



การออกแบบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ
DESIGN OF MICROWAVE ABSORBER



โดย
นางสาวมาลีวัลย์ แก้วแจ่มจันทร์
นางสาวรัชณี บักกุนันท์

วัน เดือน ปี..... 14 ส.ค. ๒๕๕๐.....
เลขทะเบียน..... ๐3๗๒๐๗.....
เลขเรียกหนังสือ..... ๐๒๒๖๐๐ ๗ ๕๑๒๖๓.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา ๒๕๓๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ 037207 ไปใช้

การออกแบบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ
DESIGN OF MICROWAVE ABSORBER



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

DESIGN OF MICROWAVE ABSORBER

โดย นางสาวมาลีวัลย์ แก้วแจ่มจันทร์
นางสาวรัชณี ปักกุนันท์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้แสดงการออกแบบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ สำหรับคลื่นตกกระทบในแนวตั้งฉาก ที่ความถี่ 12.65 กิกะเฮิรท์ ช่วยดูดซับคลื่นซึ่งสะท้อนมาจากวัตถุที่อยู่ภายนอกระบบ หรือในทางกลับกันจะช่วยดูดซับคลื่นไม่ให้สะท้อนออกนอกระบบ

โครงสร้างจะประกอบด้วยแผ่นความต้านทาน วางห่างจากแผ่นตัวนำ ด้วยระยะเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น จากผลการทดลองวัสดุดูดซับคลื่นที่ออกแบบไว้ สามารถดูดซับคลื่นได้ผลน่าพอใจ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับคลื่นที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป ในการประยุกต์ใช้งานกับระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ วัสดุดูดซับคลื่นสามารถดูดซับคลื่นได้ดีแต่ผลที่ได้ยังมีข้อผิดพลาด ซึ่งจะได้ทำการแก้ไขปรับปรุงให้ใช้งานได้ต่อไป

ABSTRACT

This project shows the design of microwave absorber for normal incident wave at 12.65 GHz frequency. It uses to absorb the reflected wave from outside system. In the opposite, it uses to absorb the reflected wave to not reflect to outside system.

The structure consists of resistive sheet and the conductive plate which a distance between the resistive sheet and the conductive plate is one-fourth wavelength. The results of designed absorber is satisfied when compared with commercial absorber. In application, planar near-field measurement system, the designed absorber can absorb the wave but the results are different and are under improved.

ปริญญาโทปีการศึกษา 2538

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

DESIGN OF MICROWAVE ABSORBER

ผู้จัดทำ

1.นางสาวมาลีวัลย์ แก้วแจ่มจันทร์ 35104330

2.นางสาวรัชณี ปักกุนันท์ 35104343


(รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ 1	บทนำ.....	1
บทที่ 2	คลื่นกับขอบเขตตัวนำไม่สมบูรณ์.....	3
2.1	คลื่นระนาบตกกระทบบนที่รอยต่อ.....	3
2.2	คลื่นตกกระทบบนตั้งฉากบนพื้นผิวตัวนำ.....	7
2.3	คลื่นส่งผ่านแผ่นตัวนำบาง.....	10
2.4	การกรองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ELECTROMAGNETIC SCREENING).....	12
2.5	คลื่นตกกระทบบนทำมุมใดๆกับพื้นผิวตัวนำ.....	14
บทที่ 3	สารที่นำมาสร้างวัสดุดูดซับคลื่น.....	19
3.1	การดูดซับคลื่นของสาร.....	19
3.2	ทำไมเลือกใช้คาร์บอน.....	19
3.3	คลื่นตกกระทบบนตั้งฉากกับตัวกลางไดอิเล็กตริก.....	21
บทที่ 4	ทฤษฎีสำหรับวัสดุดูดซับคลื่นและการดูดซับคลื่นด้วยแผ่นความต้านทาน.....	25
4.1	ทฤษฎีสำหรับวัสดุดูดซับคลื่น.....	25
4.2	แผ่นตัวนำหุ้มด้วยชั้นของวัสดุดูดซับคลื่น.....	25
4.3	การดูดซับคลื่นด้วยแผ่นความต้านทาน.....	27
บทที่ 5	การลดทอนในสายสื่อสารสัญญาณที่มีการสูญเสีย.....	32
5.1	การสะท้อนของคลื่นในสายสื่อสารสัญญาณ.....	32
5.2	สมการสายสื่อสารสัญญาณ.....	34
บทที่ 6	การคำนวณและการสร้างวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ.....	35
6.1	การคำนวณ.....	35
6.2	การออกแบบการสร้างวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ.....	39
บทที่ 7	การทดลองและผลการทดลอง.....	45
7.1	การทดลอง.....	45
7.1.1	วัตถุประสงค์.....	45
7.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสนามระยะใกล้.....	45
7.1.3	ขั้นตอนการทดลอง.....	45
7.2	ผลการทดลอง.....	47
7.2.1	สายอากาศแบบร่องขนาด 16.2 เซนติเมตร.....	47
7.2.2	สายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร.....	51
บทที่ 8	สรุปผลการทดลองและวิจารณ์.....	55
8.1	สรุปผลการทดลองและวิจารณ์.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 แนวทางการพัฒนา.....	55
บทแทรกที่ 1.....	57
กติกกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 (a) คลื่นระนาบเดินทางตกกระทบในทิศตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด (b) สายส่งทัดเทียมของ (a).....	3
รูปที่ 2.2 คลื่นตกกระทบ, คลื่นสะท้อนกลับ, คลื่นส่งผ่านสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวกลางซึ่งมีค่าความนำจำกัด.....	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแผ่นความต้านทาน.....	9
รูปที่ 2.4 คลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่านเข้าไปในแผ่นตัวนำที่มีความหนาจำกัด.....	11
รูปที่ 2.5 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของคลื่นเมื่อทำมุมใดๆกับรอยต่อ.....	14
รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางของสนามเมื่อคลื่นตกกระทบทำมุมใดๆ กับรอยต่อเมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับรอยต่อ.....	15
รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางสนามเมื่อคลื่นตกกระทบทำใดๆกับรอยต่อ และมีสนามไฟฟ้าขนานกับรอยต่อ.....	16
รูปที่ 3.1 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ แสดงแผ่นหกเหลี่ยมของคาร์บอน ตำแหน่งอะตอมแทนโดยทรงกลมและทิศทางของบอนด์แทนโดยก้านระหว่างทรงกลม.....	20
รูปที่ 3.2 คลื่นสะท้อนและส่งผ่านเมื่อตกกระทบตั้งฉากกับรอยต่อ.....	22
รูปที่ 4.1 สเปนเซอร์มีความต้านทาน 376.7 โอห์มต่อตารางหน่วย.....	28
รูปที่ 4.2 ตารางของสเปนเซอร์หรือโคลทที่มีความหนา h.....	29
รูปที่ 4.3 (a) คลื่นระนาบเดินทางไปทางขวาตกกระทบตั้งฉากบนสเปนเซอร์ (b) สายส่งทัดเทียมของข้อ (a) มีทั้งคลื่นสะท้อนและส่งผ่านเนื่องจากไม่แมทช์กัน.....	29
รูปที่ 4.4 (a) คลื่นระนาบเดินทางไปทางขวาตกกระทบตั้งฉากบนสเปนเซอร์ซึ่งมีแผ่นตัวนำ วางอยู่ข้างหลังคลื่นจะถูกดูดซับโดยไม่มีคลื่นสะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่าน (b) คลื่นเดินทางไปทางขวา จะดูดซับคลื่นโดยไม่มีคลื่นสะท้อนกลับ แสดงโดยใช้สายส่งทัดเทียมสายยาวเศษหนึ่งส่วนสี่เท่าของความยาวคลื่น และลวดวงจรจะแสดงตัวเหมือนกับเปิดวงจรทางด้านซ้าย.....	31
รูปที่ 5.1 คลื่นสองชนิดเดินทางในทิศตรงกันข้ามทำให้เกิดรูปแบบคลื่นนิ่ง ที่มีคาบเวลาเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น.....	32
รูปที่ 5.2 แบบรูปคลื่นนิ่งในตัวกลางที่มีการสูญเสีย.....	33
รูปที่ 5.3 โหลดที่ปลายของสายสื่อสารจะก่อให้เกิดการสะท้อน ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดไม่เท่ากับอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสาย.....	34
รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่าน กับความหนาของกระดาษคาร์บอน.....	37
รูปที่ 6.2 แสดงโครงสร้างของวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟขนาด (21*33 เซนติเมตร).....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.3 แสดงอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านที่ความถี่ต่างๆเมื่อปล่อยคลื่น ไปในช่องว่างอิสระ.....	40
รูปที่ 6.4 แสดงอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านที่ความถี่ต่างๆเมื่อปล่อยคลื่น ไปตกกระทบแผ่นโลหะ.....	40
รูปที่ 6.5 แสดงอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านที่ความถี่ต่างๆเมื่อปล่อยคลื่น ไปตกกระทบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ (ขนาด 21*33 เซนติเมตร).....	41
รูปที่ 6.6 วัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟขนาดใช้งานจริง (75*116 เซนติเมตร).....	42
รูปที่ 6.7 แสดงรอยต่อของวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ.....	42
รูปที่ 6.8 แสดงอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านเมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบโลหะ.....	43
รูปที่ 6.9 แสดงอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านเมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบ วัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ออกแบบ (ขนาด 75*116 เซนติเมตร).....	43
รูปที่ 6.10 แสดงอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านเมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบ วัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด.....	44
รูปที่ 7.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ.....	45
รูปที่ 7.2 แสดงการติดตั้งวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟในระบบการวัดสนามระยะใกล้.....	46
รูปที่ 7.3 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องกรณีไม่มีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ.....	47
รูปที่ 7.4 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ห่างจากสายอากาศรับแก้้ท่าของความยาวคลื่น.....	48
รูปที่ 7.5 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ห่างจากสายอากาศรับสิบเท่าของความยาวคลื่น.....	48
รูปที่ 7.6 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ห่างจากสายอากาศรับสิบเอ็ดเท่าของความยาวคลื่น.....	49
รูปที่ 7.7 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ห่างจากสายอากาศรับสิบสองเท่าของความยาวคลื่น.....	49
รูปที่ 7.8 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ห่างจากสายอากาศรับสิบสามเท่าของความยาวคลื่น.....	50
รูปที่ 7.9 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร ในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อไม่มีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ.....	51
รูปที่ 7.10 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร ในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อมีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ.....	52
รูปที่ 7.11 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร ในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อวัดสนามระยะใกล้.....	52
รูปที่ 7.12 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อไม่มีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ.....	53
รูปที่ 7.13 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร ในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อมีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ.....	53
รูปที่ 7.14 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร ในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อวัดสนามระยะไกล.....	54
รูปที่ 1 แสดง s-พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ 2 ช่องทาง และแสดงภาพการไหลโดยเสมือนของ สัญญาณโดย "a" หมายถึงสัญญาณทางเข้าและ "b" หมายถึงสัญญาณทางด้านออก.....	57
รูปที่ 2 รายการสำหรับการปรับตำแหน่งมาตรฐานสำหรับการสะท้อนกลับ และส่งผ่านทั้งสองช่องทาง.....	58



สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ค่าความนำ ดัชนี ของโลหะพื้นฐาน.....	20
ตารางที่ 6.1 แสดงอัตราการสูญเสียที่ความถี่ 12.65 กิกะเฮิร์ต เมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบ วัตถุคู่คี่กับคลื่นไมโครเวฟที่ออกแบบ.....	41
ตารางที่ 1 แสดง s-พารามิเตอร์ชนิดต่างๆ.....	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในการวัดแบบรูปของสายอากาศแบบสนามระยะใกล้ซึ่งจะทำการวัดภายในห้อง ดังนั้นอาจจะมีคลื่นส่วนหนึ่งสะท้อนกับผนังห้องและอาจสะท้อนกลับมาเข้าสายอากาศรับหรืออาจสะท้อนจากเครื่องกวาดโพรมกก็ได้เพื่อที่จะให้ผลการวัดแบบรูปของสายอากาศได้ผลที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เราจึงใช้วัสดุดูดซับคลื่นมาติดตั้งไว้ที่ผนังห้องและที่เครื่องกวาดโพรม มีประโยชน์คือในการวัดแบบรูปของสายอากาศแบบสนามระยะใกล้ วัสดุดูดซับคลื่นจะช่วยลดพลังงานของคลื่นที่สะท้อนจากเครื่องกวาดโพรมหรือสิ่งแวดล้อมที่อาจจะมีผลทำให้คลื่นสะท้อนเข้าสู่สายอากาศรับนั้นถูกลดทอนพลังงานลงจนไม่มีคลื่นสะท้อนกลับเลย

วัสดุดูดซับคลื่นส่วนใหญ่จะใช้สารที่มีค่าดัชนีการหักเหเป็นจำนวนเชิงซ้อนและมีจำนวนจินตภาพค่ามาก ๆ วัสดุดูดซับคลื่นที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปในท้องตลาด มีข้อดีคือ

- ส่วนใหญ่สามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ในย่านความถี่กว้าง หรือบรอดแบนด์ (Broadband)
- มีลักษณะบาง
- น้ำหนักเบา
- ทนทาน
- ติดตั้งสะดวก

แต่มีข้อเสียคือ

- ราคาแพง บางครั้งในการนำมาใช้งานอาจไม่คุ้มค่า

ดังนั้นจึงได้ออกแบบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟแบบซาลิสบูรี สกรีน (Salisbury Screen Absorber) มีข้อดีคือ

- สามารถออกแบบการสร้างเพื่อใช้งานได้สะดวกมากกว่าวัสดุดูดซับคลื่นแบบอื่น ๆ
- ราคาค่อนข้างถูก

แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานคือ

- เป็นตัวดูดซับคลื่นแบบรีโซแนนซ์ (Resonance) เนื่องจากคลื่นจะลดน้อยลง หรือถูกดูดซับเฉพาะที่ความถี่หนึ่งเท่านั้น
- ดูดซับคลื่นซึ่งตกกระทบตั้งฉากได้ดีที่สุด

โครงสร้างโดยทั่วไปของซาลิสบูรี สกรีนประกอบด้วย แผ่นความต้านทานวางห่างจากแผ่นตัวนำด้วยระยะห่างเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น

ในการศึกษานี้ได้ออกแบบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 12.65 กิกะเฮิรท์ นำมาประกอบกับระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ เพื่อทำการวัดแบบรูป (Pattern) ของสายอากาศสล롯 อาร์เรย์ (Slot Array) ซึ่งออกแบบไว้รับสัญญาณจากดาวเทียมไทยคม ในย่านความถี่เคยู (Ku-Band) ที่ความถี่ 12.65 กิโลเฮิรท์ เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอน ไม่นอญู เติเหนาไปเซประยเชขนดานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กะเอิร์ท เช่นเดียวกัน เนื่องจากอุปกรณ์ของระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบจะติดตั้งอยู่ในห้อง ดังนั้นในระหว่างทำการวัดอาจเกิดการสะท้อนของคลื่นที่เครื่องกวาดโทรมและสิ่งแวดล้อมใกล้เคียง ซึ่งคลื่นสะท้อนเหล่านี้ อาจเป็นผลทำให้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น การแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยใช้วัสดุดูดซับคลื่นมาช่วยลดคลื่นสะท้อน

สำหรับส่วนประกอบต่างๆ ของปริภูมิวิทยุนี้ จะประกอบไปด้วยบทยที่สองจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคลื่นระนาบซึ่งตกกระทบตั้งฉากหรือทำมุมกับรอยต่อระหว่างอากาศกับตัวนำไม่สมบูรณ์และคำนวณหาคลื่นที่ส่งผ่านไปและคลื่นที่สะท้อนกลับ บทที่สามกล่าวถึงสารที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเก็บในการสร้างวัสดุดูดซับคลื่น บทที่สี่กล่าวถึงทฤษฎีสำหรับวัสดุดูดซับคลื่นและการสร้างวัสดุดูดซับคลื่นจากแผ่นความต้านทาน บทที่ห้ากล่าวถึงการสะท้อนของคลื่นในสายสื่อสารสัญญาณ บทที่หกกล่าวถึงการคำนวณและการสร้างวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ บทที่เจ็ดกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง ส่วนในบทสุดท้ายของปริภูมิวิทยุนี้จะเป็นบทสรุปและวิจารณ์ โดยรายละเอียดของบทต่างๆ มีดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

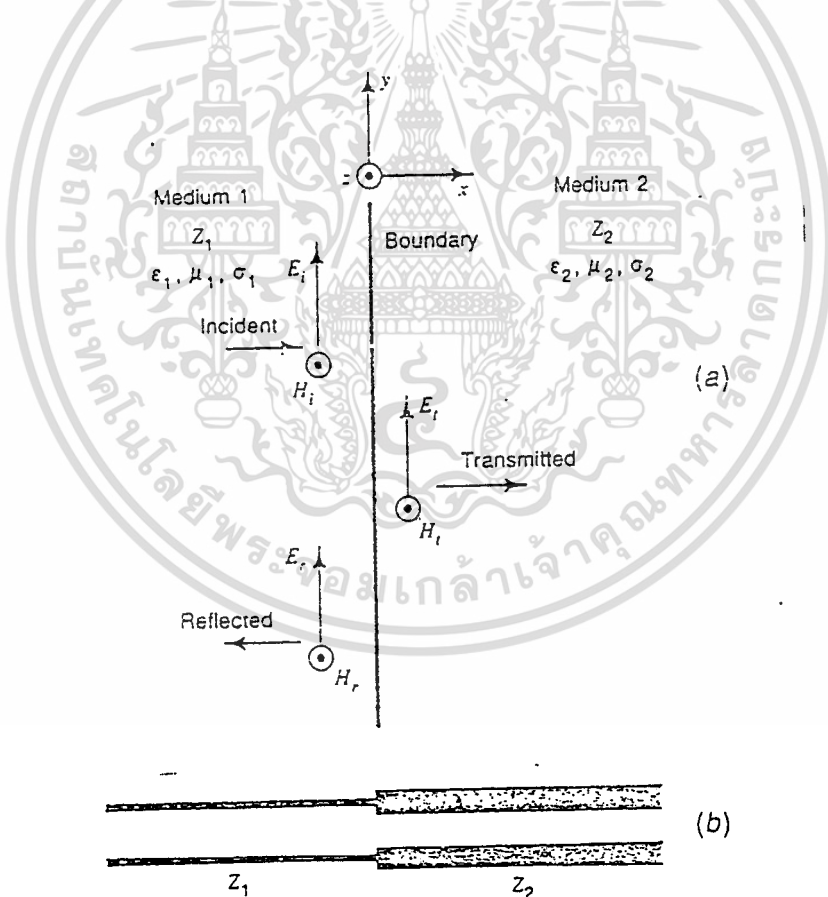
บทที่ 2

คลื่นกับขอบเขตตัวนำไม่สมบูรณ์

2.1 คลื่นระนาบตกกระทบบนที่รอยต่อ

พิจารณาคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นที่เดินทางในทิศ $+x$ โดยมี E ในทิศ y และ H ในทิศ z คลื่นนี้ตกกระทบบนทิศตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ (2.1) สมมติว่าคลื่นที่ตกกระทบบนมีองค์ประกอบของสนามเป็น E_i และ H_i ที่รอยต่อ โดยทั่วไปแล้วส่วนหนึ่งของคลื่นตกกระทบบนจะสะท้อนกลับมา ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สอง คลื่นสะท้อนกลับมีองค์ประกอบของสนามเป็น E_r และ H_r ที่รอยต่อ และคลื่นส่งผ่านมีองค์ประกอบของสนามเป็น E_t และ H_t ที่รอยต่อ

จากความต่อเนื่องขององค์ประกอบของสนามในทิศสัมผัสที่รอยต่อ เราได้ว่า



รูปที่ 2.1 (a) คลื่นระนาบเดินทางตกกระทบบนทิศตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด

(b) สายส่งที่ตัดเทียมของข้อ (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_i + E_r = E_i \quad (2.1)$$

และ

$$H_i + H_r = H_i \quad (2.2)$$

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นระนาบจะสัมพันธ์กันด้วยค่าอิมพีแดนซ์อินทรินสิคของตัวกลางนั้นคือ

$$\frac{E_i}{H_i} = Z_1, \frac{E_r}{H_r} = -Z_1, \frac{E_t}{H_t} = Z_2 \quad (2.3)$$

อิมพีแดนซ์ของคลื่นสะท้อน (เดินทางในทิศ $-x$) จะให้มีค่าเท่ากับ $-Z_1$ และของคลื่นตกกระทบเท่ากับ $+Z_1$ จากสมการที่ (2.2) และ (2.3)

$$H_i = \frac{E_i}{Z_2} = \frac{E_i}{Z_1} - \frac{E_r}{Z_1} \quad (2.4)$$

และ

$$E_i = \frac{Z_2}{Z_1} E_i - \frac{Z_2}{Z_1} E_r \quad (2.5)$$

คูณสมการที่ (2.1) ด้วย Z_2/Z_1 จะได้

$$\frac{Z_2}{Z_1} E_i = \frac{Z_2}{Z_1} E_i + \frac{Z_2}{Z_1} E_r \quad (2.6)$$

บวกสมการที่ (2.5) และ (2.6) เราจะได้

$$E_i \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) = 2 \frac{Z_2}{Z_1} E_i \quad (2.7)$$

หรือ

$$E_i = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} E_i = \tau E_i \quad (2.8)$$

เมื่อ τ เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient) และจะได้ต่อไปอีกว่า

$$\tau = \frac{E_i}{E_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลบสมการที่ (2.5) จากสมการที่ (2.6) จะได้

$$E_i \left(\frac{Z_2}{Z_1} - 1 \right) = 2 \frac{Z_2}{Z_1} E_r \quad (2.10)$$

แทนค่า E_r จากสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.10) และแก้สมการหาค่า E_r เราจะได้

$$E_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} E_i = \rho E_i \quad (2.11)$$

เมื่อ ρ เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient) และจะได้ต่อไปว่า

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.9) และ (2.12)

$$\tau = \rho + 1 \quad (2.13)$$

สภาพของคลื่นระนาบที่ตกกระทบในทิศตั้งฉาก บนรอยต่อระหว่างตัวกลางแตกต่างกันสองชนิด ดังรูปที่ (2.1) ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์อินทรีนสิคเป็น Z_1 และ Z_2 ตามลำดับจะคล้ายคลึงกับสภาพของคลื่นที่เดินทางในสายส่งยาวอนันต์ (infinite transmission line) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก Z_1 เป็น Z_2 (รูปที่ 2.1(b)) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและสัมประสิทธิ์การสะท้อนสำหรับศักดาไฟฟ้าตกคร่อมสายส่งจะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้ในสมการที่ (2.9) และ (2.12) ถ้าอิมพีแดนซ์อินทรีนสิค Z_1 ของตัวกลางที่ 1 ถูกทำให้มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของสายทางด้านซ้ายมือของส่วนต่อ (รูปที่ 2.1(b)) และค่าอิมพีแดนซ์อินทรีนสิค Z_2 ของตัวกลางที่ 2 ถูกทำให้มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของสายทางด้านขวามือของส่วนต่อของสายส่ง เรากลับมาพิจารณากรณีที่คลื่นระนาบตกกระทบในทิศตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด ดังแสดงใน รูปที่ 2.1(a) กันต่อไปโดยพิจารณากรณีเฉพาะต่อไปนี้คือ

กรณีที่ 1 สมมติตัวกลางที่ 1 เป็นอากาศและตัวกลางที่ 2 เป็นตัวนำ ดังนั้น $Z_1 \gg Z_2$ และจากสมการที่ (2.8) เราจะได้ความสัมพันธ์ซึ่งเป็นค่าประมาณคือ

$$E_r = 2 \frac{Z_2}{Z_1} E_i \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าจากสมการที่ (2.3) ความสัมพันธ์ข้างบนจะเป็น

$$H_r Z_2 \cong 2 \frac{Z_2}{Z_1} H_i Z_1 \quad (2.15)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$H_r = 2 H_i \quad (2.16)$$

นั่นคือ สำหรับคลื่นระนาบในอากาศที่ตกกระทบในทิศตั้งฉากบนตัวกลางที่เป็นตัวนำ สนามแม่เหล็กบนตัวนำจะมีค่าโดยประมาณเป็นสองเท่าของค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กที่รอยต่อและจะได้ต่อไปอีกว่า

$$H_r \cong H_i \quad \text{ซึ่งจะได้เป็นคลื่นนิ่งบริสุทธิ์ทางซ้ายมือของรอยต่อ (ในตัวกลางที่หนึ่ง)}$$

กรณีที่ 2 พิจารณาต่อไปในสภาพตรงข้ามกับกรณีที่ 1 บ้าง เมื่อตัวกลางที่ 1 เป็นตัวนำและตัวกลางที่ 2 เป็นอากาศ จะทำให้ $Z_1 \ll Z_2$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.8) เราจะได้โดยประมาณว่า

$$E_r = 2 E_i \quad (2.17)$$

นั่นคือ สำหรับคลื่นที่เดินทางออกจากตัวกลางที่เป็นตัวนำ สนามไฟฟ้าในอากาศจะมีค่าโดยประมาณเป็นสองเท่าของความเข้มสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ และจะได้ต่อไปอีกว่า $E_r \cong E_i$ นั่นคือจะได้เป็นคลื่นนิ่งบริสุทธิ์ ($VSWR = \infty$) ทันทีทางด้านซ้ายมือของรอยต่อ (ในตัวกลางที่ 1) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากจะเกิดการลดทอนขนาดของคลื่นในตัวกลางที่ 1 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า ($VSWR$) จะลดลงอย่างรวดเร็วในระยะทางที่ห่างออกจากรอยต่อ (ไปทางซ้ายมือ)

กรณีที่ 3 ในกรณีที่ 1 เราได้สมมติว่า $Z_1 \gg Z_2$ พิจารณาต่อไปถ้า $Z_2 = 0$ (ตัวกลางที่ 2 เป็นตัวนำสมบูรณ์) ดังนั้นจากสมการที่ (2.12) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $\rho = -1$ และจากสมการที่ (2.9) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน $\tau = 0$ นั่นคือคลื่นจะถูกสะท้อนกลับหมด และไม่มีสนามถูกส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 เลย พิจารณาต่อไปจะได้ $E_r = E_i$ และ $H_r = H_i$ นั่นคือ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นสองเท่าพอดีที่รอยต่อ สภาพเช่นนี้จะคล้ายกับสายส่งถูกลัดวงจร (short-circuited transmission line)

กรณีที่ 4 ในกรณีที่ 2 เราได้สมมติว่า $Z_1 \ll Z_2$ พิจารณาต่อไปในกรณีที่ Z_2 มีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นจากสมการที่ (2.12) $\rho = 1$ และจากสมการที่ (2.9) $\tau = 0$ นั่นคือคลื่นจะถูกสะท้อนกลับหมด แต่ $E_r = E_i$ ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่รอยต่อจะเป็นสองเท่าพอดี สภาพเช่นนี้จะคล้ายกับสายส่งที่ถูกเปิดวงจร (open-circuited transmission line)

กรณีที่ 5 สมมติว่าทั้งตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 เป็นสารไดอิเล็กทริกที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กและไม่มีกระแสสูญเสีย ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$) ดังนั้นจะได้จากสมการที่ (2.12) ว่า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{\sqrt{\epsilon_1/\epsilon_2} - 1}{\sqrt{\epsilon_1/\epsilon_2} + 1} \quad (2.18)$$

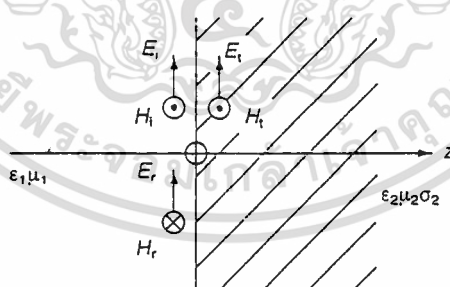
และจะได้จากสมการที่ (2.9) ว่า

$$\tau = \frac{2}{1 + \sqrt{\epsilon_2/\epsilon_1}} \quad (2.19)$$

กรณีที่ 6 พิจารณากรณีที่ $Z_2 = Z_1$ ดังนั้น $\rho = 0$ และ $\tau = 1$ นั่นคือคลื่นจะเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่ 2 โดยไม่มีการสะท้อนเลย สภาพเช่นนี้จะคล้ายกับกรณีของสายส่งที่ต่อเนื่องที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งสม่ำเสมอ

2.2 คลื่นตกกระทบตั้งฉากบนพื้นผิวตัวนำ

พิจารณากรณีของคลื่นระนาบในตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย (เช่น อากาศ) ตกกระทบตั้งฉากบนแผ่นตัวนำค่าจำกัด (semi-infinite conducting) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เราจะสมมติว่าแผ่นนั้นเป็นตัวนำ ให้แอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบ, คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านที่พื้นผิวของแผ่นเป็น E_i, E_r, E_t แสดงดังสมการ (2.9) และ (2.12)



รูปที่ 2.2 คลื่นตกกระทบ, คลื่นสะท้อนกลับ, คลื่นส่งผ่านสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวกลางซึ่งมีค่าความนำจำกัด

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{E_i}{E_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

เมื่ออิมพีแดนซ์ของคลื่นของสารทั้งสองเป็น

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \quad , \quad Z_2 = \frac{(1+j)}{\omega} \quad (2.20)$$

เพราะ Z_2 เป็นจำนวนเชิงซ้อน พร้อมกับมุมเฟส 45 องศา คลื่นส่งผ่านนั้นต่างเฟสกันกับคลื่นตกกระทบ

กำลังงานที่ถูกดูดซับโดยพื้นผิวสามารถคำนวณได้โดยวิธีทฤษฎีของพอยดิง คลื่นส่งผ่านเดินทางเข้าไปในแผ่นและถูกดูดซับอย่างสมบูรณ์โดยแผ่นนั้น กำลังงานที่ถูกดูดซับต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับกำลังงานไหลผ่านเข้าไปในหน่วยพื้นผิวพื้นที่ของแผ่นซึ่งคือขนาดของพอยดิง เวกเตอร์ ดังนั้นจาก

$$S_i = \frac{1}{4} \omega \epsilon_i E_i^2 \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} S_i &= \frac{1}{4} \omega \left| \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \right|^2 E_i^2 \\ &= \frac{1}{2} \omega Z_1 \left| \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \right|^2 P_i \end{aligned} \quad (2.22)$$

จากสมการ (2.22) เป็นที่แน่ชัดว่า หน่วยของ ω ต้องเป็น Ω^{-1} (siemens) จึงเป็นการสะดวกที่จะกำหนด ความต้านทานพื้นผิวโดย

$$R_s = \frac{1}{\omega} \quad (2.23)$$

อิมพีแดนซ์ของคลื่นของสารเขียนได้โดย

$$Z_2 = R_s(1+j) \quad (2.24)$$

จาก (2.22) ค่าการสูญเสียของการส่งผ่านที่รอยต่อเป็น

$$L = -10 \text{Log} \left(\frac{Z_1}{2R_s} \left| \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \right|^2 \right) \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติ $|Z_1| \gg |Z_2|$ ดังนั้นจึงประมาณได้ดังนี้

$$L = -10 \text{Log} \left| \frac{2|R_s(1+j)|^2}{R_s Z_1} \right|$$

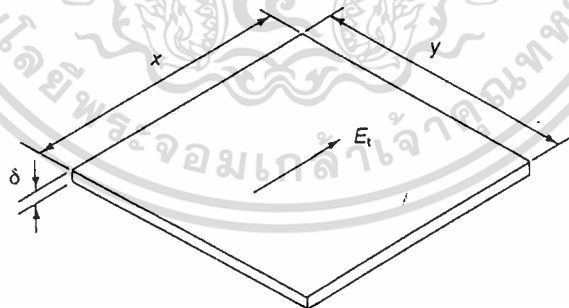
$$= -10 \text{Log} \left(\frac{4R_s}{Z_1} \right) \quad (2.26)$$

หลักการของความต้านทานพื้นผิว (surface resistance) สามารถอธิบายได้จากโครงสร้างทางฟิสิกส์ อันดับแรก จากสมการ

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

คลื่นที่เดินทางเข้าไปในตัวนำที่ติจะลดทอนแบบเอ็กโปเนนเชียลด้วยค่าคงที่การลดทอนเท่ากับค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำ สำหรับตัวนำที่ติค่า δ จะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรหรือน้อยกว่านั้น พิจารณากำลังงานที่สูญเสีย (dissipated) ในเนื้อสารจะสูญเสียในชั้นพื้นผิวที่ความหนา δ ดังในรูปที่ 2.3 ค่าความต้านทานของแผ่นวัดในทิศทาง x เป็น

$$R = \frac{x}{\omega y} = \frac{x}{y} R_s \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแผ่นความต้านทาน

สำหรับกรณีพิเศษแผ่นสี่เหลี่ยม $R = R_s$ โดยไม่คำนึงถึงขนาดของสี่เหลี่ยม ด้วยเหตุผลนี้ ความต้านทานพื้นผิวจะมีหน่วยเป็นโอห์มต่อตาราง

ถ้ากระแสทั้งหมดในตัวนำ ถูกพิจารณาว่าไหลในค่าความลึกที่คลื่นสามารถเดินทางเข้าไปในตัวนำ ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตบนสนามแม่เหล็กเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H = 2H_i = A \quad (2.28)$$

เมื่อ A คือกระแสที่ไหลในหน่วยความกว้างของพื้นผิว การสะท้อนกลับเกือบทั้งหมดของคลื่นตกกระทบที่พื้นผิว จะมีค่าตรงข้ามกันในเวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมายความว่าส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กขนานกับพื้นผิว เป็นผลบวกของเวกเตอร์สนามแม่เหล็กที่ตกกระทบและสะท้อนกลับที่รอยต่อผิวสัมผัส กำลังงานที่สูญเสียต่อหน่วยพื้นที่จะเป็นดังนี้

$$P = \frac{1}{2} A^2 R_s = \frac{1}{2} H^2 R_s = 2H_i^2 R_s \quad (2.29)$$

จาก 2.9 เมื่อ $Z_2 \ll Z_1$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} E_i &= 2E_i R_s (1+j)/Z_1 \\ E_i^2 &= 8R_s^2 E_i^2 / Z_1 \\ &= 8R_s H_i^2 \end{aligned} \quad (2.30)$$

แทนลงในสมการ (2.21) จะได้ผลเหมือนในสมการ (2.29)

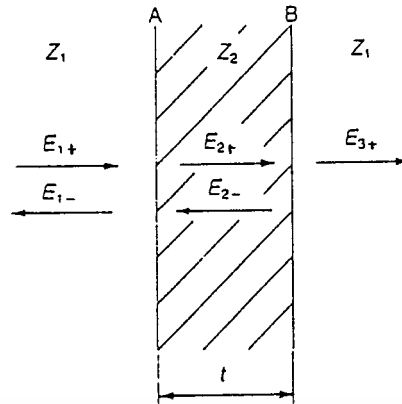
วิธีนี้ใช้หาค่าการดูดซับของกำลังงานในพื้นที่ตัวนำ การใช้วิธีสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของกระแสที่ไหลบนพื้นผิวจะง่ายกว่าการใช้สนามไฟฟ้า ทั้งสองวิธีก็ได้คำตอบเหมือนกัน

เราอาจคิดว่ากำลังทั้งหมดกระจายในชั้นผิว, มีค่าความต้านทานพื้นผิว R_s ความหนาเท่ากับค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำ กำลังงานจะไหลเป็นตารางของความเข้มสนามไฟฟ้าและลดลงเป็นฟังก์ชันของ $\exp(-z/2\delta)$ เมื่อคลื่นเดินทางเข้าไปในแผ่น ที่ค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปตัวนำกำลังงานเหลือเพียง 13.5 % ของที่ผิว ดังนั้น 86.5% ของกำลังงานเข้าไปในแผ่นถูกดูดซับภายในระยะค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในแผ่น

2.3 คลื่นส่งผ่านแผ่นตัวนำบาง

จากรูปที่ 2.4 เมื่อคลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำมันจะสะท้อนกลับที่ B แอมพลิจูดของคลื่นส่งผ่านและคลื่นสะท้อนกลับในแต่ละตัวกลางแสดงดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 คลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่านเข้าไปแผ่นตัวนำที่มีความหนาจำกัด ถ้าความหนาของตัวนำเท่ากับค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำ การสูญเสียในการส่งผ่านเป็น

$$L = -10 \text{Log}(0.135) = 8.7 \text{dB} \quad (2.31)$$

ดังนั้นแม้ถ้าคลื่นส่งผ่านจะสะท้อนกลับหมดที่ B และคลื่นสะท้อนก็สะท้อนกลับหมดที่ A การสะท้อนกลับสองครั้งจะมีแอมพลิจูดต่ำกว่าคลื่นส่งผ่านครั้งแรก 17.4 dB ถ้าความหนาของแผ่นมากกว่าค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำ ผลของการสะท้อนกลับหลายๆ ครั้งก็สามารถตัดไปได้ การสูญเสียของการส่งผ่านที่ A และ B การสูญเสียของการส่งผ่านสำหรับช่วง A-B นี้เราสามารถให้การประมาณค่าเพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณได้

การสูญเสียของการส่งผ่านที่ A โดยสมการ (2.26) และการสูญเสียของการส่งผ่านตลอดแผ่นเป็น

$$L_{AB} = -10 \text{Log}[\exp-(2t/\delta)] \quad (2.32)$$

ที่ B

$$\frac{E_{3+}}{E_{2+}} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \approx 2 \quad (2.33)$$

ถ้า $|Z_1| \gg |Z_2|$ ที่ได้ผลลัพธ์เช่นนี้เพราะเงื่อนไขขอบเขตที่ B เข้าใกล้วงจรเปิด (open-circuit) มากๆ แล้วคลื่นตกกระทบจะสะท้อนกลับด้วยเฟสเปลี่ยนไป 180 องศา ทำให้สนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเพิ่มขึ้น กำลังงานของคลื่นส่งผ่านจะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังงานของคลื่นตกกระทบ แม้ว่าขนาดของสนามไฟฟ้าจะมากกว่าก็ตามเพราะความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ของสารทั้งสอง

กำลังงานของคลื่นตกกระทบจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{2+} = |E_{2+}|^2 / 4R_s \quad (2.34)$$

จากสมการ (2.21) และกำลังงานของคลื่นส่งผ่านเป็น

$$\begin{aligned} P_{3+} &= |E_{3+}|^2 / 2Z_1 \\ &= 2|E_{2+}|^2 / Z_1 \end{aligned} \quad (2.35)$$

การสูญเสียของการส่งผ่านที่ B จะเป็น

$$\begin{aligned} L_B &= -10 \text{Log} \left(\frac{P_{3+}}{P_{2+}} \right) \\ &= -10 \text{Log} \left(\frac{8R_s}{Z_1} \right) \end{aligned} \quad (2.36)$$

การสูญเสียที่ A จะเป็นดังสมการ (2.26)

2.4 การกรองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ELECTROMAGNETIC SCREENING)

ในหัวข้อที่แล้วเราจะเห็นว่าสกรีนนิ่งเอฟเฟก (screening effect) ของแผ่นตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ การสะท้อนกลับจากด้านหน้าของแผ่นตัวนำ , การลดทอนตลอดแผ่น , และการสะท้อนกลับจากด้านหลังของแผ่น การสะท้อนจากหลายๆส่วนจะมีความสำคัญมาก (multiple reflections) ค่าสกรีนนิ่งทั้งหมดจะมีค่า

$$S = R + A + B \quad (2.37)$$

เมื่อ R คือ การสูญเสียของการส่งผ่านเป็นผลมาจากการสะท้อนกลับทั้งสองด้าน

A คือ เป็นค่าการลดทอนของคลื่นเมื่อผ่านแผ่นตัวนำ

B คือ ผลจากการสะท้อนอื่นๆ

จากสมการ (2.26) และ (2.36) ค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนจะมีค่าเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = -10\text{Log}(4R_s / Z_1) - 10\text{Log}(8R_s / Z_1) \quad (2.38)$$

แทนค่า R_s และ Z_1 ลงในสมการ (2.38)

$$R = 315 - 10\text{Log}\left(\frac{f\mu}{\sigma}\right) \quad \text{dB} \quad (2.39)$$

การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความถี่และค่าเพอิมิบลิตี และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนา

การสูญเสียเนื่องจากการลดทอนภายในแผ่นแสดงโดย จากสมการ (2.32)

$$A = -\frac{t}{\delta} 10\text{Log}(e^{-2}) \quad (2.40)$$

จะได้

$$A = 15.4\sqrt{f\sigma\mu}t \quad \text{dB} \quad (2.41)$$

แสดงว่าการลดทอนจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่น, ความถี่, ค่าเพอิมิบลิตีและค่าความหนา ค่าการสูญเสียที่เกิดจากการลดทอนภายในแผ่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าค่าสติกการิทึมในสมการ (2.39) ดังนั้นค่าสกรีนนิ่งทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสูญเสียจากการลดทอน

ถ้าคลื่นระนาบตกกระทบตั้งฉากกับแผ่นตัวนำที่มีขนาดใหญ่มาก (infinite sheet) การแก้สมการโดยตรงจะทำได้ยากมากจะต้องใช้การวิเคราะห์นิวเมอริคัลเมทอด (numerical methods) เข้าช่วย ดังนั้นในการวิเคราะห์จะใช้วิธีประมาณค่าซึ่งจะได้

$$S_M = 20\text{Log}\left[\cosh\gamma t + \frac{1}{3}\left[\frac{\gamma R}{\mu_r} + \frac{2(\mu_r - 1)}{\gamma R}\right]\sinh\gamma t\right] \quad (2.42)$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega\sigma\mu}$$

และ

$$S_E = 20\text{Log}\left[\frac{2\gamma \sin\gamma d}{3\omega^2\epsilon_0\mu R}\right] \quad (2.43)$$

เมื่อ R เป็นรัศมีของชั้นบรรยากาศ แผ่นมีความหนา t จากสมการ (2.42) และ (2.43) จะประมาณค่าได้ดังนี้

1. กรณีแมกนีโตสแตติก (magnetostatic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_M = 20 \text{Log} \left[1 + \frac{2(\mu_r - 1)t}{3R} \right] \quad (2.44)$$

2. กรณีที่ความถี่ต่ำ ($t \ll \delta$)

$$S_M = 10 \text{Log} \left[1 + \omega^2 \left(\frac{\mu_0 \sigma R t}{3} \right)^2 \right] \quad (2.45)$$

$$S_E = 20 \text{Log} \left[\frac{2\sigma t}{3\omega \epsilon_0 R} \right] \quad (2.46)$$

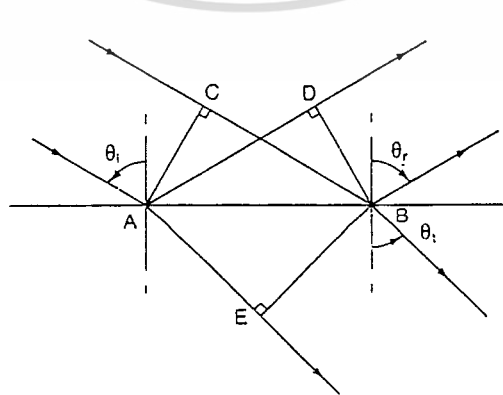
3. กรณีที่ความถี่สูง ($t \gg \delta$)

$$S_M = 20 \text{Log} \left[\frac{R}{3\sqrt{2\mu_r\delta}} e^{t/\delta} \right] \quad (2.47)$$

$$S_E = 20 \text{Log} \left[\frac{\sigma\delta}{3\sqrt{2\omega\epsilon_0 R}} e^{t/\delta} \right] \quad (2.48)$$

2.5 คลื่นตกกระทบทำมุมใดๆกับพื้นผิวตัวนำ

เมื่อคลื่นตกกระทบทำมุมใดๆกับรอยต่อ จะพิจารณาได้สองกรณีคือกรณีที่คลื่นมีโพลาไรเซชันตั้งฉากกับรอยต่อและกรณีที่คลื่นมีโพลาไรเซชันขนานกับรอยต่อ



รูปที่ 2.5 แสดงการตกกระทบและสะท้อนของคลื่นเมื่อทำมุมใดๆกับรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎการสะท้อนและหักเห (ดูรูปที่ 2.5) เมื่อคลื่นตกกระทบทำมุม θ_i จะเกิดคลื่นสะท้อนทำมุม θ_r และคลื่นส่งผ่านทำมุม θ_t กับเส้นปกติ เลือกจุด A และ B บนรอยต่อที่มีเฟสต่างกัน 360 องศา แนวหน้าคลื่น AC, BD และ BE จะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ระยะทาง CB, AD และ AE จะมีค่าเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น ดังสมการ

$$\begin{aligned} CB = AD &= \lambda_1 \\ AE &= \lambda_2 \end{aligned} \quad (2.49)$$

เมื่อ λ_1 และ λ_2 เป็นความยาวคลื่นในตัวกลางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$AB = \frac{\lambda_1}{\sin\theta_1} = \frac{\lambda_2}{\sin\theta_2} \quad (2.50)$$

เมื่อ

$$\lambda_1 = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\epsilon_1\mu_1}} \quad (2.51)$$

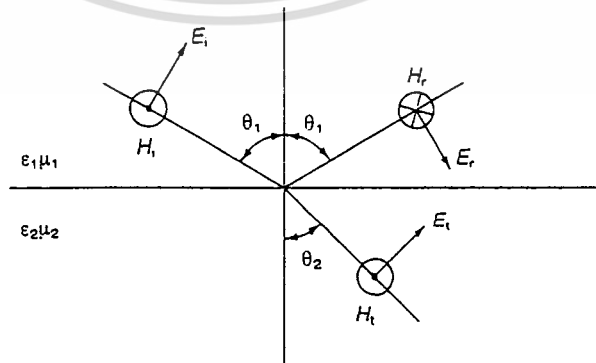
$$\lambda_2 = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\epsilon_2\mu_2}}$$

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \sqrt{\frac{\mu_2\epsilon_2}{\mu_1\epsilon_1}} \quad (2.52)$$

ตามกฎของสเนลล์

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.53)$$

เมื่อ n_1 และ n_2 เป็นดัชนีการหักเหของตัวกลางทั้งสอง ค่าดัชนีการหักเหเป็นอัตราส่วนของความเร็วของแสงเมื่อเคลื่อนที่ไปในช่องว่างอากาศต่อความเร็วเมื่อเคลื่อนที่ไปในตัวกลาง



รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางของสนามเมื่อคลื่นตกกระทบทำมุมใดๆกับรอยต่อเมื่อสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6

$$(E_i + E_r) \cos \theta_1 = E_t \cos \theta_2 \quad (2.54)$$

$$H_i - H_r = H_t \quad (2.55)$$

จากสมการ (2.1) และ (2.2) จะได้อ่านอิมพีแดนซ์ของคลื่น

$$Z_{n\perp} = \frac{E \cos \theta}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cos \theta \quad (2.56)$$

ถ้าสนามไฟฟ้าขนานกับรอยต่อแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางการหักเหของคลื่นตกกระทบทำมุมใดๆกับรอยต่อและมีสนามไฟฟ้าขนานกับรอยต่อจากเงื่อนไขขอบเขต

$$E_i + E_r = E_t \quad (2.57)$$

และ

$$(H_i - H_r) \cos \theta_1 = H_t \cos \theta_2 \quad (2.58)$$

จากสมการ (2.1) และ ความสัมพันธ์ $(E_i - E_r) / Z_1 = E_t / Z_2$ จะได้อ่านอิมพีแดนซ์เป็น

$$Z_{n\parallel} = \frac{E}{H \cos \theta} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากอิมพีแดนซ์ของคลื่นซึ่งตกกระทบทำมุมใดๆกับรอยต่อด้วย E ขนานกับพื้นผิวจากสมการ (2.59) ดังนั้น

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cos\theta_1 - Z_1 \cos\theta_2}{Z_2 \cos\theta_1 + Z_1 \cos\theta_2} \quad (2.60)$$

และ

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2 \cos\theta_1}{Z_2 \cos\theta_1 + Z_1 \cos\theta_2} \quad (2.61)$$

จาก (2.9) และ (2.12) กับ Z_1 และ Z_2 ที่ได้จาก (2.20) การหักเหของคลื่นที่ขอบเขตเป็นไปตามกฎของสเนลล์ สมการ (2.53) คือ

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = k_1 \delta \quad (2.62)$$

ในดิวน่าที่ตีค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในดิวน่าน้อยกว่าความยาวคลื่นในฟรีสเปซ ดังนั้นที่ด้านขวาของสมการ (2.62) โดยปกติจะน้อยมาก ทำให้ θ_2 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นคลื่นส่งผ่านสามารถพิจารณาได้ว่าเดินทางตั้งฉากกับขอบเขต ทำการประมาณค่าและแทนค่า Z_2 จะได้

$$\begin{aligned} \frac{E_r}{E_i} &= \frac{(1+j)R_s \cos\theta_1 - Z_1}{(1+j)R_s \cos\theta_1 + Z_1} \\ &\approx -1 \end{aligned} \quad (2.63)$$

เพราะ Z_1 โดยปกติจะมากกว่า R_s ดังนั้นคลื่นเกือบทั้งหมดจะสะท้อนกลับด้วยเฟสตรงข้ามเหมือนในกรณีตัวนำสมบูรณ์ คลื่นส่งผ่านมีแอมพลิจูดเป็น

$$\begin{aligned} \frac{E_t}{E_i} &= \frac{2(1+j)R_s \cos\theta_1}{(1+j)R_s \cos\theta_1 + Z_1} \\ &\approx \frac{2(1+j)R_s}{Z_1} \cos\theta_1 \end{aligned} \quad (2.64)$$

แสดงว่ากำลังงานถูกดูดซับน้อยลงเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้น

เมื่อคลื่นตกกระทบมีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับขอบเขตอิมพีแดนซ์ของคลื่นเป็นดังสมการ (2.56) และเราสามารถแสดงแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านด้วยการสมมติดังอันแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{(1+j)R_s - Z_1 \cos\theta_1}{(1+j)R_s + Z_1 \cos\theta_1} \quad (2.65)$$

และ

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{2(1+j)R_s}{(1+j)R_s + Z_1 \cos\theta_1} \quad (2.66)$$

สำหรับมุมตกกระทบค่ามากอิมพีแดนซ์ของคลื่นของตัวกลางที่ 1 จะมากกว่าของตัวนำมากและคลื่นจะสะท้อนกลับอย่างสมบูรณ์ด้วยเฟสที่กลับกันเหมือนกับเงื่อนไขว่ อย่างไรก็ตามถ้าคลื่นตกกระทบด้วยมุมขนาดเล็ก (เทียบกับเส้นปกติ) เปรียบเทียบขนาดของเทอมสองเทอมของเศษของสมการ (2.65) กำลังงานตกกระทบจะถูกดูดซับไปด้วยพลังงานที่มากพอ และคลื่นสะท้อนกลับจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขว่

$$Z_1 \cos\theta_1 = R_s \quad (2.67)$$

ดังนั้น

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{j}{2+j} \quad (2.68)$$

และ

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{2(1+j)}{2+j} \quad (2.69)$$

บทที่ 3

สารที่นำมาสร้างวัสดุระดับคลื่น

3.1 การดูดซับคลื่นของสาร

วัสดุที่ใช้ดูดซับคลื่นจะลดทอนพลังงานที่จะสะท้อนเข้าสู่สายอากาศรับหมายถึงการดูดซับคลื่นนั่นเอง พลังงานของคลื่นถูกดูดซับแบบการสูญเสียโห้มิมิค (ohmic loss) เป็นความจริงที่ว่า การสูญเสียนี้เปลี่ยนจากพลังงานไมโครเวฟเป็นความร้อน และวัสดุดูดซับคลื่นไม่ดูดซับพลังงานเพียงพอที่จะร้อนได้หรืออาจจะสัมผัสได้ว่าอุ่น เมื่อใช้งาน นี่คือนสิ่งที่เกิดขึ้น แม้ว่ามันจะทำงานด้วยกลไกใดก็ตาม ถ้าเครื่องส่งกับวัสดุที่ใช้ดูดซับคลื่นไมโครเวฟถูกนำเข้าไปใกล้กันเพียงพอ มันจะเกิดความร้อนขึ้น

พื้นฐานสำคัญที่สุดของวัสดุที่ใช้ดูดซับคลื่นไมโครเวฟต้องพิจารณาสาระสำคัญในความจริงที่ว่า

- มีอยู่จริง
- สามารถสร้างขึ้นได้โดยมีดัชนีการหักเหของแสงเป็นเลขจำนวนเชิงซ้อน

ดัชนีการหักเหของแสงซึ่งประกอบด้วยผลทางแม่เหล็กเช่นเดียวกับผลทางไฟฟ้า ส่วนของจำนวนจินตภาพเป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียนี้, ที่ความถี่ไมโครเวฟ การสูญเสียถูกกำหนดโดยค่าความนำจำกัด (finite conductivity) ของวัสดุ ซึ่งเกิดจากการชนกันของโมเลกุลเมื่อโมเลกุลพยายามที่จะเคลื่อนที่ไปตามสนามที่ป้อนให้กับมัน เราจะรวมผลของการสูญเสียทั้งหมดในรูปของค่าเพอร์มิททิวิตีและค่าเพอร์มิบิลิตีของวัสดุ

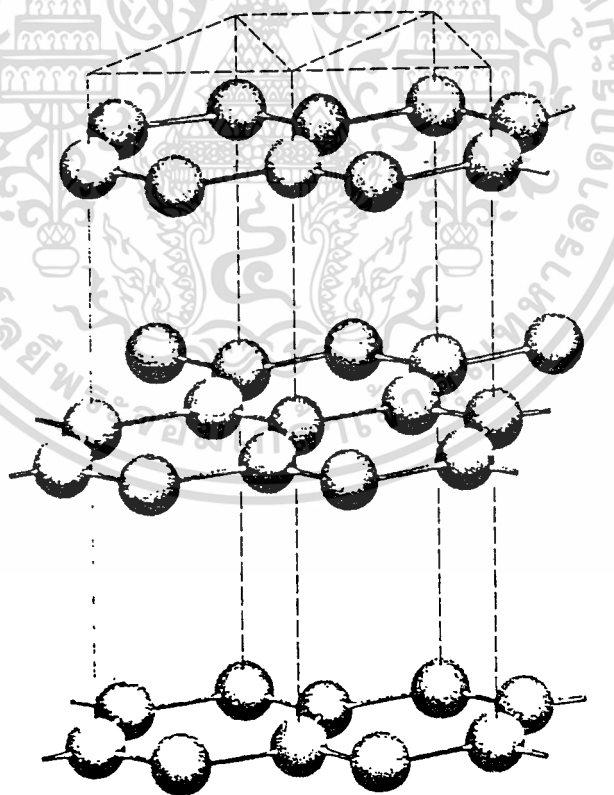
3.2 ทำไมเลือกใช้คาร์บอน

คาร์บอนเป็นวัสดุพื้นฐานที่ถูกใช้สร้างวัสดุดูดซับคลื่นในยุคแรกๆ เพราะค่าความนำที่ไม่สมบูรณ์ของมัน (imperfect conductivity) คือมีค่าความนำอยู่ระหว่างค่าความนำที่มาก เช่น ทอง,เงิน,ทองแดง,เหล็ก กับค่าความนำที่น้อย เช่น แก้ว,ทราย,เทฟลอน วัสดุดังกล่าว เช่น คาร์บอน,ซิลิคอน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ความจริงมีสารมากมายหลายชนิดในท้องตลาดแต่ในการออกแบบสร้างวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟไม่ได้เปลี่ยนแปลงสาระสำคัญไปเลยเป็นเวลากว่า 20 ปีแล้ว ข้อกำหนดสำหรับการทดลองหรือการพิจารณาการใช้งานนั้นจะใช้ภายในห้อง แต่ไม่เหมาะสมที่จะใช้ภายนอกเพราะมีขนาดใหญ่และเปราะแตกง่าย

ตารางที่ 3.1 ค่าความนำ ดัชนี ของโลหะพื้นฐาน

โลหะ	ค่าความนำ (mhos/m)
เงิน	62000000
ทองแดง	58000000
ทอง	41000000
เหล็ก	1200000
นิโครม	1000000
แกรไฟต์ (ในรูปของ คาร์บอน)	71000
ซิลิคอน	1200

พิจารณาโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยอะตอมยึดติดกันเป็นแพ เรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) หลายๆรูปต่อเนื่องกัน อะตอมของคาร์บอนในแพเดียวกันต่างก็ยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันอย่างเหนียวแน่นและมั่นคงด้วยพันธะโควาเลนต์ แต่อะตอมที่อยู่กันคนละแพจะไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกัน เนื่องจากแขนยึดมีความยาวมาก โดยบอนด์ระหว่างแพมีลักษณะเมตอลลิคบอนด์ จึงทำให้แกรไฟต์อ่อนเพราะอะตอมลื่นหลุดง่าย แกรไฟต์จะนำความร้อนและไฟฟ้า ได้ง่ายในแนวที่ขนานกับแพกว่าในแนวที่ตั้งฉากกับแพ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ แสดงแผ่นหกเหลี่ยมของคาร์บอนอะตอม ตำแหน่งอะตอมแทนโดยทรงกลมและทิศทางของบอนด์แทนโดยก้านระหว่างทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีแบบจำลองภาวะอะตอมของบอร์ คือ

1. อิเล็กตรอนของอะตอมซึ่งอยู่ในภาวะหนึ่งและมีพลังงานเพียงค่าหนึ่งเท่านั้นซึ่งสัมพันธ์กับวงโคจรในขณะนั้น
2. ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากชั้นที่ต่ำกว่าไปยังชั้นที่สูงกว่า (วงโคจร) มันจะดูดซับพลังงานค่าหนึ่ง
3. ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากชั้นที่สูงกว่าไปยังชั้นที่ต่ำกว่า (วงโคจร) มันจะคายพลังงานค่าหนึ่งออกมา
4. ถ้าอิเล็กตรอนรักษากำลังงานของมันไว้ที่ชั้นหนึ่ง (วงโคจร) มันจะดูดซับหรือไม่ก็คายพลังงานออกมา

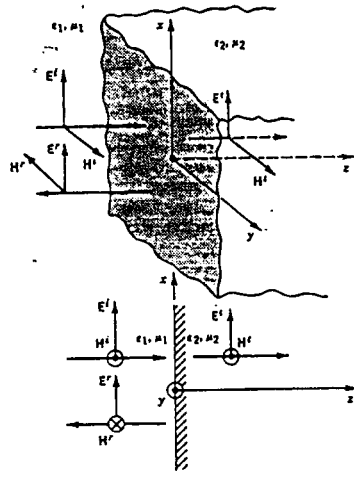
คาร์บอนเป็นสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า พลังงานของวาเลนซ์อิเล็กตรอนในการยึดเกาะกันระหว่างอะตอมจะมีค่าอยู่ในแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence band) และพลังงานส่วนนี้ในภาวะปกติธรรมดาจะมีค่าชิดติดกับแถบพลังงานนำกระแส (conduction band) หรือมีค่ามากกว่าแถบพลังงานนำกระแส ดังนั้นถ้าเราเพิ่มพลังงานแก่วาเลนซ์อิเล็กตรอนของคาร์บอน (อยู่ในรูปของแกรไฟต์) เพียงเล็กน้อย โดยป้อนสนามไฟฟ้า E ให้แก่อิเล็กตรอนก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ โดยภาวะรูปทรงของอะตอมในการยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงไม่หลุดจากกัน วาเลนซ์อิเล็กตรอนเมื่อเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า E จะมีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนเป็น $\underline{F} = -e \underline{E}$ ถ้าอิเล็กตรอนอยู่ในอวกาศอิสระมันจะเกิดความเร่งและมีความเร็วที่เพิ่มขึ้น (รวมถึงพลังงานด้วย) อย่างต่อเนื่อง ในสารผลึก เช่นแกรไฟต์ ความเร็วของอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นจะถูกต้านเพราะมีการชนกันกับโครงสร้างของตาข่ายของสารผลึกและในที่สุดอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ การเพิ่มขึ้นของพลังงานทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากชั้นวงโคจรที่ต่ำกว่าไปยังชั้นวงโคจรที่สูงกว่าและมันจะดูดซับพลังงานไว้ค่าหนึ่งตามทฤษฎีแบบจำลองภาวะอะตอมของบอร์ข้างต้น ด้วยเหตุนี้คาร์บอนจึงสามารถดูดซับพลังงานไว้ได้

วัสดุดูดซับคลื่นที่วัสดุที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (magnetic absorber) จะมีการใช้งานที่กว้างกว่าแบบแรก โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานภายนอกได้ดีกว่า การสูญเสียกำหนดโดยแมกเนติก ไดโพลโมเมนต์ (magnetic dipole moment) , และมีส่วนประกอบของเหล็กเป็นพื้นฐาน ตัวอย่างเช่นคาร์บอนนิล ไอรอน (carbonyl iron) ทำให้มีความคงทนมากกว่า แต่ข้อเสียคือมีน้ำหนักมากเนื่องจากมีส่วนประกอบของเหล็ก

3.3 คลื่นตกกระทบตั้งฉากกับตัวกลางไดอิเล็กตริก

เราหาการสะท้อนกลับและการส่งผ่านจากขอบเขตระนาบของตัวกลางไม่มีการสูญเสียโดยสมมติว่าคลื่นเดินทางตกกระทบตั้งฉากกับรอยต่อแบบระนาบของตัวกลางไม่มีการสูญเสียสองตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แต่ละตัวกลางมีพารามิเตอร์ ϵ_1, μ_1 และ ϵ_2, μ_2 เมื่อคลื่นตกกระทบที่รอยต่อ จะมีส่วนของคลื่นสะท้อนในตัวกลางที่ 1 และคลื่นส่งผ่านในตัวกลางที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 คลื่นสะท้อนและส่งผ่านเมื่อตกกระทบตั้งฉากกับรอยต่อ

สมมติว่าสนามไฟฟ้าตกกระทบมีแอมพลิจูดเป็น E_0 มีโพลาไรซ์ในทิศทาง x เราสามารถแสดงส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าตกกระทบ, สะท้อนและส่งผ่าน ดังนี้

$$E_i = \hat{a}_x E_0 e^{-\beta_1 z} \quad (3.1)$$

$$E_r = \hat{a}_x \Gamma^b E_0 e^{+\beta_1 z} \quad (3.2)$$

$$E_t = \hat{a}_x T^b E_0 e^{-\beta_2 z} \quad (3.3)$$

ส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กเป็น

$$H_i = \hat{a}_y \frac{E_0}{\eta_1} e^{-\beta_1 z} \quad (3.4)$$

$$H_r = -\hat{a}_y \Gamma^b \frac{E_0}{\eta_1} e^{+\beta_1 z} \quad (3.5)$$

$$H_t = \hat{a}_y T^b \frac{E_0}{\eta_2} e^{-\beta_2 z} \quad (3.6)$$

เมื่อ Γ^b คือสัมประสิทธิ์การสะท้อน

T^b คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่รอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.9) และ (2.12)

$$\frac{E_r}{E_i} = \Gamma^b = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (3.7)$$

$$\frac{E_t}{E_i} = T^b = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (3.8)$$

เราให้ตัวกลางที่ 1 เป็นอากาศและตัวกลางที่ 2 เป็นกระดาษซึ่งมีค่าเฟอร์ริตดิอิเล็กทริกเท่ากับ 3 และค่าเฟอร์ริบิลิตีสัมพัทธ์เท่ากับ 1 กำหนดให้แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าตกกระทบที่รอยต่อเป็น 1 mV/m ดังนั้นพารามิเตอร์ η_1, η_2 และ Γ^b, T^b เป็นดังนี้

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (3.9)$$

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = \frac{1}{1.73} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (3.10)$$

$$\Gamma^b = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{\frac{1}{1.73} - 1}{\frac{1}{1.73} + 1} = \frac{1 - 1.73}{1 + 1.73} = -0.267 \quad (3.11)$$

$$T^b = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{2\left(\frac{1}{1.73}\right)}{\frac{1}{1.73} + 1} = \frac{2}{2.73} = 0.732 \quad (3.12)$$

ความเข้มของกำลังงานของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่านเป็นดังนี้

$$S_{av}^i = \frac{|E_0|^2}{2\eta_1} = \frac{|10^{-3}|^2}{2(376.73)} = 1.327 * 10^{-9} \quad \text{w/m}^2 \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} S_{av}^r &= |\Gamma^b|^2 S_{av}^i = |-0.267|^2 * 1.327 * 10^{-9} \\ &= 0.094 * 10^{-9} \quad \text{w/m}^2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{av}^t = |T^b|^2 S_{av}^i \frac{\eta_1}{\eta_2} = |0.732|^2 \frac{1}{1/1.73} (1.327 * 10^{-9})$$

$$= 1.23 * 10^{-9} \quad \text{w/m}^2 \quad (3.15)$$

จากค่าความเข้มกำลังงานของคลื่นสามารถใช้หาค่าการสูญเสียของการส่งผ่านและค่าการสูญเสียของการสะท้อนกลับได้ดังนี้

$$\text{Transmission loss} = -10 \text{Log} \left| \frac{S_{av}^t}{S_{av}^i} \right| \quad (3.16)$$

$$= -10 \text{Log} \left| \frac{1.23 * 10^{-9}}{1.327 * 10^{-9}} \right| = 0.33 \text{ dB} \quad (3.17)$$

$$\text{Return loss} = -10 \text{Log} \left| \frac{S_{av}^r}{S_{av}^i} \right| \quad (3.18)$$

$$= -10 \text{Log} \left| \frac{0.094 * 10^{-9}}{1.327 * 10^{-9}} \right| = 11.49 \text{ dB} \quad (3.19)$$

แสดงว่าความเข้มกำลังงานของคลื่นที่ตกกระทบตั้งฉากบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศกับกระดาษจะมีค่ามากกว่าค่าความเข้มกำลังงานของคลื่นส่งผ่าน 0.33 dB และมากกว่าค่าความเข้มกำลังงานของคลื่นสะท้อน 11.49 dB สรุปว่าคลื่นที่เดินทางผ่านกระดาษมีค่ามากกว่าคลื่นที่เดินทางสะท้อนกลับ

บทที่ 4

ทฤษฎีสำหรับวัสดุดูดซับคลื่นและการดูดซับคลื่นด้วยแผ่นความต้านทาน

4.1 ทฤษฎีสำหรับวัสดุดูดซับคลื่น (Theorem for Absorbers)

ทั้งสองทฤษฎีนี้ใช้สำหรับการแตกกระจายของพลังงานจากวัสดุดูดซับคลื่นที่ใช้ห่อหุ้มตัวนำ เมื่อคลื่นตกกระทบเป็นแบบระนาบ

ทฤษฎีที่ 1 ถ้าค่าจำนวนเชิงซ้อนของเพอร์มิบิลิตีสัมพัทธ์และเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุดูดซับคลื่นมีค่าเท่ากัน นั่นคือ $\epsilon(r) = \mu(r)$ แล้วสนามกระเจิงระยะไกล (far-zone backscattered field) จะมีค่าเป็นศูนย์

ทฤษฎีที่ 2 สนามกระเจิง (backscattered field) จะเป็นศูนย์ ถ้าอนุพัทธ์ของอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับหนึ่ง ($\eta = 1$) และถ้าวัสดุดูดซับคลื่นประกอบด้วยสารที่จะทำให้องค์ประกอบของสนามในแนวสัมผัสทั้งหมดเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตอิมพีแดนซ์บนพื้นผิว

$$E - (n \cdot E)n = \eta n \times H \quad (4.1)$$

เมื่อ n เป็นยูนิต เวกเตอร์ ที่พุ่งตั้งฉากกับพื้นผิว

4.2 แผ่นตัวนำหุ้มด้วยชั้นของวัสดุดูดซับคลื่น

เมื่อเราพิจารณาแผ่นตัวนำสมบูรณ์หุ้มด้วยวัสดุซึ่งมีค่าเพอร์มิตติวิตีและเพอร์มิบิลิตีเป็นจำนวนเชิงซ้อน คือค่า ϵ และ μ และมีความหนาเป็น δ เมื่อคลื่นระนาบตกกระทบบนพื้นผิวด้วยมุมตกกระทบ θ เราสามารถแสดงองค์ประกอบสนามแทนเจนของสนามภายนอก (คลื่นสะท้อนบวกกับคลื่นตกกระทบ) เงื่อนไขขอบเขตอิมพีแดนซ์บนพื้นผิวด้านนอกของวัสดุหุ้ม ดังสมการที่ (4.1)

$$E - (n \cdot E)n = \eta n \times H$$

เมื่อ n เป็นยูนิต เวกเตอร์ที่พุ่งตั้งฉากกับพื้นผิว เราสมมติว่าสนามเปลี่ยนไปตามเวลาฮาร์มอนิกด้วย $e^{-j\omega t}$ และภายนอกตัวกลางมีคุณสมบัติแสดงด้วยค่าคงที่ $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$ อิมพีแดนซ์ η เป็นฟังก์ชันของ ϵ, μ, θ และโพลาริเซชันของคลื่นตกกระทบ

ถ้าสนามไฟฟ้าตกกระทบมีโพลาริเซชันแบบตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบแล้วอิมพีแดนซ์จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_{\perp} = -i \frac{\mu}{N} \frac{\tan(Nk\delta \cos\theta_1)}{\cos\theta_1} \quad (4.2)$$

เมื่อ $\sin\theta = N \sin\theta_1$ และ $N = (\epsilon\mu)^{\frac{1}{2}}$ ถ้าสนามไฟฟ้าตกกระทบบมีโพลาไรเซชันขนานกับระนาบของการตกกระทบบ อิมพีแดนซ์เป็น

$$\eta_{//} = -i \frac{\mu}{N} \cos\theta_1 \tan(Nk\delta \cos\theta_1) \quad (4.3)$$

เราหาสัมประสิทธิ์หักเหของการสะท้อนกลับ (voltage reflection coefficients) โดยเศษส่วนของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าสะท้อนกลับกับแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าตกกระทบบ จะได้

$$R_{\perp} = \frac{\eta_{\perp} \cos\theta - 1}{\eta_{\perp} \cos\theta + 1} \quad (4.4)$$

$$R_{//} = \frac{\eta_{//} - \cos\theta}{\eta_{//} + \cos\theta} \quad (4.5)$$

สำหรับการตกกระทบบตั้งฉาก ($\theta = 0$) โพลาไรซ์ทั้งสองโมดจะเท่ากัน

$$\eta = -i \frac{\mu}{N} \tan Nk\delta \quad (4.6)$$

$$R = \frac{\eta - 1}{\eta + 1} \quad (4.7)$$

ในกรณีของตัวนำสมบูรณ์ $\eta = 0$ และ $R = -1$ เพื่อที่จะไม่ขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชัน เรากำหนดเงื่อนไขพิเศษ

$$|N| \gg 1 \quad (4.8)$$

สมมติว่าคลื่นในวัสดุตกกระทบบคลื่นเดินทางในทิศตั้งฉากกับพื้นผิว จะได้

$$\eta_{//} = \eta_{\perp} = -i \frac{\mu}{N} \tan Nk\delta \left[1 + O\left(\frac{k\delta}{N}\right) + O\left(\frac{1}{N^2}\right) \right] \quad (4.9)$$

ถ้าหากเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k\delta \ll |N| \quad (4.10)$$

ดังนั้นสำหรับดัชนีการหักเหค่ามาก N อิมพีแดนซ์ η จะไม่ขึ้นอยู่กับอยู่กับโพลาไรเซชันและจะเหมือนกับกรณีตกกระทบตั้งฉาก

เงื่อนไขในสมการ (4.10) สามารถผ่อนผันได้ ถ้า $Nk\delta$ มีส่วนจินตภาพเป็นค่าบวกมากๆ ในกรณีนี้ $\tan(Nk\delta)$ ประมาณได้เท่ากับ i อิมพีแดนซ์จะกลายเป็น

$$\eta = \frac{\mu}{N} = \left(\frac{\mu}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

สอดคล้องกับอิมพีแดนซ์ซึ่งสามารถจะพิสูจน์ได้สำหรับตัวกลางกึ่งจำกัดไดอิเล็กตริก (semi-infinite dielectric) สมมติว่า $\text{Im}(Nk\delta) \gg 1$ หมายความว่าความหนาของวัสดุหุ้มมากกว่าค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำ ดังนั้นแผ่นตัวนำจึงไม่มีผลกระทบต่อคลื่น

สุดท้ายเป็นกรณีพิเศษของชั้นที่บางมาก เมื่อ $|Nk\delta| \ll 1$ อิมพีแดนซ์ในกรณีนี้จะเป็น

$$\eta = -i\mu k\delta \quad (4.12)$$

ไม่ขึ้นอยู่กับค่าเพอร์มิตติวิตี

ถ้าวัสดุดูดซับคลื่นเป็นไปตามเงื่อนไขในทฤษฎีที่ 2 ดังนั้นอิมพีแดนซ์จะเท่ากับ 1 และพารามิเตอร์ของวัสดุหุ้มจะมีความสัมพันธ์เป็น

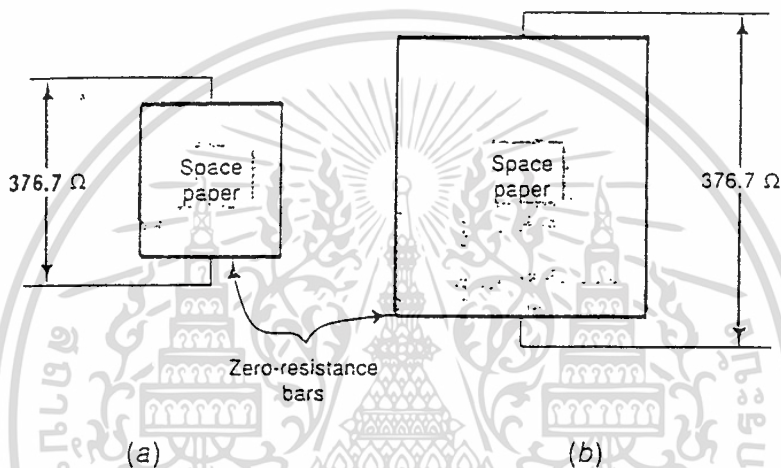
$$\tan(Nk\delta) = i \frac{N}{\mu} \quad (4.13)$$

เมื่อความหนาของวัสดุหุ้มมากกว่าค่าความลึกที่คลื่นเดินทางเข้าไปในตัวนำ เงื่อนไขในสมการที่ (4.13) กลายเป็นไม่ขึ้นกับค่า δ และลดรูปเป็น $\epsilon = \mu$ นี่เป็นตัวอย่างของวัสดุดูดซับคลื่นภายใต้การอธิบายในทฤษฎีที่ 1 เมื่อแผ่นมีความบางมากๆ สมการที่ 12 จะลดรูปเป็น $k\delta = i/\mu$ ซึ่ง μ จะมีส่วนจินตภาพเป็นค่าบวกมากๆ และตัดค่าจริงทิ้งไปได้

4.3 การดูดซับคลื่นด้วยแผ่นความต้านทาน (Wave Absorption with Resistance Paper)

พิจารณาดำแหน่งที่คลื่นถูกดูดซับโดยสมบูรณ์ และไม่มีคลื่นสะท้อนกลับเลยอินทรีนลิตอิมพีแดนซ์ของฟรีสเปซเท่ากับ 376.7 โอห์ม จากหลักการนี้ ถ้าเราพิจารณาให้คุณสมบัติของแผ่นความต้านทานมีความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานเท่ากับ 376.7 โอห์มต่อตารางหน่วย (ohms per square) วัสดุที่ใช้ทำแผ่นความต้านทานเรียกว่า สเปซเปเปอร์ (space paper) หรือ สเปซ โคลท (space cloth) สังเกตว่า ความต้านทานไม่ใช่หน่วยเป็นต่อ ตารางเซนติเมตร หรือ ต่อตารางเมตร แต่เป็นต่อตารางหน่วย กล่าวได้ว่าความต้านทานระหว่างขอบของ ส่วนของตารางใดๆ ของวัสดุนั้นมีค่าเท่ากับ จากรูปที่ 4.1(a) ความต้านทานระหว่างขอบด้านตรงข้ามของ ตารางเล็กๆ ของสเปซเปเปอร์เท่ากับ 376.7 โอห์ม เช่นเดียวกับความต้านทานระหว่างขอบด้านตรงข้ามของ ตารางใหญ่ๆ ในรูปที่ 4.1(b) ในการอธิบายจะสมมติว่าขอบทั้งสองด้านถูกจับไว้ด้วยแถบซึ่งมีความต้านทานเป็นศูนย์และอิมพีแดนซ์ตัดทิ้งไปได้



รูปที่ 4.1 สเปซเปเปอร์มีความต้านทาน 376.7 โอห์มต่อตารางหน่วย

ค่าความนำ (conductivity) มีค่าขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นสเปซ เปเปอร์ ดังนั้นความต้านทาน ของส่วนของตารางดังในรูปที่ 4.2 แสดงได้ดังนี้

$$R = \frac{l}{\sigma a} = \frac{l}{\sigma h l} = \frac{1}{\sigma h} \quad \Omega \quad (4.14)$$

เมื่อ l = ความยาว (m)
 a = พื้นที่ของขอบ (m^2)
 h = ความหนาของขอบ (m)
 σ = ความนำของแผ่น ($1/\Omega m$)

ค่าความนำจะได้เป็น

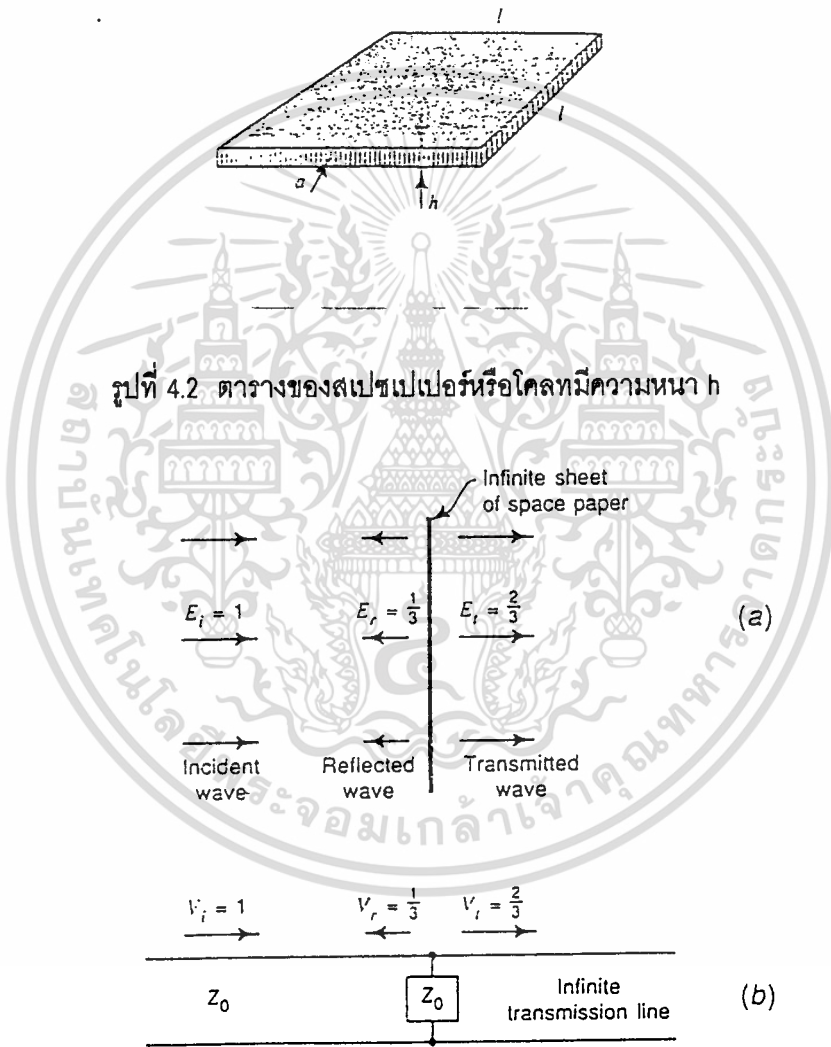
$$\sigma = \frac{1}{Rh} = \frac{1}{376.7h} \quad (1/\Omega m) \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาคณสมบัติของสเปซ เปเปอร์ ซึ่งถูกวางในเส้นทางที่คลื่นระนาบผ่านดังแสดงในรูปที่ 4.3 (a) คลื่นระนาบในฟรีสเปซเคลื่อนที่ไปทางขวาตกกระทบตั้งฉากกับสเปซ เปเปอร์ซึ่งมีขนาดเป็นอนันต์

ให้แอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบเป็น $1 \text{ m}^{-1}\text{V}$ จากสมการ (2.9)

$$\tau = \frac{E_r}{E_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \tag{4.16}$$



รูปที่ 4.3 (a) คลื่นระนาบเดินทางไปทางขวาตกกระทบตั้งฉากบนสเปซเปเปอร์

(b) สายส่งทัดเทียมของข้อ(a) มีทั้งคลื่นสะท้อนกลับและส่งผ่านเนื่องจากไม่แมทช์กัน

คลื่นที่ส่งผ่านไปทางขวาของแผ่นความต้านทานจะมีแอมพลิจูดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_r = \tau E_i = \frac{2 * 188.3}{188.3 + 376.7} = \frac{2}{3} \text{vm}^{-1} \quad (4.17)$$

และจากสมการ (2.12)

$$\sigma = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.18)$$

คลื่นสะท้อนมาทางซ้ายของแผ่นความต้านทานจะมีแอมพลิจูดเป็น

$$E_r = \sigma E_i = \frac{188.3 - 376.7}{188.3 + 376.7} = -\frac{1}{3} \text{vm}^{-1} \quad (4.19)$$

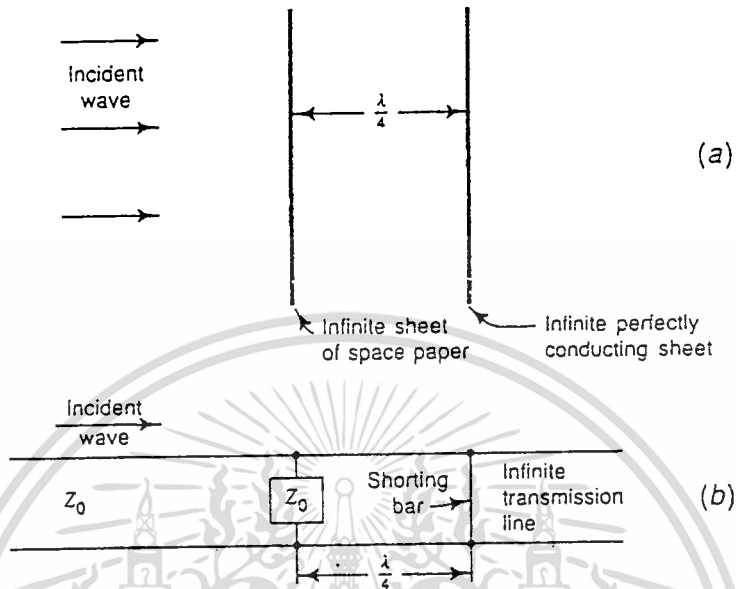
สังเกตว่า อิมพีแดนซ์ที่มองโดยคลื่นที่ตกกระทบแผ่นความต้านทานจะเป็นผลลัพท์ของอิมพีแดนซ์ของสเปซ เปเปออร์ ขนานกับอิมพีแดนซ์ของอากาศที่อยู่ข้างหลังสเปซ เปเปออร์นั้น จะได้เป็นครึ่งหนึ่งของ 376.7 หรือ 188.3 โอห์ม

จะเห็นว่าสเปซ เปเปออร์นั้นไม่สามารถที่จะลดปริมาณคลื่นสะท้อนให้หมดลงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับสายส่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.3(b)

เพื่อที่จะดูชัดหรือทำให้คลื่นตกกระทบสิ้นสุดลง โดยปราศจากคลื่นสะท้อนหรือคลื่นส่งผ่าน ทำได้โดยนำแผ่นตัวนำสมบูรณ์มีขนาดอนันต์ วางขนานกับสเปซ เปเปออร์ โดยวางข้างหลังสเปซ เปเปออร์ ห่างกัน $\lambda/4$ แสดงในรูปที่ 4.4(a) ในขณะนี้อิมพีแดนซ์ที่มองโดยคลื่นตกกระทบจะมองเห็นอิมพีแดนซ์ของสเปซ เปเปออร์เป็น 376.7 โอห์ม ได้มาจากอิมพีแดนซ์ของสเปซ เปเปออร์ขนานกับอินฟินิท อิมพีแดนซ์ ผลที่ได้คือสเปซ เปเปออร์ ดูชัดคลื่นได้ทั้งหมด โดยไม่มีคลื่นสะท้อนมาทางซ้ายของสเปซ เปเปออร์เลย อย่างไรก็ตาม จะมีคลื่นนิ่ง (standing wave) และพลังงานหมุนเวียนระหว่างแผ่นกระดาษกับแผ่นตัวนำ เมื่อเปรียบเทียบกับสายส่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.3(b)

ในกรณีของคลื่นระนาบ แผ่นตัวนำสมบูรณ์จะเป็นตัวแยกบริเวณที่วางข้างหลังมันจากคลื่น เปรียบเทียบอย่างคร่าว ๆ คือ ขอตตั้ง บาร์ (shorting bar) ในสายส่งช่วยลดคลื่นข้างหลังมันให้มีค่าน้อยลง

สายส่งอาจจะทำให้สิ้นสุดโดยวางอิมพีแดนซ์ซึ่งมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายขวงกับสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.3(b) และไม่ต่อสายอื่นใดอีกหลังสายส่งนั้น ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปได้ เพราะหลังสายส่งต้องมีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์ของช่องว่างต่ออยู่ ดังนั้น เราจึงเอาตัวนำสมบูรณ์มา กันไว้



รูปที่ 4.4 (a) คลื่นระนาบเดินทางไปทางขวาตกกระทบบนสเปซเปเปอร์ซึ่งมีแผ่นตัวนำวางอยู่ข้างหลังคลื่นจะถูกดูดซับโดยไม่มีคลื่นสะท้อนกลับและคลื่นส่งผ่าน
 (b) คลื่นเดินทางไปทางขวา จะดูดซับคลื่นโดยไม่มีคลื่นสะท้อนกลับแสดงโดยใช้สายส่งทัดเทียม สายยาวเศษหนึ่งส่วนสี่เท่าของความยาวคลื่นและลัดวงจรจะแสดงตัวเหมือนกับเปิดวงจรทางด้านซ้าย

บทที่ 5

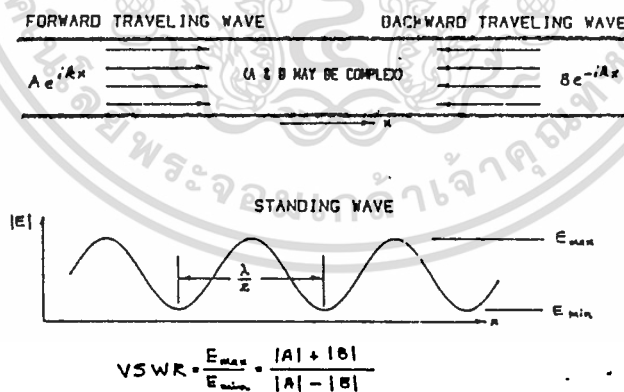
การลดทอนในสายสื่อสัญญาณที่มีการสูญเสีย

5.1 การสะท้อนของคลื่นในสายสื่อสัญญาณ

ในรูปที่ 5.1 แสดงสายสื่อสัญญาณที่มีการแพร่กระจายคลื่นทั้งไปและกลับ (forward and backward propagating wave) คลื่นที่เดินทางกลับอาจเกิดเนื่องจากการสะท้อนจากจุดสังเกตหรือจากความไม่สม่ำเสมอของสาย หรืออาจเนื่องมาจากทั้งสองกรณี คลื่นที่เดินทางกลับจะรวมกับคลื่นที่เดินทางไปทำให้เกิดแบบรูปคลื่นนิ่ง (standing wave pattern) แบบรูปคลื่นนิ่งจะแสดงความเข้มทั้งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และเนื่องจากคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามและมีคาบเวลาเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น อัตราส่วนระหว่างความเข้มสนามสูงสุดต่อความเข้มสนามต่ำสุดเรียกว่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (voltage standing wave ratio) หรือ “ VSWR ” ในเทอมของขนาดของคลื่นที่เดินทางไปและกลับ VSWR จะมีค่าดังนี้

$$VSWR = \frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{|A| + |B|}{|A| - |B|} \quad (5.1)$$

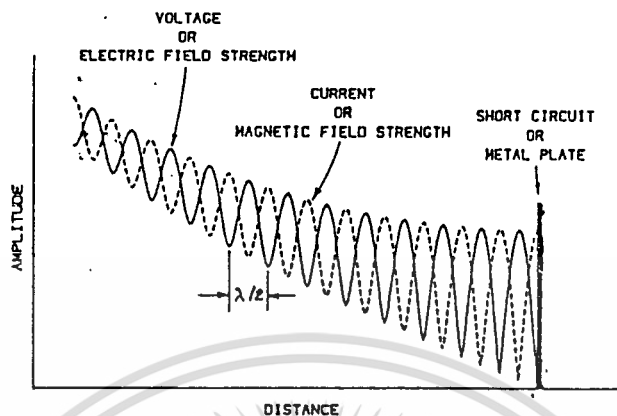
เมื่อ A และ B เป็นจำนวนเชิงซ้อน VSWR สามารถทำให้เป็นหน่วยเดซิเบล (decibels) ได้



รูปที่ 5.1 คลื่นสองชนิดเดินทางในทิศทางตรงกันข้ามทำให้เกิดแบบรูปคลื่นนิ่งที่มีคาบเวลาเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

ค่า VSWR สามารถเพิ่มค่าได้จนถึงอนันต์สำหรับกรณีที่เป็นกรณีการสะท้อนกลับสมบูรณ์ (ขนาดของคลื่นสะท้อนมีค่าเท่ากับขนาดของคลื่นตกกระทบ) ค่า VSWR จะมีค่าเท่ากับหนึ่งถ้าไม่มีคลื่นสะท้อนกลับภายใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายเลย สายที่ใช้กับความถี่สูงที่มีค่าการสูญเสียต่ำมาก ๆ ค่าสูงสุดของคลื่นนิ่ง (peaks of the standing wave pattern) จะคงที่ แต่ถ้าสายมีการสูญเสียลักษณะของขนาดของคลื่นนิ่งจะแสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แบบรูปคลื่นนิ่งในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ตัวอย่างข้างบนแสดงความเข้มของสนามในสายสื่อสารสัญญาณที่หลายความยาวคลื่นและมีการสูญเสีย สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังนี้

$$E = Ae^{jkx} + Be^{-jkx} \quad (5.2)$$

$$vZ_0 H = Ae^{jkx} - Be^{-jkx} \quad (5.3)$$

เมื่อ E เป็นความเข้มสนามไฟฟ้า

H เป็นความเข้มสนามแม่เหล็ก

เครื่องหมายลบในเทอมที่สองแสดงพลังงานที่เคลื่อนที่กลับป้ทางด้านซ้าย สมการแสดงความเข้มของสนามของคลื่นระนาบสองคลื่น คลื่นหนึ่งเกิดจากการสะท้อนจากสิ่งกีดขวางที่อยู่ในทิศของการกระจายคลื่นของคลื่นตกกระทบ ทิศของแรงดัน (voltage) และความแรงของสนามไฟฟ้า (electric field strength) จะขนานกัน ทิศของกระแส (current) กับความแรงสนามแม่เหล็กก็จะขนานกันด้วย เส้นกราฟในรูปที่ 5.2 จะสิ้นสุดลงโดยการลัดวงจร ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันมีค่าเป็นศูนย์ที่ปลายสาย ซึ่งมีผลเนื่องมาจากตัวนำสมบูรณ์จะทำให้ไม่มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส ในทางกลับกันความแรงของสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณลัดวงจรแสดงให้เห็นว่ากระแสที่บริเวณลัดวงจรจะมีค่าสูงสุด ใกล้เคียงกับบริเวณลัดวงจรอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะมีค่ามากกว่าบริเวณทางเข้า (input) ของสายสื่อสารสัญญาณเพราะความเข้มของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนจะมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะเดียวกันใกล้บริเวณทางเข้าของสายสื่อสารสัญญาณอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะมีค่าน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากเพราะขนาดของคลื่นสะท้อนที่ทางเข้าจะมีค่าน้อยกว่าบริเวณลัดวงจรมากและคลื่นตกกระทบจะถูกลดทอนในสายที่มีการสูญเสีย เมื่อเคลื่อนที่จากทางเข้าไปยังโหลด

5.2 สมการของสายส่งสัญญาณ

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสายส่งสัญญาณจะเปลี่ยนไปตามระยะทางภายในสายเพราะว่าค่าอิมพีแดนซ์เป็นอัตราส่วนของความแรงของสนามไฟฟ้าต่อความแรงของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นจะกำหนดเป็นจุดๆภายในสาย ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถเขียนในเทอมของอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสาย, อิมพีแดนซ์ที่ปลายสาย และระยะทางจากปลายสายมายังจุดที่ทำการวัดตั้งสมการ

$$Z = Z_0(1 + \Gamma) / (1 - \Gamma) \quad (5.4)$$

$$\Gamma = \frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0} e^{j2kx} \quad (5.5)$$

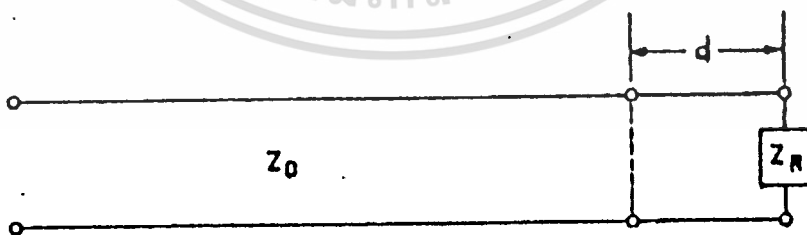
เมื่อ Z เป็นอิมพีแดนซ์ที่จุดใด ๆ ภายในสาย

Γ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแรงดัน

Z_R เป็นอิมพีแดนซ์ที่ปลายสาย

d เป็นระยะทางจากปลายสายมายังจุดที่ทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์

แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยทั่วไปค่าต่างๆจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนในรูปของขนาดและเฟส หรือสัมพันธ์กันโดยค่าจริงและค่าจินตภาพ



รูปที่ 5.3 โหลดที่ปลายของสายส่งสัญญาณจะทำให้เกิดการสะท้อน

ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดไม่เท่ากับอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การคำนวณและการสร้างวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

การออกแบบและสร้างวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ชนิดซาลิสบูรี สกรีน ให้สามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 12.65 กิกะเฮิรท์ในบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส)

6.1 การคำนวณ

6.1.1 เมื่อคลื่นเดินทางผ่านบรรยากาศมากระทบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ถ้าคลื่นมองเห็นวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟมีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์ของอากาศ แล้วคลื่นจะเดินทางเข้าไปในวัสดุดูดซับคลื่นโดยไม่มี การสะท้อนกลับ

คลื่นระนาบในตัวกลาง 1 เดินทางในทิศทาง $+x$ มีสนามไฟฟ้าในทิศทาง y (E_y) มีสนามแม่เหล็กในทิศทาง z (H_z) ตกกระทบตั้งฉากกับรอยต่อ (ดูรูปที่ 2.1) เราต้องการให้คลื่นเดินทางจากตัวกลางที่ 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 ทั้งหมดโดยไม่มี การสะท้อนกลับเลย ทำได้โดยออกแบบให้อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่สองมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่หนึ่ง แสดงดังสมการที่ (2.9)

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (6.1)$$

$$E_t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} E_i \quad (6.2)$$

ถ้า $Z_1 = Z_2$ แล้วจะได้

$$E_t = E_i \quad (6.3)$$

และจากสมการที่ (2.12)

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (6.4)$$

$$E_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} E_i \quad (6.5)$$

ถ้า $Z_1 = Z_2$ แล้วจะได้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_r = 0 \quad (6.6)$$

จากสมการที่ (6.3) และ (6.6) จะเห็นว่าเมื่อสามารถทำให้อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่สองเท่ากับอิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่หนึ่งแล้วสนามไฟฟ้าส่งผ่านจะมีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าตกกระทบและขณะเดียวกันสนามไฟฟ้าสะท้อนจะมีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่าสนามไฟฟ้าจากตัวกลางที่ 1 จะเดินทางไปในตัวกลางที่ 2 ทั้งหมด โดยไม่มีการสะท้อนกลับเลย

6.1.2 เนื่องจากตัวกลางที่ 1 เป็นอากาศมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ $120\pi \ \Omega$ หรือ $376.7 \ \Omega$ ดังนั้นจึงต้องออกแบบตัวกลางที่ 2 ให้มีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์ของอากาศคือ $376.7 \ \Omega$ ด้วย ซึ่งตัวกลางที่สองนี้จะเป็นแผ่นความต้านทานที่มีค่าความนำค่าหนึ่งซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

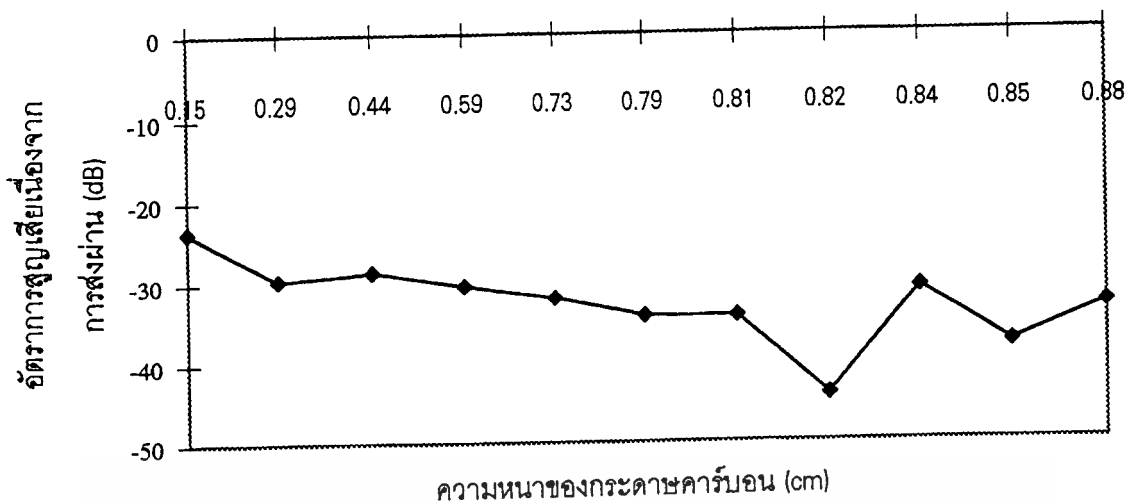
$$R = \frac{l}{\sigma a} = \frac{l}{\sigma h l} = \frac{1}{\sigma h} \quad (6.7)$$

เมื่อ R = ความต้านทานพื้นผิวของแผ่นความต้านทาน
 l = ขนาดของแผ่นความต้านทาน (เมตร)
 a = พื้นที่ขอบ (เมตร²)
 h = ความหนาของแผ่นความต้านทาน (เมตร)
 σ = ค่าความนำของแผ่นความต้านทาน ($1/\Omega m$)

ออกแบบให้แผ่นความต้านทานมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์ของอากาศ ดังนั้นก็จะทราบค่าความนำของแผ่นความต้านทานดังสมการ

$$\sigma = \frac{1}{376.7h} \left(1/\Omega m \right) \quad (6.8)$$

ในการออกแบบจะใช้กระดาษคาร์บอนเป็นแผ่นความต้านทาน ซึ่งได้ทำการทดลองหาความหนาของกระดาษคาร์บอนที่จะทำให้มีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์ของอากาศโดยการวัดอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านหาความหนาของกระดาษคาร์บอนที่ทำให้เกิดการสูญเสียมากที่สุด ที่ความหนานั้นก็คือความหนาของกระดาษคาร์บอนที่ทำให้มีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์ของอากาศ จากการทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านกับความหนาของกระดาษคาร์บอนดังกราฟ



รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่าน
กับความหนาของกระดาษคาร์บอน

จากการทดลองพบว่าที่ความหนา 0.821 เซนติเมตร จะเกิดการลดทอนของคลื่นสูงสุด ดังนั้นที่ความหนา 0.821 เซนติเมตร จะทำให้อิมพีแดนซ์ของกระดาษคาร์บอนมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของอากาศ จากสมการที่ (6.8) แทนค่า h ด้วย 0.821 เซนติเมตร จะได้

$$\begin{aligned} \sigma &= 1 / (376.7 \text{ ohms} * 0.821 \text{ cm}) \\ &= 0.32334 \text{ 1/ohm-m} \end{aligned} \quad (6.9)$$

6.1.3 เมื่อออกแบบให้กระดาษคาร์บอนมีอิมพีแดนซ์เท่ากับอิมพีแดนซ์ของอากาศแล้วแทนที่คลื่นจะเดินทางเข้ามายังตัวกลางที่ 2 คือกระดาษคาร์บอนทั้งหมด แต่ปรากฏว่าคลื่นจะมีบางส่วนสะท้อนกลับ เนื่องจากมีช่องว่างอยู่ด้านหลังแผ่นคาร์บอน ทำให้คลื่นมองเห็นเป็นอิมพีแดนซ์ของแผ่นคาร์บอนขนานกับอากาศ ทำให้อิมพีแดนซ์ลดลงครึ่งหนึ่ง แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Z_2 &= Z_{carbon} \parallel Z_{space} \\ &= 376.7 / 376.7 \\ &= 188.3 \text{ โอห์ม} \end{aligned} \quad (6.10)$$

แทนค่า $Z_2 = 188.3$ โอห์ม ลงในสมการ (6.9)

$$E_i = \tau E_r = \frac{2 * 188.3}{188.3 + 376.7} E_r \quad (6.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ $E_i = \frac{2}{3} E_r$ ได้รับความรู้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ (6.12) ในด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_r = \rho E_i = \frac{188.3 - 376.7}{188.3 + 376.7} E_i \quad (6.13)$$

$$E_r = -\frac{1}{3} E_i \quad (6.14)$$

6.1.4 จากสมการ (6.12) และสมการ (6.14) จะเห็นว่าคลื่นบางส่วนเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่ 2 และมีคลื่นบางส่วนสะท้อนกลับออกมา แสดงว่าแผ่นความต้านทานไม่สามารถดูดซับคลื่นได้ทั้งหมด จึงออกแบบโดยการนำแผ่นตัวนำสมบูรณ์ (perfect conductor) ไปวางไว้หลังช่องว่างที่มีความยาวเท่ากับเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ (4.4) เมื่อมองอินพุทอิมพีแดนซ์จากหลังกระดาษคาร์บอนไปทางขวามือจะได้

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_i + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_i \tan \beta l} \quad (6.15)$$

เมื่อ β และ l เท่ากับ

$$\beta = 2\pi / \lambda \quad (6.16)$$

$$l = \frac{\lambda}{4} \quad (6.17)$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_i / \tan \beta l + jZ_0}{Z_0 / \tan \beta l + jZ_i} \quad (6.18)$$

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_i} \quad (6.19)$$

เนื่องจากด้านหลังเป็นแผ่นตัวนำสมบูรณ์มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับศูนย์ เมื่อแทนค่า

$$Z_i = 0 \quad (6.20)$$

จะได้

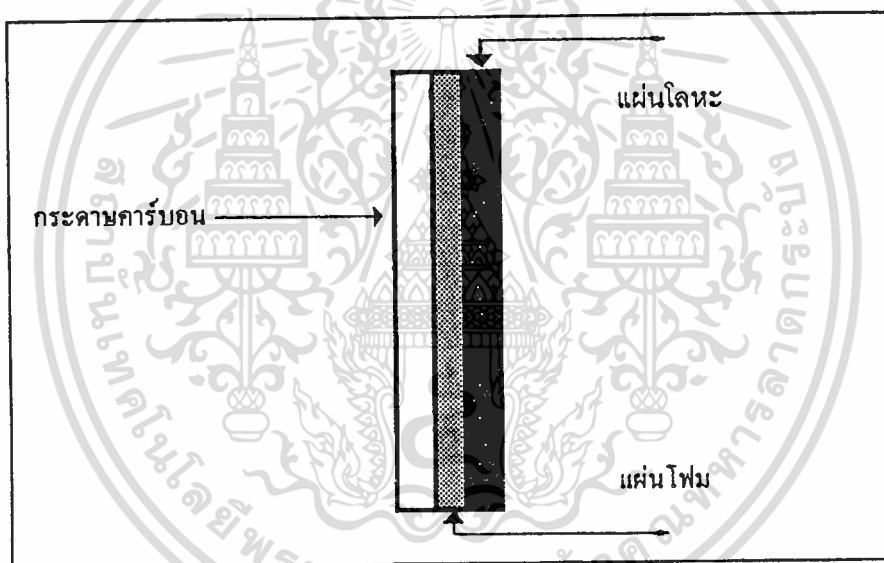
$$Z_{in} = \infty \quad (6.21)$$

ดังนั้นอินพุทอิมพีแดนซ์ที่มองเข้าไปในตัวกลางที่สองจะมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของแผ่นความต้านทานขนานกับอิมพีแดนซ์ที่มีค่าอนันต์ ดังนั้นอิมพีแดนซ์รวมจะมีค่าประมาณเท่ากับอิมพีแดนซ์ของแผ่นความต้านทานซึ่ง

มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของอากาศ ดังนั้นคลื่นจะเดินทางจากตัวกลางที่ 1 เข้าไปยังตัวกลางที่ 2 โดยไม่มีการสะท้อนกลับ

6.2 การออกแบบการสร้างวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

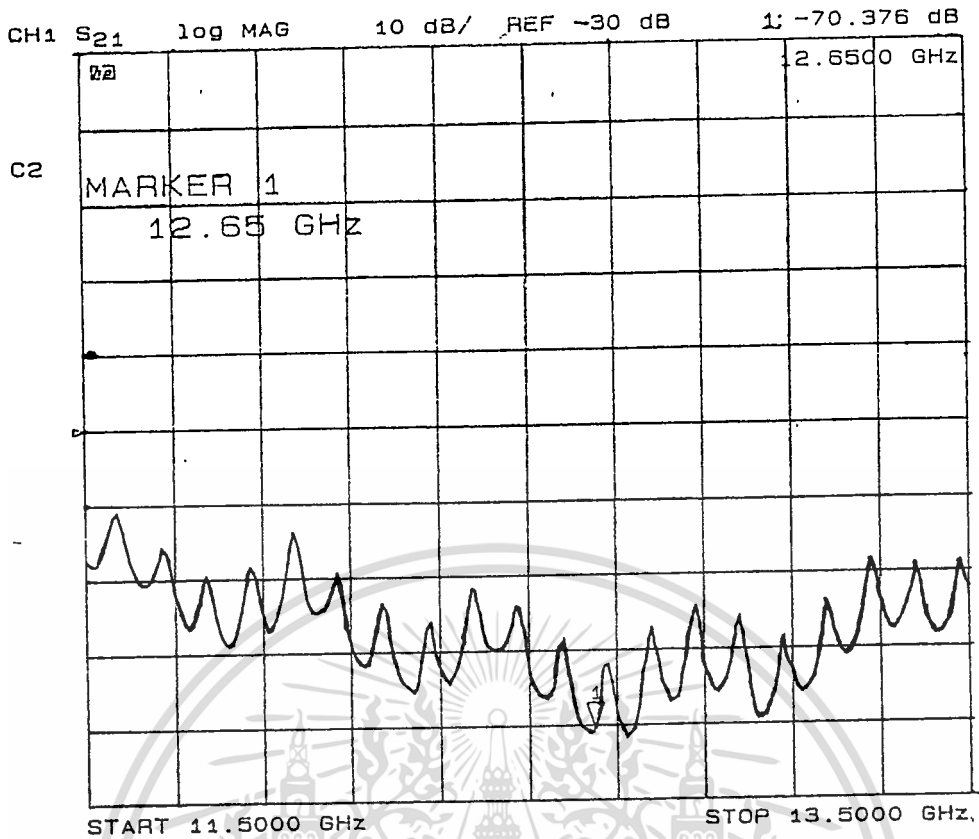
การออกแบบสร้างวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟนี้ จะออกแบบโดยการนำแผ่นตัวนำสมบรูณ์วางไว้หลังแผ่นความต้านทานเป็นระยะเศษหนึ่งส่วนสี่เท่าของความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน ในการออกแบบจะใช้กระดาษคาร์บอนหนา 0.82 เซนติเมตร เป็นแผ่นความต้านทาน และใช้ลู่มีเนียมเป็นแผ่นตัวนำ วางแผ่นลู่มีเนียมหลังกระดาษคาร์บอนเป็นระยะ 0.59 เซนติเมตร (เนื่องจากความถี่ที่ใช้งานเท่ากับ 12.65 กิกะเฮิรท์ ดังนั้นเศษหนึ่งส่วนสี่เท่าของความยาวคลื่นมีค่าเท่ากับ 0.59 เซนติเมตร) ช่องว่างระหว่างกระดาษคาร์บอนกับแผ่นโลหะจะใช้แผ่นโฟม เนื่องจากโฟมเป็นสารไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ใกล้เคียงกับอากาศ ด้านหน้าของกระดาษคาร์บอนยึดด้วยแผ่นโฟมอีก 1 ชั้น เพื่อให้โครงสร้างคงรูปอยู่ได้ แสดงดังรูป



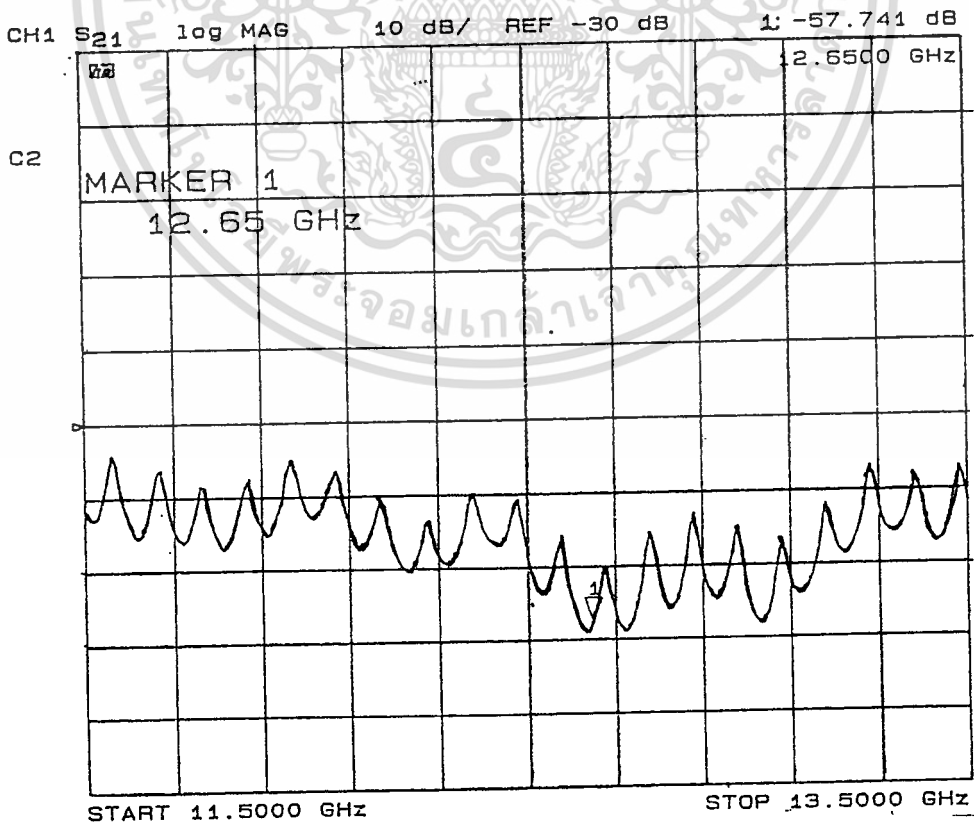
รูปที่ 6.2 แสดงโครงสร้างของวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ (ขนาด 21*33 เซนติเมตร)

จากวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ออกแบบ ทำการปล่อยคลื่นระนาบให้ตกกระทบตั้งฉากกับรอยต่อ วัดอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านได้ -74.93 dB ลักษณะของกราฟจะดังลงที่ความถี่ที่ออกแบบอย่างเห็นได้ชัดเจน แสดงว่าที่ความถี่นี้ วัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟสามารถดูดซับคลื่นได้ดีที่สุด และเมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบแผ่นโลหะวัดอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านได้ -57.74 dB แสดงว่าวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ออกแบบสามารถดูดซับคลื่นได้ประมาณ 17 dB (ใช้โลหะเป็นตัวอ้างอิง)

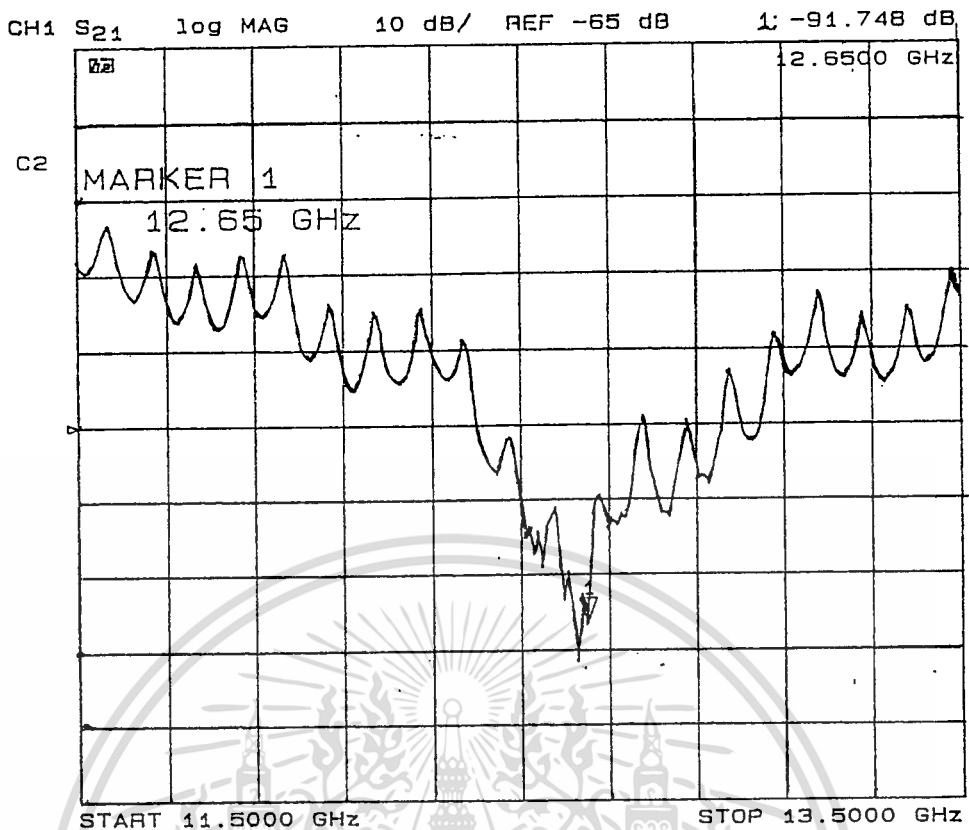
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แสดงอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านที่ความถี่ต่างๆเมื่อปล่อยคลื่นไปในช่องว่างอิสระ



รูปที่ 6.4 แสดงอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านที่ความถี่ต่างๆเมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบแผ่นโลหะ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 แสดงอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านที่ความถี่ต่างๆเมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ (ขนาด 21*33 เซนติเมตร)

ตาราง 6.1 แสดงอัตราการสูญเสียที่ความถี่ 12.65 กิกะเฮิรตซ์ เมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

แผ่นที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	เฉลี่ย
อัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่าน (dB)	-91	-81	-77	-70	-71	-85	-67	-70	-68	-73	-75	-82	-70	-70	-74	74.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟขนาดเล็ก (21*33 เซนติเมตร) มาประกอบเป็นแผ่นขนาดใหญ่แสดงดัง

รูป

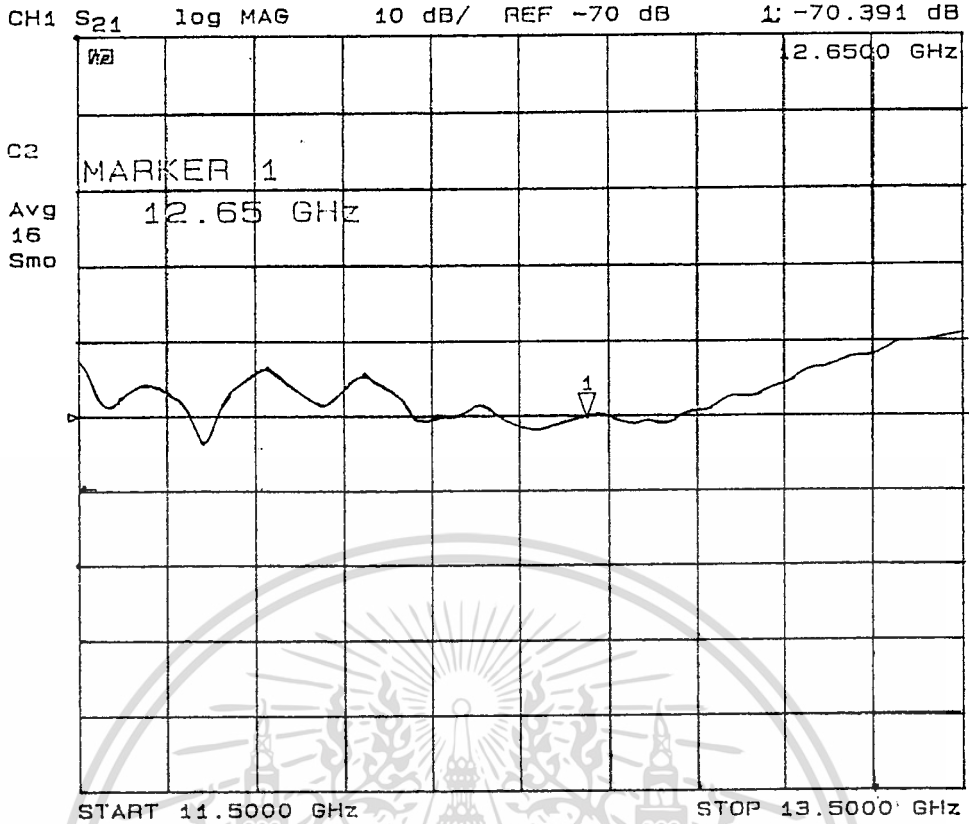


รูปที่ 6.6 วัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟขนาดใช้งานจริง (75*116 เซนติเมตร) บริเวณรอยต่อทำเป็น 2 ชั้นเพื่อป้องกันคลื่นรั่วบริเวณรอยต่อ

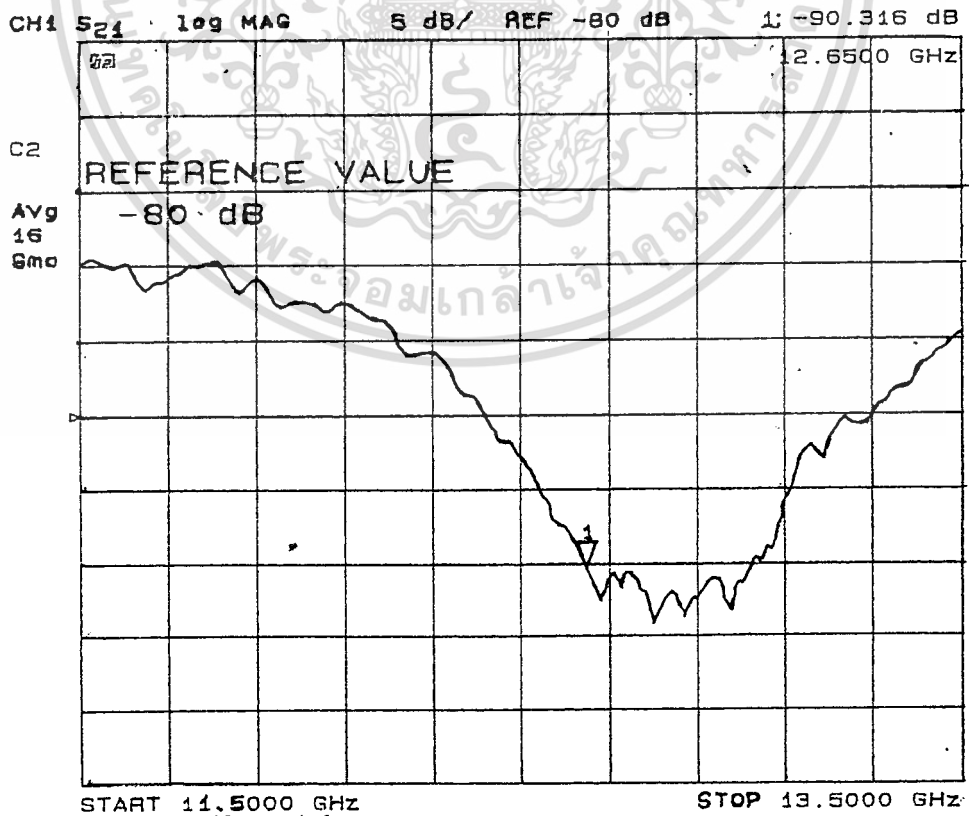


รูปที่ 6.7 แสดงรอยต่อของวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

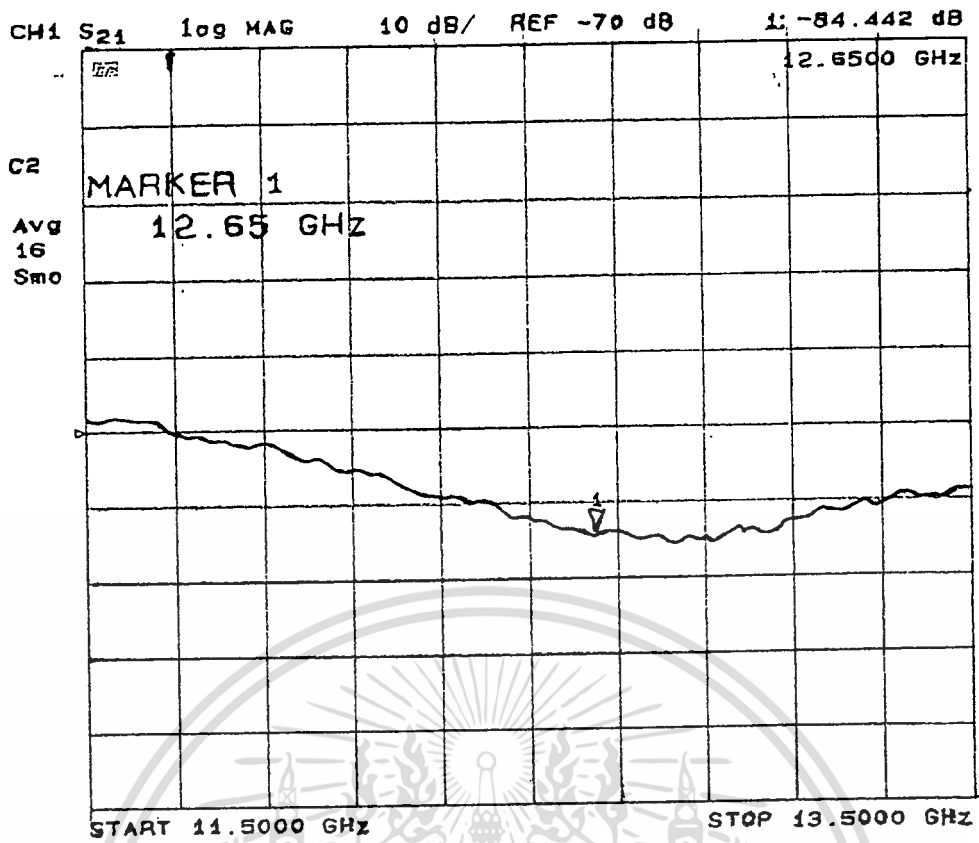
วัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟขนาดใช้งานจริงสามารถดูดซับคลื่นได้ประมาณ 20 dB ดูดซับคลื่นได้ในความถี่ที่ออกแบบที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 แสดงอัตราการใช้สูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านเมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบโลหะ



รูปที่ 6.9 แสดงอัตราการใช้สูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านเมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบวัสดุดูดซับไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกด้านหนึ่งของแผ่นดูดซับ (ขนาด 75*116 เซนติเมตร) เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 แสดงอัตราการสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่านเมื่อปล่อยคลื่นไปตกกระทบวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด

บทที่ 7

การทดลองและผลการทดลอง

7.1 การทดลอง

7.1.1 วัตถุประสงค์

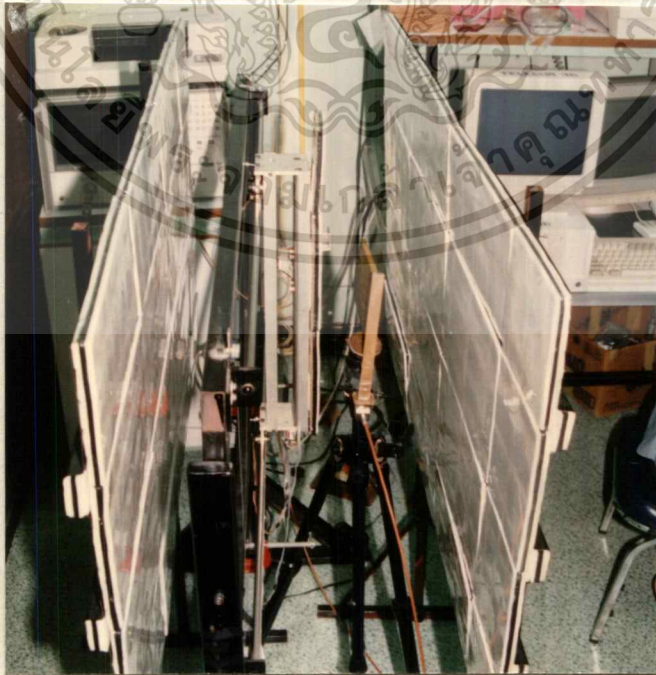
วัตถุประสงค์หลักนี้ไม่ใคร่เฉพาะที่ออกแบบนี้เพื่อวัตถุประสงค์ในการนำมาประกอบการทดลองวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบของสายอากาศแบบร่อง 2 ขนาดคือ 16.2 เซนติเมตรและขนาด 26.5 เซนติเมตรนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวัดสนามระยะใกล้ในกรณีที่ไม่ติดวัตถุประสงค์หลักนี้ไม่ใคร่เฉพาะและเปรียบเทียบผลที่ได้กับแบบรูปของสายอากาศที่ได้จากการวัดสนามระยะใกล้

7.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสนามระยะใกล้

- สายอากาศทดสอบแบบร่อง 2 ตัว คือ ขนาด 16.2 เซนติเมตรและขนาด 26.5 เซนติเมตร
- โพรบที่ใช้วัดเป็นแบบโอเพนเอน เวฟไกด์
- เครื่องสแกนเนอร์
- เน็ทเวิร์ค อานาไลเซอร์
- เครื่องคอมพิวเตอร์
- วัตถุประสงค์หลักนี้ไม่ใคร่เฉพาะ

7.1.3 ขั้นตอนการทดลอง

7.1.3.1. คำนวณหาขนาดของอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่จะทำการทดลองทั้งสองขนาด และทำการต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 7.1

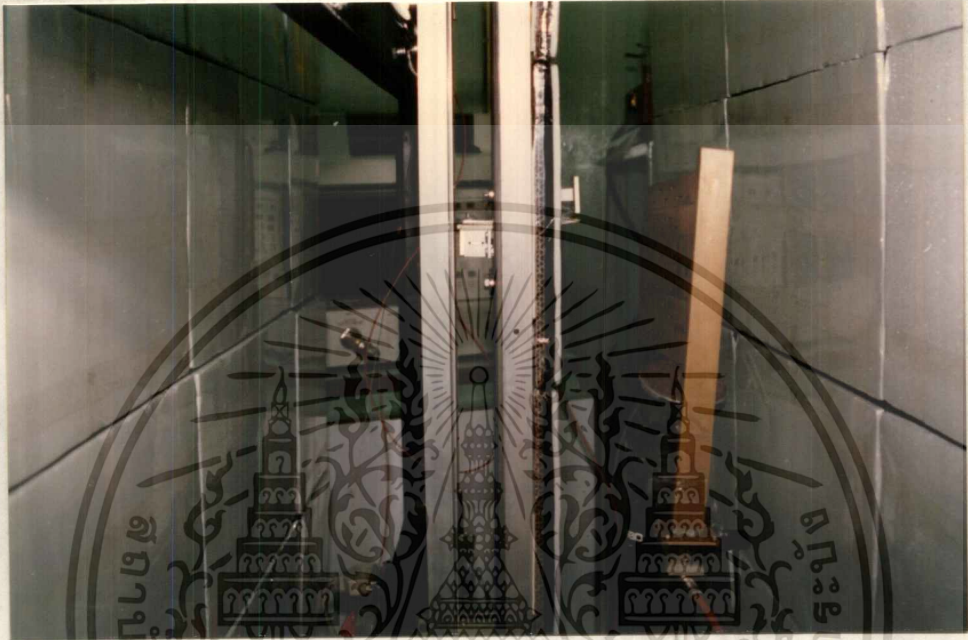


รูปที่ 7.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้สายอากาศทดสอบเป็นตัวส่ง และโพรบเป็นตัวรับสัญญาณ ซึ่งทั้งสองอุปกรณ์นี้จะต่ออยู่กับพอร์ทของเน็ตเวิร์ค อนุไลเซอร์ทั้งคู่ โดยสายอากาศทดสอบที่เป็นตัวส่งจะต่ออยู่กับพอร์ทที่ 1 และโพรบจะต่ออยู่กับพอร์ทที่ 2

7.3.1.2. ติดตั้งวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ด้านหน้าและด้านหลังเครื่องสแกนเนอร์ และที่เครื่องกวาดโพรบ ดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 แสดงการติดตั้งวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟในระบบการวัดสนามระยะไกล

7.3.1.3. ใช้ความถี่ในการทดสอบสายอากาศ 12.65 กิกะเฮิรท์

7.3.1.4. ทำการสแกนโพรบไปบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบ ซึ่งในขณะที่ทำการสแกนไปตามจุดต่างๆก็จะทำการวัดค่าแอมพลิจูดและเฟส ไปเก็บไว้ในไฟล์ข้อมูลในคอมพิวเตอร์

7.3.1.5. นำไฟล์ข้อมูลนี้ไปเข้าโปรแกรมแปลงฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม เพื่อหาข้อมูลสนามระยะไกล

7.3.1.6. นำข้อมูลสนามระยะไกลที่ได้จากการคำนวณมาพล็อตกราฟ

7.3.1.7. กราฟที่ได้จะเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบชนิดนั้น

ค่ามุม θ ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศแบบสนามระยะไกลนี้ใช้มุม 75 องศา

ค่าระยะห่างที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศแบบสนามระยะไกล มีค่าเท่ากับ 2λ (4.743 เซนติเมตร)

สำหรับสายอากาศขนาด 16.2 เซนติเมตร จะทำการวัดสนามระยะไกลเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟห่างจากเครื่องสแกนเนอร์เป็นระยะต่างๆ

สำหรับสายอากาศขนาด 26.5 เซนติเมตร จะทำการวัดสนามระยะไกลเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ห่างจากเครื่องสแกนเนอร์ในระยะที่ได้แบบรูปของสายอากาศที่ดีที่สุด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 ผลการทดลอง

7.2.1. สายอากาศแบบร่อง ขนาด 16.2 เซนติเมตร

$$\text{ขนาดการสแกน} = D + 2Z \tan \theta \quad (7.1)$$

$$= 16.2 + 2(2 * 2.3715)(3.732)$$

$$= 51.602 \text{ เซนติเมตร}$$

$$\text{ทำการวัดที่ทุกระยะ } \lambda/2 = 1.1858 \text{ เซนติเมตร} \quad (7.2)$$

$$\text{จำนวนจุดในการสแกน} = 51.602 / 1.1858 \quad (7.3)$$

$$= 43 \text{ จุด}$$

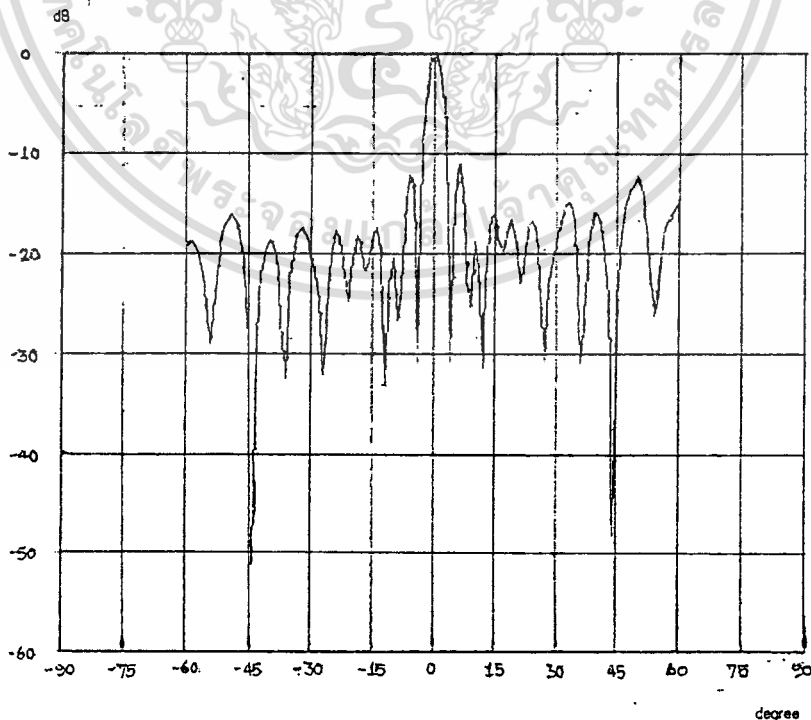
แต่เครื่องสแกนเนอร์สแกนได้มากที่สุดเพียง 28 จุด

$$\text{ดังนั้นจะทำการสแกนในแนวแกน } x = 28 \text{ จุด} \quad (7.4)$$

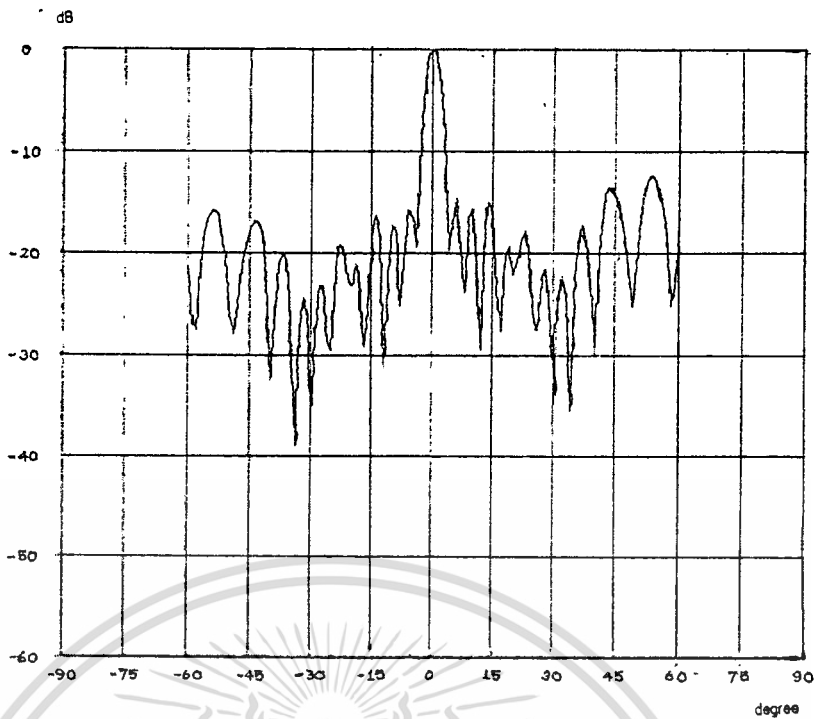
$$\text{และในแนวแกน } y = 28 \text{ จุด} \quad (7.5)$$

$$\text{ดังนั้นจำนวนจุดทั้งหมดในการสแกน} = 28 * 28 = 784 \text{ จุด} \quad (7.6)$$

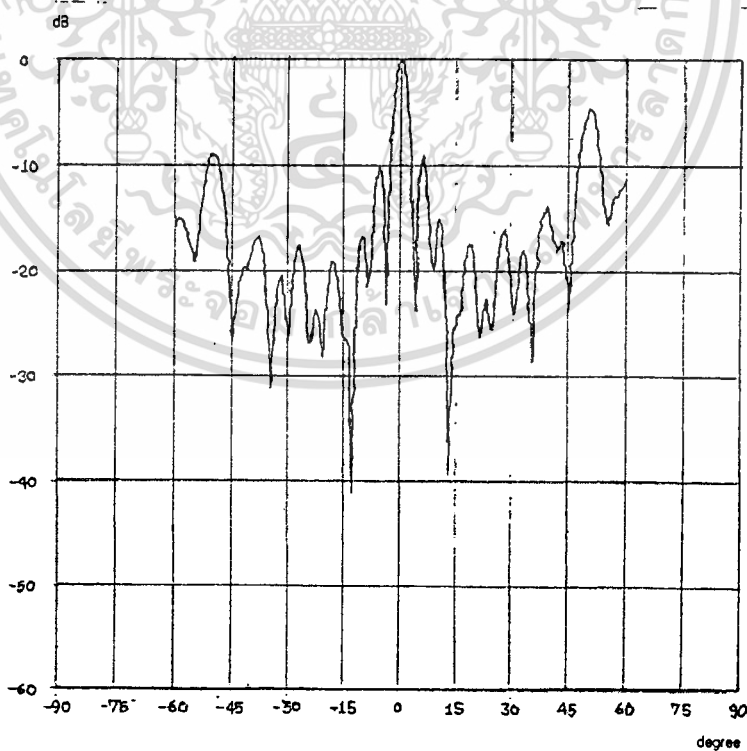
เมื่อทำการทดลองแล้วพบว่าแบบรูปของสายอากาศทดสอบที่ทำการวัดโดยไม่มีวัสดุดูดซับคลื่น กับเมื่อทำการวัดโดยมีวัสดุดูดซับคลื่นที่ระยะต่างๆจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันบริเวณไซดิลอบ คือไซดิลอบที่อยู่ใกล้เมนโลบจะลดลงเมื่อใช้วัสดุดูดซับคลื่นประกอบการวัด และเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ระยะใกล้สุด (22 เซนติเมตร) ระดับไซดิลอบบริเวณใกล้ๆเมนโลบจะลดลงมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะใกล้สุดในการทดลองวัดสายอากาศตัวต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 7.3 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องกรณีไม่มีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ยื่นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

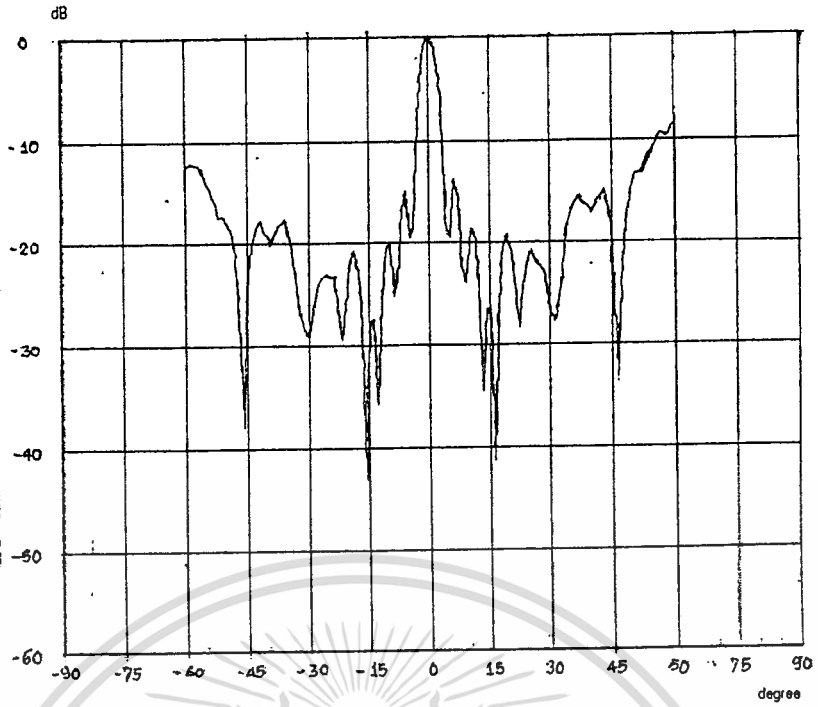


รูปที่ 7.4 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ
ห่างจากสายอากาศรับแก้้เท่าของความยาวคลื่น

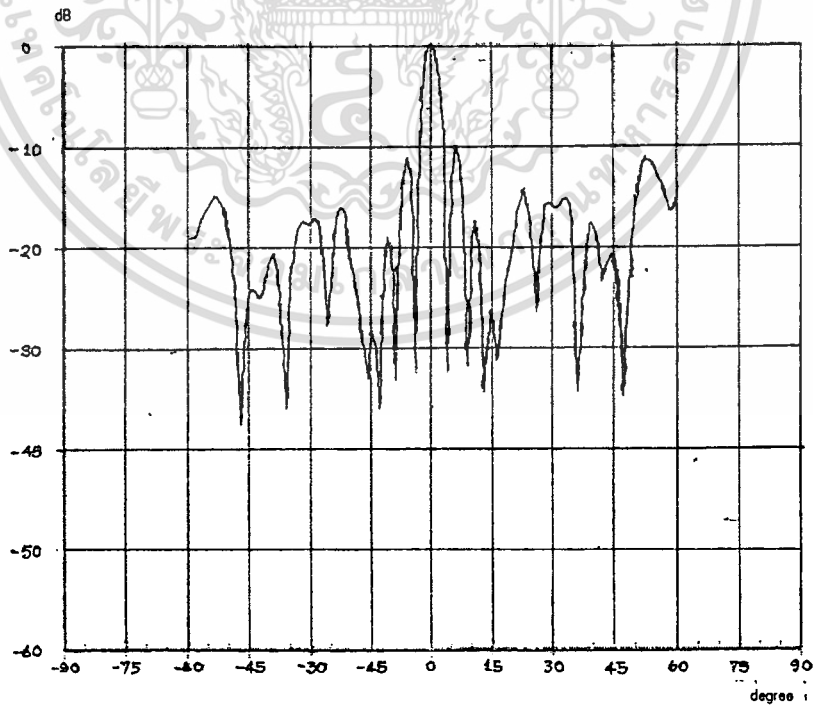


รูปที่ 7.5 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับห่างจากสายอากาศรับสืบท่าของควมยาวคลื่นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



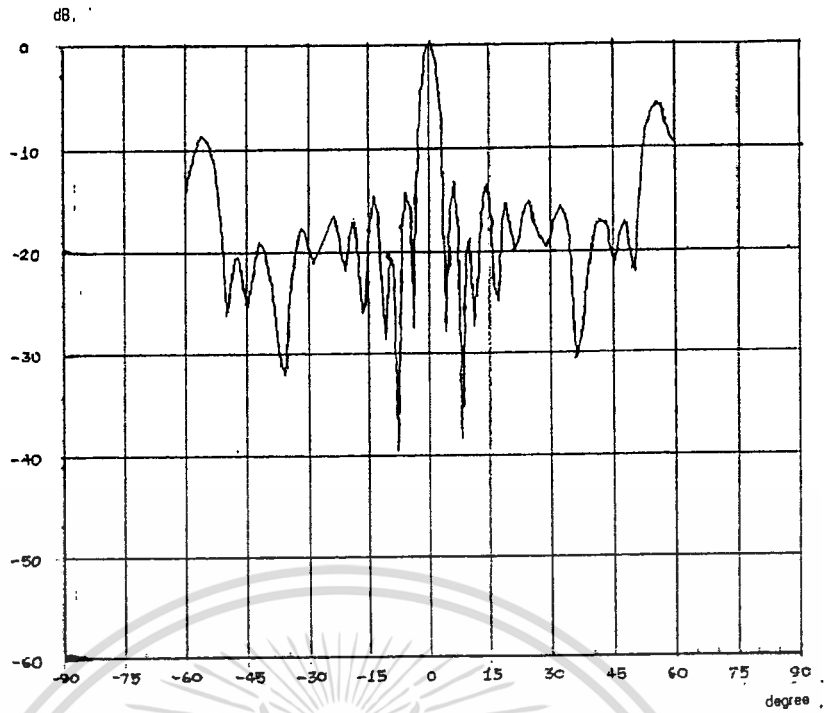
รูปที่ 7.6 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ
ห่างจากสายอากาศทดสอบสิบเอ็ดเท่าของความยาวคลื่น



รูปที่ 7.7 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

ห่างจากสายอากาศทดสอบสิบสองเท่าของความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัย ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์นี้ขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.8 แบบรูปของสายอากาศแบบร่องเมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ
ห่างจากสายอากาศทดสอบสิบสามเท่าของความยาวคลื่น



7.2.2. สายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{ขนาดการสแกน} &= D + 2Z \tan \theta \\ &= 26.5 + 2(2 * 2.3715) (3.732) \\ &= 61.902 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned} \quad (7.7)$$

$$\text{ทำการวัดทุกระยะ } \lambda/2 = 1.1858 \text{ เซนติเมตร} \quad (7.8)$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวนจุดในการสแกน} &= 61.902 / 1.1858 \\ &= 52 \end{aligned} \quad (7.9)$$

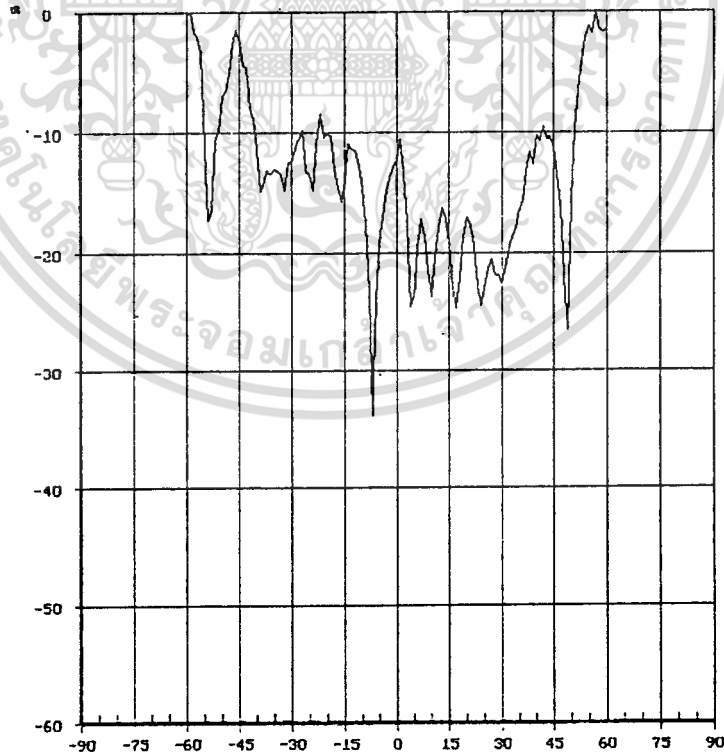
$$\text{แต่เครื่องสแกนอร์ทำการสแกนได้มากที่สุด 28 จุด} \quad (7.10)$$

$$\text{ดังนั้นจะทำการสแกนในแนวแกน } x = 28 \text{ จุด} \quad (7.11)$$

$$\text{และในแนวแกน } y = 28 \quad (7.12)$$

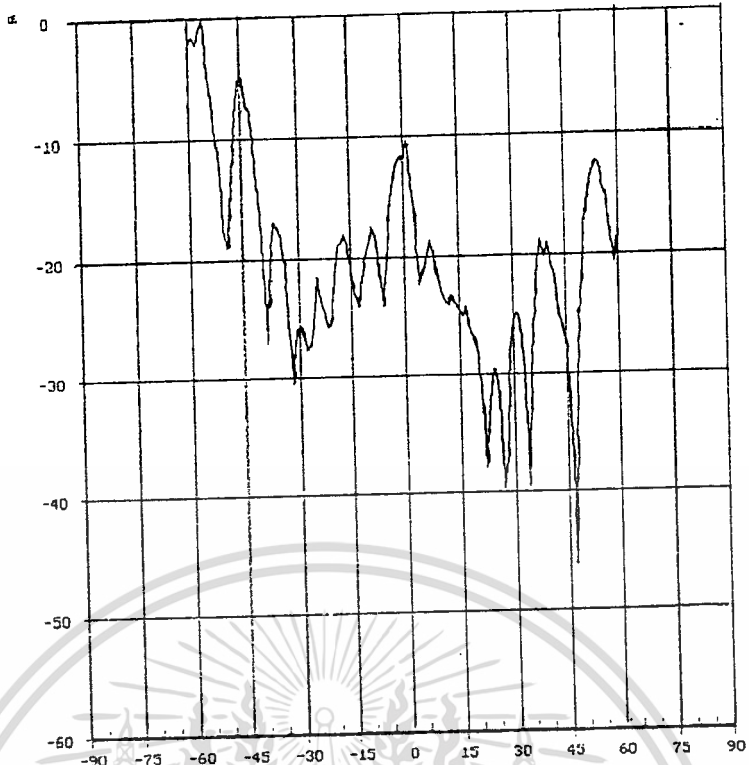
$$\text{ดังนั้นจำนวนจุดในการสแกน } = 784 \text{ จุด} \quad (7.13)$$

เมื่อทำการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบเมื่อมีและไม่มีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ พบว่าแบบรูปของสายอากาศเมื่อมีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟจะมีระดับของเมนโลบสูงกว่าระดับของไซด์โลบ แต่ถ้าไม่มีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟแบบรูปที่ได้ระดับของเมนโลบจะลดลงขณะเดียวกันระดับของไซด์โลบจะเพิ่มขึ้นทำให้มองไม่เห็นความแตกต่างระหว่างเมนโลบและไซด์โลบ และเมื่อเปรียบเทียบแบบรูปของสายอากาศจากการวัดสนามระยะใกล้เมื่อมีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟกับแบบรูปของสายอากาศเมื่อวัดสนามระยะใกล้พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน

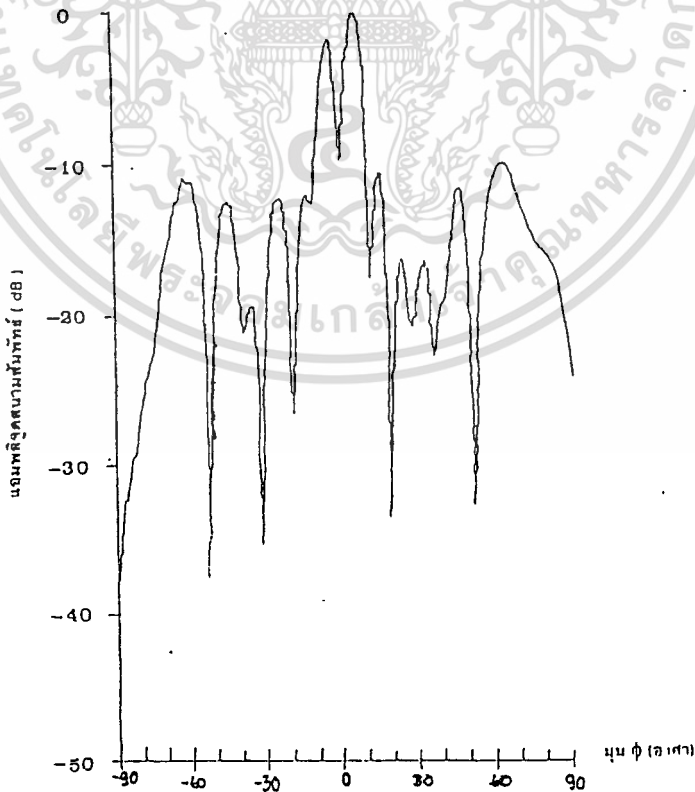


รูปที่ 7.9 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร

ในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อไม่มีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

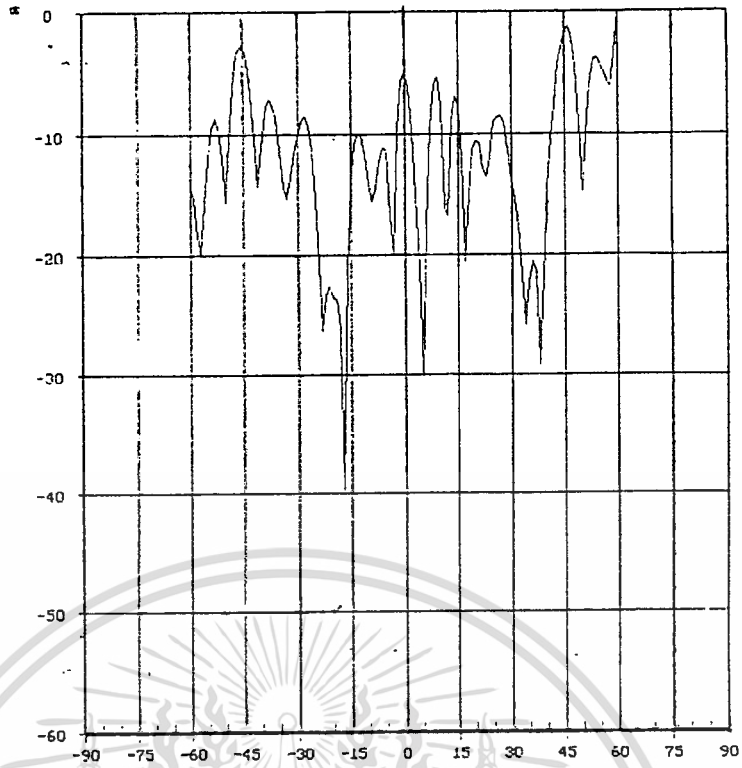


รูปที่ 7.10 แสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร
 ในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อมีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ

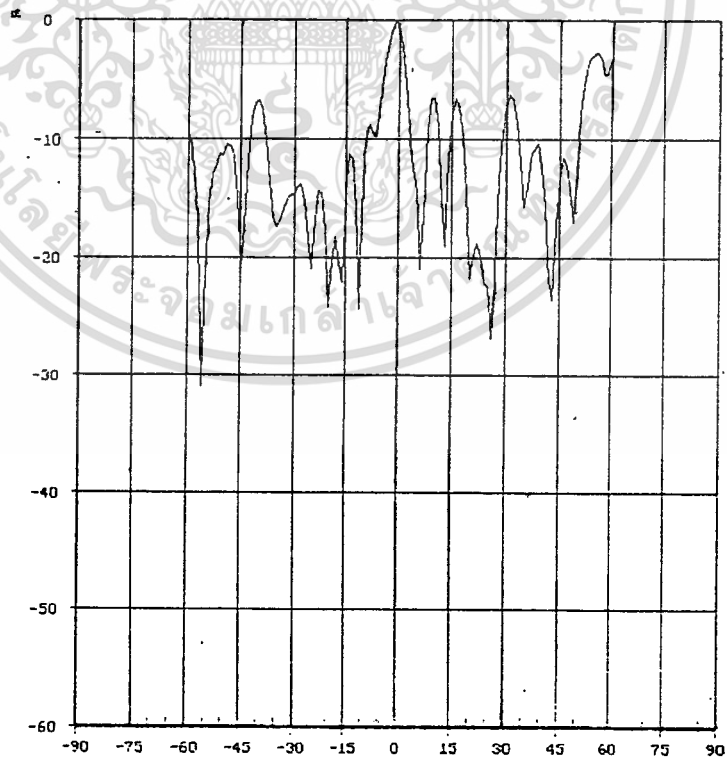


รูปที่ 7.11 แสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในอาคารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อวัดสนามในระยะไกล
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

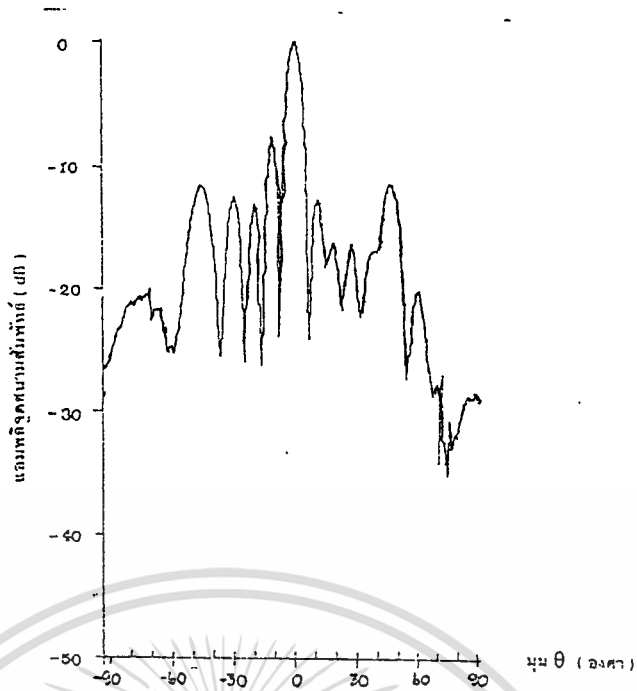


รูปที่ 7.12 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร
 ในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อไม่มีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ 7.13 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อมีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.14 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตร
 ในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อวัดสนามในระยะไกล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

8.1 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดลองวัดแบบรูปของสายอากาศขนาดเล็ก (16.2 เซนติเมตร) จะพบว่าแบบรูปของสายอากาศเมื่อไม่มีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟไซดีโลบจะมีระดับใกล้เคียงกัน และมีระดับต่ำกว่าระดับของเมนโลบ แต่เมื่อมีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟระดับของไซดีโลบบริเวณที่อยู่ใกล้กับเมนโลบจะมีระดับลดลงขณะเดียวกันระดับของเมนโลบมีค่าสูงขึ้นทำให้เห็นความแตกต่างของระดับเมนโลบและไซดีโลบมากขึ้น แต่ไซดีโลบที่ห่างออกไปไกลๆจะมีระดับคงเดิมหรือเพิ่มมากขึ้น (ค่าที่เพิ่มมากขึ้นอาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งโพรบ, การผิดพลาดของข้อมูลเนื่องจากการประมาณค่า, ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งสายอากาศรับและสายอากาศทดสอบ)

เมื่อวางวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ระยะใกล้ๆกับสายอากาศรับระดับของไซดีโลบจะต่ำลง แต่เมื่อวางที่ระยะห่างเพิ่มมากขึ้นลักษณะของแบบรูปของสายอากาศที่ได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับเมื่อทำการวัดโดยไม่มีวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นในการวัดแบบรูปของสายอากาศแบบสนามระยะใกล้ควรติดตั้งวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟในระยะที่ใกล้ที่สุดเพื่อให้วัสดุดูดซับคลื่นสามารถดูดซับคลื่นได้ดีที่สุดและทำให้ประหยัดพื้นที่ในการวัด

จากการทดลองวัดแบบรูปของสายอากาศแบบร่องขนาด 26.5 เซนติเมตรจะพบว่าเมื่อใช้วัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟในระบบการวัดจะทำให้ระดับของไซดีโลบลดลง ระดับของเมนโลบเพิ่มขึ้นทำให้เห็นลักษณะของโลบชัดเจนขึ้น ขณะเดียวกันแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นก็มีลักษณะใกล้เคียงกับเมื่อทำการวัดสนามระยะไกล แสดงว่าวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ออกแบบสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ไม่ต้องการ (เช่น คลื่นที่สะท้อนจากเครื่องมือ, คลื่นรบกวนจากสภาพแวดล้อม) ได้ ทำให้ระบบการวัดสนามระยะใกล้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าระดับของไซดีโลบที่ระยะห่างออกไปยังคงมีระดับที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดสนามระยะไกล ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดหรือวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่ออกแบบไม่สามารถดูดซับคลื่นที่ไม่ต้องการได้ทั้งหมด

8.2 แนวทางการพัฒนา

วัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟชนิดซาลิสบูรี สกรีน ที่ออกแบบสามารถดูดซับคลื่นได้ความถี่เดียวคือเฉพาะความถี่ที่ออกแบบ เมื่อความถี่ของคลื่นเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยความสามารถในการดูดซับคลื่นก็ลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน ดังนั้นจึงควรสร้างวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟให้สามารถดูดซับคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้นี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงความถี่ที่กว้างขึ้นโดยการนำแผนความต้านทานมาเรียงต่อกันหลายๆชั้นซึ่งก็มีทฤษฎีและหลักการ
สร้างที่จะต้องพิจารณาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทแทรกที่ 1

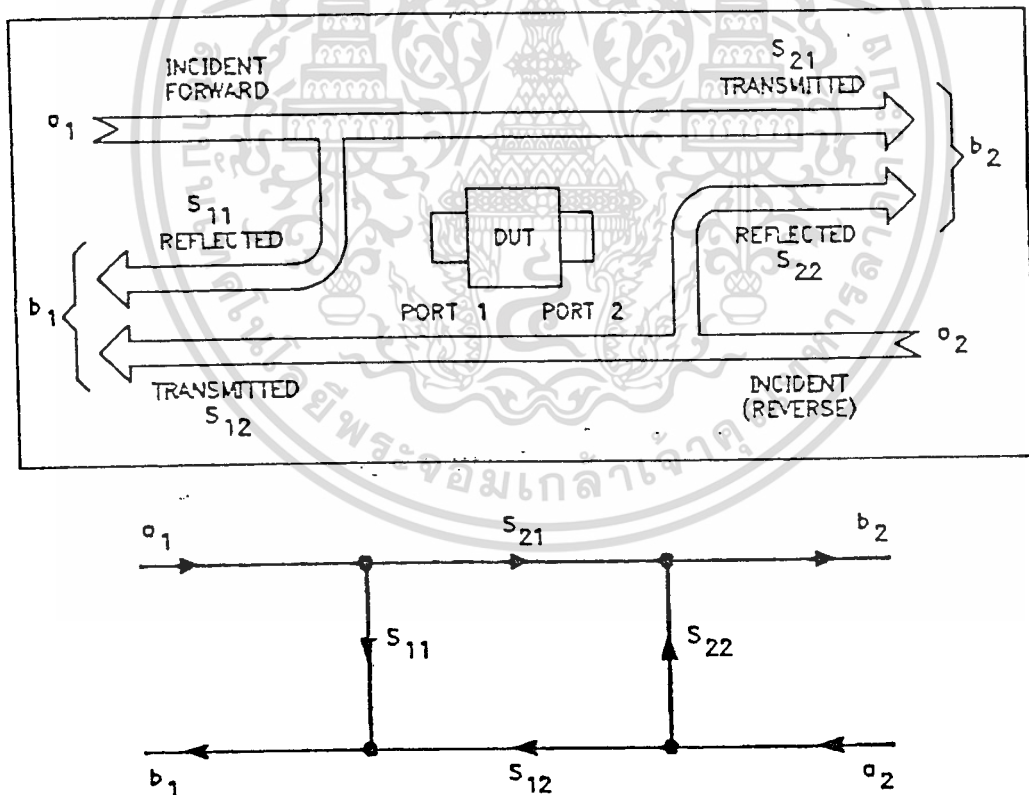
การใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายสำหรับการวัดแบบส่งผ่าน

S พารามิเตอร์

S- พารามิเตอร์ หรือพารามิเตอร์ของการแตกกระจาย (scattering parameters) เป็นข้อตกลงที่ถูกต้องใช้ เป็นลักษณะเฉพาะตัวของอุปกรณ์ที่ใช้ปรับปรุงการไหลของสัญญาณ คำอธิบายคร่าวๆของ S-พารามิเตอร์ คือถูกใช้ในอุปกรณ์ 2 ช่องทาง (two-port device) สำหรับรายละเอียดจะมีอยู่ในคู่มือ AN 95-1 และ AN 154 ซึ่งเป็นเอกสารการประยุกต์ใช้ของเฮวเลตต์-แพคการ์ด (Hewlett-Packard)

S-พารามิเตอร์ เป็นอัตราส่วนของปริมาณเชิงซ้อน 2 ตัวคือ แมกนิจูด (magnitude) และเฟส S-พารามิเตอร์ สามารถแสดงโดยใช้ตัวเลขประกอบเช่น $S_{out\ in}$

ตัวเลขตัวแรก (out) หมายถึง ช่องทางที่สัญญาณออกมาจากอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ (DTU) และตัวเลขตัวที่สอง (in) คือช่องทางที่สัญญาณเกี่ยวเนื่อง ตัวอย่างเช่น S-พารามิเตอร์เป็น S_{21} หมายถึงการวัดอัตราส่วนเชิงซ้อนของสัญญาณที่ออกมาจาก ช่องทางหมายเลข 2 ต่อสัญญาณทางช่องทางหมายเลข 1



รูปที่ 1 แสดง S-พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ 2 ช่องทาง และแสดงภาพการไหลโดยเสมือนของสัญญาณโดย “ a

“ หมายถึง สัญญาณทางเข้า และ “ b “ หมายถึงสัญญาณทางด้านออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

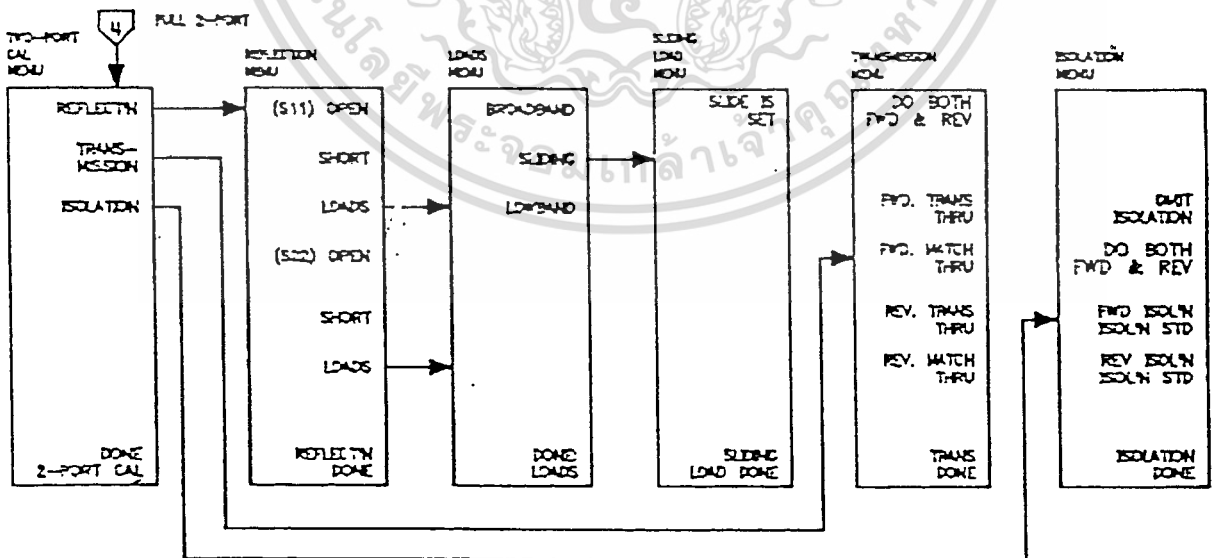
สำหรับการวัดทางฟอร์เวิร์ด (FWD) สัญญาณต้นกำเนิดออกมาทางช่องทางหมายเลข 1 และ สำหรับทางรีเวิร์ด (REV) สัญญาณต้นกำเนิดจะออกมาทางช่องทางหมายเลข 2 ดังตัวอย่างเช่น S_{21} จะมีค่าเท่ากับ $IS_{21} \angle \theta_{21}$ โดย S_{21} จะมีค่าเท่ากับ $E_2 \angle \theta_2$ หาดด้วย $E_1 \angle \theta_1$ โดยค่า S-พารามิเตอร์ ต่างๆจะแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดง S-พารามิเตอร์ชนิดต่างๆ

Measurement	S-Parameter	Test Direction	Signal Path
Input reflection (port 1)	S11	FWD	A/R
Forward gain/loss (transmission)	S21	FWD	B/R
Reverse gain/loss (transmission)	S12	REV	A/R
Output reflection (port 2)	S22	REV	B/R

การปรับตำแหน่งมาตรฐานสำหรับการสะท้อนกลับและส่งผ่านทั้งสองช่องทาง

การปรับตำแหน่งมาตรฐาน (calibration) ที่แสดงในรูปที่ 2 มีความสมบูรณ์และถูกต้องสำหรับทั้ง 4 ตัวของ S-พารามิเตอร์ เป็นวิธีการปรับตำแหน่งมาตรฐานที่แม่นยำที่สุดของการวัดแบบ 2 ช่องทาง ขั้นตอนปฏิบัติดังนี้



รูปที่ 2 รายการสำหรับการปรับตำแหน่งมาตรฐานสำหรับ

การสะท้อนกลับและส่งผ่านทั้งสองช่องทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้ MEASURE RESTART ใน S-พารามิเตอร์ เมนู
- เลือกชนิดของการปรับตำแหน่งมาตรฐานกคปุม CALIBATE MENU ตามด้วย FULL2-PORT ตามด้วย REFLECT'N จากนั้นต่อ open circuit เข้ากับช่องทาง 1 กค (S11) OPEN ซึ่งก็หมายถึงข้อมูลของการเปิดวงจร จะถูกวัด
 - ถอด open circuit ออกแล้วต่อ short circuit เข้าแทนที่ แล้วทำการกค (S11) SHORT ข้อมูลของ SHORT CIRCUIT จะถูกวัด
 - ถอด short circuit ออก แทนที่ด้วย impedance-match load แล้วทำการกค (S11)LOADS ทำการเลือก SLIDE IS SET
 - กคปุม SLIDING LOAD DONE แล้วกคปุม DONE LOADS หลังจากนั้น ทำการวัดแบบ open-short-load ตามที่กล่าวมาข้างต้น แต่ให้เปลี่ยนอุปกรณ์ไปเชื่อมต่อกับช่องทาง 2 และใช้ปุม (S22) softkey เมื่อทำเสร็จ แล้วให้กค REFLECT'N DONE (ถ้ากค DONE โดยไม่ได้ทำการวัดตามมาตรฐานให้ครบ จอภาพจะแสดงข้อความว่า "CAUTION : ADDITIONAL STANDARDS NEED"
 - กค TRANSMISSION แล้วทำการเชื่อมต่อช่องทาง 1 กับช่องทาง 2 โดยใช้อุปกรณ์ที่จะทดสอบอยู่ ระหว่างช่องทาง 1 และช่องทาง 2 กคปุม DO BOTH FWD & REV ตามด้วย TRANS:DONE ต่อจากนั้นถอด การเชื่อมต่อออก เมื่อต้องการความถูกต้องของการแยกจากกัน (isolation) กค AVG ตามด้วย AVERAGING ON แล้วจึงกค CAL ตามด้วย RESUME,CAL SEQUENCE,ISOLATION
 - ทำการต่อ impedance-math loads เข้ากับช่องทาง 1 และ 2 แล้วกค DO BOTH FWE & REV เพื่อทำ การวัดโดยแยกกัน ทั้งทาง forword และทาง reverse จากนั้นกคปุม ISOLATION DONE กคปุมตามด้วย AVERAGING OFF
 - กคปุม CAL ตามด้วย RESUME,CAL SEQUENCE กคปุม DONE 2-PORT CAL (ถ้ากค DONE โดยไม่ มีการวัดตามมาตรฐานที่ครบด้านตามต้องการ จอภาพจะแสดงข้อความ" CAUTION:ADDITIONAL STANDARDS NEEDED") ค่าสัมประสิทธิ์การปรับตำแหน่งมาตรฐานจะถูกคำนวณและเก็บเอาไว้ และจอภาพ จะแสดง "C2" ที่มุมซ้ายของจอแสดงว่า error correction ของ two-port แสดงค่า on

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำข้อมูลต่างๆ และวิจารณ์การทดลอง
มาโดยตลอด ขอขอบคุณ นายสุทธิพล สุทธิศิลป์ นายคมศักดิ์ เมฆสมุทรา นายมนตรี ธนภควัต ที่ช่วยเหลือให้
คำแนะนำในการทดลองและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้อง EMI ทุกท่านที่เอื้อเฟื้ออุปการะการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. R.F. Harrington, "Time-Harmonic Electromagnetic Field".
2. "Table of Dielectric Materials", (Vol.IV, Mass.Inst. Technol, Research Lab. Insulation, Tech.Rept .).
3. Part V of "Dielectric Materials and Applications", Technology Press, M.I.T, Cambridge, Mass, 1954.
4. G.p., Singh P.P., Pran Kishan and Dubey G.C., Lucknow, Solid state Physics Laboratory, Srivastava Road, Timmarpur, Delhi.
5. E.F. Knott and et.al., "Radar Cross Section", Dedham. MA. Artech House, 1985.
6. P.A. Rizzi, "Microwave Engineering", Practice Hall, Inc. A Division of Simal&Schuster Englewood Cliffs, NT 07632, 1988.
7. J.D. Kraus, "Electromagnetics", Forth Edition, McGRAW-HILL INTERNATIONALEDITION, 1991.
8. J.W. Crispin, Jr. and K.M. Siegel, "Method of Radar Cross-Section Analysis", Academic Press New York and London , 1968.
9. E.F. Knott, "Radar Cross Section Measurement", Van Nos Trad Feinhold, 1993.
10. A.K. Bhattacharyya, D.L. Sengupta, "Radar Cross Section Analysis&Control", Artech House, Inc, 1991.
11. E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley, "Radar Cross Section", Artech House, Inc, 1995.
12. R.G. Carter, "Electromagnetic Waves Microwave components and devices", Chapman and Hall, 1990.
13. C.A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons, 1989.
14. จเร สุวัฒน์ปัญญา ผศ. ดร., "วิศวกรรมแม่เหล็กไฟฟ้า", ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้