

### บทที่ 3

#### ผลการวิเคราะห์ของงานวิจัย

##### ความนำ

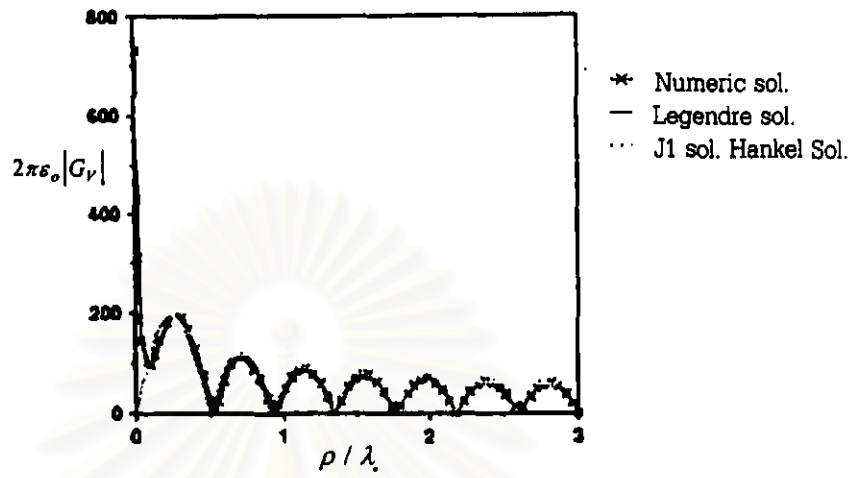
ในบทนี้เป็นกรนำเสนอผลการวิเคราะห์ที่ได้จากทฤษฎีในบทที่ 2 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้โปรแกรม Matlab Version 4.2c บนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows เป็นโปรแกรมคำนวณผลการจำลองแบบ และได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์ของนักวิจัยในอดีต รวมทั้งผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม EE. Sof. และผลการทดลองวัดวงจรตัวอย่างของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริป

ผลการวิเคราะห์ในบทนี้สามารถจำแนกออกได้ดังนี้

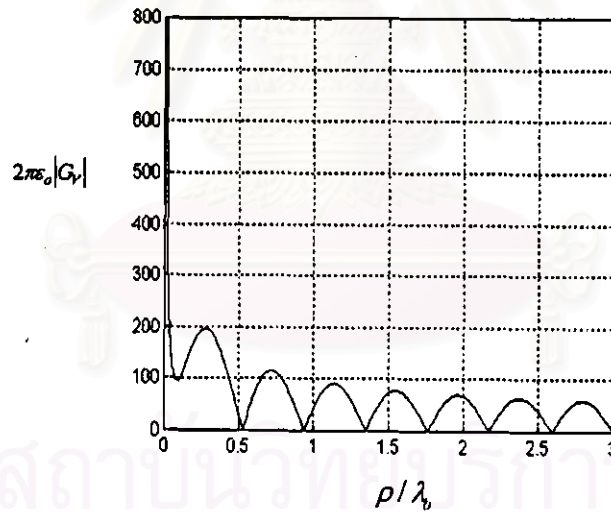
1. ผลการวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันของกรีนโดยใช้เทคนิคการอินทิเกรตสำหรับอินทิกรัลซอมเมอร์เฟลด์ ซึ่งได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์ของ Marchetti และ Citerne (1993)
2. ผลการวิเคราะห์หาค่า  $S_{11}$  และ  $S_{21}$  ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปจากผลการวิเคราะห์ของวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์ของงานวิจัยของ Randall (1995) และโปรแกรม EE. Sof.
3. ผลการทดลองวัดหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (voltage standing-wave ratio) VSWR และ  $S_{21}$  ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปจากวงจรตัวอย่างที่สร้างขึ้น

##### ผลการวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันของกรีน

จากทฤษฎีและเทคนิคการอินทิเกรตสำหรับอินทิกรัลซอมเมอร์เฟลด์ที่อธิบายในบทที่ 2 สามารถนำมาหาค่าฟังก์ชันของกรีนและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์ของ Marchetti และ Citerne (1933) สำหรับกรณีไมโครสตริปมีความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก  $h$  มีค่าเท่ากับ 0.635 mm. , ความถี่ใช้งาน  $f$  เท่ากับ 30 GHz. และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  เท่ากับ 9.9 ได้ดังรูปที่ 3.1 ก. และ 3.1 ข. แสดงค่าสัมพัทธ์ของฟังก์ชันของกรีน และ รูปที่ 3.2 ก. และ 3.2 ข. แสดงค่าเฟสของฟังก์ชันของกรีน



ก.

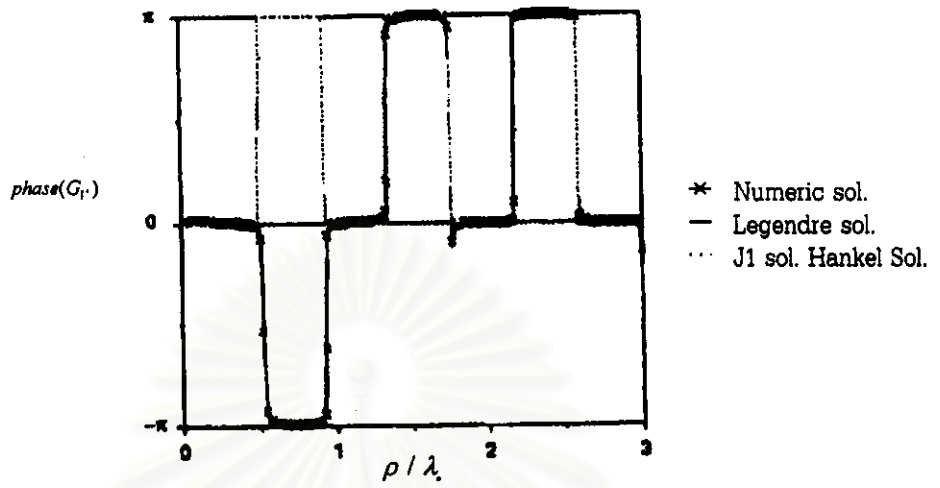


ข.

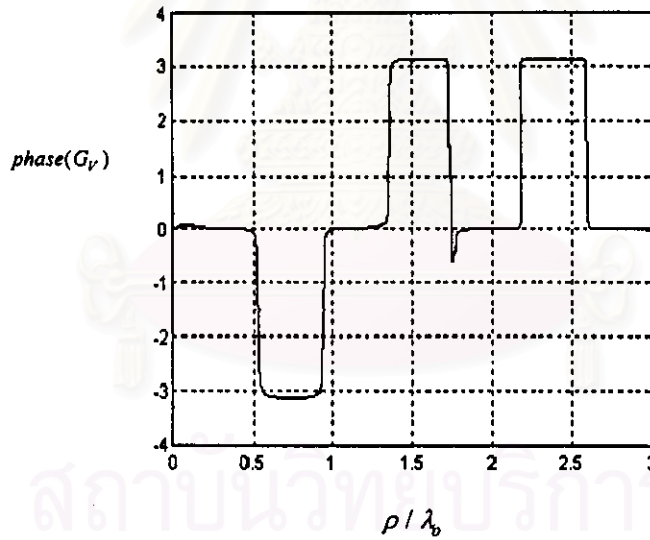
รูปที่ 3.1 ค่าสัมพันธของฟังก์ชันของกรีนชนิดสเกลาร์

ก.) จากผลการวิเคราะห์ของ Marchetti และ Citerne (1993)

ข.) จากผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการอินทิเกรตสำหรับอินทิกรัล  
ซอมเมอร์เฟลด์



ก.



ข.

รูปที่ 3.2 ค่าเฟสของฟังก์ชันของกรีนชนิดสเกลาร์

ก.) จากผลการวิเคราะห์ของ Marchetti and Citerne (1993)

ข.) จากผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการอินทิเกรตสำหรับอินทิกรัล

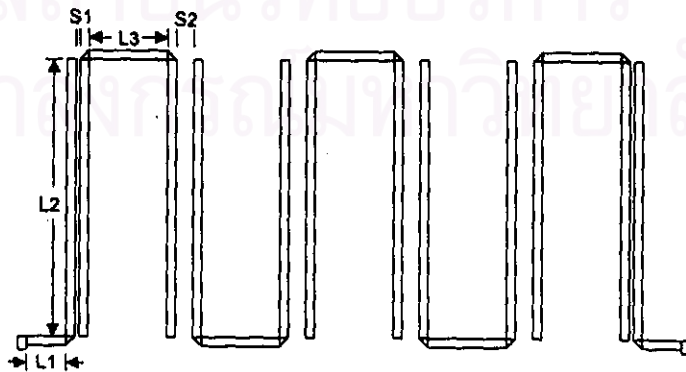
ซอมเมอร์เฟลด์

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ค่าฟังก์ชันของกรีนที่ได้จากการใช้เทคนิคการอินทิเกรตสำหรับอินทิกรัลซอมเมอร์เฟลด์ ถูกต้องเหมือนกับผลการวิเคราะห์ของ Marchetti และ Citerne ทั้งขนาดและเฟส แต่จะมีผลที่แตกต่างกันบ้างเล็กน้อยที่บริเวณค่า  $\rho$  เข้าใกล้ศูนย์

### ผลการวิเคราะห์ค่า S11 และ S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แอร์พินไลน์ไมโครสตริบ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แอร์พินไลน์ไมโครสตริบ โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์ของงานวิจัยในอดีต Randall (1995) ซึ่งมีทั้งผลการวิเคราะห์จากการจำลองแบบและผลจากการทดลอง นอกจากนี้งานวิจัยของ Randall แล้ว ยังได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม EE. Sof. รวมทั้งผลจากการทดลองวัดวงจรตัวอย่างที่สร้างขึ้น

ผลการวิเคราะห์ของ Randall (1995) ได้จากการใช้โปรแกรมการจำลองแบบ Super Star แผนภาพของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แอร์พินไลน์ไมโครสตริบสำหรับแอร์พินไลน์เรโซเนเตอร์ 5 อันดับ แสดงในรูปที่ 3.3 ความกว้างของสายแถบแคบ (strip line) เท่ากับ 32.44 มิล (1 มิล เท่า 1/1000 นิ้ว) ความยาวของสายป้อน L1 เท่ากับ 141.082 มิล , ความยาวของขาแอร์พินไลน์เรโซเนเตอร์ L2 เท่ากับ 965.961 มิล , ระยะห่างระหว่างสายป้อนกับขาที่หนึ่งของแอร์พินไลน์เรโซเนเตอร์ตัวที่หนึ่ง S1 เท่ากับ 9.59137 มิล , ระยะห่างระหว่างขาทั้งสองของแอร์พินไลน์เรโซเนเตอร์ L3 เท่ากับ 282.164 มิล และระยะห่างระหว่างขาที่สองของแอร์พินไลน์เรโซเนเตอร์ตัวที่หนึ่งกับขาที่หนึ่งของแอร์พินไลน์เรโซเนเตอร์ตัวที่สอง S2 เท่ากับ 53.4191 มิล ผลการวิเคราะห์สำหรับความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก h เท่ากับ 25 มิล , ความถี่ใช้งาน 1.27 GHz. , ความกว้างแถบ (bandwidth) เท่ากับ 40 MHz. , ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  เท่ากับ 6.00 และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย  $\tan \delta$  เท่ากับ 0.0004

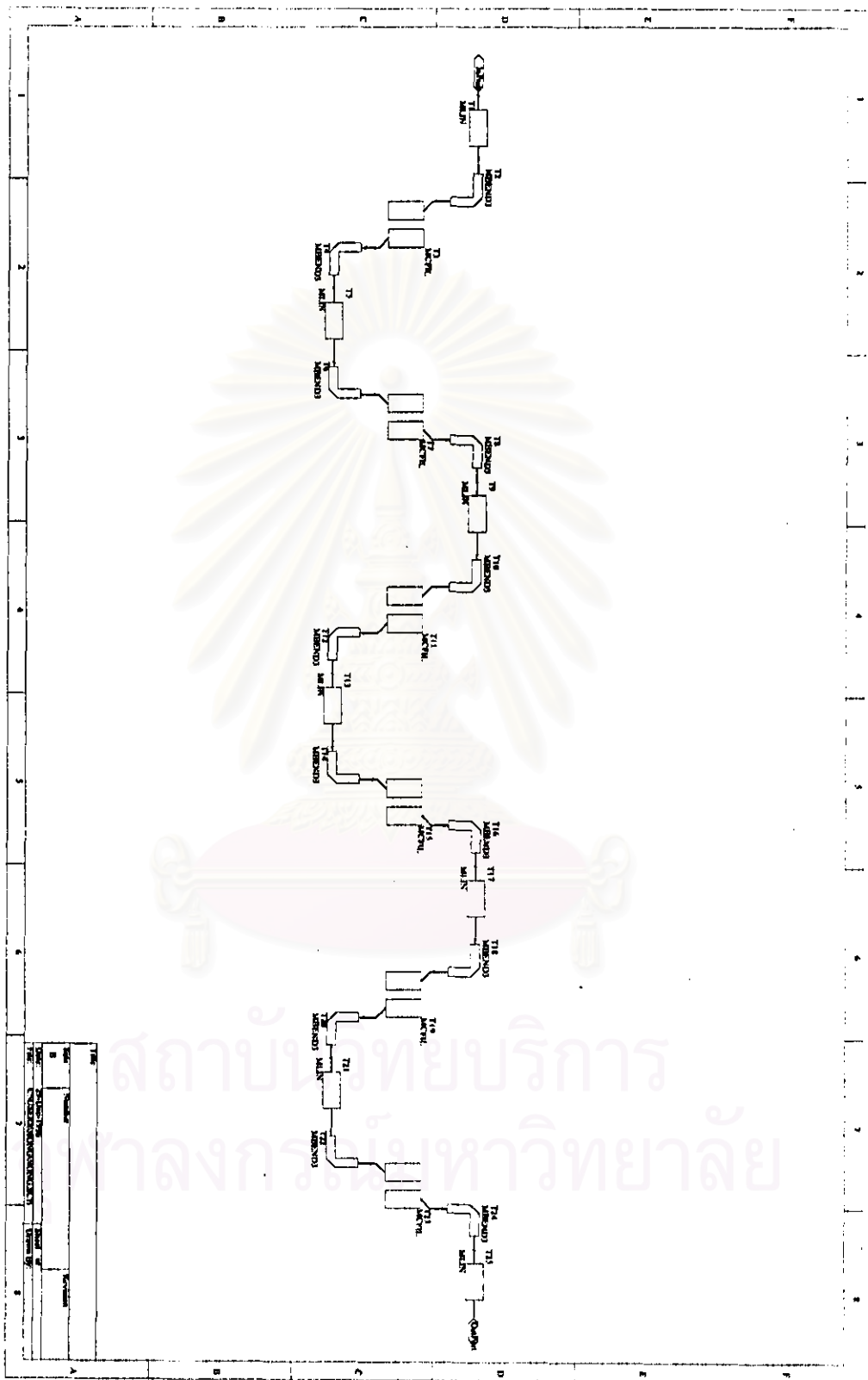


รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรกรองผ่านแถบความถี่แอร์พินไลน์ไมโครสตริบ

ผลการวิเคราะห์หาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) S11 และ ค่าการสูญเสียการส่งผ่าน (transmission loss) S21 จากการใช้โปรแกรมการจำลองแบบของ Randall แสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.6 และผลการทดลองวัดหาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) S11 และ ค่าการสูญเสียการส่งผ่าน (transmission loss) S21 จากวงจรตัวอย่างของ Randall แสดงในรูปที่ 3.7

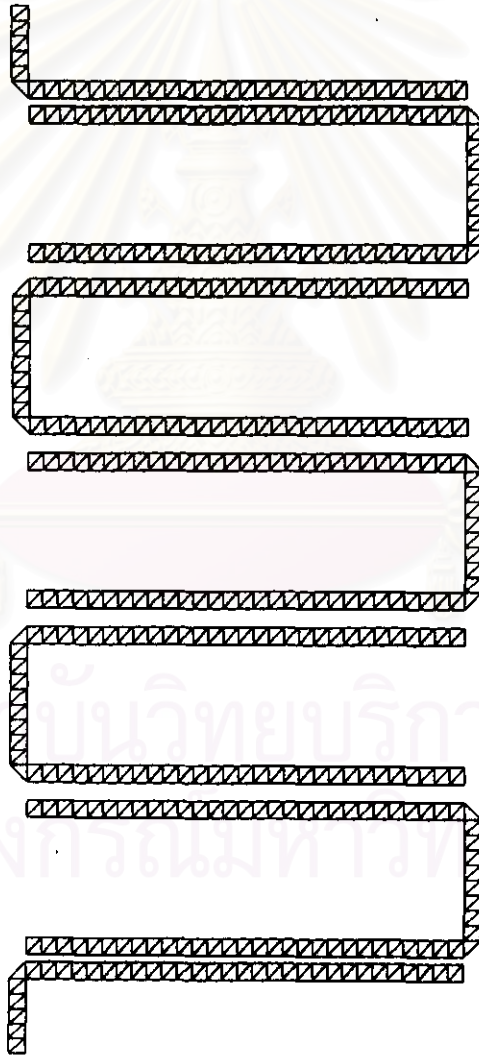
ผลการวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปโดยใช้โปรแกรม EE. Sof. เริ่มจากการวาดแผนภาพของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปจากชิ้นส่วนวงจรใน EE. Sof. Library พร้อมกับใส่ค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่ต้องการออกแบบ โดยใช้โปรแกรม Protel Advanced Schematic เป็นโปรแกรมวาดแผนภาพ ดังรูปที่ 3.4 ลำดับต่อไปทำการเชื่อมต่อแผนภาพของวงจรกับส่วนของโปรแกรม Libra ซึ่งทำหน้าที่แปลงแผนภาพเป็นรหัสต้นฉบับ (source code) ที่ใช้ออกแบบวงจร ดังแสดงในภาคผนวก ข. รหัสต้นฉบับนี้สามารถแก้ไขและเพิ่มเติมค่า พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบได้ เช่น ความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก ความถี่ใช้งาน ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย และค่าที่ต้องการทราบ เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปค่าที่ต้องการทราบคือ S11 และ S21 การวิเคราะห์หาค่า S11 และ S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปในรูปที่ 3.3 จากผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม EE. Sof. แสดงค่า S11 และ S21 ได้ดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.6

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 แผนภาพของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป

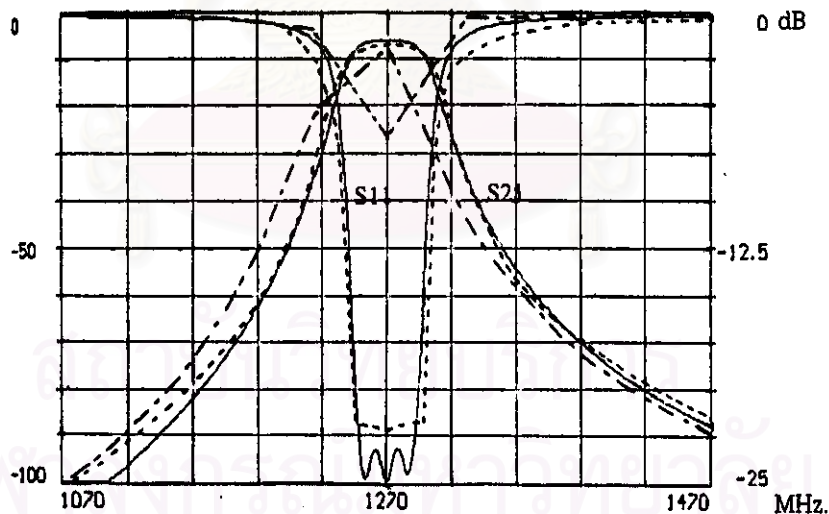
ผลการวิเคราะห์วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริบโดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะสามารถหาค่า S11 และ S21 ได้จากค่าการกระจายความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าบนแผ่นตัวนำโดยใช้วิธีการไม่ยืดติดของพารามิเตอร์โครงข่าย สำหรับโครงสร้างและพารามิเตอร์ในรูปที่ 3.3 สามารถแบ่งพื้นผิวตัวนำด้วยพื้นที่เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งมีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 880 ชิ้น และจำนวนขอบเท่ากับ 1623 ด้าน ค่า S11 และ S21 ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงในตารางที่ 3.1, รูปที่ 3.6 และ 3.7 ซึ่งได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยของ Randall และผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม EE. Sof.



รูปที่ 3.5 การแบ่งพื้นผิวของลายวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริบ ด้วยพื้นที่เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

	MPIE& FEM	Randall's result	EE. Sof.	MPIE& FEM	Randall's result	EE. Sof
FREQ-GHz.	dB[S11]	dB[S11]	dB[S11]	dB[S21]	dB[S21]	dB[S21]
1.07000	-0.188	-0.180	-0.187	-100.000	-100.000	-100.000
1.12000	-0.248	-0.252	-0.250	-88.853	-93.486	-88.838
1.17000	-0.452	-0.454	-0.453	-69.998	-74.532	-66.124
1.22000	-5.025	-4.989	-3.159	-37.119	-37.025	-23.879
1.27000	-89.920	-99.899	-28.200	-5.940	-5.899	-7.960
1.32000	-5.024	-4.989	-0.705	-37.118	-37.025	-47.076
1.37000	-3.786	-1.454	-0.301	-63.752	-63.988	-69.366
1.42000	-2.052	-1.252	-0.219	-79.887	-79.989	-82.246
1.47000	-2.049	-0.225	-0.190	-84.769	-88.473	-90.786

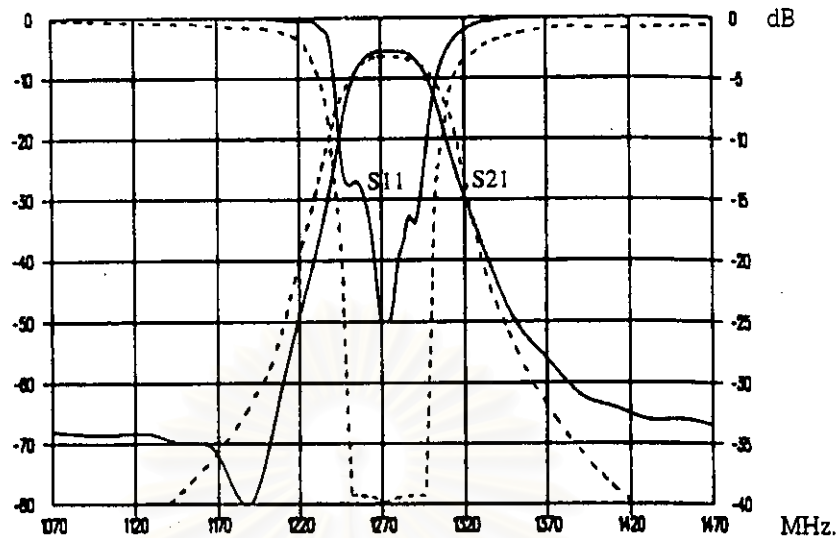
ตารางที่ 3.1 ค่า S11 และ ค่า S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป



รูปที่ 3.6 ค่า S11 และ S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์พินไลน์ไมโครสตริป

- จากผลการวิเคราะห์ของ Randall
- - - จากผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม EE. Sof.
- ..... จากผลการวิเคราะห์ของวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์





รูปที่ 3.7 ค่า S11 และ S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริป

— จากผลการทดลองของ Randall

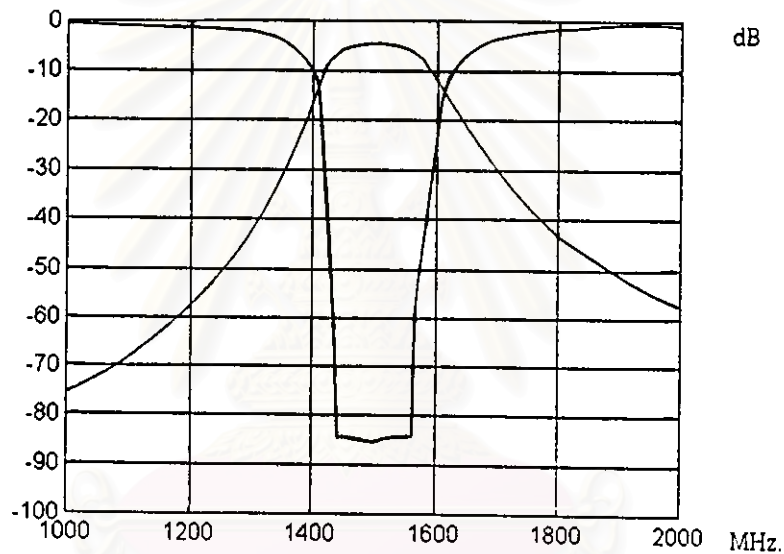
... จากผลการวิเคราะห์ของวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์

จากตารางที่ 3.1 และกราฟในรูปที่ 3.6 พบว่าผลการวิเคราะห์ค่า S11, S21 และค่าความกว้างแถบที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าเท่ากับ  $-89.92$  dB.,  $-5.94$  dB. และ  $38.5$  MHz. ตามลำดับ ที่ความถี่ค่ากลาง (center frequency)  $1.27$  GHz. แต่ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม EE. Sof. มีค่า S11, S21 และค่าความกว้างแถบเท่ากับ  $-28.2$  dB.,  $-7.96$  dB. และ  $35$  MHz. ตามลำดับ ที่ความถี่ค่ากลาง  $1.268$  GHz. และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยของ Randall มีค่า S11, S21 และค่าความกว้างแถบเท่ากับ  $-99.899$  dB.,  $-5.899$  dB. และ  $40$  MHz. ตามลำดับ ที่ความถี่ค่ากลาง  $1.27$  GHz. จากผลการวิเคราะห์ที่ได้โดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์จะเห็นว่าสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของ Randall อาจมีค่าผิดพลาดอยู่บ้างที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของความกว้างแถบ ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.1 แต่ที่บริเวณความถี่ค่ากลาง ค่าที่ได้สอดคล้องกันดี สำหรับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม EE. Sof. จะแตกต่างจากผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่ผลที่ได้ก็ไม่แตกต่างกันมากนักโดยแนวโน้มของกราฟยังคงสอดคล้องกันอยู่ เฉพาะค่า S11 จะมีความแตกต่างกันมากที่สุด ทั้งนี้อาจเกิดจากการกำหนดจุดน้อยเกินไปในการวาดกราฟของผู้ใช้โปรแกรม EE. Sof.

จากกราฟในรูปที่ 3.7 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองของ Randall กับผลการวิเคราะห์ที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้น่าเสนอ ค่า S11, S21 และค่าความกว้างแถบเท่ากับ  $-50$  dB.,  $-5.85$  dB. และ  $38.6$  MHz. ตามลำดับ ที่ความถี่ค่ากลาง จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ในกราฟรูปที่ 3.7 ของวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดลองของ Randall แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธี

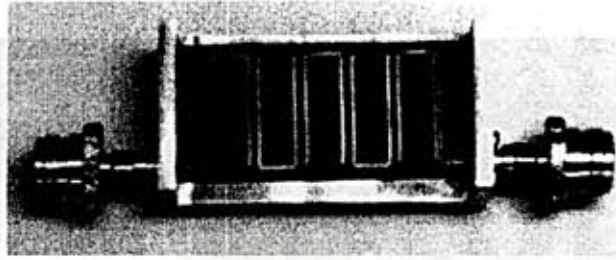
สมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสอดคล้องกับผลการทดลองของ Randall โดยเฉพาะค่า S21 ที่บริเวณ -3 dB. ของค่าความกว้างแถบ แต่จะมีค่า S11 ที่แตกต่างกันบริเวณความถี่ค่ากลาง

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้ทําวิจัยได้สร้างวงจรตัวอย่างของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปสำหรับโครงสร้างและพารามิเตอร์ในรูปที่ 3.3 แต่ใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของชั้นไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.00 แทนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เท่ากับ 6.00 ผลการวิเคราะห์ค่า S11 และ S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปโดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เท่ากับ 4.00 แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ค่า S11 และ S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปจากผลการวิเคราะห์โดยใช้วิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เท่ากับ 4.00

สำหรับโครงสร้างและพารามิเตอร์ในรูปที่ 3.3 (แต่ใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เท่ากับ 4.00 แทนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เท่ากับ 6.00) สามารถสร้างวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปแบบมีการเชื่อมร่วมได้ดังรูปที่ 3.9 ตัวต่อ (connector) ที่ใช้ในการทดลองคือตัวต่อชนิด SMA-PR (ภาคผนวก ง.) และใช้ตัวปรับต่อ (adaptor) ชนิด SMA เป็น ชนิด N เพื่อเชื่อมต่อวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์เข้ากับเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรดังรูปที่ 3.9



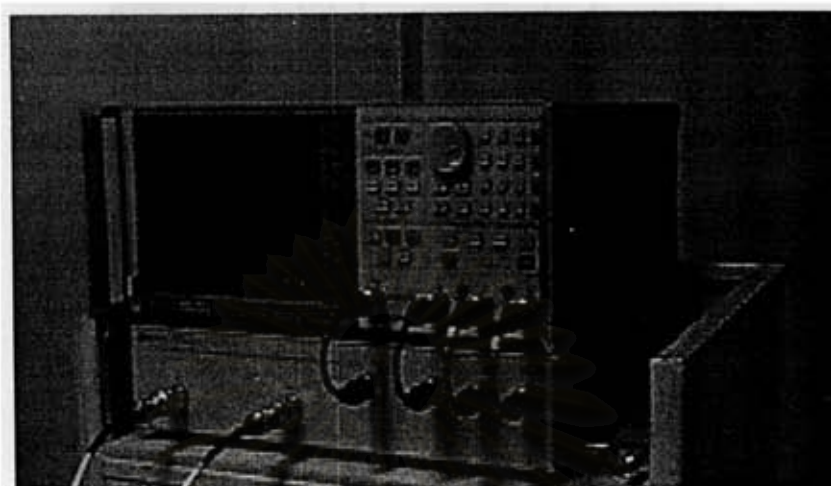
รูปที่ 3.9 วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปที่สร้างขึ้น



รูปที่ 3.10 วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปและ  
กล่องครอบป้องกันสัญญาณรบกวน



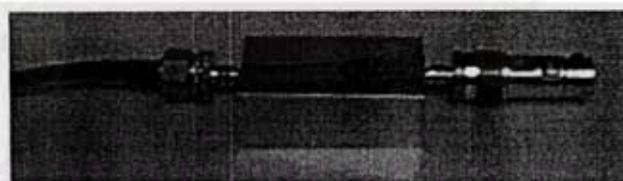
รูปที่ 3.11 วงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปพร้อม  
กล่องครอบป้องกันสัญญาณรบกวน



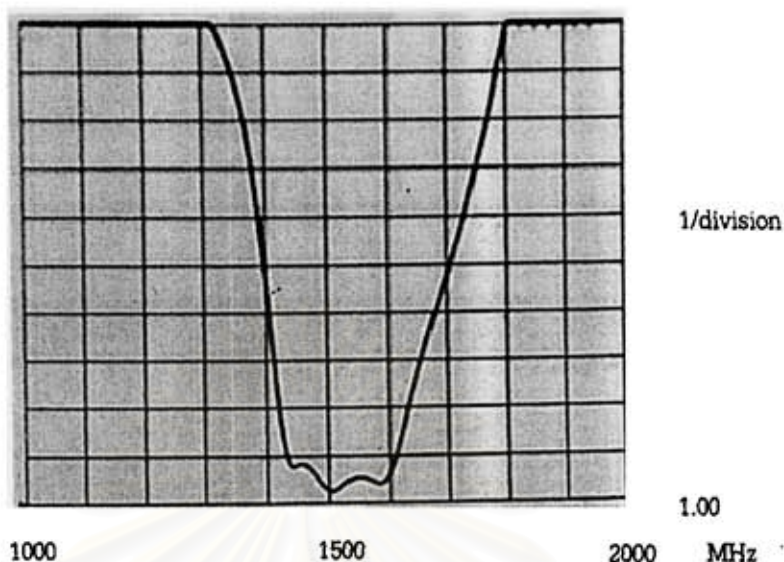
รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจร

#### การวัดหาค่า VSWR

การวัดหาค่า VSWR จะต้องต่อแมตซ์โหลด (matched load) ด้านตรงข้ามกับด้านสัญญาณขาเข้าดังรูปที่ 3.13 เพื่อลดสัญญาณการสะท้อนกลับของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริป ค่า VSWR ที่ได้จากการวัดแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 การต่อวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรเพื่อหาค่า VSWR

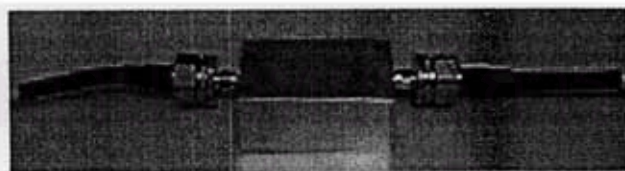


รูปที่ 3.14 ค่า VSWR ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริป

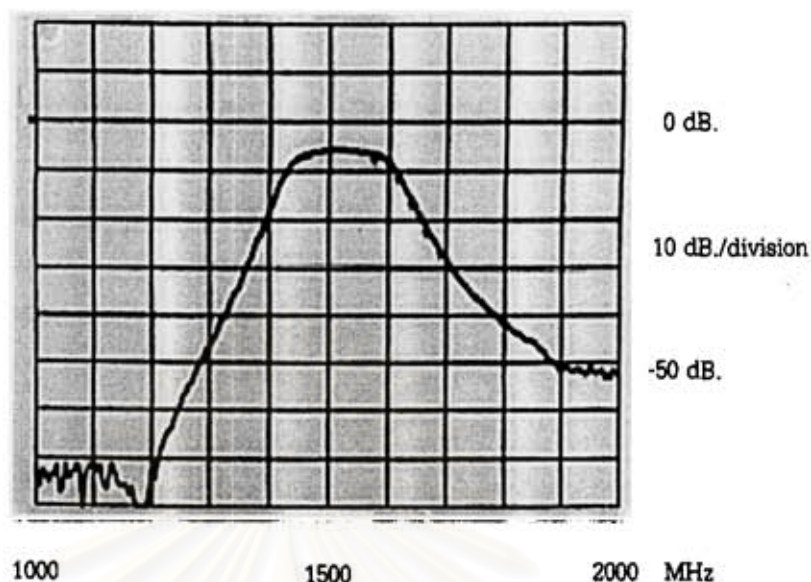
จากรูปที่ 3.14 ผลการวัดค่า VSWR เข้าใกล้ 1 ซึ่งหมายความว่าสัญญาณสะท้อนมีค่าเข้าใกล้ 0

#### การวัดหาค่า $S_{21}$

การวัดหาค่า  $S_{21}$  จะต่อสายป้อนสัญญาณของเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรเข้ากับวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์จะต่อเข้ากับสายด้านรับสัญญาณของเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรดังรูปที่ 3.15 ค่า  $S_{21}$  ที่ได้จากการวัดแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 การต่อวงจรกรองผ่านแถบความถี่แฮร์ฟิโนไลน์ไมโครสตริปเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรเพื่อหาค่า  $S_{21}$



รูปที่ 3.16 ค่า S21 ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่แอร์พินไลน์ไมโครสตริป

จากรูปที่ 3.16 ค่า S21 ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ  $-5.89$  dB. และค่าความกว้างแถบเท่ากับ 100 MHz. ที่ตำแหน่ง  $-3$  dB. ของค่าความกว้างแถบ มีความถี่ค่ากลางเท่ากับ 1.47 GHz. จากผลการทดลองจะเห็นว่าสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีสมการอินทิกรัลร่วมกับเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์ จะมีค่าแตกต่างกันบ้างบริเวณปลายทั้งสองข้างของความกว้างแถบ ซึ่งค่าความกว้างแถบที่ได้จากการวัดมีค่ามากกว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 3.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย