการป้อนเข้า (Max input power)	:	100 mW
ไคโอค (Diode)	:	PM 7726
ท่อนำคลื่นเข้า (Waveguide input)	:	R 100 (WG 16, WR 90)
น้ำหนัก (Weight)	:	100 g



รูปที่ ๘.๘
แสดงเครื่องตรวจจับคลื่น

๔.๕ การเตรียมสารตัวอย่าง

สารที่เราเลือกมาเป็นสารตัวอย่าง เพื่อวัดการหักล้างของคลื่น คือวัสดุที่สามารถทำเป็นรูปร่างโพลีเอสเตอร์ (Polyester molding materials) ที่เลือกขึ้นมาเป็นพวกไฟเบอร์ (fiber) ที่หาได้ง่ายมีขายในท้องตลาด สารตัวอย่างที่เลือกขึ้นมาคือค่าไดอิเล็กตริก (dielectric constant) 4.0 - 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ในการอ่อนตัว (attenuation's coefficient) 0.015-0.020 นำมาประกอบเข้ากับวัสดุหลัก AI 2024 T2 ที่เป็นชิ้นส่วนของอากาศยาน โดยแยกทำเป็น ๒ ชุด

๑. ชุดแรกเป็นไฟเบอร์เปล่ากับอะลูมิเนียมเปล่า
๒. ชุดที่สอง เป็นประกอบไฟเบอร์กับอะลูมิเนียมท้าวขาว

ขั้นตอนของการเตรียม

๔.๕.๑ ตักอะลูมิเนียม (AI 2024 T2) เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้างและยาวด้านละ ๓๐ ซม. ที่มีความหนา

อะลูมิเนียมแผ่นที่ ๑ หน้า ๑.๐ มม.

อะลูมิเนียมแผ่นที่ ๒ หน้า ๒ มม.

๔.๕.๒ ประกอบไฟเบอร์เปล่า เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้างและยาวด้านละ ๓๐ ซม. ที่มีความหนา

ไฟเบอร์แผ่นที่ ๑ หน้า ๑ มม.

ไฟเบอร์แผ่นที่ ๒ หน้า ๒ มม.

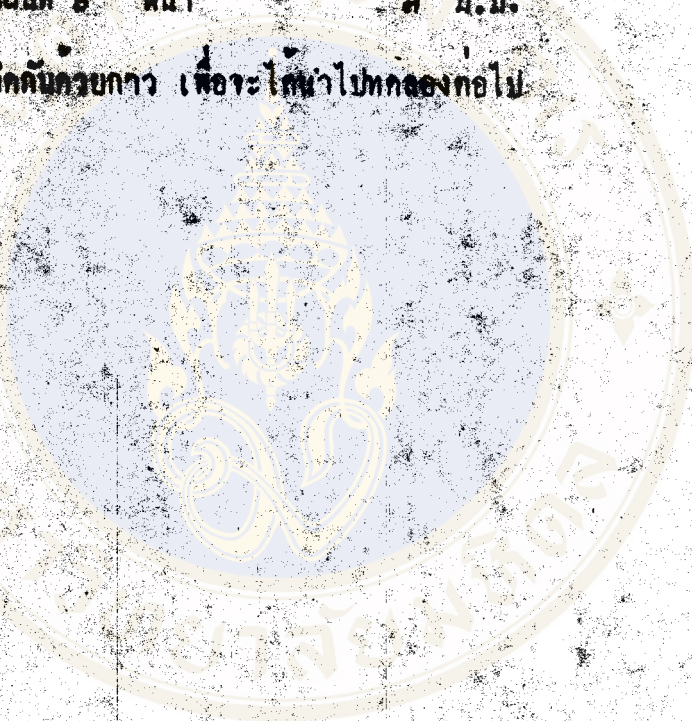
ไฟเบอร์แผ่นที่ ๓ หน้า ๓ มม.

ไฟเบอร์แผ่นที่ ๔ หน้า ๔ มม.

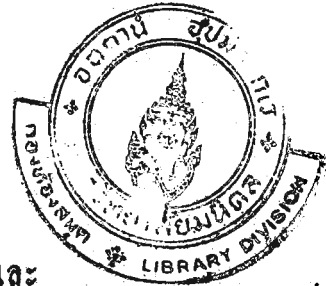
๔.๕.๓ ประกอบไฟเบอร์กับอะลูมิเนียมเข้าด้วยกันโดยใช้ท้าว ซึ่งทั้งคู่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง และยาวด้านละ ๔๐ ซม. โดยที่

กรณีพิเศษ (A1 2024 T2)	หน้า	๒	น.น.
โทรศัพท์มือถือ	หน้า	๑	น.น.
โทรศัพท์มือถือ	หน้า	๒	น.น.
โทรศัพท์มือถือ	หน้า	๓	น.น.
โทรศัพท์มือถือ	หน้า	๔	น.น.
โทรศัพท์มือถือ	หน้า	๕	น.น.
โทรศัพท์มือถือ	หน้า	๖	น.น.

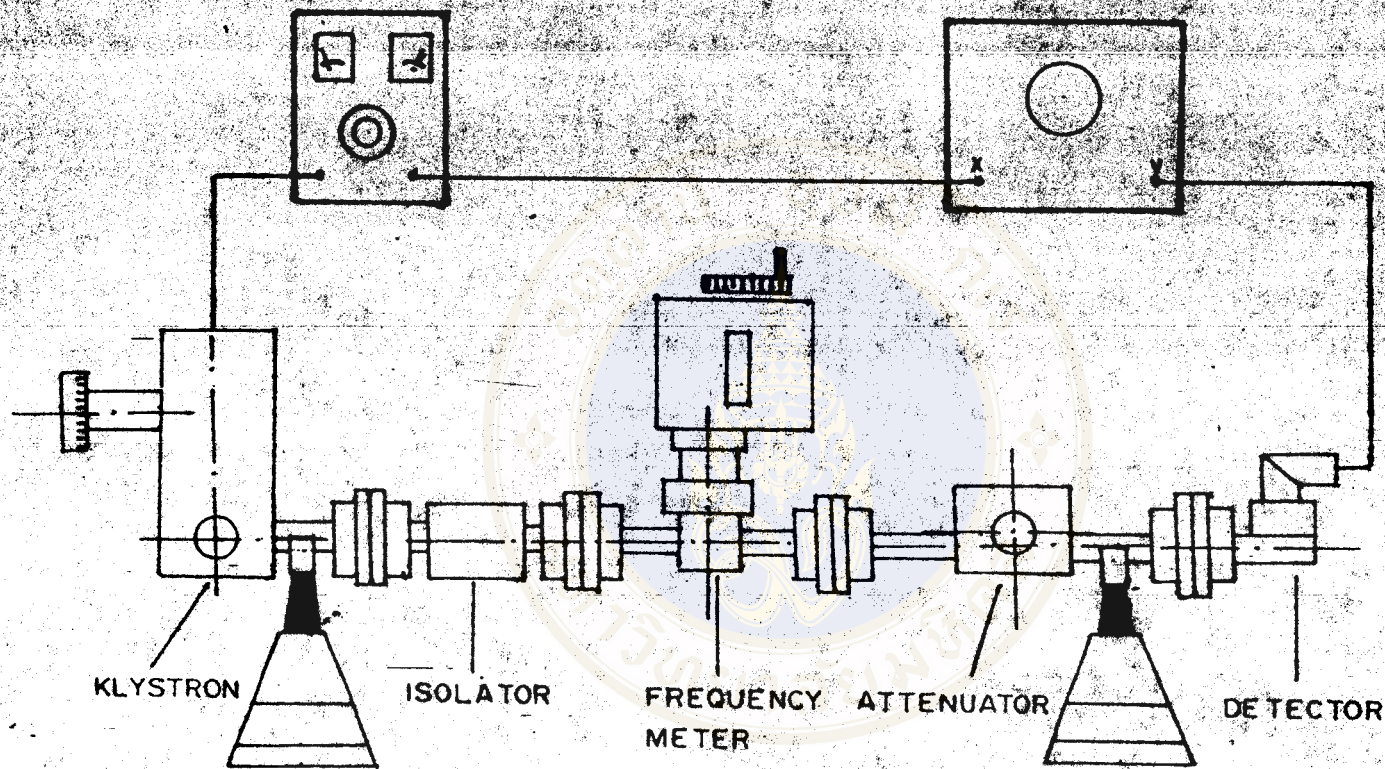
นำมายื่นต่ออธิการบดีมหาวิทยาลัย เพื่อจะได้นำไปทูลเกล้าทูลกระหม่อม



๔.๑๐ การศึกษาว่าความถี่แต่ละแถบของ Klystron ที่ใช้มีความถี่สูงจากออสซิลโลสโคป (Mode studies on oscilloscope)



๑. เราจักเตรียมอุปกรณ์ตามรูปที่ ๔.๑๐
 ๒. ปรับค่า waveguide attenuator ที่ 0 dB
 ๓. Oscilloscope sweep selector จะอยู่ภายนอก และ Horizontal input ถูกเชื่อมด้วย BNC-Jack (0-30V, 50 Hz) กับ power supply ส่วน Vertical amplifier ที่เป็น DC-coupled เชื่อมกับ detector ที่ปรับค่าได้
 ๔. ถอดปุ่มบน Klystron power supply ที่ 50 Hz
 ๕. ตรวจสอบ Res/refl. on อยู่ที่ตำแหน่ง out และ reflector voltage ความคุมอยู่ในตำแหน่งกลาง แล้วเปิด power supply
 ๖. เราจะพบว่า ในแนวระดับบน oscilloscope จะมี curve รูป sine ปรากฏอยู่ ปรับค่าจากข้างหลังเครื่อง power supply จากนั้นปรับ amplitude ในแนวระดับบน oscilloscope และให้สมมาตรกับเส้นกลางของ vertical (การทำให้สมมาตร สามารถปรับได้ โดย "x shift" บน oscilloscope)
 ๗. ถอดปุ่ม "Res/refl. on" ที่ power supply และปรับค่า reflector voltage ไปประมาณ -200 volt
 ๘. ปรับค่า reflector voltage และ vertical sensitivity ไป mode ที่ต้องการดังรูปที่ ซึ่งในรูปนี้จะแสดงให้เห็นว่า mode นี้เป็นส่วนหนึ่งของ Klystron ซึ่งแกนอนคือ reflector voltage ซึ่งแกนตั้งคือ power axis ปรับค่า frequency meter จนเกิดการหนักรของช่วงคลื่น ดังรูปที่
- เราจะใช้ความถี่ = 9.2 GHz เป็นความถี่ที่สูงที่สุดในการใช้งาน Klystron power supply ที่ 100 volt



รูปที่ ๘.๑๐ แสดงการศึกษาความถี่ไคลสตรอน

SET UP FOR OSCILLOSCOPE STUDIES OF THE KLYSTRON

๔.๑๑ การวัดคลื่นสถิต (SWR - measurements)

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ในสายส่ง สามารถพิจารณาที่จุดหรือตำแหน่งนั้นได้ว่าเป็นผลรวมของคลื่น คือ คลื่นตกกระทบ (incident wave) แพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิด กับคลื่นสะท้อน (reflected wave) แพร่กระจายเข้าหาแหล่งกำเนิด เมื่อคลื่นทั้งสองซึ่งมีอัมปลิจูด (amplitude) ความถี่ และความเร็วเท่ากันเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเดียวกันในทิศทางตรงข้าม คลื่นรวมที่ได้จะเป็นคลื่นสถิต (standing wave) เราสามารถคำนวณได้จาก

$$S = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}$$

โดยที่ $S = 0$ หมายถึง การเข้ากันโคเฟอซีเกิดเป็นคลื่นสถิต (perfect match)

$S = 1$ หมายถึง การเข้ากันไม่โคเฟอซีเกิดเป็นคลื่นสถิต (perfect mismatch)

เราสามารถหาค่าคลื่นสถิตได้จากผลการทดลอง โดยใช้วิธีการวัดคลื่นสถิต | SWR measurements (standing wave ratio measurements) | จากหนังสือ basic experiments I ของ Philips

โดยคำนวณได้จาก

$$S = 10 \left| \frac{A_2 - A_1}{20} \right|$$

A_1 = ค่าที่อ่านได้จากกาบปล่อย คลื่นตกกระทบไม่มีเป้า บน SWR

A_2 = ค่าที่อ่านได้ (จากการสะท้อนกลับของคลื่นที่กระทบเป้า) บน SWR

๔.๑๒ การวัดค่าอัตราส่วนของคลื่นสติดบนวัสดุตัวอย่าง โดยใช้ SWR-meter

เราจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลอง ดังรูปที่ ๔.๑๒
การวัดค่าคลื่นสติดจากวัสดุตัวอย่าง ๒ แบบ

แบบแรก เป็นการประกอบวัสดุตัวอย่างบนอะลูมิเนียมเข้าด้วยกัน ให้เกิดช่องว่างคืออากาศ

แบบที่สอง เป็นการประกอบวัสดุตัวอย่างบนอะลูมิเนียมเข้าด้วยกัน โดยใช้การเป็นตัวเชื่อม

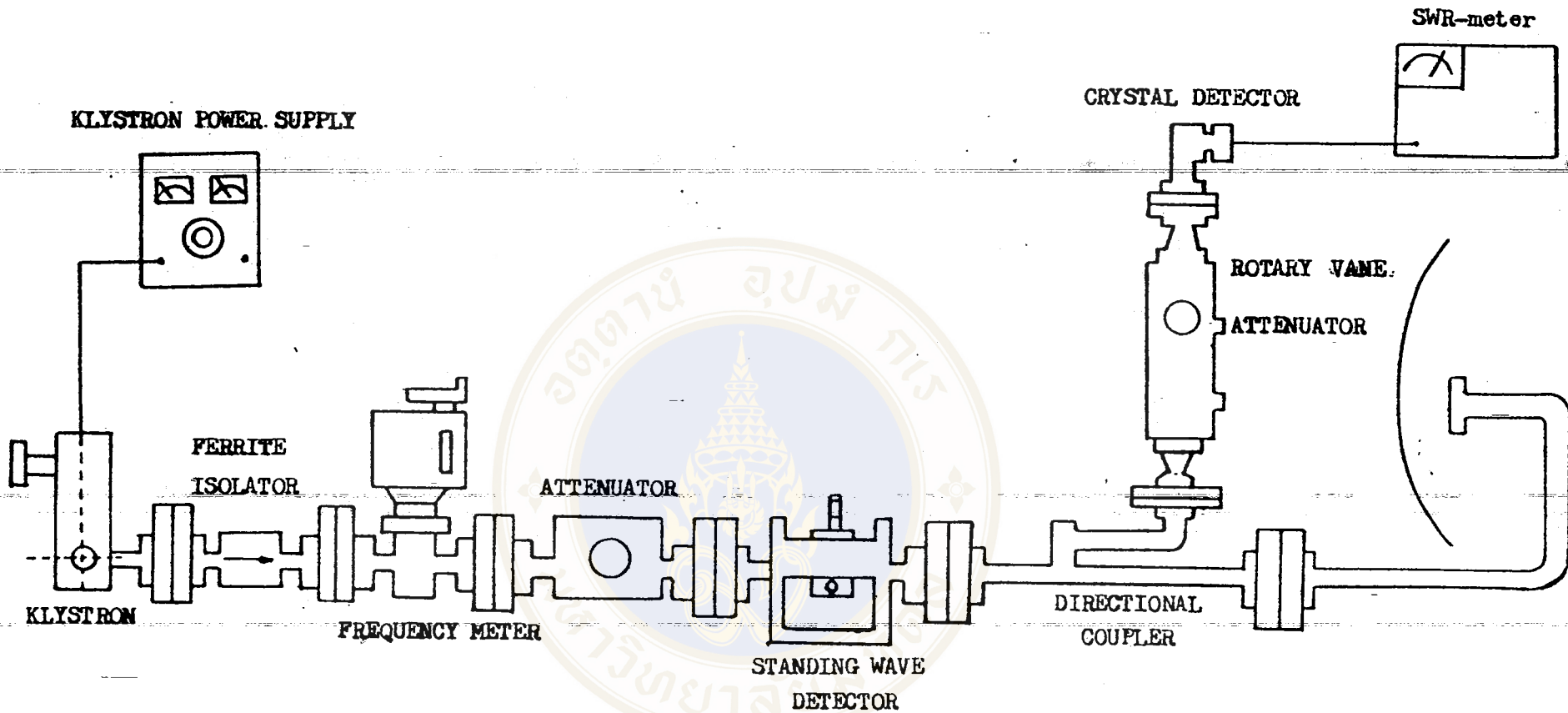
เราวัดความถี่ ที่ออกจาก Klystron power supply 100V, 23 mA
ที่ความถี่ 9.2 GHz เมื่อเปิดเครื่องที่ไม่มีวัสดุตัวอย่าง ดูจาก SWR-meter
ที่ 50 dB ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในการส่งคลื่นออกมา เราปรับปุ่ม gain ของ
SWR-meter ไว้ที่กึ่งกลางที่ 3 dB ซึ่งจะเป็นตัวหลัก (ที่อากาศเปล่า)

$$\text{เราจะได้ว่า } A_1 = 3 \text{ dB}$$

เราจะทำการอ่านค่า SWR-meter เมื่อมีวัสดุตัวอย่างทั้งสองแบบมา
วางกันที่แอนเทนนา (antenna) ที่ระยะ ๑ เมตร และ ๑.๕ เมตร ซึ่งค่า
ที่อ่านไบน SWR-meter คือค่า A_2 ซึ่งจะนำไปคำนวณหาค่า SWR ได้จาก

$$S = 10 \left| \frac{A_2 - A_1}{20} \right|$$

โดยการนำวัสดุตัวอย่างทั้งสองแบบ ทั้งจากบันทึกทางกรเคลื่อนที่ เรา
สามารถอ่านค่าได้จาก SWR-meter ทั้งตารางประกอบพร้อมทั้งคำนวณหา
SWR ไว้ด้วย



รูปที่ ๘.๑๒ แสดงการวัดคลื่นสติดิจัยโดยใช้ SWR-meter

การวัดค่า error meter วัสดุที่ใช้	๑	๒	๓	๔	๕	๖	๗	๘	๙	๑๐	ค่าเฉลี่ย	$S = \frac{0 A_1 - A_2 }{20}$
ลูกปืน (AL) ขนาด ๑ มม.	๒	๑.๓	๑.๓	๑.๓	๒	๑.๓	๒	๑.๓	๑.๓	๑.๓	๑.๓๕	๐.๒๐๕
ลูกปืน (AL) ขนาด ๒ มม.	๑.๖	๑.๖	๒	๒	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖๕	๐.๖๖
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๑ มม.	๒.๕	๒.๒	๒.๓	๒.๒	๒.๕	๒.๕	๒.๒	๒.๓	๒.๒	๒.๕	๒.๓	๐.๓๕
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๒ มม.	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕๕	๐.๒๕
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๓ มม.	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๓	๒.๒	๒.๒	๒.๒๑	๐.๓๕๕
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๔ มม.	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๐.๓
FB (๑) + AL (๑)	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕๕	๐.๐๕
FB (๒) + AL (๑)	๓.๒	๓.๒	๓.๒	๓.๒	๓.๒	๓.๒	๓.๒	๓.๒	๓.๒	๓.๒	๓.๒	๐.๑
FB (๓) + AL (๑)	๓.๕	๓.๕	๓.๕	๓.๕	๓.๕	๓.๕	๓.๕	๓.๕	๓.๕	๓.๕	๓.๕	๐.๒
FB (๕) + AL (๑)	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕๒	๐.๑๕
FB (๑) + AL (๒)	๒.๖	๒.๖	๒.๖	๒.๖	๒.๖	๒.๖	๒.๖	๒.๖	๒.๖	๒.๖	๒.๖	๐.๒
FB (๒) + AL (๒)	๒.๑	๒.๒	๒.๑	๒.๒	๒	๒	๒.๑	๒.๑	๒.๒	๒.๒	๒.๑๒	๐.๕๕
FB (๓) + AL (๒)	๓.๖	๓.๖	๓.๖	๓.๖	๓.๖	๓.๖	๓.๖	๓.๖	๓.๖	๓.๖	๓.๖๕	๐.๓๒
FB (๕) + AL (๒)	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕๒	๐.๑๕

ตารางที่ ๔.๑๓ แสดงวัสดุตัวอย่างแบบแรก ที่ระยะ ๑ เมตร

การบัญชี บัญชี	๑	๒	๓	๔	๕	๖	๗	๘	๙	๑๐	บัญชี	9-10A, A21 20
บัญชีเงินสด (AL) สาขา ๑๓.๓.	๑.๑	๑.๑	๒	๒	๒	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑๐๕
บัญชีเงินฝาก (AL) สาขา ๑๓.๓.	๒	๒	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑	๑.๑๑๑
บัญชีเงินฝาก (FB) สาขา ๑๓.๓.	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๑.๑๑๑
บัญชีเงินฝาก (FB) สาขา ๑๓.๓.	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๑.๑๑๑
บัญชีเงินฝาก (FB) สาขา ๑๓.๓.	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๑.๑๑๑
บัญชีเงินฝาก (FB) สาขา ๑๓.๓.	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๑.๑๑๑
FB (๑) + AL (๑)	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๑.๑๑๑
FB (๒) + AL (๑)	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๑.๑๑๑
FB (๓) + AL (๑)	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๑.๑๑๑
FB (๔) + AL (๑)	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๑.๑๑๑
FB (๑) + AL (๒)	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๑.๑๑๑
FB (๒) + AL (๒)	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๑.๑๑๑
FB (๓) + AL (๒)	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๓.๑	๑.๑๑๑
FB (๔) + AL (๒)	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๒.๑	๑.๑๑๑

การบัญชี ๑.๑๕ แสดงวิธีคำนวณแบบแรก ที่ระยะ ๑.๕ เมตร

การวัดค่า σ_{max} under วัสดุที่ใช้	๑	๒	๓	๔	๕	๖	๗	๘	๙	๑๐	ค่าเฉลี่ย	$S=10 A_1-A_2 $ 20
ฟิล์มเหนียว (Al) ขนาด ๑ มม.	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๒	๒	๒	๑.๗๘	๐.๖๐๕
ฟิล์มเหนียว (Al) ขนาด ๒ มม.	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๒	๒	๑.๖๘	๐.๖๖
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๑ มม.	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๓๓	๐.๓๕
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๒ มม.	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔๔	๐.๒๘
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๓ มม.	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๓	๒.๒๑	๐.๓๘๕
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๔ มม.	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๒.๔	๐.๓
FB (๑) + Al (๑)	๐.๑	๐.๓	๐.๒	๐.๒	๐.๑	๐.๓	๐.๓	๐.๑	๐.๒	๐.๓	๐.๒๑	๑.๓๘๕
FB (๒) + Al (๑)	๐.๓	๐.๒	๐.๑	๐.๓	๐.๒	๐.๑	๐.๒	๐.๓	๐.๑	๐.๒	๐.๒	๑.๔
FB (๓) + Al (๑)	๐.๒	๐.๑	๐.๓	๐.๑	๐.๓	๐.๒	๐.๑	๐.๓	๐.๓	๐.๑	๐.๒	๑.๔
FB (๔) + Al (๑)	๔.๑	๔.๒	๔	๔	๔.๒	๔.๑	๔.๑	๔.๒	๔.๒	๔	๔.๑๑	๐.๕๕๕
FB (๑) + Al (๒)	๑.๓	๑.๒	๑.๑	๑.๒	๑.๓	๑.๑	๑.๒	๑.๒	๑.๓	๑.๑	๑.๒	๐.๕
FB (๒) + Al (๒)	๑.๒	๑.๓	๑.๑	๑.๒	๑.๑	๑.๒	๑.๓	๑.๒	๑.๓	๑.๓	๑.๒๒	๐.๔๘
FB (๓) + Al (๒)	๑.๑	๑.๑	๑.๒	๑.๓	๑.๒	๑.๓	๑.๑	๑.๒	๑.๓	๑.๒	๑.๒	๐.๕
FB (๔) + Al (๒)	๐.๓	๐.๑	๐.๑	๐.๓	๐.๑	๐.๓	๐.๓	๐.๑	๐.๑	๐.๔	๐.๒๑	๑.๓๘๕

ตารางที่ ๔.๑๕ แสดงวัสดุตัวอย่างแบบสอง ที่ระยะ ๑ มม

การวัดค่า σ_{max} และ m_{max} วัสดุที่ใช้	๑	๒	๓	๔	๕	๖	๗	๘	๙	๑๐	ค่าเฉลี่ย	$S = \frac{D(A_1 - A_2)}{20}$	
ส.คิม.นิ่ม (AL) ขนาด ๑ มม.	๒	๒	๒	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๑.๗	๑.๗๕	.๖๐๕
ส.คิม.นิ่ม (AL) ขนาด ๒ มม.	๒	๒	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖	๑.๖๕	.๖๖
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๑ มม.	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๒๗	.๓๖๕
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๒ มม.	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๕๕	.๒๕
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๓ มม.	๒.๒	๒.๒	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๕	๒.๕	๒.๕	๒.๓	๒.๓๕	.๓๕
โฟมเบอร์ (FB) ขนาด ๔ มม.	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๒	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๓	๒.๒๕	.๓๕๗
FB (๑) + AL (๑)	๑.๕	๐.๕	๐.๓	๑.๕	๑.๕	๐.๓	๐.๕	๐.๕	๐.๓	๐	.๓๓	๑.๑๓๕	
FB (๒) + AL (๑)	๐.๒	๑	๐.๖	๐.๓	๐.๕	๐.๗	๐.๕	๐.๕	๐.๒	๐.๓	.๕๗	๑.๒๑๕	
FB (๓) + AL (๑)	๑.๓	๑.๕	๑.๓	๑.๕	๑.๖	๑.๖	๑.๑	๑.๑	๑.๓	๑.๓	๑.๓๕	๐.๕๓	
FB (๔) + AL (๑)	๑.๕	๐.๖	๐.๕	๐.๕	๐.๕	๑.๕	๐.๕	๐.๕	๐.๕	๐.๖	๐.๕๕	๑.๑๓	
FB (๑) + AL (๒)	๑.๕	๑.๓	๑.๓	๑.๕	๑.๓	๑.๕	๑.๒	๑.๓	๑.๕	๑.๓	๑.๓๕	๐.๕๓	
FB (๒) + AL (๒)	๑.๕	๑.๕	๑.๖	๑.๓	๑.๓	๑.๕	๑.๕	๑.๕	๑.๖	๑.๕	๑.๕๖	๐.๕๗	
FB (๓) + AL (๒)	๔.๕	๔.๑	๔.๕	๔.๓	๔.๒	๔.๓	๔.๒	๔.๑	๔.๒	๔.๑	๔.๒๕	๐.๖๒	
FB (๔) + AL (๒)	๔.๕	๔.๕	๔.๕	๔.๕	๔.๕	๔.๕	๔.๕	๔.๓	๔.๓	๔.๒	๔.๕	๐.๕	

ตารางที่ ๔.๑๖ แสดงวัสดุตัวอย่างแบบสอง ที่ระยะ ๑.๕ เมตร

ข้อสรุป และเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากหลักการทางงานของเรการ อาศัยการส่งคลื่น (การส่งคลื่นออกไปเสมือนกับเป็นเส้นกรง) ออกไปกระทบเป้าเกิดคลื่นสะท้อน เข้ามายังเครื่องรับทำให้เกิดการจับเป้าหมายได้ ด้วยหลักการทางงานอันนี้เราสามารถที่จะหา

๑. ทฤษฎีของการหักล้างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่จะทำให้ไม่เกิดคลื่นสะท้อนกลับไปยังเครื่องรับได้ จากบทที่ ๒ และบทที่ ๔ ซึ่งจะนำไปสู่การหาวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในภายในประเทศ

๒. เราสามารถสร้าง computer program เพื่อใช้หาวัสดุโดยขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารนั้น (dielectric constant of material) ค่าสัมประสิทธิ์ของการอ่อนกำลังของสารนั้น (attenuation coefficient of material) และสิ่งที่สำคัญคือขนาดของความหนาที่เหมาะสม ในย่านความถี่ของไมโครเวฟ (microwave) ไม่ว่าจะเปลี่ยนไปเท่าใด และสามารถพิจารณาใช้กับความถี่อื่น ๆ ได้อีกในบทที่ ๓

๓. วัสดุที่เราหามาได้นั้น ซึ่งนำมาใช้จากบทที่ ๔ จะพบว่า นำวัสดุตัวอย่างกับวัสดุโดยการใส่ตะปูจริงแผ่นให้ติดกัน (rivet) ให้เกิดช่องอากาศ จะดีกว่าการใช้กาวอย่างมาก

ในการวิเคราะห์ปัญหาระหว่างการใช้สีพื้นชนิดพิเศษ กับวัสดุตัวอย่างเทียบค่า ๑ ลำ

๔. ในกรณีสีพื้นชนิดพิเศษ

- ค่าใช้จ่ายในการทาสีประมาณ ๑,๖๐๐,๐๐๐ บาท
- อายุการใช้งานของสีประมาณ ๖ เดือน
- การทาสีให้ไล่ความหนาที่เหมาะสมทำได้ลำบากต้องใช้เวลานาน

๕. ในกรณีที่ใช้กับวัสดุตัวอย่าง (ไฟเบอร์)

- ค่าใช้จ่ายประมาณ ๑๓๐,๐๐๐ บาท
- อายุการใช้งานมีมาก
- การหาขนาดความหนาของวัสดุทำได้ง่ายใช้เวลาสั้นมาก

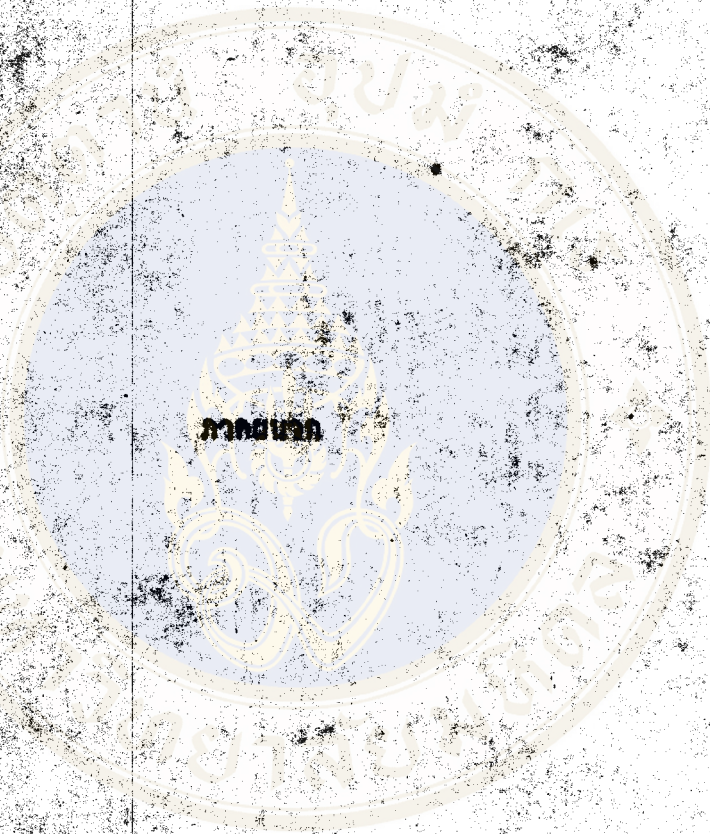
ดังนั้นในการปรับปรุงการหาวัสดุนี้ ทางกองทัพสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายประมาณ

• ล้างบาทต่อลำ

จากผลการวิจัยครั้งนี้ สนับสนุนให้มีการหาวัสดุที่มีโซอยู่ภายในประเทศนำมาใช้ และสอดคล้องกับหลักทศสตร์ทุกประการ

ข้อเสนอแนะการวิจัยเพิ่มเติม

ในการวิจัยโดยใช้เครื่องมือของบริษัทฟิลิปส์ โคลสตรอนโมค PM 7011X พบว่า ช่วงของความถี่ที่พอจะใช้ทำการทดลองได้คือ ช่วงประมาณ ๔.๕ ถึง ๕ จิกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีช่วงแคบมาก ความแม่นยำของเครื่องวัดความถี่อยู่ในช่องของ ๐.๐๓ % และในการอ่านค่าได้ละเอียดถึง ± ๐.๒ MHz ความเสถียรของความถี่อยู่ในชั้นไม่ก็ กล่าวคือเปลี่ยนแปลงรวดเร็วมาก หลังจากการเปิดเครื่องไปได้ประมาณ ๓๐ นาที การใช้ SWR-meter ก็มี ความผิดพลาดมาก และเกิดการชำรุดบ่อย เนื่องจากเวลาทำการวิจัยมีจำกัด จึงได้หยุดการวิจัยไว้เพียงเท่าที่ข้อเสนอผลงานไปแล้วความข้างต้น ถ้าจะให้ผลการวิจัยถูกต้องและแน่นอน ควรจะไต่กระทำการกับของจริง สำหรับผู้ที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องทางค่านนี้ จะได้เกิดประโยชน์กับประเทศชาติอย่างมาก



การเขียน Program Computer

```
10 DIM Z(1001),E(3),E3(2),N2(10), BETA(10),T(11)
20 CLS
30 LOCATE 20,0 : PRINT "*****"
40 LOCATE 20,1 : PRINT "*"      Wave Propagation in Mediums      "*"
50 LOCATE 20,2 : PRINT "*"      Written by Flt. Varin Chareonrat      "*"
60 LOCATE 20,3 : PRINT "*"      Dept. of App. Math., Mahidol University      "*"
70 LOCATE 20,4 : PRINT "*****"
80 LOCATE 20,6 : PRINT "ALPHA1 = WAVE LENGTH OF MEDIUM1"
82 LOCATE 20,7 : PRINT "ALPHA2 = WAVE LENGTH OF MEDIUM2"
84 LOCATE 20,8 : PRINT "BETA = ATTENUATION CONSTANTS OF MATERIAL"
86 LOCATE 20,9 : PRINT "D = THICKNESS OF MATERIAL"
88 LOCATE 20,10 : PRINT "E(1) = INCIDENTED WAVE"
90 LOCATE 20,11 : PRINT "E(2) = REFLECTED WAVE"
92 LOCATE 20,12 : PRINT "E(3) = REFRACTED WAVE"
94 LOCATE 20,13 : PRINT "F = FREQUENCY OF MICROWAVE RADAR"
96 LOCATE 20,14 : PRINT "N1 = DIELECTRIC CONSTANTS OF AIR"
98 LOCATE 20,15 : PRINT "N2 = DIELECTRIC CONSTANTS OF MATERIAL"
100 LOCATE 20,16 : PRINT "OMEGA = ANGULAR FREQUENCY"
102 LOCATE 20,17 : PRINT "T = TIME"
104 LOCATE 20,18 : PRINT "Z = DISTANCE OF WAVE PROPAGATION"
120 CLS
130 FOR J = 1 TO 8
135 LOCATE 1,20 : PRINT "N2      Z      D      BETA      E1
      E2      E3      F"
```

```

140 FOR IFR = 1 TO 10
150 LPRINT : APRINT : LPRINT
160 LPRINT " N2      Z      D      BETA      E1      E2
           E2      F"

170 NPO = 101 + (IFR-1)*50
180 FOR I = 1 TO NPO
190 Z(I) = (5/(NPO-1)-I*5/(NPO-1))
200 NEXT I
210 F = IFR*1E+10
220 T = 1/F
230 ALPHA1=3E+10/F
240 OMAGA =2*3.14159*F
250 K=2*3.14159/ALPHA1
260 N1=1
270 FOR I = 1 TO 8
280 N2(I) = 2+(I-1)
290 NEXT I
300 ICOL = 4
310 IJ = 0
320 FOR I = 1 TO NPO
330 E(1) = COS(OMAGA*T-K*Z(I))
340 E(2) = (N1-N2(J))*E(1)/(N2(J)+N1)
350 IF E(2) < 0 THEN E(2) = -(N1-N2)(J)*COS(OMAGA*T+K*Z(I))/(N2(J)+N1)
360 IF E(2) > 0 THEN E(2) = (N1-N2)(J)+COS(OMAGA*T-K*Z(I))/(N2(J)+N1)

```

```

370 E3(1) = 2*N1*COS(OMAGA*T-K*Z(I))/(N2(J)+N1)
380 ALPHA2 = ALPHA1/N2(J)
390 D=N2(J)*ALPHA2/(4*(N2(J)+1))
400 BETA(IJ)=.01+.01*(IJ-1)
410 E3(2)=EXP(-BETA(IJ)*D*.01)*COS(OMAGA*T-K*Z(I))
420 E(3)=E3(2)-E3(1)
450 IF E(3)+E(2) =1E-11 THEN 520
480 LOCATE 10,21 : PRINT "
      "
490 PRINT USING " ## ";N2(J); : PRINT USING " ##.### ";Z(I)
      ; : PRINT USING " #.### ";D; : PRINT USING " #.### "; BETA(IJ)
      ; : PRINT USING " #.### ";E(1); : PRINT USING " ##.### ";
      E(2); : PR
500 PRINT USING " #.## ";F
530 LINE (30,10)-(30,370),PSET,1
540 SYMBOL (24,10), CHR$(154),2,2,1,0
550 LINE (30,180)-(600,180);PSET,1
560 SYMBOL (600,155), CHR$(157),3,3,1,0
580 IF Z(I) = 0 THEN 620
590 LINE (X1,Y1)-(30+100*ABS(Z(I)),180+100*E(1)),PSET,1
600 LINE (X2,Y2)-(30+100*ABS(Z(I)),180+100*E(2)),PSET,2
610 LINE (X3,Y3)-(30+100*ABS(Z(I)),180+100*E(3)),PSET,3
620     X1=30+100*ABS(Z(I)) : Y1=180+100*E(1)
630     X2=30+100*ABS(Z(I)) : Y2=180+100*E(2)

```



```

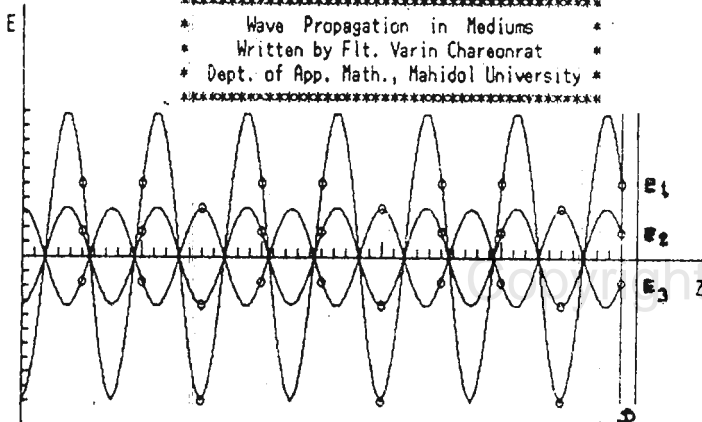
640          X3=30+100*ABS(Z(I)) : Y3=180+100*E(3)
650 NEXT I
660 Z1=0 : Z2=5
670 STL=(Z2-Z1)/50
680 FOR II=1 TO 5
690 FOR JJ=1 TO 10
700 LINE (30+100*Z1,180)-(30+100*Z1,175),PSET,4
710 Z1=Z1+STL : NEXT JJ
720 LINE (30+100*Z1,180)-(30+100*Z1,170),PSET,4
730 NEXT II
740 YAX1=1 : YAX2 = -1
750 DTL=(YAX1-YAX2)/20
760 FOR II=1 TO 21
770 LINE (30,180-100*YAX2)-(35,180-100*YAX2),PSET,4
780 YAX2=YAX2+STL
790 NEXT II
800 LINE (30+100*ABS(Z(NPO)),80)-(30+100*ABS(Z(NPO)),280),PSET,4
810 LINE (30+100*ABS(Z(NPO))+200*D,80)-(30+100*ABS(Z(NPO))+200*D,280)
      ,PSET,ICOL
820 SYMBOL(15+100*ABS(Z(NPO)),260),CHR$(157),2,2,3,0
830 SYMBOL (30+100*ABS(Z(NPO))+200*D,260),CHR$(156),2,2,3,0
840 SYMBOL (50+100*ABS(Z(NPO))+200*D,270),"D",2,1,1,0
850 SYMBOL (45,10), "E", 2,1,1,0
860 SYMBOL (600,200), "Z",2,1,1,0

870 BEEP : BEEP : BEEP
880 IF ICOL >= 7 THEN ICOL = 1
890 ICOL = ICOL + 1
900 CLS 20, 4 : COPY 1 : CLS
910 NEXT IFR : CLS
920 NEXT J

```

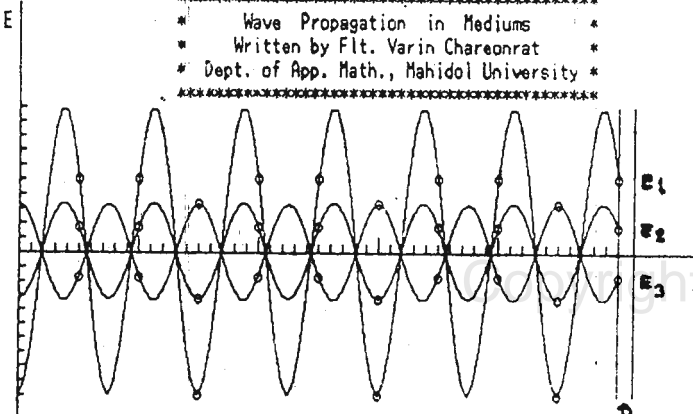
N2	Z	D	BETA	E1	E2	E3	F
2	0.00	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-0.05	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-0.10	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-0.15	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-0.60	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-0.65	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-0.70	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-0.75	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-0.80	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-0.85	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-0.90	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-1.35	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-1.40	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-1.45	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-1.50	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-1.55	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-1.60	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-1.65	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-2.10	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-2.15	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-2.20	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-2.25	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-2.30	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-2.35	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-2.40	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-2.85	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-2.90	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-2.95	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-3.00	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-3.05	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-3.10	0.063	0.020	0.6692	-0.2231	0.2230	0.20E+11
2	-3.15	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-3.60	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-3.65	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-3.70	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-3.75	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-3.80	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-3.85	0.063	0.020	0.6692	-0.2231	0.2230	0.20E+11
2	-3.90	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-4.35	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-4.40	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-4.45	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-4.50	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-4.55	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-4.60	0.063	0.020	0.6692	-0.2231	0.2230	0.20E+11
2	-4.65	0.063	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.20E+11

 * Wave Propagation in Mediums *
 * Written by Flt. Varin Charoenrat *
 * Dept. of App. Math., Mahidol University *

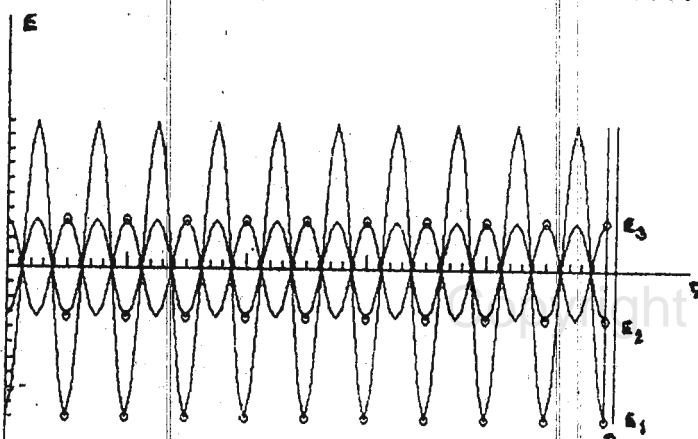


N2	Z	D	BETA	E1	E2	E3	F
2	0.00	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-0.05	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-0.10	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-0.15	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-0.60	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-0.65	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-0.70	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-0.75	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-0.80	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-0.85	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-0.90	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-1.35	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-1.40	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-1.45	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-1.50	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-1.55	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-1.60	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-1.65	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-2.10	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-2.15	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-2.20	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-2.25	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-2.30	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-2.35	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-2.40	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-2.85	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-2.90	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-2.95	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-3.00	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-3.05	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-3.10	0.063	0.020	0.6692	-0.2231	0.2230	0.20E+11
2	-3.15	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-3.60	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-3.65	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-3.70	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-3.75	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-3.80	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-3.85	0.063	0.020	0.6692	-0.2231	0.2230	0.20E+11
2	-3.90	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-4.35	0.063	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.20E+11
2	-4.40	0.063	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.20E+11
2	-4.45	0.063	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-4.50	0.063	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.20E+11
2	-4.55	0.063	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.20E+11
2	-4.60	0.063	0.020	0.6692	-0.2231	0.2230	0.20E+11
2	-4.65	0.063	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.20E+11

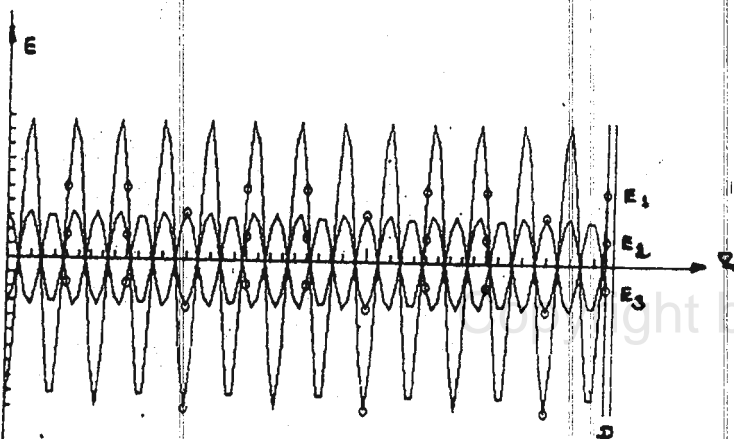
 * Wave Propagation in Mediums *
 * Written by Flt. Varin Chareonrat *
 * Dept. of App. Math., Mahidol University *



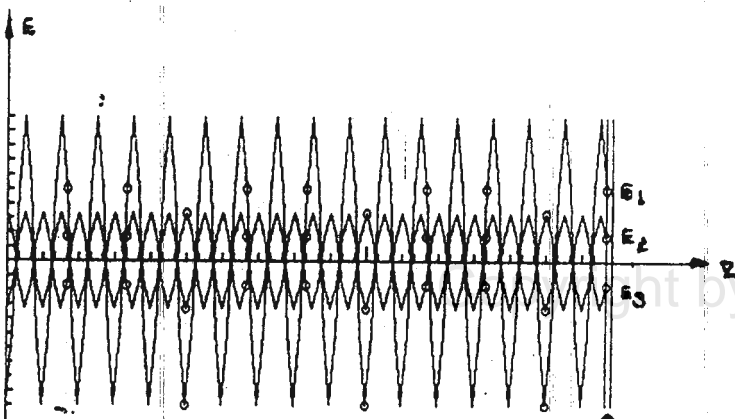
N2	Z	D	BETA	E1	E2	E3	F
2	0.00	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11
2	-0.05	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-0.10	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-0.40	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-0.45	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-0.50	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11
2	-0.55	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-0.60	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-0.90	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-0.95	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-1.00	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11
2	-1.05	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-1.10	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-1.40	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-1.45	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-1.50	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11
2	-1.55	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-1.60	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-1.90	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-1.95	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-2.00	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11
2	-2.05	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-2.10	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-2.40	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-2.45	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-2.50	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11
2	-2.55	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-2.60	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-2.90	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-2.95	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-3.00	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11
2	-3.05	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-3.10	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-3.40	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-3.45	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-3.50	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11
2	-3.55	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-3.60	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-3.90	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-3.95	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-4.00	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11
2	-4.05	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-4.10	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-4.40	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-4.45	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-4.50	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11
2	-4.55	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-4.60	0.042	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-4.90	0.042	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.30E+11
2	-4.95	0.042	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.30E+11
2	-5.00	0.042	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.30E+11



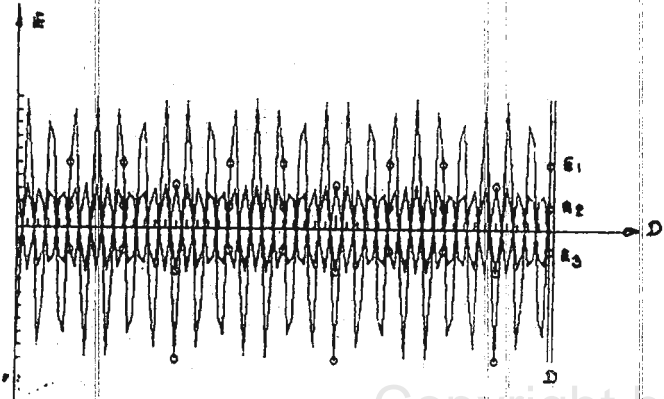
N2	Z	D	BETA	E1	E2	E3	F
2	0.00	0.031	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.40E+11
2	-0.05	0.031	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.40E+11
2	-0.30	0.031	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-0.35	0.031	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-0.40	0.031	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-0.45	0.031	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-0.70	0.031	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.40E+11
2	-0.75	0.031	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.40E+11
2	-0.80	0.031	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.40E+11
2	-1.05	0.031	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-1.10	0.031	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-1.15	0.031	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-1.20	0.031	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-1.45	0.031	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.40E+11
2	-1.50	0.031	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.40E+11
2	-1.55	0.031	0.020	0.6692	-0.2231	0.2230	0.40E+11
2	-1.80	0.031	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-1.85	0.031	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-1.90	0.031	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-1.95	0.031	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-2.20	0.031	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.40E+11
2	-2.25	0.031	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.40E+11
2	-2.30	0.031	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.40E+11
2	-2.55	0.031	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-2.60	0.031	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-2.65	0.031	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-2.70	0.031	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-2.95	0.031	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.40E+11
2	-3.00	0.031	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.40E+11
2	-3.05	0.031	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.40E+11
2	-3.30	0.031	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-3.35	0.031	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-3.40	0.031	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-3.45	0.031	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-3.70	0.031	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.40E+11
2	-3.75	0.031	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.40E+11
2	-3.80	0.031	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.40E+11
2	-4.05	0.031	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-4.10	0.031	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-4.15	0.031	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-4.20	0.031	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-4.45	0.031	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.40E+11
2	-4.50	0.031	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.40E+11
2	-4.55	0.031	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.40E+11
2	-4.80	0.031	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.40E+11
2	-4.85	0.031	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-4.90	0.031	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.40E+11
2	-4.95	0.031	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.40E+11



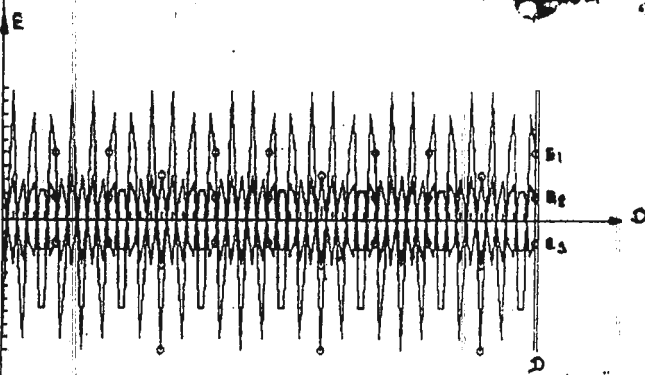
N2	Z	D	BETA	E1	E2	E3	F
2	0.00	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-0.05	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-0.25	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-0.30	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-0.35	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-0.55	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-0.60	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-0.65	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-0.85	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-0.90	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-0.95	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-1.15	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-1.20	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-1.25	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-1.45	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-1.50	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-1.55	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-1.75	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-1.80	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-1.85	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-2.05	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-2.10	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-2.15	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-2.35	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-2.40	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-2.45	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-2.65	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-2.70	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-2.75	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-2.95	0.025	0.020	0.4999	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-3.00	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-3.05	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-3.25	0.025	0.020	0.4999	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-3.30	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-3.35	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-3.55	0.025	0.020	0.4999	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-3.60	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-3.65	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-3.85	0.025	0.020	0.4999	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-3.90	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-3.95	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-4.15	0.025	0.020	0.4999	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-4.20	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-4.25	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-4.45	0.025	0.020	0.4999	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-4.50	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-4.55	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-4.75	0.025	0.020	0.4999	-0.1667	0.1667	0.50E+11
2	-4.80	0.025	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.50E+11
2	-4.85	0.025	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.50E+11



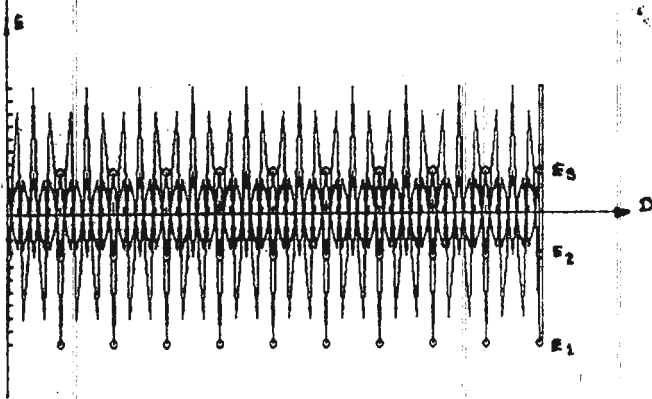
NZ	Z	D	BETA	E1	E2	E3	F
2	0.00	0.018	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.70E+11
2	-0.05	0.018	0.020	0.1045	-0.0348	0.0348	0.70E+11
2	-0.20	0.018	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.70E+11
2	-0.25	0.018	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.70E+11
2	-0.40	0.018	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.70E+11
2	-0.45	0.018	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.70E+11
2	-0.60	0.018	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.70E+11
2	-0.65	0.018	0.020	0.9782	-0.3261	0.3260	0.70E+11
2	-0.85	0.018	0.020	0.9781	-0.3260	0.3260	0.70E+11
2	-0.90	0.018	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.70E+11
2	-1.05	0.018	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.70E+11
2	-1.10	0.018	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.70E+11
2	-1.25	0.018	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.70E+11
2	-1.30	0.018	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.70E+11
2	-1.45	0.018	0.020	0.1045	-0.0348	0.0348	0.70E+11
2	-1.50	0.018	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.70E+11
2	-1.55	0.018	0.020	0.1046	-0.0349	0.0349	0.70E+11
2	-1.70	0.018	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.70E+11
2	-1.75	0.018	0.020	0.5000	-0.1667	0.1667	0.70E+11
2	-1.90	0.018	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.70E+11
2	-1.95	0.018	0.020	0.8091	-0.2697	0.2697	0.70E+11
2	-2.10	0.018	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.70E+11
2	-2.15	0.018	0.020	0.9782	-0.3261	0.3261	0.70E+11
2	-2.35	0.018	0.020	0.9781	-0.3260	0.3260	0.70E+11
2	-2.40	0.018	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.70E+11
2	-2.55	0.018	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.70E+11
2	-2.60	0.018	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.70E+11
2	-2.75	0.018	0.020	0.4999	-0.1666	0.1666	0.70E+11
2	-2.80	0.018	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.70E+11
2	-2.95	0.018	0.020	0.1044	-0.0348	0.0348	0.70E+11
2	-3.00	0.018	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.70E+11
2	-3.05	0.018	0.020	0.1045	-0.0349	0.0349	0.70E+11
2	-3.20	0.018	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.70E+11
2	-3.25	0.018	0.020	0.5001	-0.1667	0.1667	0.70E+11
2	-3.40	0.018	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.70E+11
2	-3.45	0.018	0.020	0.8091	-0.2697	0.2697	0.70E+11
2	-3.60	0.018	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.70E+11
2	-3.65	0.018	0.020	0.9782	-0.3261	0.3261	0.70E+11
2	-3.85	0.018	0.020	0.9781	-0.3260	0.3260	0.70E+11
2	-3.90	0.018	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.70E+11
2	-4.05	0.018	0.020	0.8089	-0.2696	0.2696	0.70E+11
2	-4.10	0.018	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.70E+11
2	-4.25	0.018	0.020	0.4999	-0.1666	0.1666	0.70E+11
2	-4.30	0.018	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.70E+11
2	-4.45	0.018	0.020	0.1044	-0.0348	0.0348	0.70E+11
2	-4.50	0.018	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.70E+11
2	-4.55	0.018	0.020	0.1047	-0.0349	0.0349	0.70E+11
2	-4.70	0.018	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.70E+11
2	-4.75	0.018	0.020	0.5001	-0.1667	0.1667	0.70E+11
2	-4.90	0.018	0.020	0.6690	-0.2230	0.2230	0.70E+11
2	-4.95	0.018	0.020	0.8091	-0.2697	0.2697	0.70E+11



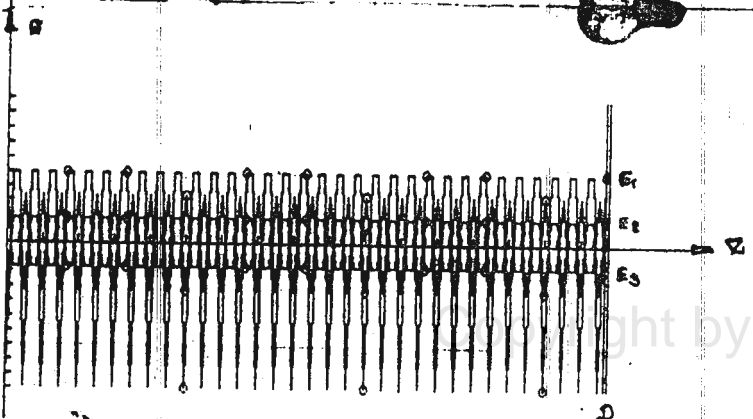
N2	Z	D	BETA	E1	E2	E3	F
2	0.00	0.016	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.80E+11
2	-0.15	0.016	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-0.20	0.016	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-0.35	0.016	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.80E+11
2	-0.40	0.016	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.80E+11
2	-0.55	0.016	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-0.60	0.016	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-0.75	0.016	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.80E+11
2	-0.90	0.016	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-0.95	0.016	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-1.10	0.016	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.80E+11
2	-1.15	0.016	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.80E+11
2	-1.30	0.016	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-1.35	0.016	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-1.50	0.016	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.80E+11
2	-1.65	0.016	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-1.70	0.016	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-1.85	0.016	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.80E+11
2	-1.90	0.016	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.80E+11
2	-2.05	0.016	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-2.10	0.016	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-2.25	0.016	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.80E+11
2	-2.40	0.016	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-2.45	0.016	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-2.60	0.016	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.80E+11
2	-2.65	0.016	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.80E+11
2	-2.80	0.016	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-2.85	0.016	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-3.00	0.016	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.80E+11
2	-3.15	0.016	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-3.20	0.016	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-3.35	0.016	0.020	0.6691	-0.2230	0.2230	0.80E+11
2	-3.40	0.016	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.80E+11
2	-3.55	0.016	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-3.60	0.016	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-3.75	0.016	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.80E+11
2	-3.90	0.016	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-3.95	0.016	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-4.10	0.016	0.020	0.6690	-0.2230	0.2230	0.80E+11
2	-4.15	0.016	0.020	0.6692	-0.2231	0.2231	0.80E+11
2	-4.30	0.016	0.020	0.9135	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-4.35	0.016	0.020	0.3092	-0.1031	0.1031	0.80E+11
2	-4.50	0.016	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.80E+11
2	-4.65	0.016	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.80E+11
2	-4.70	0.016	0.020	0.9136	-0.3045	0.3045	0.80E+11
2	-4.85	0.016	0.020	0.6690	-0.2230	0.2230	0.80E+11
2	-4.90	0.016	0.020	0.6693	-0.2231	0.2231	0.80E+11



N2	Z	D	BETA	E1	E2	E3	F
2	0.00	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11
2	-0.15	0.014	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-0.20	0.014	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-0.30	0.014	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-0.35	0.014	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-0.50	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11
2	-0.65	0.014	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-0.70	0.014	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-0.80	0.014	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-0.85	0.014	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-1.00	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11
2	-1.15	0.014	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-1.20	0.014	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-1.30	0.014	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-1.35	0.014	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-1.50	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11
2	-1.65	0.014	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-1.70	0.014	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-1.80	0.014	0.020	0.3090	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-1.85	0.014	0.020	0.8091	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-2.00	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11
2	-2.15	0.014	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-2.20	0.014	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-2.30	0.014	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-2.35	0.014	0.020	0.8091	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-2.50	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11
2	-2.65	0.014	0.020	0.8090	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-2.70	0.014	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-2.80	0.014	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-2.85	0.014	0.020	0.8091	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-3.00	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11
2	-3.15	0.014	0.020	0.8089	-0.2696	0.2696	0.90E+11
2	-3.20	0.014	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-3.30	0.014	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-3.35	0.014	0.020	0.8091	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-3.50	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11
2	-3.65	0.014	0.020	0.8089	-0.2696	0.2696	0.90E+11
2	-3.70	0.014	0.020	0.3091	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-3.80	0.014	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-3.85	0.014	0.020	0.8091	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-4.00	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11
2	-4.15	0.014	0.020	0.8089	-0.2696	0.2696	0.90E+11
2	-4.20	0.014	0.020	0.3092	-0.1031	0.1031	0.90E+11
2	-4.30	0.014	0.020	0.3089	-0.1030	0.1030	0.90E+11
2	-4.35	0.014	0.020	0.8091	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-4.50	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11
2	-4.65	0.014	0.020	0.8089	-0.2696	0.2696	0.90E+11
2	-4.70	0.014	0.020	0.3092	-0.1031	0.1031	0.90E+11
2	-4.80	0.014	0.020	0.3088	-0.1029	0.1029	0.90E+11
2	-4.85	0.014	0.020	0.8091	-0.2697	0.2697	0.90E+11
2	-5.00	0.014	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.90E+11



N2	Z	D	BETA	E1	E2	E3	F
2	0.00	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-0.15	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-0.30	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-0.45	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-0.60	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-0.75	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-0.90	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-1.05	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-1.20	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-1.35	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-1.50	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-1.65	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-1.80	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-1.95	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-2.10	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-2.25	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-2.40	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-2.55	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-2.70	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-2.85	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-3.00	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-3.15	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-3.30	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-3.45	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-3.60	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-3.75	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-3.90	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-4.05	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-4.20	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-4.35	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-4.50	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-4.65	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-4.80	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12
2	-4.95	0.013	0.020	1.0000	-0.3333	0.3333	0.10E+12





1. Arthur F. Kip., "Fundamentals of Electricity and Magnetism," McGraw-Hill Book Company, Inc. 1962.
2. Demetrius T. Paris., and F. Kenneth Hurd, "Basic Electromagnetic Theory," McGraw-Hill Book Company, Inc., 1969.
3. Francis A. Jenkins., and Harvey E. white, "Fundamentals of Optics" McGraw-Hill Book Company, Inc., 1953.
4. Godfrey T. Coate., and J. Francis Reintjes, "Principles of Radar," McGraw-Hill Book Company, Inc., 1952,
5. John D. Kraus., and Keith R. Corver, "Electromagnetics," McGraw-Hill Book Company, Inc., 1953.
6. Ray E. Bolz., and George L. Tuve., "CRC Handbook of tables for Applied Engineering Science," CRC Prass, Inc., 1976.
7. Robert E. Collin., "Foundations for Microwave Engineering, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1966.
8. Robert Plonsey and Robert E. Collin., "Principles and Applications of Electromagnetic Fields," McGraw-Hill Book Company., Inc., 1961.
9. Simon Ramo., and John R. Wtlinnery, "Field and Waves in Communication Electronics," John Wiley and Sons, 1965.
10. หนังสือประกอบการศึกษา "Microwaves I Basic Experiments III".