

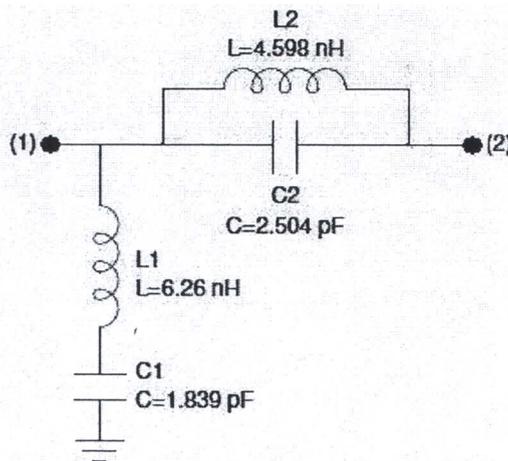
### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

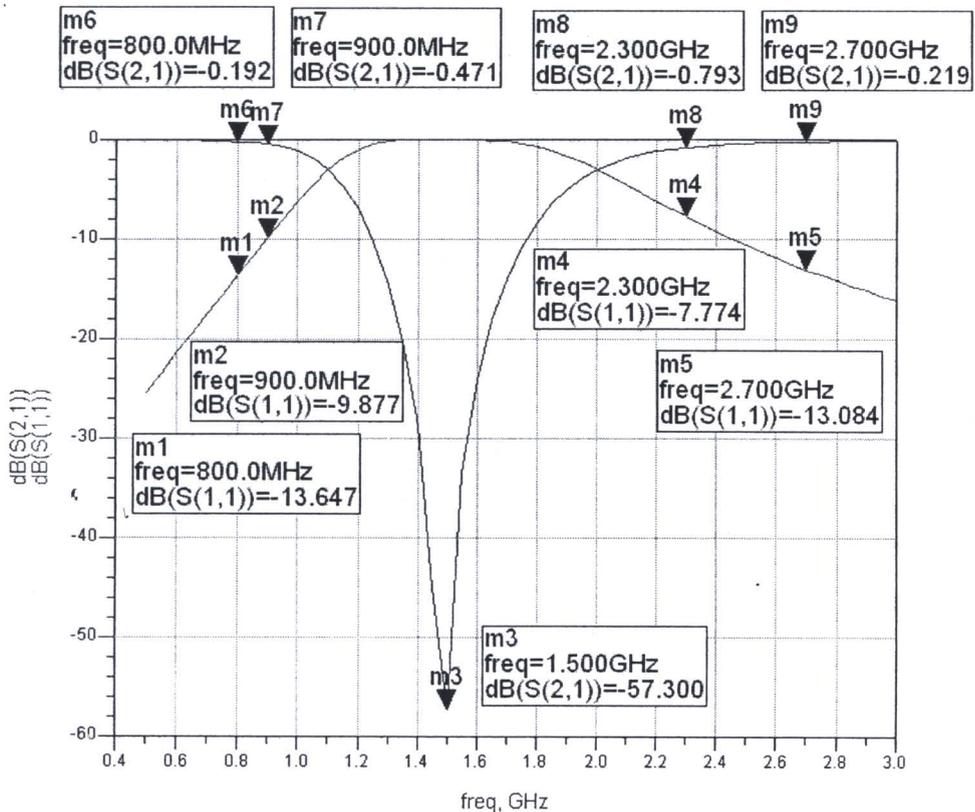
ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงหลักการและการออกแบบที่ละเอียดขึ้นตอน โดยเริ่มต้นจากหัวข้อที่ 3.1 ที่จะกล่าวถึงวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ หลังจากนั้น หัวข้อที่ 3.2 จะกล่าวถึงวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณยาว  $\lambda/4$  แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิด หัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงการออกแบบเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่มีโครงสร้างใหม่และนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่นำเสนอนี้สามารถรองรับการใช้งานที่ 2 ย่านความถี่ และคุณสมบัติในการใช้งานเป็นไปตามที่ต้องการได้ รายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

#### 3.1 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์

ในอดีตที่ผ่านมา วงจรกรองหยุดแถบนิยมถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์โดยอาศัยตารางการแปลงต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำไปเป็นวงจรกรองความถี่กรองหยุดแถบ ยกตัวอย่างเช่น เราจะออกแบบและสร้างวงจรกรองหยุดแถบให้ทำงานรับส่งสัญญาณที่ย่านความถี่ 800 MHz ร่วมกับ 2.4 GHz เราจะได้วงจรหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์ LC ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์



ภาพที่ 3.2 ค่า Return Loss ( $S_{11}$ ) และค่า Insertion Loss ( $S_{21}$ ) ที่ได้จากการจำลองวงจรหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์

คุณสมบัติการทำงานที่ได้รับจากการจำลองวงจรหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์มีแสดงไว้ดังในภาพที่ 3.2 โดยค่า  $S_{11}$  (ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับหรือ Return Loss) และค่า  $S_{21}$  (ค่าสูญเสียจากการย้อนกลับหรือ Return Loss) ที่ได้จากการจำลองของวงจรสรุปได้ดังนี้

(1) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า  $S_{11}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -13.647 dB และ -9.877 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า  $S_{11}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -7.774 dB และ -13.084 dB ตามลำดับ

(2) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า  $S_{21}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -0.192 dB และ -0.471 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า  $S_{21}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -0.793 dB และ -0.219 dB ตามลำดับ

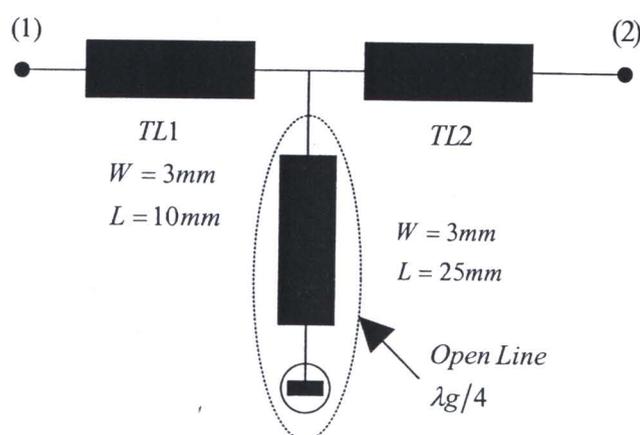
(3) ที่ความถี่ศูนย์กลางของการออกแบบวงจรหยุดแถบ 1.5 GHz พบว่า ค่า  $S_{21}$  มีค่าต่ำสุดตามต้องการ เท่ากับ -57.300 dB

ในทางปฏิบัติจริงนั้น การสร้างวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ไม่สามารถที่จะกระทำได้จริง เนื่องจากเราไม่สามารถหาค่าอุปกรณ์ดังกล่าวที่แม่นยำเพื่อใช้งานได้ตามที่ต้องการ อีกทั้ง เนื่องจากที่ย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น การใช้เรโซเนเตอร์แบบ  $RLC$  ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมพ์จะไม่เหมาะสมและมีความยุ่งยาก จึงมีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการนำส่วนหนึ่งของสายสัญญาณมาใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์แทน เหตุผลก็คือ เนื่องจากสายนำสัญญาณประกอบไปด้วยองค์ประกอบกระจาย สายนำสัญญาณที่มีความยาวขนาดต่างๆ โดยที่ปลายด้านหนึ่งของสายนำสัญญาณต่อโหลดแบบวงจรลัดหรือวงจรเปิดจึงถูกใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์ได้

### 3.2 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณยาว $\lambda_g/4$ แบบวงจรเปิด

จากหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.1 เมื่อพิจารณาทฤษฎีของสายนำสัญญาณ พบว่าสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิดจะถูกใช้งานเป็นเรโซเนเตอร์  $RLC$  แบบอนุกรม นั่นก็หมายความว่า เราสามารถออกแบบและสร้างวงจรกรองหยุดแถบที่ต้องการโดยใช้สายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิดได้

ในเบื้องต้นจะทำการออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรกรองหยุดแถบอย่างง่ายที่สร้างขึ้นจากการใช้สายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบที่ปลายด้านหนึ่งเป็นวงจรเปิด (ต่อไปนี้จะใช้คำว่า เรโซเนเตอร์หยุดแถบ แทน) เพียง 1 เส้นเท่านั้น ดังแสดงในภาพที่ 3.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติการทำงานของวงจรที่ได้รับ

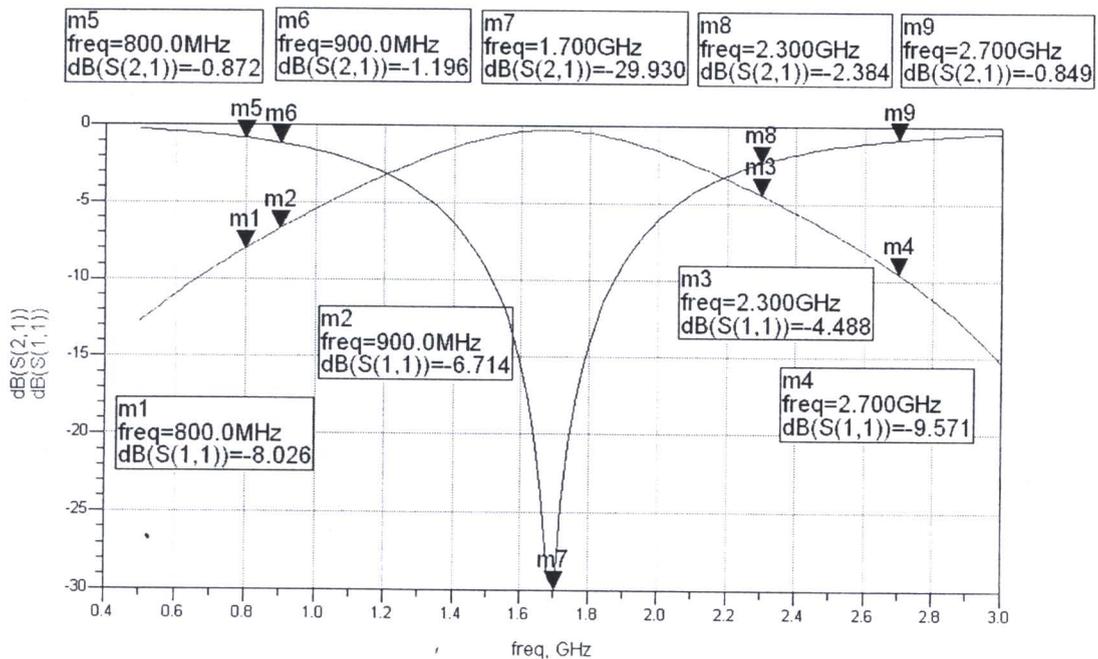


ภาพที่ 3.3 เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบเป็นวงจรเปิด

โดยในที่นี้ จะทำการออกแบบและสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบที่มีค่าความถี่ศูนย์กลางเพื่อหูดแถบเท่ากับ 1.65 GHz สำหรับแยกย่านความถี่ต่ำ 800 – 900 MHz ออกจากย่านความถี่สูงที่กำหนดคือ 2.3 - 2.7 GHz และทำการสร้างเรโซเนเตอร์หูดแถบนี้บนแผ่นวงจรพิมพ์ FR-4 ที่มีค่าความหนา  $h$  เท่ากับ 1.6 mm มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r$  เท่ากับ 4.3 พบว่าจากการใช้คอนเนกเตอร์ SMA 50 โอห์ม เราจะได้ค่าความกว้างของสตริปเท่ากับ  $3 \text{ mm}^1$  และหาค่า  $\lambda_g$  ได้จากสมการดังนี้

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{3 \times 10^8}{1.65 \times 10^9 \times \sqrt{3.31}} = 100 \text{ mm} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\lambda_0 = c/f$  เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศ,  $\lambda_g$  เป็นค่าความยาวคลื่นในแผ่นวงจรพิมพ์ และ  $\epsilon_{eff}$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ คุณสมบัติการทำงานที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบเป็นวงจรเปิดเพียง 1 เส้นมีแสดงไว้ดังในภาพที่ 3.4 โดยค่า  $S_{11}$  และค่า  $S_{21}$  ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรสรุปได้ดังนี้



ภาพที่ 3.4 ค่า Return Loss ( $S_{11}$ ) และค่า Insertion Loss ( $S_{21}$ ) ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หูดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบเป็นวงจรเปิดเพียง 1 เส้น

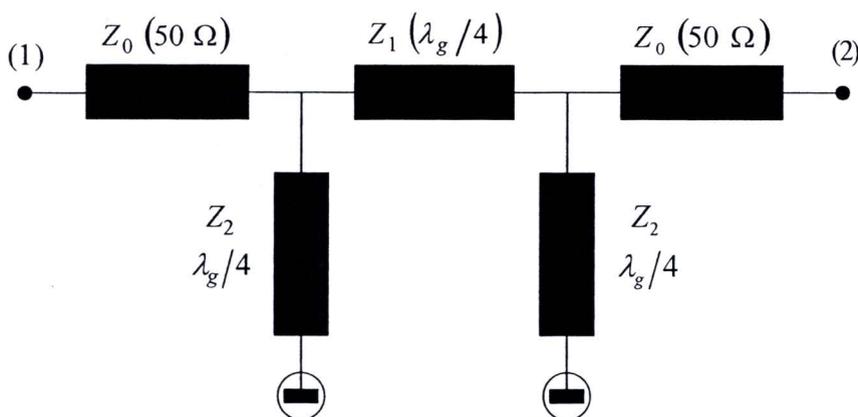
<sup>1</sup> C. Laohapensaeng, C. Free, and K.M. Lum. (2005, March). "Printed strip monopole antenna with the parasitic elements on the circular ground plane." IWAT 2005. pp. 371 - 374.

(1) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า  $S_{11}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -8.026 dB และ -6.714 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า  $S_{11}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -4.488 dB และ -9.571 dB ตามลำดับ

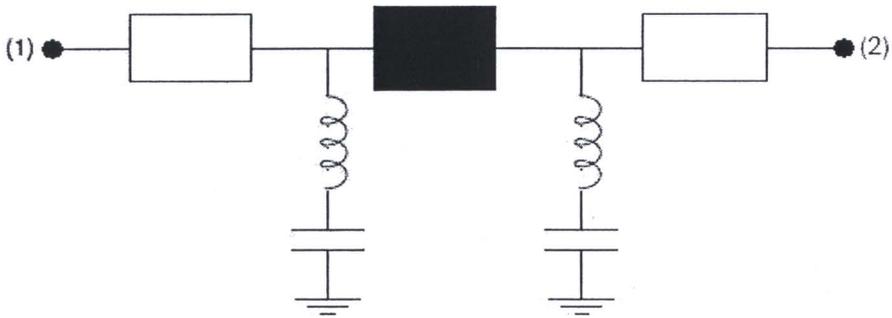
(2) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า  $S_{21}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -0.872 dB และ -1.196 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า  $S_{21}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -2.384 dB และ -0.849 dB ตามลำดับ และ ที่ความถี่ศูนย์กลางของการออกแบบวงจรกรองหยุดแถบ 1.7 GHz พบว่า ค่า  $S_{21}$  มีค่าต่ำสุดตามต้องการ เท่ากับ -29.930 dB

จากผลการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบเป็นวงจรเปิดเพียง 1 เส้นดังกล่าวพบว่า ค่า Return Loss ( $S_{11}$ ) และค่า Insertion Loss ( $S_{21}$ ) ที่ได้รับแยกว่า วงจรกรองหยุดแถบที่ทำจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ และค่าความถี่ศูนย์กลางมีการขยับออกไปจากเดิม 500 MHz แต่เนื่องจากวงจรเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบเป็นวงจรเปิดดังกล่าวเป็น โครงสร้างการออกแบบที่ง่ายกว่าและสามารถสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้น จึงทำการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างใหม่เพื่อให้มีผลตอบสนองเชิงความถี่หรือมีคุณสมบัติในการทำงานที่ดีขึ้น โดยอาศัยทฤษฎีที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.2 วงจรกรองหยุดแถบที่สร้างจากเรโซเนเตอร์ยาว  $\lambda/4$  และอ้างถึงภาพที่ 2.4 วงจรเทียบเท่าสำหรับวงจรกรองหยุดแถบของภาพที่ 2.3 (a)

ซึ่งในที่นี้ จะทำการต่อสายนำสัญญาณขนาดความยาว  $\lambda_g/4$  วางตัวแบบอนุกรมกับอินพุตและเอาต์พุตของวงจร (ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $Z_1$ ) และต่อเชื่อมสายนำสัญญาณขนาดความยาว  $\lambda_g/4$  แบบขนานเข้าไปทางขวาของวงจรถัดก่อนจะส่งสัญญาณออกไปที่โหลดหรือเอาต์พุตของวงจร (ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $Z_2$ ) ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับภาพที่ 2.3 (a)



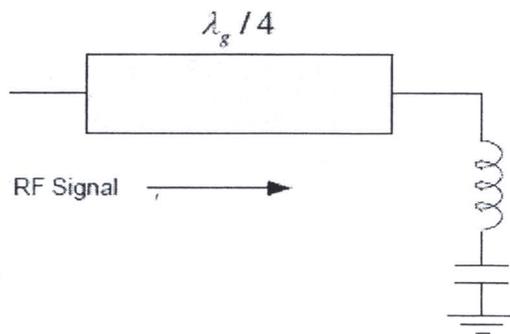
ภาพที่ 3.5 เรโซเนเตอร์หยุดแถบที่ทำจากสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบเป็นวงจรเปิดที่เป็นโครงสร้างใหม่ที่ปรับปรุงให้ดีขึ้นจากภาพที่ 3.4



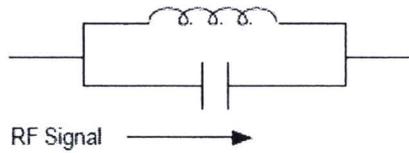
ภาพที่ 3.6 วงจรเทียบเท่าภาพที่ 3.5 ที่สร้างจากเรโซเนเตอร์และวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์

อ้างอิงวงจรเทียบเท่าของวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างจากเรโซเนเตอร์และวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์ดังในภาพที่ 2.4 (b) ทำให้ได้วงจรเทียบเท่าของภาพที่ 3.5 เป็นไปตามภาพที่ 3.6 กล่าวคือ สายนำสัญญาณขนาดความยาว  $\lambda_g/4$  ที่วางตัวอยู่ตรงกลางระหว่างเรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกันทั้งสองด้านทำหน้าที่เป็นตัว J-Inverter โดยในที่นี้ เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกันแต่ละด้านเปรียบเสมือนสตัด์ที่ถูกเปิดวงจรและมีความยาวทางไฟฟ้า  $\theta \approx 90^\circ$  ดังในภาพที่ 2.4 (a)

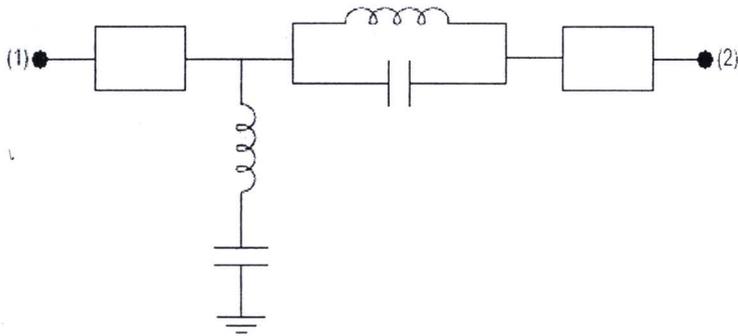
หลังจากนั้น อ้างถึงวงจรเทียบเท่าของวงจรกรองหยุดแถบที่สร้างจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ดังในภาพที่ 2.4 (c) ทำให้ได้วงจรเทียบเท่าของภาพที่ 2.4 (b) เป็นไปตามภาพที่ 3.9 กล่าวคือ เมื่อสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งผ่านสายนำสัญญาณยาว  $\lambda_g/4$  ที่ต่ออยู่กับโหลด (เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกัน) ดังในภาพที่ 3.7 สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าวจะมองวงจรในภาพที่ 3.7 เสมือนเป็นเรโซเนเตอร์ LC ที่ต่อขนานกัน ดังในภาพที่ 3.8 โดยในที่นี้ เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่อขนานกันนี้จะถูกมองว่าเป็น 1 บล็อกที่ต่ออนุกรมกับวงจร และ เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกันอยู่จะถูกมองว่าต่อขนานกับวงจร เช่นเดียวกับ  $L_1' C_1'$  และ  $L_2' C_2'$  ดังในภาพที่ 2.4 (c) ตามลำดับ



ภาพที่ 3.7 สายนำสัญญาณยาว  $\lambda_g/4$  ที่ต่ออยู่กับโหลด (เรโซเนเตอร์ LC ที่ต่ออนุกรมกัน)



ภาพที่ 3.8 วงจรเทียบเท่าภาพที่ 3.7 เสมือนเป็นเป็นเรโซเนเตอร์ LC ที่ต่อขนานกัน



ภาพที่ 3.9 วงจรเทียบเท่าภาพที่ 3.6 ที่ได้จากการใช้เรโซเนเตอร์และอาศัยวงจรแปลงแอดมิตแตนซ์

จากหลักการออกแบบที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่า ภาพที่ 3.9 เป็นรูปวงจรเทียบเท่าของภาพที่ 3.6 กล่าวคือ เรโซเนเตอร์หุ้ดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  จำนวน 1 ท่อนที่วางอยู่ตรงกลางระหว่างสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบวงจรเปิดที่วางตัวแบบขนานไว้ทั้ง 2 ด้านสามารถที่จะถูกมองเสมือนเป็นหรือมีวงจรเทียบเท่าเป็นวงจรกรองหุ้ดแถบที่สร้างจากอุปกรณ์แบบลัมพ์ที่มีโครงสร้างเหมือนกับภาพที่ 3.1 ตามทฤษฎี

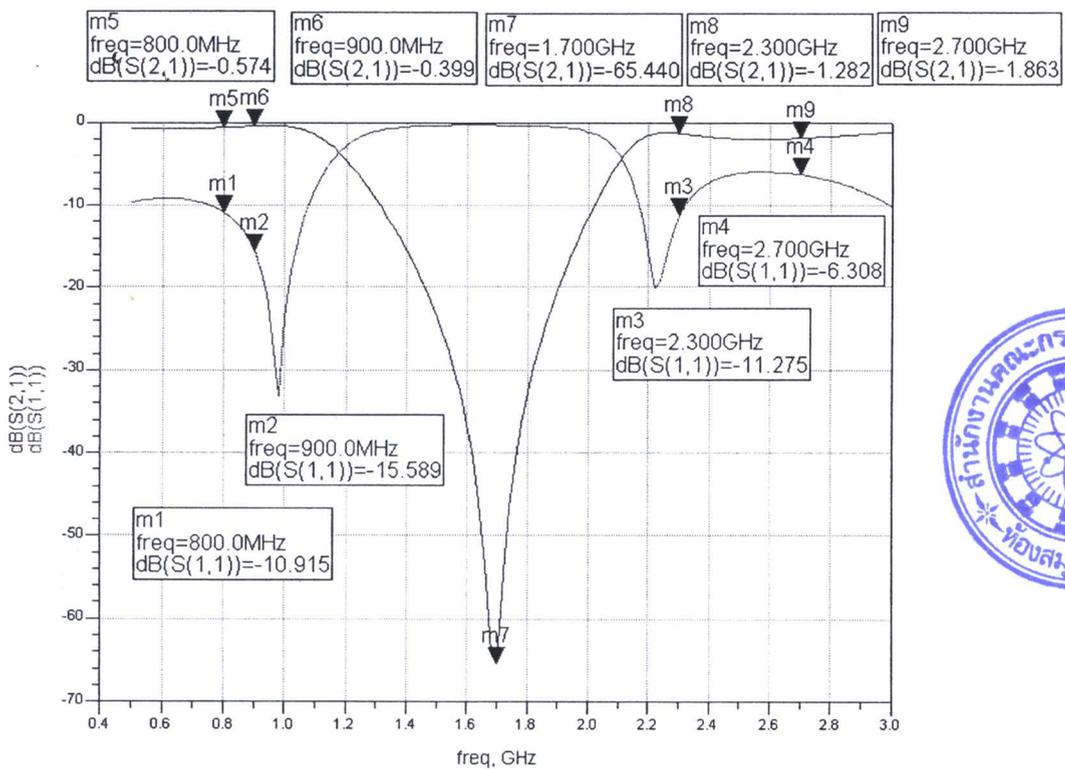
ในภาพที่ 3.10 แสดงคุณสมบัติการทำงานที่ได้รับจากการจำลองเรโซเนเตอร์หุ้ดแถบที่มีโครงสร้างใหม่ตามภาพที่ 3.6 พบว่า ค่า  $S_{11}$  และค่า  $S_{21}$  ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรสรุปได้ดังนี้

(1) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า  $S_{11}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -10.915 dB และ -15.589 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า  $S_{11}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -11.275 dB และ -6.308 dB ตามลำดับ

(2) ที่ย่านความถี่ต่ำ 800 MHz และ 900 MHz ค่า  $S_{21}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -0.574 dB และ -0.399 dB ตามลำดับ ส่วนที่ย่านความถี่สูง 2.3 GHz และ 2.7 GHz ค่า  $S_{21}$  ที่ได้รับมีค่าเท่ากับ -1.282 dB และ -1.863 dB ตามลำดับ

(3) ที่ความถี่ศูนย์กลางของการออกแบบวงจรกรองหยุดแถบ 1.5 GHz พบว่า ค่า  $S_{21}$  มีค่าต่ำสุดตามต้องการ เท่ากับ -65.440 dB

จากผลการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่สร้างขึ้นจากสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  จำนวน 1 ท่อนที่วางอยู่ตรงกลางระหว่างสายนำสัญญาณที่ยาว  $\lambda_g/4$  แบบวงจรเปิดที่วางตัวแบบขนานไว้ทั้ง 2 ด้านดังกล่าวพบว่า ค่า Return Loss ( $S_{11}$ ) และค่า Insertion Loss ( $S_{21}$ ) ที่ได้รับสอดคล้องเป็นอย่างดีกับวงจรเรโซเนเตอร์หยุดแถบที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบลัมป์ และ ค่าความถี่ศูนย์กลางก็ยังคงขยับออกไปจากเดิม 500 MHz เช่นกัน



ภาพที่ 3.10 ค่า  $S_{11}$  และค่า  $S_{21}$  ที่ได้จากการจำลองเรโซเนเตอร์หยุดแถบ โครงสร้างใหม่ที่ได้รับเหมือนกับภาพที่ 3.6

**หมายเหตุ** เหตุผลที่กำหนดค่าความถี่ศูนย์กลางเท่ากับ 1.65 GHz คือ “ค่าความถี่ศูนย์กลาง 1.65 GHz นั้นเป็นค่าความถี่กลางที่เกิดขึ้นจากการออกแบบที่ต้องการหยุดแถบตั้งแต่ค่าความถี่ 1.1 GHz ไปจนถึง 2.2 GHz ส่วนย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 1.1 GHz และสูงกว่า 2.2 GHz ประมาณ 500 MHz นั้นเป็นย่านความถี่ผ่านแถบที่ต้องการออกแบบและปรับจูนเรโซเนเตอร์หยุดแถบ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองเชิงความถี่ในย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูงตามที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้”