



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงวงจรสายส่งในวงจรขนาดเล็กที่มีความสูญเสียในฐานรอง
Improvement of Transmission Line Circuit in Compact Form with Lossy
Substrate

นายฉัตรพล ฤทธิศิริ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงวงจรสายส่งในวงจรขนาดเล็กที่มีความสูญเสียในฐานรอง
Improvement of Transmission Line Circuit in Compact Form with Lossy
Substrate

นายฉัตรพล ฤทธิศิริ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2561

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การปรับปรุงวงจรสายส่งในวงจรขนาดเล็กที่มีความสูญเสียในฐานรอง
แหล่งเงิน เงินรายได้.....
ประจำปีงบประมาณ 2562 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 125,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ต.ค. 2561 ถึง 30 ก.ย. 2562

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด
นาย ฉัตรพล ภคศิริ วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง โทร.02-329-8264 email: chatrpol.pa@kmitl.ac.th
(หัวหน้าโครงการ).....

บทคัดย่อ

ในวงจรขนาดเล็ก การสร้างสายส่งไม่สามารถทำได้โดยการใช้หลักการของไมโครสตริป เนื่องจากขนาดของพื้นที่ที่จำกัด วงจรของสายส่งจึงต้องสร้างโดยใช้อุปกรณ์แบบ lump ซึ่งโดยทั่วไปจะถูกสร้างบนฐานที่มีความสูญเสีย อย่างไรก็ตาม ปัญหาของอุปกรณ์แบบ lump ที่มีความสูญเสียคือการมีค่าความต้านทานเกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์ ซึ่งทำให้การออกจำลองสายส่งมีประสิทธิภาพต่อยลง การใช้วงจรสายส่งโดยใช้ lump แบบทั่วไปสามารถทำได้เพียงสายส่งที่มีค่าความยาวเชิงไฟฟ้าสั้นเท่านั้น การจำลองสายส่งที่มีค่าความยาวเชิงไฟฟ้ายาวจำเป็นต้องใช้วงจรสายส่งแบบ lump ที่มาต่อกันแบบ cascade ผลการศึกษาได้นำไปใช้ในการออกแบบวงจรเลื่อนเฟส โดยผลการจำลองวงจรเลื่อนเฟสให้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษาวงจรสายส่ง

คำสำคัญ : วงจรสายส่ง, ฐานรองที่มีความสูญเสีย, วงจรเลื่อนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Improvement of Transmission Line Circuit in Compact Form with Lossy Substrate.....

Researcher: Chatrpol Pakasiri.....

Faculty: College of Advanced Manufacturing Innovation.....

Department: -.....

ABSTRACT

In compact electronic form, transmission line cannot be implemented in microstrip form because of limited space availability. Transmission line circuit therefore needs to be implemented by lumped components. In general, compact electronic form is based on lossy substrate. For lossy substrate, lumped components exhibit loss in terms of resistance. When they are composed in circuits, the performance of the circuits will be degraded. In this study shows that conventional lumped transmission line circuit can mimic only short electrical length transmission line. Longer electrical length transmission line requires additional cascaded lumped transmission line circuits. The results of lumped circuit transmission line have been applied to design of phase shifter circuit. The performance of the simulated phase shifter circuit depends on performance of individual transmission line in the circuit. Better individual transmission line circuit leads to better phase shifter circuit.

Keywords : Transmission line circuit, lossy substrate, phase shifter circuit.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่สามารถกล่าวได้ทั้งหมด ซึ่งผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณ นาย ธิติพันธ์ คงขยาสุขวัฒน์ ที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำโครงการนี้ การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

ฉัตรพล ฤคศิริ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ **iii** ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
บทที่ 2 วงจรสายส่งสัญญาณ	2
2.1 สายส่งแบบไมโครสตริป.....	2
2.2 สายส่งที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมพ์.....	3
บทที่ 3 วงจรเลื่อนเฟส	7
3.1 วงจรเลื่อนเฟสแบบสายส่งและแบบลัมพ์.....	7
3.2 การสร้างอุปกรณ์ลัมพ์ใน IPD Process.....	8
3.2.1 ตัวเก็บประจุ.....	9
3.2.2 ตัวเหนี่ยวนำ.....	10
บทที่ 4 ผลการจำลองวงจรสายส่งสัญญาณและวงจรเลื่อนเฟส	12
4.1 ผลการจำลองวงจรสายส่ง.....	12
4.2 ผลการจำลองวงจรเลื่อนเฟส.....	14
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	17
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	17
5.2 การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ(Publications).....	17
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	17
บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง	18
ประวัตินักวิจัย	19
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยเผยแพร่	21
ภาคผนวก ข รายงานการเงิน	26

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตัวเก็บประจุที่มีค่าตัวแปรต่างๆ.....	10
3.2 ตัวเหนี่ยวนำแบบ spiral ที่มีค่า $W = 30 \mu\text{m}$ และ $S = 10 \mu\text{m}$ และ $N = 2$	11
4.1 วงจรเลื่อนเฟสและคุณสมบัติของสายส่ง.....	14
4.2 แสดงค่าตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุทางอุดมคติ.....	15
4.3 แสดงค่าตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุใน IPD process.....	15
4.4 สรุปคุณสมบัติของวงจรเลื่อนเฟสของทั้งสองแบบ.....	16



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 รูปทรงของสายส่งแบบไมโครสตริป.....	2
2.2 เส้นสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กบนสายส่งแบบไมโครสตริป.....	3
2.3 วงจรสายส่งสัญญาณแบบทั่วไปที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมพ์.....	5
2.4 วงจรสายส่งสัญญาณแบบหลายส่วนที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมพ์.....	5
3.1 วงจรเลื่อนเฟส.....	7
3.2 วงจรเลื่อนเฟส ที่ใช้สายส่ง.....	7
3.3 วงจรเลื่อนเฟส ที่ใช้วงจรแบบลัมพ์ (ก) วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้วงจรสายส่งแบบลัมพ์ทั่วไป (ข) วงจรเลื่อนเฟสที่ใช้สายส่ง แบบลัมพ์ทั่วไป และสายส่งแบบลัมพ์หลายส่วน.....	8
3.4 ภาพตัดขวางของกระบวนการ IPD.....	9
3.5 ภาพด้านบนและภาพตัดขวางของตัวเก็บประจุ.....	9
3.6 การจำลองตัวเก็บประจุในโปรแกรม ADS.....	10
3.7 โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ.....	11
3.8 การจำลองตัวเหนี่ยวนำในโปรแกรม ADS.....	11
4.1 การเปรียบเทียบวงจรสายส่งทั่วไปโดยมีค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำที่ค่าต่างๆ โดยเปรียบเทียบ (ก) ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และ (ข) ค่าความยาวเชิงไฟฟ้า.....	13
4.2 การเปรียบเทียบวงจรสายส่งแบบสองส่วนโดยมีค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำที่ค่าต่างๆ โดยเปรียบเทียบ (ก) ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และ (ข) ค่าความยาวเชิงไฟฟ้า.....	14
4.3 วงจรเลื่อนเฟส.....	14
4.4 ลายวงจรของวงจรเลื่อนเฟสสำหรับ (ก) แบบที่หนึ่ง และ (ข) แบบที่สอง.....	16

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการออกแบบวงจรขนาดเล็กเช่นวงจรรวม ที่ย่านความถี่สูงมาก (เมื่อเทียบความยาวคลื่นกับขนาดของวงจร) จะมีการใช้สายส่ง (transmission line) ร่วมกับวงจร อย่างไรก็ตาม สายส่งมักจะมีขนาดยาวเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ซึ่งขนาดของสายส่งไม่สามารถวางลงไปในวงจรขนาดเล็ก เช่นวงจรรวมได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจร lumped circuit ที่ทำหน้าที่แทนการใช้สายส่ง ซึ่งวงจร lumped circuit สามารถทำงานแทนสายส่งได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ แต่มีช่องความถี่แคบ (narrow bandwidth) นอกจากนี้ในวงจรรวมขนาดเล็กยังมีฐานที่มีความสูญเสีย (lossy substrate) ซึ่งจะส่งผลให้อุปกรณ์ใน lumped circuit มีค่าความสูญเสียเกิดขึ้น ค่าความสูญเสียนี้ทำให้ประสิทธิภาพของวงจร lumped circuit ในการทำงานแทนสายส่งด้อยลง โครงการนี้จะศึกษาถึงผลกระทบของความสูญเสียที่เกิดขึ้น และ ประสิทธิภาพของวงจร lumped circuit ในการทำงานแทนสายส่ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการทำงานของวงจร lumped circuit ที่ทำหน้าที่เป็นสายส่ง ในวงจรวจรขนาดเล็กที่มีฐานที่มีความสูญเสีย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการทำงานของวงจร lumped circuit ที่ทำหน้าที่เป็นสายส่ง ออกแบบวงจรอย่างง่ายเพื่อทดสอบการทำงานของวงจร lumped circuit โดยใช้การจำลองทางไฟฟ้า (Electronic simulation)

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานมีดังต่อไปนี้

- 1.4.1 ศึกษาวงจร lumped circuit transmission line ในฐานรองที่มีความสูญเสีย
- 1.4.2 ออกแบบ และจำลองวงจร phase shifter
- 1.4.3 สรุปผลการทำโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 รู้และเข้าใจหลักการการทำงานแนวทางการออกแบบวงจรรายส่งขนาดเล็ก
- 1.5.2 สามารถสร้างตัววงจร phase shifter

บทที่ 2 วงจรสายส่งสัญญาณ

สายส่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบการสื่อสาร นอกเหนือจากผู้ส่งข่าวหรือเครื่องส่งและผู้รับข่าวหรือเครื่องรับแล้ว ตัวกลางในการส่งข่าวสารข้อมูลก็นับได้ว่าเป็นส่วนสำคัญเช่นเดียวกัน

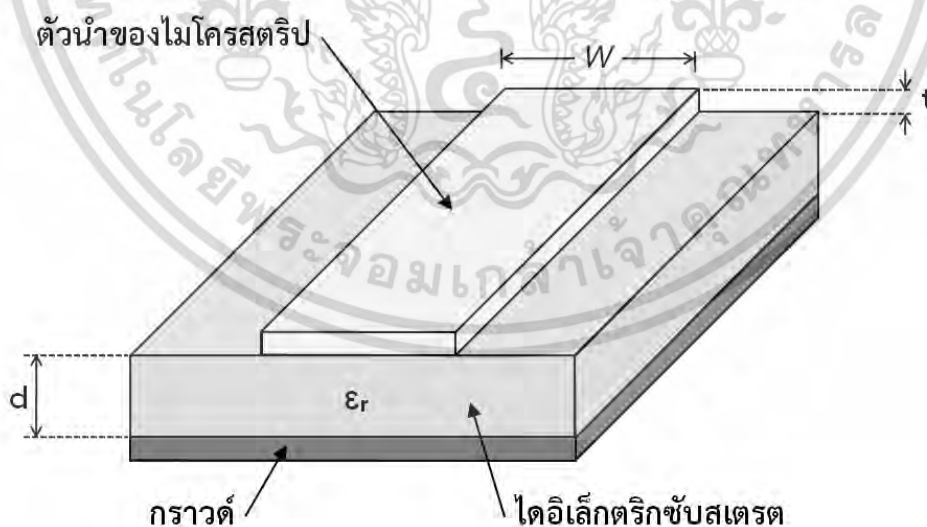
สายส่งได้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งพบเห็นได้อย่างทั่วไป ยกตัวอย่างเช่น สายไฟฟ้า สายโทรศัพท์ ที่เห็นบนเสาไฟริมถนน สายลำโพงที่เชื่อมต่อจากเครื่องเสียงไปยังตู้ลำโพง สารไมโครโฟนที่เชื่อมต่อจากไมโครโฟนไปยังเครื่องขยายเสียง สายจากเครื่องส่งวิทยุไปยังสายอากาศ และสายจากสายอากาศไปยังเครื่องรับวิทยุ

สายส่งสัญญาณที่ใช้กับความถี่สูงในรูปคลื่นวิทยุจะทำหน้าที่เหมือนกันคือพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากที่หนึ่งไปยังที่อื่นๆ ตามตำแหน่งปลายทางที่ต้องการ

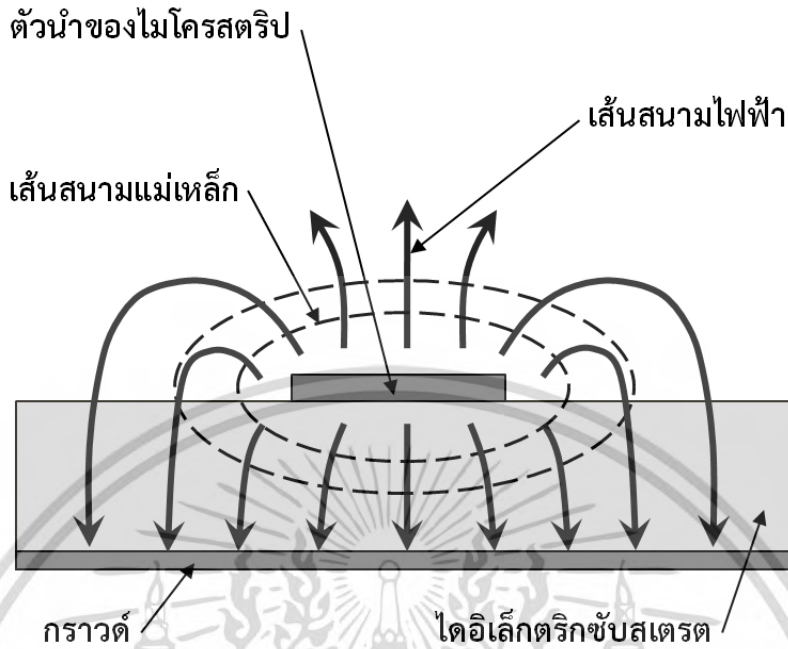
2.1 สายส่งแบบไมโครสตริป

สายส่งแบบไมโครสตริป (Microstrip transmission line) เป็นหนึ่งในสายส่งแบบราบที่ได้รับความนิยมที่สุด เนื่องจากสามารถถูกสร้างได้ด้วยกระบวนการทางโฟโตลิโธกราฟีค (Photolithographic process) และง่ายที่จะถูกย่อให้มีขนาดเล็ก และสามารถเชื่อมต่อเข้ากับทั้งอุปกรณ์แบบพาสซีฟ (Passive component) และแอคทีฟ (Active component) ที่ใช้งานกับคลื่นความถี่ไมโครเวฟได้

รูปทรงของสายส่งแบบไมโครสตริปได้ถูกแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่ขนาดของตัวนำมีความกว้างเป็น W ซึ่งถูกพิมพ์ลงอย่างบาง ขนาดกราวด์ของไดอิเล็กทริกชั้นสเตรตมีความหนาเป็น d และค่าคงที่ของความเป็นฉนวน (Relative permittivity) เป็น ϵ_r โดยการแพร่กระจายของเส้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ซึ่งถูกส่งผ่านชั้นของชั้นสเตรตทบริเวณที่อยู่ระหว่างชั้นตัวนำกับระนาบของกราวด์



รูปที่ 2.1 รูปทรงของสายส่งแบบไมโครสตริป



รูปที่ 2.2 เส้นสนามไฟฟ้าและแม่เหล็กบนสายส่งแบบไมโครสตริป

เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะกระจายตัวในอากาศ ค่าประสิทธิผลไดอิเล็กทริกของไมโครสตริป ϵ_e จะมีค่าแตกต่างจากค่าไดอิเล็กทริกของฐานรอง โดยค่าประสิทธิผลไดอิเล็กทริกของไมโครสตริปจะอยู่ในช่วง $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ ทั้งนี้ค่าประสิทธิผลไดอิเล็กทริกจะขึ้นอยู่กับความหนาของฐานรอง ความกว้างของตัวนำ และความถี่ ค่าประสิทธิผลไดอิเล็กทริกของไมโครสตริปสามารถประมาณได้คือ [1]

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (2.1)$$

จากนั้นค่าความยาวคลื่น λ_g จะหาได้จาก

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.2)$$

โดย λ_0 คือค่าความยาวคลื่นของอากาศ นอกจากนี้ค่าการกระจายคงที่ β (propagation constant) สามารถหาได้จาก [1]

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (2.3)$$

ทั้งนี้ค่าความยาวเชิงไฟฟ้าของไมโครสตริปสามารถหาได้จาก

$$\theta = \beta l \quad (2.4)$$

โดย l คือความยาวของไมโครสตริป

2.2 สายส่งที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมพ์

สายส่งแบบลัมพ์ที่นำมาใช้ในย่านความถี่แชนแนลแบนด์ (Narrow band) ที่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 300 ถึง 3,400 เฮิร์ตซ์ ถูกนำมาใช้งานในรูปแบบของพายเน็ตเวิร์ค รูปแบบพายเน็ตเวิร์คของสายส่งแบบลัมพ์ซึ่งมีค่า

ความยาวทางไฟฟ้าน้อยกว่า 180° ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของวงจรสามารถหาค่าได้ตามสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$L_r = \frac{Z_0}{\omega} \sin(\theta) \quad (2.5)$$

$$C_r = \frac{1}{\omega Z_0} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.6)$$

โดยที่ ω คือ ความถี่เชิงมุม (Angular frequency), Z_0 คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance) และ θ คือ ความยาวทางไฟฟ้าของสายส่ง (Electrical length) อย่างไรก็ตามในแผ่นซับสเตรตที่มีการสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะมีค่าความต้านทานภายในซึ่งถูกรวมไว้กับค่าอิมพีแดนซ์

โดยปกติแล้วค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำบนแผ่นซับสเตรตที่มีการสูญเสียค่อนข้างสูงนั้นมีค่าค่อนข้างสูง โดยค่านั้นแปรผันกับตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) หรือ Q_r ซึ่งความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 2.7

$$Q_r = \frac{\omega L_r}{R} \quad (2.7)$$

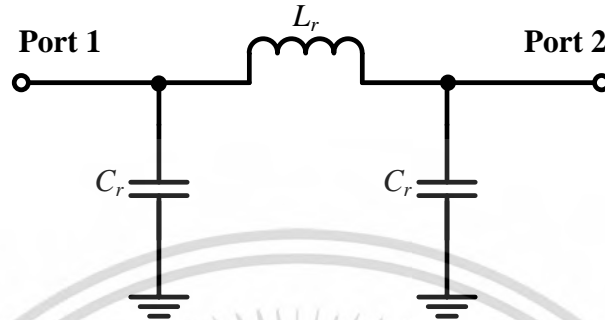
โดยที่ R คือ ค่าความต้านทานแฝงของตัวเหนี่ยวนำ ในงานวิจัยนี้ ตัวประกอบคุณภาพของตัวเหนี่ยวนำถูกพิจารณาที่ค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำที่ถูกสร้างบนแผ่นซับสเตรตจะมีความต้านทานสูง ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ถูกใช้กับสายส่งแบบส่วนเดียวที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมพ์สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.8

$$Z_{ind,r} = \frac{Z_0 \sin(\theta)}{Q_r} + jZ_0 \sin(\theta) \quad (2.8)$$

โดยที่ $Z_{ind,r}$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ สำหรับตัวเก็บประจุบนแผ่นซับสเตรตที่มีการสูญเสียที่ใช้ในย่านความถี่สูง ค่าของความต้านทานภายในมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นค่าคงตัวค่าหนึ่งจึงถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้สำหรับงานวิจัยนี้ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.9

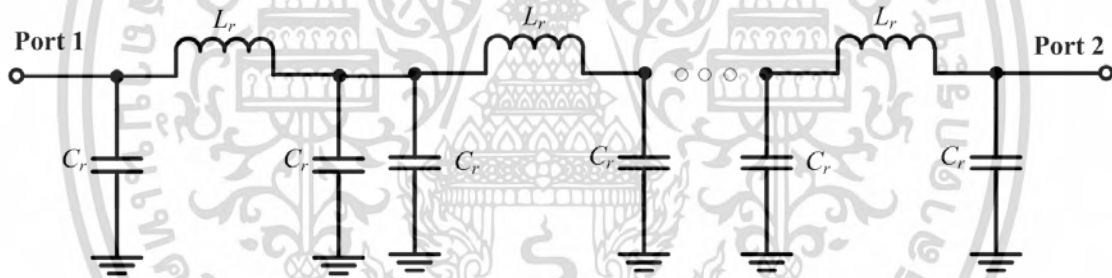
$$Z_{cap,r} = R_{cap} - jZ_0 \cot\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.9)$$

โดยที่ R_{cap} คือ ความต้านทานภายในของตัวเก็บประจุ และ $Z_{cap,r}$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.3 วงจรสายส่งสัญญาณแบบทวิภาคที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมพ์

การสูญเสียที่เกิดบนแผ่นซับสเตรต ทำให้เกิดข้อจำกัดในด้านการรับส่งสัญญาณของสายส่งแบบส่วนเดียว มีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสายส่งที่มีค่าความยาวทางไฟฟ้าที่มาก สายส่งแบบหลายส่วนจึงถูกนำมาใช้งาน โดยการเรียงซ้อนกันของสายส่งแบบแบบลัมพ์ ซึ่งถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสายส่งสัญญาณแบบหลายส่วนที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมพ์

เมทริกซ์ของ ABCD ของสายส่งแบบหลายส่วนสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.10

$$[ABCD]_{multiTL} = [ABCD]_{TL1} \cdot [ABCD]_{TL2} \cdots [ABCD]_{TLn} \quad (2.10)$$

โดยที่ $[ABCD]_{TLi}$ คือ ABCD เมทริกซ์จำนวนที่ i ของสายส่งแบบหลายส่วน และ n คือ ผลรวมทั้งหมดของสายส่งแบบหลายส่วน คุณสมบัติของสายส่งนั้นสามารถหาได้จาก

$$\theta = \cosh^{-1}(A_{multiTL}) \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ 5 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_0 = \frac{B_{multiTL}}{\sinh(\theta)} \quad (2.12)$$

โดยที่ θ คือความยาวเชิงไฟฟ้า (Electrical length) และ Z_0 คือค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance)

สำหรับกรณีพิเศษของสายส่งที่เหมือนกันทั้งสองส่วนในที่ถูกเรียงซ้อนกัน สามารถหาเมทริกซ์ ABCD ได้ดังนี้

$$A_{2sec TL} = 1 + 4 \frac{Z_{ind,r}}{Z_{cap,r}} + 2 \frac{Z_{ind,r}^2}{Z_{cap,r}^2} \quad (2.13)$$

$$B_{2sec TL} = 2Z_{ind,r} + 2 \frac{Z_{ind,r}^2}{Z_{cap,r}} \quad (2.14)$$

$$C_{2sec TL} = \frac{4}{Z_{cap,r}} + 6 \frac{Z_{ind,r}}{Z_{cap,r}^2} + 2 \frac{Z_{ind,r}^2}{Z_{cap,r}^3} \quad (2.15)$$

$$D_{2sec TL} = A_{2sec TL} \quad (2.16)$$

โดยคุณสมบัติของสายส่งสัญญาณสามารถพบได้โดยใช้สมการ (2.11) และ (2.12)



บทที่ 3 วงจรเลื่อนเฟส

วงจรเลื่อนเฟส (Phase shifter) เป็นอุปกรณ์สองขา (Two-port device) ซึ่งในทางอุดมคติ วงจรเลื่อนเฟสจะเปลี่ยนเฟสของสัญญาณอินพุตให้เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่มีขนาดของเฟสเท่ากันและไม่ลดทอนสัญญาณอินพุต โดยเฟสของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของความถี่นั้นสามารถกำหนดให้เปลี่ยนได้เมื่อมีการแพร่กระจายผ่านสายส่ง



รูปที่ 3.1 วงจรเลื่อนเฟส

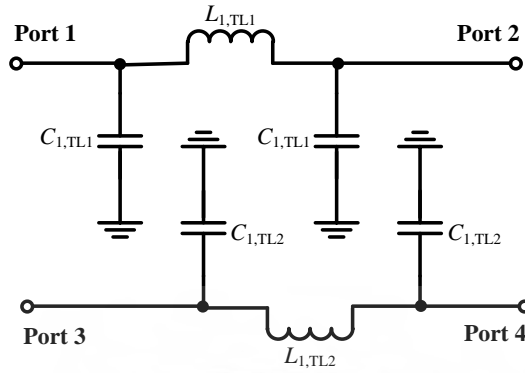
3.1 วงจรเลื่อนเฟสแบบสายส่งและแบบลัมพ์

ในย่านความถี่สูงยิ่งยวด วงจรเลื่อนเฟสจะอยู่ในรูปของสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยสายส่ง 2 เส้น โดยปกติสายส่งทั้งสองเส้นจะมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากัน ($Z_{01} = Z_{02}$) แต่จะมีค่าความยาวเชิงไฟฟ้าต่างกัน ($\theta_1 \neq \theta_2$) สัญญาณอินพุตที่ port 1 และ port 3 จะไปออกที่เอาต์พุต port 2 และ port 4 ตามลำดับ ความยาวเชิงไฟฟ้าของสายส่งทั้งสองจะทำให้สัญญาณเอาต์พุตที่ port 2 และ port 4 มีเฟสที่ต่างกันตามต้องการ

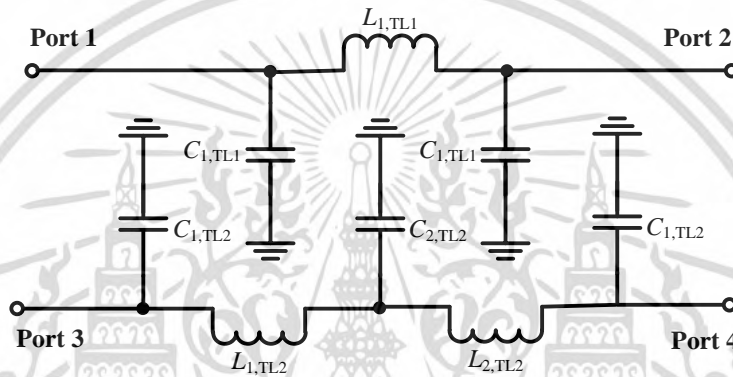


รูปที่ 3.2 วงจรเลื่อนเฟส ที่ใช้สายส่ง

สำหรับวงจรเลื่อนเฟสแบบลัมพ์จะใช้โครงสร้างของวงจรสายส่งแบบลัมพ์ที่กล่าวในบทที่ 2 มาใช้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยในรูป 3.3(ก) จะใช้วงจรสายส่งแบบลัมพ์ทั่วไปสำหรับสายส่งที่ 1 และ 2 แต่ในรูปที่ 3.3(ข) จะใช้วงจรสายส่งแบบลัมพ์ ทั่วไปสำหรับสายส่งที่ 1 และใช้สายส่งแบบลัมพ์สองส่วนสำหรับสายส่งที่ 2



(ก)



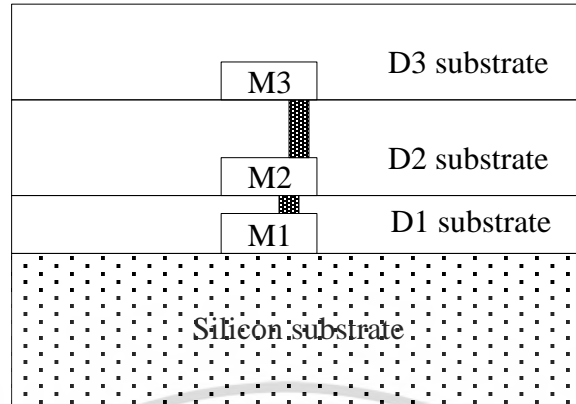
(ข)

รูปที่ 3.3 วงจรเลื่อนเฟส ที่ใช้วงจรแบบสัสม์ (ก) วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้วงจรสายส่งแบบสัสม์ทั่วไป (ข) วงจรเลื่อนเฟสที่ใช้สายส่ง แบบสัสม์ทั่วไป และสายส่งแบบสัสม์หลายส่วน

3.2 การสร้างอุปกรณ์ลัมพีใน IPD Process

วงจรเลื่อนเฟสจะถูกจำลองบนกระบวนการ “Integrated Passive Device Process,” หรือ IPD ใน IPD จะมีชั้นฉนวนทั้งหมด 3 ชั้น และมีชั้นตัวนำทั้งหมด 3 ชั้นดังแสดงในรูปที่ 3.4 ฐานรองจะเป็นซิลิคอนซึ่งมีค่า dielectric constant เท่ากับ 11.9 และค่าความสูญเสีย loss tangent เท่ากับ 0.033 ค่าความหนาของชั้นฐานอยู่ที่ 650 μm ชั้นต่อมาคือชั้นฉนวน D1 ซึ่งก็คือ SiNx จะมีค่า dielectric constant เท่ากับ 6.7 และค่าความสูญเสีย loss tangent เท่ากับ 0.0002 ชั้นต่อมาอีกสองชั้นคือ D2 และ D3 จะเป็นวัสดุชนิด BCB ซึ่งมีค่า dielectric constant เท่ากับ 2.65 และค่าความสูญเสีย loss tangent เท่ากับ 0.0008

ใน In the IPD process จะมีชั้นตัวนำสามชั้นคือ M1, M2 และ M3 ทั้งสามชั้นทำมาจากทองแดง ซึ่งมีค่าความนำ conductivity เท่ากับ $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$. ความหนาของแต่ละชั้นตัวนำคือ 1 μm , 0.65 μm , และ 10 μm สำหรับ M1, M2 และ M3 ตามลำดับ มีชั้น SiNx_via เชื่อมต่อชั้น M1 และ M2 และมีชั้น BCB1_ เชื่อมต่อชั้น M2 และ M3. ชั้นเชื่อมต่อทั้งหมดทำจากทองแดง

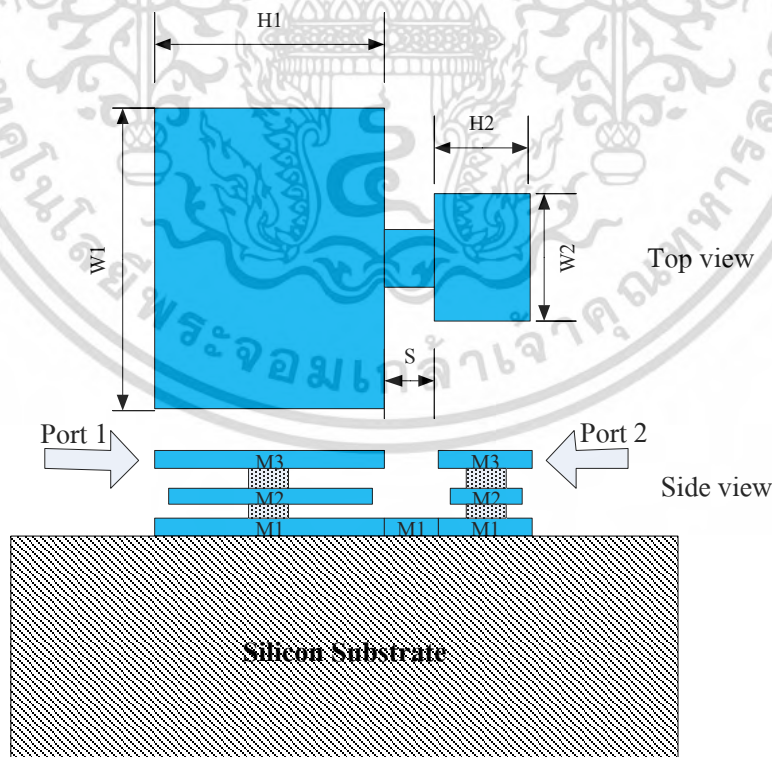


รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางของกระบวนการ IPD

ในวงจรสายส่งแบบลัมพ์ที่สร้างบนกระบวนการ IPD จะประกอบด้วยค่า ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ ดังนั้นต่อไปนี้จะเป็นการวิเคราะห์อุปกรณ์แต่ละตัว

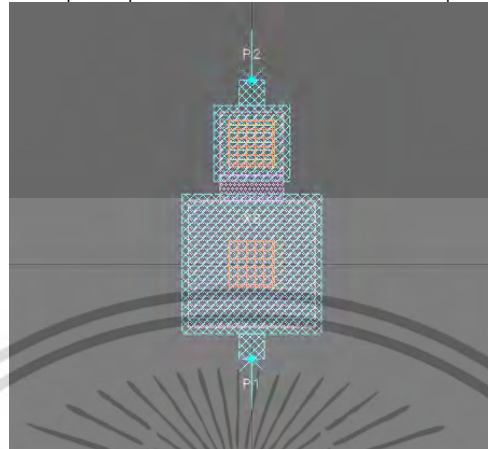
3.2.1 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุในโครงข่ายนี้จะแบบ parallel plate capacitor โครงสร้างของตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นขนานกัน ตัวแปรในการออกแบบตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยค่า $H1$, $W1$, S , $H2$, $W2$ โดย $H1$ และ $W1$ คือ ความยาวและความกว้างของแผ่น ส่วน $H2$ และ $W2$ คือความยาวและความกว้างของ via ที่ต่อกับตัวเก็บประจุ ตัวแปร S คือระยะระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุกับ via รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 3.5 ภาพด้านบนและภาพตัดขวางของตัวเก็บประจุ

การหาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุทำได้โดยการจำลองในโปรแกรม ADS ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ตารางที่ 3.1 แสดงค่าอิมพีแดนซ์และค่าตัวเก็บประจุของอุปกรณ์โดยใช้ via ขนาดเล็กสุด และค่า S เท่ากับ 10 μm



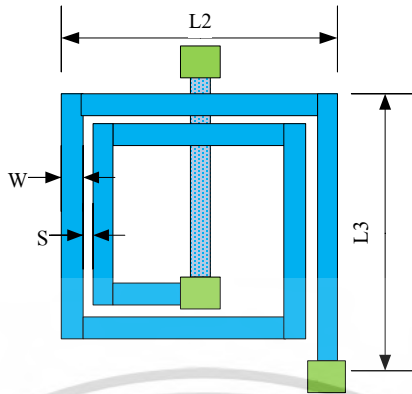
รูปที่ 3.6 การจำลองตัวเก็บประจุในโปรแกรม ADS

ตาราง 3.1 ตัวเก็บประจุที่มีค่าตัวแปรต่างๆ

H1 (μm)	W1 (μm)	Frequency = 2.4 GHz		Frequency = 5.2 GHz	
		Impedance (Ω)	Capacitance (pF)	Impedance (Ω)	Capacitance (pF)
50	50	0.13-j121.24	0.548	0.15-j54.24	0.564
60	60	0.125-j79.192	0.837	0.156-j34.666	0.883
70	70	0.124-j55.605	1.193	0.16-j23.624	1.295
80	80	0.121-j40.868	1.623	0.162-j16.671	1.836
90	90	0.125-j31.226	2.124	0.169-j12.065	2.53
100	100	0.125-j24.483	2.708	0.17-j8.815	3.472
110	110	0.129-j19.58	3.387	0.176-j6.4	4.782
120	120	0.132-j15.968	4.153	0.181-j4.595	6.66
130	130	0.137-j13.1	5.062	0.188-j3.124	9.797

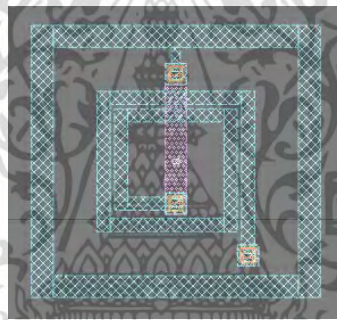
3.2.2 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในโครงการนี้เป็นแบบ spiral โดยจะมีตัวแปรคือ L2, L3, W, S, N ซึ่ง L2 และ W3 คือความยาวและความกว้าง ของวงนอกของตัวเหนี่ยวนำ ขณะที่ W คือความกว้างของตัวนำและ S คือระยะห่างระหว่างตัวนำ N คือจำนวนรอบ รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ

ในการจำลอง รอบของตัวเหนี่ยวนำจะถูกกำหนดไว้ที่ 2 รอบ ความกว้างของตัวนำและระยะห่างระหว่างตัวนำ ถูกกำหนดไว้ที่ 30 และ 10 μm ตามลำดับ รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการจำลองตัวเหนี่ยวนำในโปรแกรม ADS ตารางที่ 3.2 แสดงผลการจำลอง



รูปที่ 3.8 การจำลองตัวเหนี่ยวนำในโปรแกรม ADS

ตารางที่ 3.2 ตัวเหนี่ยวนำแบบ spiral ที่มีค่า $W = 30 \mu\text{m}$ และ $S = 10 \mu\text{m}$ และ $N = 2$

L2	L3	Frequency = 2.4 GHz		Frequency = 5.2 GHz	
		Impedance (Ω)	Inductor (nH)	Impedance (Ω)	Inductor (nH)
210	210	0.515+j8.945	0.593	0.785+j19.3	0.59
240	240	0.587+j12.228	0.81	0.911+j26.748	0.8187
300	300	0.707+j19.496	1.293	1.19+j44.064	1.349
360	360	0.855+j27.533	1.826	1.615+j65.018	1.99
400	400	0.963+j33.276	2.207	2.018+j81.573	2.497
450	450	1.124+j40.885	2.711	2.691+j106.138	3.249
500	500	1.285+j48.949	3.246	3.862+j136.84	4.188
550	550	1.474+j57.563	3.817	5.659+j176.869	5.413
600	600	1.696+j66.752	4.427	8.89+j231.962	7.1

บทที่ 4

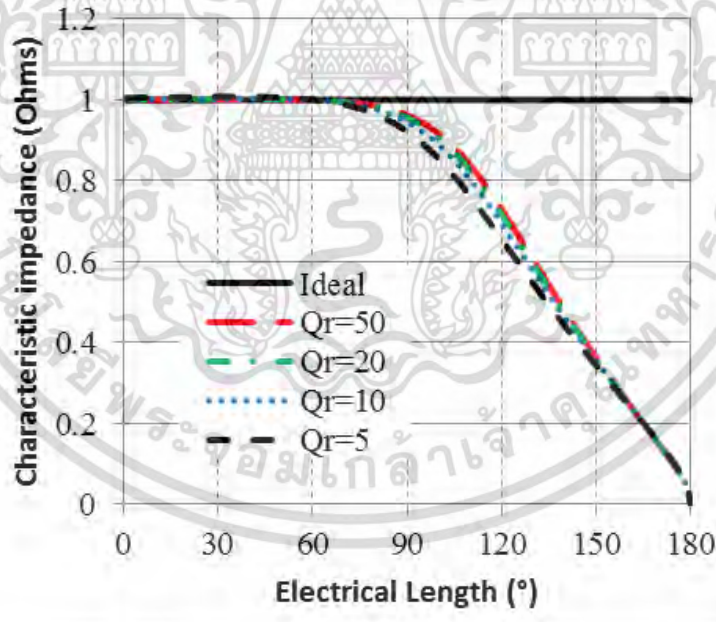
ผลการจำลองวงจรสายส่งสัญญาณและวงจรเลื่อนเฟส

ในบทนี้ วงจรที่ศึกษาจะถูกจำลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นจะเป็นการจำลองวงจรโดยโปรแกรม *ADS* สำหรับวงจรสายส่ง จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการรวมของค่าความสูญเสียเข้าไปด้วย จากนั้นจึงใช้โปรแกรม *ADS* วาดรูปตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเพื่อมาประกอบเป็นวงจรสายส่ง หลังจากนั้นจะนำวงจรสายส่งไปประกอบเป็นวงจรเลื่อนเฟส

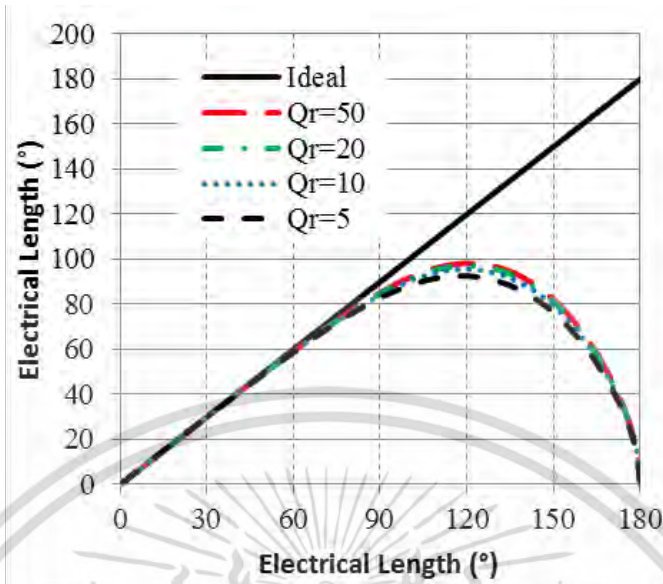
4.1 ผลการจำลองวงจรสายส่ง

อุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดให้มีค่าอิมพีแดนซ์ตามสมการที่ (2.7) – (2.9) โดยค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นกับค่า Q_r ในขณะที่ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดที่ 0.3Ω ค่า Q_r ที่ศึกษาจะเป็นค่า 50, 20, 10 และ 5

ผลการจำลองวงจรสายส่งสัญญาณแบบทั่วไปที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมพ์ตามรูปที่ 2.3 ได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเทียบกับค่า 50Ω และความยาวเชิงไฟฟ้าตามรูปที่ 4.1(ก) และ 4.1(ข) ตามลำดับ ในรูปจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะจะมีค่าประมาณหนึ่งที่มีความยาวเชิงไฟฟ้า ศูนย์ถึงประมาณหกสิบองศา จากนั้นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะจะมีค่าลดลงที่ความยาวเชิงไฟฟ้ามากขึ้น ส่วนค่าความยาวเชิงไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่คาดหวัง หากความยาวเชิงไฟฟ้ามากกว่าหกสิบองศา



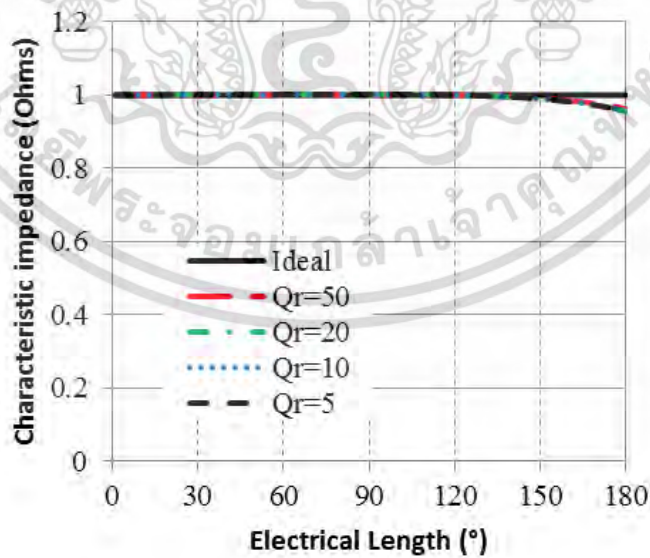
(ก)



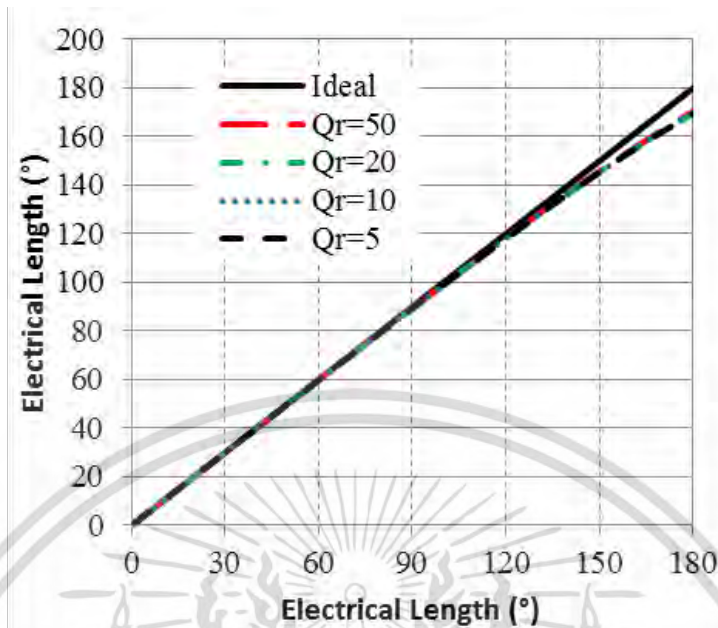
(ข)

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบวงจรสายส่งทั่วไปโดยมีค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำที่ค่าต่างๆ โดยเปรียบเทียบ (ก) ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และ (ข) ค่าความยาวเชิงไฟฟ้า

ผลการจำลองวงจรสายส่งสัญญาณแบบสองส่วนที่ใช้อุปกรณ์แบบสิมป์ตามรูปที่ 2.4 ได้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเทียบกับค่า 50Ω และความยาวเชิงไฟฟ้าตามรูปที่ 4.2(ก) และ 4.2(ข) ตามลำดับ ในรูปจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะจะมีค่าประมาณหนึ่งที่มีความยาวเชิงไฟฟ้า ศูนย์ถึงประมาณหนึ่งร้อยห้าสิบองศา จากนั้นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะจะมีค่าลดลงที่ความยาวเชิงไฟฟ้ามากขึ้น ส่วนค่าความยาวเชิงไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่คาดหวัง หากความยาวเชิงไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งร้อยห้าสิบองศา



(ก)

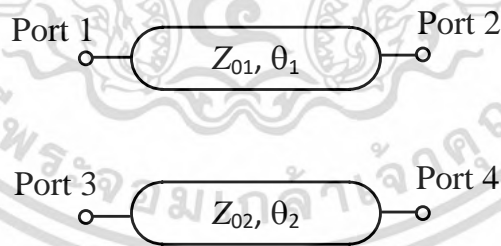


(ข)

รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบวงจรสายส่งแบบสองส่วนโดยมีค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำที่ค่าต่างๆ โดยเปรียบเทียบ (ก) ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และ (ข) ค่าความยาวเชิงไฟฟ้า

4.2 ผลการจำลองวงจรเลื่อนเฟส

ในการทดลองวงจรเลื่อนเฟสถูกกำหนดให้มีค่าองศาที่เอาต์พุตต่างกัน 120° ที่ความถี่ 2.4 GHz วงจรสายส่งจะมีสองเส้นโดยเส้นที่หนึ่งต่ออินพุตพอร์ท 1 และ เอาต์พุตพอร์ท 2 ส่วนเส้นที่สองต่ออินพุตพอร์ท 3 และเอาต์พุตพอร์ท 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สายส่งทั้งหมดออกแบบให้มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50Ω คุณสมบัติของสายส่งเส้นที่หนึ่งและสองแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 วงจรเลื่อนเฟส

ตารางที่ 4.1 วงจรเลื่อนเฟสและคุณสมบัติของสายส่ง

Transmission Line	Characteristic impedance (Ω)	Electrical length ($^\circ$)
1	50	30
2	50	150

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุทางอุดมคติที่ต้องการในการออกแบบสายส่ง โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ (2.5) และ (2.6)

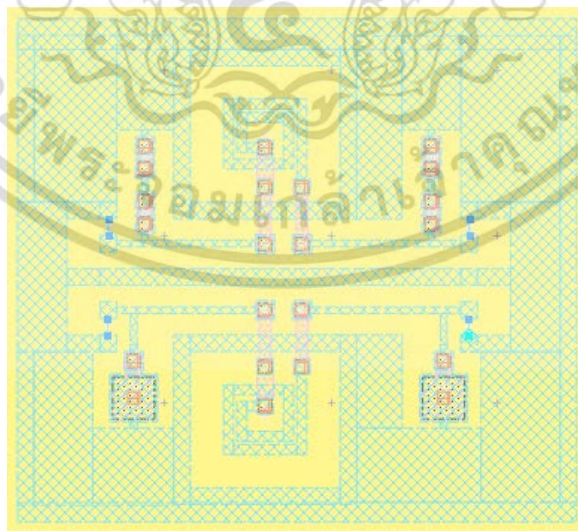
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุทางอุดมคติ

Transmission Line	L_r (nH)	C_r (pF)
1	1.658	0.3554
2	1.658	4.95

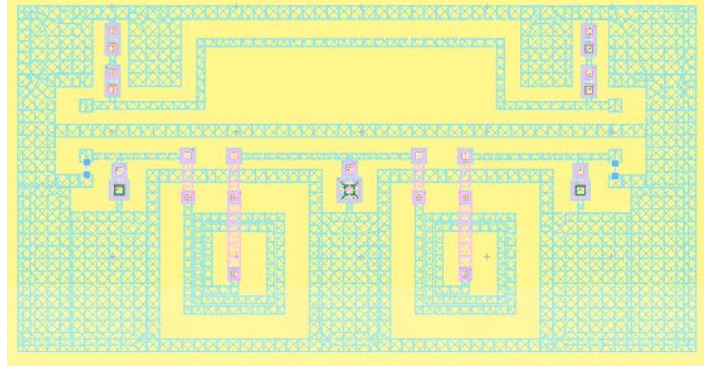
จากค่าที่ได้ นำไปออกแบบอุปกรณ์ใน IPD process โดยจะออกแบบสองแบบคือ แบบที่หนึ่งจะใช้สายส่งแบบทั่วไปทั้งสายส่งที่หนึ่ง และสายส่งที่สอง ส่วนแบบที่สองจะใช้สายส่งแบบทั่วไปในการออกแบบสายส่งที่หนึ่ง แต่จะใช้สายส่งแบบสองส่วนในการออกแบบสายส่งที่สอง ค่าอุปกรณ์ที่ออกแบบได้จะเป็นไปตามค่าที่ระบุในตารางที่ 4.3 รูปของการออกแบบทั้งสองแสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.4 สรุปคุณสมบัติของวงจรเลื่อนเฟส

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุใน IPD process

Design	T.L.	L1 (nH)	C1 (pF)	L2 (nH)	C2 (pF)
1	1	1.666	0.247	-	-
	2	1.666	5.44	-	-
2	1	1.692	0.247	-	-
	2	2.37	1	2.37	1.73



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 ลายวงจรของวงจรเลื่อนเฟสสำหรับ (ก) แบบที่หนึ่ง และ (ข) แบบที่สอง

ตารางที่ 4.4 สรุปคุณสมบัติของวงจรเลื่อนเฟสของทั้งสองแบบ

Design	T.L.	Characteristic impedance (Ω)	Electrical length ($^{\circ}$)
1	1	49.8-j0.937	30.4
	2	31-j8.71	151.9
2	1	48.9-j0.5	4.95
	2	51.3-j2.25	149.9

จากตารางจะเห็นได้ว่าสายส่งที่สองของแบบที่หนึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะแตกต่างจากค่าในอุดมคติที่ ค่าความยาวเชิงไฟฟ้าประมาณ 150° ในขณะที่สายส่งที่หนึ่งของแบบที่สองมีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะใกล้เคียงกับค่าในอุดมคติที่ค่าความยาวเชิงไฟฟ้าเท่ากัน ส่วนสายส่งที่หนึ่งซึ่งมีค่าความยาวเชิงไฟฟ้าสั้น การออกแบบที่หนึ่งและที่สองจะไม่มีผลแตกต่างมากนัก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาการสร้างวงจรสายส่งบนฐานรองซึ่งมีค่าความสูญเสียในขนาดเล็ก โดยในวงจรขนาดเล็กการใช้สายส่งแบบสตริปจะไม่เหมาะสมเนื่องจากสายส่งแบบสตริปจะมีความยาวมากกว่าขนาดของวงจร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วงจรสายส่งที่ใช้อุปกรณ์แบบลัมพ์ ซึ่งจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ในฐานรองที่มีความสูญเสีย ตัวเหนี่ยวนำจะมีความต้านทานสูง ซึ่งจะแตกต่างจากตัวเหนี่ยวนำในอุดมคติ ในโครงการนี้ผลการศึกษาแสดงว่าวงจรสายส่งแบบลัมพ์ทั่วไปที่มีความยาวเชิงไฟฟ้ามากกว่า 60 องศา จะไม่สามารถแสดงคุณสมบัติแบบสายส่งได้ดัดนัก ในโครงการมีการใช้สายส่งหลายส่วนซึ่งจะช่วยให้วงจรสายส่งแบบลัมพ์มีประสิทธิภาพดีขึ้น

จากการศึกษาวงจรสายส่งแบบลัมพ์ ได้มีการนำสายส่งแบบลัมพ์มาใช้ในวงจรเลื่อนเฟส โดยมีการเปรียบเทียบการออกแบบโดยใช้สายส่งแบบลัมพ์ทั่วไป และสายส่งแบบลัมพ์หลายส่วน ผลการศึกษาพบว่าสายส่งแบบลัมพ์ทั่วไปใช้งานได้ดัดกับสายส่งที่มีความยาวเชิงไฟฟ้า 30 องศา ในขณะที่สายส่งที่ต้องการความยาวเชิงไฟฟ้า 150 องศา วงจรสายส่งหลายส่วนจะทำงานได้ดีกว่าวงจรสายส่งแบบลัมพ์ทั่วไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

การออกแบบวงจรสายส่งบนฐานรองซึ่งมีค่าความสูญเสียในขนาดเล็ก จะต้องคำนึงถึงความยาวเชิงไฟฟ้าที่ต้องการ หากความยาวเชิงไฟฟ้ามาก จะต้องใช้วงจรแบบลัมพ์หลายส่วนมาใช้ในการออกแบบ

5.2 การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ(Publications)

Conference paper:

C. Pakasiri, T. Kongchayasukwat “Improvement of transmission line circuit on lossy substrate with application on phase shifter design,” iEECON019, 6-8 March, Cha-am, Thailand.

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างวงจรเลื่อนเฟส จะทำได้ดีหากมีการใช้วงจรสายส่งหลายส่วน นอกจากนี้การใช้วงจรสายส่งหลายส่วนอาจมีการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการใช้งานย่านความถี่กว้าง (wide band) โดยจะต้องมีการศึกษาอย่างละเอียดต่อไป

บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง

- [1] C.-W. Wang, T.-G. Ma and C.-F. Yang, "A new palnar artificial transmission line and its applications to a miniaturized butler matrix," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 55, no. 12, pp. 2792-2801, Dec. 2007.
- [2] J. W. Phinney, D. J. Perreault and J. H. Lang, "Synthesis of lumped transmission-line analogs," IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 4, pp. 1531-1542, July 2007.
- [3] J. L. Ramos Quirarte and J. P. Starski, "Synthesis of Schiffman phase shifters," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 39, no. 11, pp. 1885-1889, Nov. 1991.
- [4] L. Guo, H. Zhu and A. Abbosh, "Wideband phase shifter with wide phase range using parallel coupled lines and L-shaped networks," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 26, no. 8, pp. 592-594, Aug. 2016.
- [5] Y.-X. Guo, Z.-Y. Zhang and L. C. Ong, "Improved wide-band Schiffman phase shifter," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 54, no. 3, pp. 1196-1200, March 2006.
- [6] S. Y. Zheng, W. S. Chan and K. F. Man, "Broadband phase shifter using loaded transmission line," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 20, no. 9, pp. 498-500, Sept. 2010.



ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ฉัตรพล ภคศิริ.....
 เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด..... 20 ม.ค. 2518 อายุ..... 44 ปี
 สถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	อิเล็กทรอนิกส์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2539
วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต	ECE	University of Houston, Texas, U.S.A.	2544
วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต	EECS	National Chiao Tung University, Taiwan	2556
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต	ECE	University of Houston, Texas, U.S.A.	2548

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)..... การประยุกต์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง การออกแบบเสาอากาศ..... การใช้ระเบียบวิธีทางตัวเลขในการศึกษาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
-	-	-

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2542	Research assistantships	University of Houston
2554	Scholarships	National Chiao Tung University

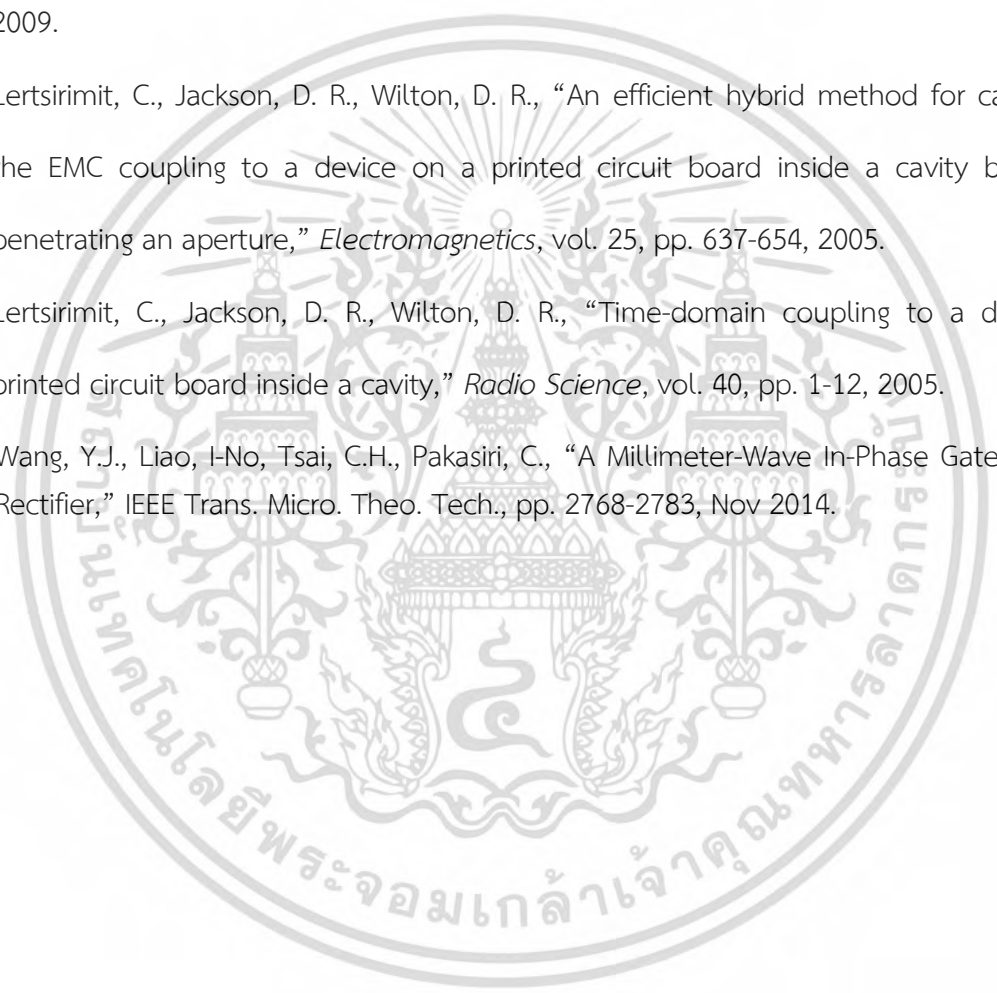
ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ).....

- 1) Pakasiri, C. and Torrungrueng, D., "Forward-backward Method with a Spectral Acceleration Algorithm for Capacitance Extraction of Planar Structures on a Single-

Layered Medium,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 3, March 2014, pp. 694-700.

- 2) Lertsirimit, C. and Torrungrueng, D., “Fast capacitance extraction for finite planar periodic structures using the generalized forward-backward and novel spectral acceleration method,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 96, pp. 251-266, 2009.
- 3) Lertsirimit, C., Jackson, D. R., Wilton, D. R., “An efficient hybrid method for calculating the EMC coupling to a device on a printed circuit board inside a cavity by a wire penetrating an aperture,” *Electromagnetics*, vol. 25, pp. 637-654, 2005.
- 4) Lertsirimit, C., Jackson, D. R., Wilton, D. R., “Time-domain coupling to a device on printed circuit board inside a cavity,” *Radio Science*, vol. 40, pp. 1-12, 2005.
- 5) Wang, Y.J., Liao, I-No, Tsai, C.H., Pakasiri, C., “A Millimeter-Wave In-Phase Gate-Boosting Rectifier,” *IEEE Trans. Micro. Theo. Tech.*, pp. 2768-2783, Nov 2014.



ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยเผยแพร่

โครงการนี้ได้ทำเผยแพร่ผลงานวิจัย ที่ “The 2019 International Electrical Engineering Congress” หรือ iEECON019 ซึ่งจัดในช่วงวันที่ 6 – 8 มีนาคม 2019 ณ โรงแรม The Regent Cha-am Beach Resort, เพชรบุรี ประเทศไทย ในหัวข้อเรื่อง “Improvement of transmission line circuit on lossy substrate with application on phase shifter design” ผลงานวิจัยนี้ได้ถูกเผยแพร่ ในฐานข้อมูล Scopus



Improvement of Transmission Line Circuit on Lossy Substrate with Application on Phase Shifter Design

Chatrpol Pakasiri
College of Advanced
Manufacturing Innovation
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
chatrpol.pa@kmitl.ac.th

Thitipun Kongchayasukwat
College of Advanced
Manufacturing Innovation
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand

Abstract—Lumped transmission line circuit design on lossy substrate is studied in this paper. Conventional single section lumped transmission line cannot perform well on lossy substrate as its electrical length gets longer. Multi-section transmission lines can be used to improve transmission line properties in this case. Phase shifter circuits are designed with a large electrical length transmission line. By using a multi-section transmission line, the resulting transmission line properties are better than those of single section transmission line.

Keywords—lumped transmission line, multi-section transmission line, lossy substrate, phase shifter.

I. INTRODUCTION

For integrated circuits, distributed transmission line size is too large to be used. Usually, lumped transmission line circuits are used to replace distributed transmission lines. Conventional lumped transmission line circuits consist of one inductor and two capacitor in form of pi-network [1]. Multi-section transmission lines are studied over broadband frequency [2]. Nevertheless, using lumped transmission line circuit on lossy substrate has some limitations as its properties diverges some expected distributed transmission line properties. Phase shifter also uses transmission lines in implementation [3-6].

In this paper, effects of lossy substrate on lumped transmission line circuit are studied. Two phase shifter circuits are designed to confirm the results from this study.

II. LUMPED TRANSMISSION LINE CIRCUIT

A. Single Section Lumped Transmission Line

For a narrow band lumped transmission line, pi network is normally used. Fig. 1 shows the pi network lumped transmission line whose electrical length less than 180° . The components of the circuit can be found as

$$L_r = \frac{Z_0}{\omega} \sin(\theta), \quad (1)$$

$$C_r = \frac{1}{\omega Z_0} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (2)$$

where ω is the angular frequency, Z_0 is the characteristic impedance and θ is the electrical length of the transmission line. However, if the substrate is lossy, the inductor and capacitor contain additional resistance terms in their impedance values. Typically, the resistance of an inductor on lossy substrate is relatively high. Its value is indicated by Q_r value as

$$Q_r = \omega L_r / R, \quad (3)$$

where R is the resistance part of the inductor. In this paper, inductors with $Q_r \leq 10$ are considered. Therefore, an inductor impedance used in single section lumped transmission line can be written as

$$Z_{ind,r} = \frac{Z_0 \sin(\theta)}{Q_r} + jZ_0 \sin(\theta). \quad (4)$$

For a capacitor on lossy substrate, the resistance value is relatively small. A fixed number is assumed in this paper. A capacitor impedance can be written as

$$Z_{cap,r} = R_{cap} - jZ_0 \cot\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (5)$$

where R_{cap} is the resistance part of the capacitor impedance.

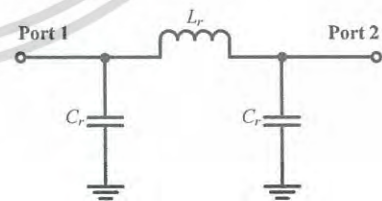


Fig. 1. Conventional lumped transmission line circuit.

B. Multi-Section Lumped Transmission Line

With substrate loss, single section lumped transmission line has limitation in representing a transmission line, especially a transmission line with large electrical length. Multi-section lumped transmission line can be implemented by cascaded

This work is supported by AMI, KMITL (grant number 2562-02-62-002)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

lumped transmission lines. Figure 2 shows multi-section lumped transmission line.

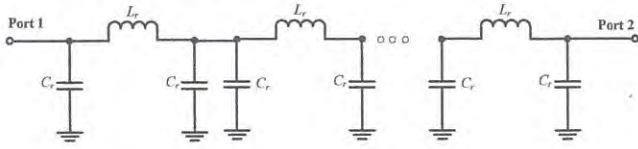


Fig. 2. Multi-section lumped transmission line circuit.

The ABCD matrix of the multi-section transmission line can be written as

$$[ABCD]_{multi\ TL} = [ABCD]_{TL1} \cdot [ABCD]_{TL2} \cdots [ABCD]_{TLn}, \quad (6)$$

where $[ABCD]_{TLi}$ is the ABCD matrix of the i^{th} transmission line section and n is the total number of section. The properties of the transmission line can then be found as

$$\theta = \cosh^{-1}(A_{multi\ TL}), \quad (7)$$

$$Z_0 = \frac{B_{multi\ TL}}{\sinh(\theta)}, \quad (8)$$

where θ and Z_0 are the electrical length and the characteristic impedance of the multi-section transmission line, respectively. For a special case of two identical transmission line section in cascade, the ABCD matrix can be found as

$$A_{2sec\ TL} = 1 + 4 \frac{Z_{ind,r}}{Z_{cap,r}} + 2 \frac{Z_{ind,r}^2}{Z_{cap,r}^2}, \quad (9)$$

$$B_{2sec\ TL} = 2Z_{ind,r} + 2 \frac{Z_{ind,r}^2}{Z_{cap,r}}, \quad (10)$$

$$C_{2sec\ TL} = \frac{4}{Z_{cap,r}} + 6 \frac{Z_{ind,r}}{Z_{cap,r}^2} + 2 \frac{Z_{ind,r}^2}{Z_{cap,r}^3}, \quad (11)$$

$$D_{2sec\ TL} = A_{2sec\ TL}. \quad (12)$$

The properties of the transmission line can be found using equation (7) and (8).

III. NUMERICAL EXPERIMENTS ON LUMPED TRANSMISSION LINES

In this section, lumped transmission lines are implemented using ideal (no loss) and practical components. For practical components, capacitors are assumed to have fixed resistance value of 0.3Ω . Inductors, however, have varied resistance values depending on their quality factor, Q_r , values. In the numerical studies, Q_r values of 50, 20, 10 and 5 are assumed.

A. Single section transmission line properties

Figure 3 shows the characteristic impedance and electrical length values of ideal and practical transmission lines. The characteristic impedances of the lines are set at unity. It is shown in Fig. 3(a) that the ideal lumped transmission line provides characteristic impedance value of unity for all the electrical length required. The practical transmission lines however yield lower characteristic impedance values as the

electrical lengths of the lines get longer (longer than 60° electrical length). A higher quality factor of inductors yields slightly a better characteristic impedance value at a higher electrical length (electrical length between 60° and 150°).

Figure 3(b) shows the electrical length of ideal and practical lumped transmission lines. For an electrical length greater than 60° , the electrical lengths of practical lines deviate from that of the ideal line. The values get lower as the required electrical length becomes longer.

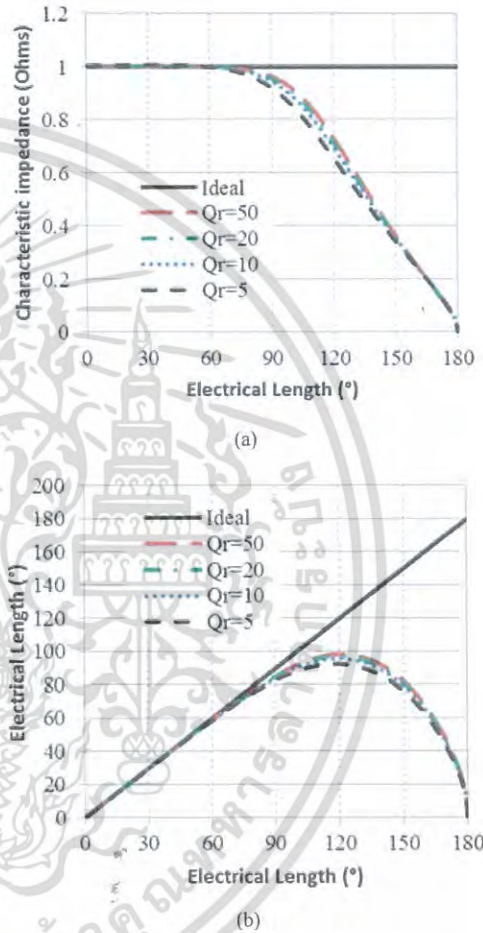


Fig. 3. Comparison of lumped transmission line circuit with different inductor quality factors. (a) Characteristic impedances and (b) electrical lengths of lumped transmission lines.

B. Multi-section transmission line properties

To check multi-section transmission line, two identical transmission lines are connected in cascade. Each section in two-section transmission lines has electrical length being half of the required electrical length. Figure 4 shows the characteristic impedance and electrical length of ideal and two-section practical transmission lines. Again, for practical components, capacitors are assumed to have fixed resistance value of 0.3Ω . Inductors, however, have varied resistance values depending on their quality factor, Q_r , values. In the numerical studies, Q_r values of 50, 20, 10 and 5 are assumed.

From the figure, it shows that the characteristic impedance and the electrical length of the two-section transmission line deviate significantly from the ideal values at the electrical length greater than 150° . In the worst case (with $Q_r=5$), the characteristic impedance has an error of 4.63% at the electrical length of 180° while the electrical length has an error of 5.84% at the electrical length of 180° . Transmission lines with these errors can be used in many applications with compromising performance. In the next section, phase shifter circuits are implemented with lumped transmission lines circuit.

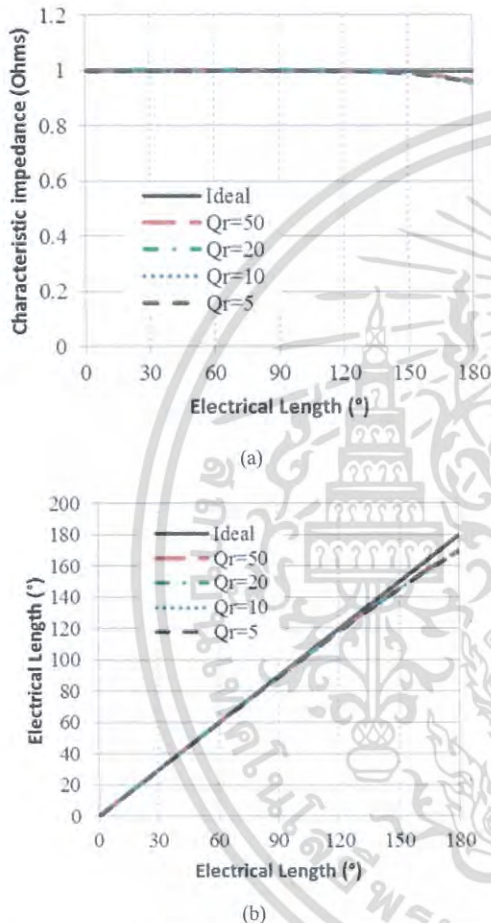


Fig. 4. Comparison of two-section transmission line circuits with different inductor quality factors. (a) Characteristic impedances and (b) electrical lengths of lumped transmission lines.

IV. PHASE SHIFTER CIRCUIT

For illustration, a phase shifter circuit with 120° output phase difference is chosen. Two transmission lines are required with the first transmission line connecting port 1 and 2 and the second transmission line connecting port 3 and 4. All ports are terminated with a 50Ω impedance value. Properties of the first and second transmission lines are shown in Table I. Figure 5 shows the phase shifter circuit with distributed transmission lines implementation.

TABLE I. PHASE SHIFTER CIRCUIT WITH DISTRIBUTED TRANSMISSION LINES PROPERTIES

Transmission Line	Characteristic impedance (Ω)	Electrical length ($^\circ$)
1	50	30
2	50	150

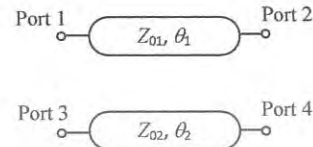


Fig. 5. Phase shifter circuit with distributed transmission lines.

The lumped transmission line components can be found by using (1) and (2). Table II shows the ideal lumped component values.

TABLE II. PHASE SHIFTER CIRCUIT WITH IDEAL LUMPED TRANSMISSION LINES COMPONENTS

Transmission Line	L_r (nH)	C_r (pF)
1	1.658	0.3554
2	1.658	4.95

To implement the circuit, an Integrated Passive Device Process (IPD) is used. The IPD process consists of three metal layer, two dielectric layer and a silicon substrate. The silicon substrate is lossy and therefore yields lossy lumped components. The dielectric 1 has a dielectric constant of 6.7 while the dielectric 2 has that of 2.65. The metal and via between the dielectric layers are made of copper. Figure 6 shows the cross section of the IPD process.

Two types of phase shifter circuits using lumped transmission lines are designed. The first design uses single-section transmission line to construct each transmission line. The second type uses single section and two-section transmission lines to construct the first and second transmission lines, respectively. The schematic of the lumped transmission line phase shifter circuit is shown in Fig. 7. In the implementation, parallel plate structures are used to construct capacitors while rectangular spiral inductors are used to construct inductors. The component values are adjusted to accommodate layout parasitic components. The final component values are shown in Table III. The transmission line (T.L.) properties of the layout are shown in Table IV. It is shown in the table that with small electrical length, single section lumped transmission line can be used with relatively small errors in transmission line properties. For a long electrical length, single section lumped transmission line yield errors in both characteristic impedance and the electrical length. Two section lumped transmission line yields a better result with an error on its characteristic impedance. If this error is minimized, there will be more errors on its electrical length. Therefore, designers need to choose an optimal value for the transmission line properties in this case.

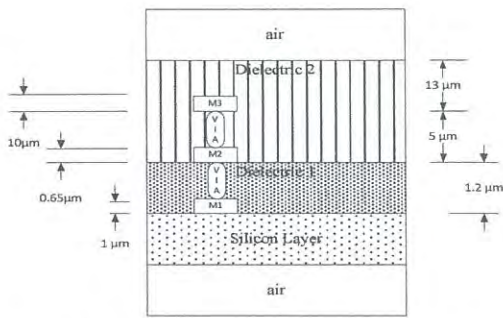


Fig. 6. Cross section view of Integrated Passive Device Process (IPD).

TABLE III. LUMPED TRANSMISSION LINES COMPONENTS ON IPD

Design	T.L.	L_1 (nH)	C_1 (pF)	L_2 (nH)	C_2 (pF)
1	1	1.666	0.247	-	-
	2	1.666	5.44	-	-
2	1	1.692	0.247	-	-
	2	2.37	1	2.37	1.73

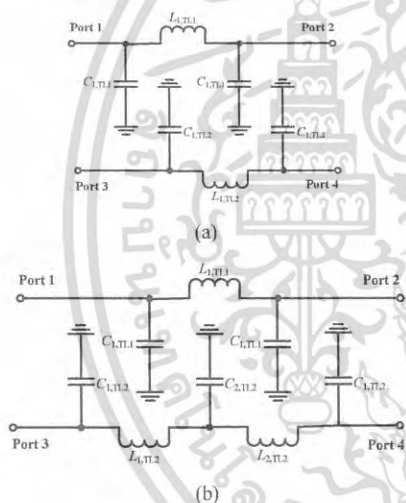


Fig. 7. Schematic of the phase shifter circuits: (a) design 1 and (b) design 2.

V. CONCLUSIONS

Lumped components on lossy substrate have resistance in their impedance values. Those resistances cause a transmission line constructed from lumped components having worsen properties, e.g. complex characteristic impedance and electrical length and errors in values from design equations. The study shows that a shorter transmission line has smaller errors than a longer transmission line. A long transmission line implementation on lossy substrate can be improved by using multi-section transmission line. Phase shifter circuits are illustrated in this paper. Two transmission lines with short and long electrical length are required in the circuit. For the long transmission line, two designs are implemented: one with single section and the other with two section transmission lines. The results show that the two section transmission line has better transmission line properties than single section

transmission line. These results confirm the use of multi section transmission lines for a long electrical length transmission line on lossy substrate.



(a)



(b)

Fig. 8. Layout of the phase shifter circuits: (a) design 1 and (b) design 2.

TABLE IV. TRANSMISSION LINES PROPERTIES OF THE LAYOUT

Design	T.L.	Characteristic impedance (Ω)	Electrical length ($^\circ$)
1	1	49.8-j0.937	30.4
	2	31-j8.71	151.9
2	1	49.87-j0.57	30.84
	2	51.3-j2.25	149.9

ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by College of Advanced Manufacturing Innovation, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (grant number 2562-02-62-002).

REFERENCES

- [1] C.-W. Wang, T.-G. Ma and C.-F. Yang, "A new planar artificial transmission line and its applications to a miniaturized butler matrix," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 55, no. 12, pp. 2792-2801, Dec. 2007.
- [2] J. W. Phinney, D. J. Perreault and J. H. Lang, "Synthesis of lumped transmission-line analogs," IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 4, pp. 1531-1542, July 2007.
- [3] J. L. Ramos Quirarte and J. P. Starks, "Synthesis of Schiffman phase shifters," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 39, no. 11, pp. 1885-1889, Nov. 1991.
- [4] L. Guo, H. Zhu and A. Abbosh, "Wideband phase shifter with wide phase range using parallel coupled lines and L-shaped networks," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 26, no. 8, pp. 592-594, Aug. 2016.
- [5] Y.-X. Guo, Z.-Y. Zhang and L. C. Ong, "Improved wide-band Schiffman phase shifter," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 54, no. 3, pp. 1196-1200, March 2006.
- [6] S. Y. Zheng, W. S. Chan and K. F. Man, "Broadband phase shifter using loaded transmission line," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 20, no. 9, pp. 498-500, Sept. 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
รายงานการเงิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 26 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ 2562-02-62-002 ตั้งแต่วันที่ 1 ต.ค.2561 ถึงวันที่ 30 ก.ย. 2562

แหล่งทุน: ทุนวิจัยเงินรายได้วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

ชื่อโครงการ : การปรับปรุงวงจรสายส่งไมโครขนาดเล็กลงที่มีความสูญเสียในฐานรอง

ชื่อหัวหน้าโครงการ: ฉัตรพล ภคศิริ

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายการรับ	รายการจ่าย					รวม รายการจ่าย
			รับ	จ่าย	คงเหลือ		ดอกเบี้ยรับ	งบบุคลากร	งบดำเนินงาน			
						ค่าจ้างชั่วคราว	ค่าตอบแทน	ค่าใช้สอย	ค่าวัสดุ	ค่า สาธารณ ูป โภค	ค่าครุภัณฑ์	
	งบประมาณที่ได้รับการอนุมัติ (ตามแผน)	2562-02-62-002	125,000.00									-
10 ม.ค. 62	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 1 = 80%)		106,250.00			179.26						
2 ส.ค. 62	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 2 = 20%)		18,750.00									
	หัก ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 1)			19,904.14				-	19,904.14	-	-	19,904.14
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 2)			105,200.00				22,500.00	82,500.00	200.00	-	105,200.00
	งบประมาณคงเหลือ		125,000.00		- 104.14	179.26						
	รายละเอียดค่าใช้จ่าย											
ครั้งที่ 1			106,250.00									
26 ต.ค. 62	หนังสือ All about CCS			494.1					494.10			494.10
29 ต.ค. 61	กระดาษ Glossy	131800112		100					100.00			100.00
9 พ.ย. 62	P-ET-A-00513 ET-BASE PIC32MX250F128B	PC6101235		909.5					909.50			909.50
21 พ.ย. 61	0059-0818-8 และ 0152-006-1	829/0001		2278.24					2,278.24			2,278.24
22 พ.ย. 61	A-AP-A-00095	PC6101282		278.2					278.20			-

บันทึกรายการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ 2562-02-62-002 ตั้งแต่วันที่ 1 ต.ค.2561 ถึงวันที่ 30 ก.ย. 2562

แหล่งทุน: ทุนวิจัยเงินรายได้วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

ชื่อโครงการ : การปรับปรุงวงจรสายส่งในวงจรขนาดเล็กที่มีความสูญเสียในฐานรอง

ชื่อหัวหน้าโครงการ: ฉัตรพล ภคศิริ

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายรับ	รายจ่าย				รวม รายจ่าย	
			รับ	จ่าย	คงเหลือ		ดอกเบี๋ยรับ	งบบุคลากร	งบดำเนินงาน			งบลงทุน
7 ก.พ. 62	แผ่นวงจรพิมพ์ RT5870	YW6202-683		14445					14,445.00			-
25 ก.พ. 62	ดอกสว่านเจาะเหล็ก 1.0 มม MEXCO	IV62020322		192.60					192.60			-
26 ก.พ. 62	กระดาษไข A4	D0000796954		190.00					190.00			-
10 พ.ค. 62	พลาสติก PE	158.00		1,016.50					1,016.50			1,016.50
												-
												-
												-
	รวมครั้งที่ 1		106,250.00	19,904.14	86,345.86	-	-	-	19,904.14	-	-	4,798.34
ครั้งที่ 2			18,750.00									
15 ส.ค. 62	RFID Tag	INV-2019908150035		200.00					200.00			200.00
20 ส.ค. 62	ค่าตอบแทน							22,500.00				22,500.00
20 ส.ค. 62	ค่าจ้างทำลายวงจรและวัดทดสอบ							32,500.00				32,500.00
20 ส.ค. 62	ค่าจัดทำสื่อสำหรับการถ่ายทอดเทคโนโลยี							50,000.00				50,000.00
												-

บันทึกรายการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ 2562-02-62-002 ตั้งแต่วันที่ 1 ต.ค.2561 ถึงวันที่ 30 ก.ย. 2562

แหล่งทุน: ทุนวิจัยเงินรายได้วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

ชื่อโครงการ : การปรับปรุงวงจรสายส่งในวงจรขนาดเล็กที่มีความสูญเสียในฐานรอง

ชื่อหัวหน้าโครงการ: ฉัตรพล ภคศิริ

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			รายการรับ		รายการจ่าย				รวม รายการจ่าย	
			รับ	จ่าย	คงเหลือ	ดอกเบี้ยรับ	งบบุคลากร	งบดำเนินงาน			งบลงทุน		
												-	
												-	
												-	
												-	
												-	
												-	
												-	
	รวมครั้งที่ 2		18,750.00	200.00	18,550.00	-	-	22,500.00	82,500.00	200.00	-	-	105,200.00

ลงชื่อหัวหน้าโครงการ *ฉัตรพล*

วันที่ *23 ส.ค. 2567*

หมายเหตุ: ให้แนบสำเนาสมุดบัญชีที่รับทุนมาพร้อมกับรายงานการเงินด้วยทุกครั้ง