# วงจรข่ายสื่อสารและสายส่งสัญญาณ

## Communication Networks and Transmission Lines

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์.

วงจรข่ายสื่อสารและสายส่งสัญญาณ = Communication Networks and Transmission Lines. — นครราชสีมา : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2567.
322 หน้า.

1. วิศวกรรมไฟฟ้า. I. ชื่อเรื่อง.

621.3
ISBN 978-974-533-777-0

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 300 เล่ม พ.ศ. 2567 (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2567)
บรรณาธิการ ประพันธ์ พันธุ์อนุกูล
ออกแบบปก ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา

SUTPRESS
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**จัดพิมพ์โดย** : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 4422 5765 0 4422 5763

**พิมพ์ที่ :** ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิตรภาพการพิมพ์ 1995
เลขที่ 267 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 4424 1476 โทรสาร 0 4424 4551

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์
ห้ามลอกเลียนไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ ไม่ว่ารูปแบบใด
นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เขียนและเรียบเรียงเท่านั้น

# คำนำ

การสื่อสารโทรคมนาคมเป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างกันในระยะทางไกล ๆ โดยใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ ผ่านทางสัญญาณหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันระบบสื่อสารจะใช้สื่อนำสัญญาณ 3 ประเภทคือ (1) สายส่งหรือสายเคเบิล เป็นการใช้วัสดุตัวกลางเป็นเส้นทางจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง (2) คลื่นวิทยุเป็นการส่งคลื่นผ่านอากาศ และ (3) เส้นใยนำแสง เป็นการใช้แสงส่งผ่านเส้นใยนำแสง เพื่อรองรับระบบสื่อสารทั้งแบบไร้สายและใช้สายส่ง เนื้อหาในตำราเล่มนี้จะกล่าวถึงเฉพาะสายส่ง ซึ่งเป็นระบบตัวนำที่ใช้ในการส่งผ่านพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังตำแหน่งอื่น ๆ ด้วยประสิทธิภาพในการส่งผ่านที่มีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด การเลือกใช้สายส่งเพื่อนำสัญญาณให้เหมาะสมกับงาน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณได้มากขึ้น เนื้อหาในตำราเล่มนี้ประกอบไปด้วย

**บทที่ 1 วงจรข่ายสื่อสารแบบสองพอร์ต** ใช้เพื่อวิเคราะห์สายส่งโดยเขียนในรูปวงจรไฟฟ้าที่มีปริมาณทางไฟฟ้าที่พิจารณาคล้ายกัน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าด้านเข้า กระแสไฟฟ้าด้านเข้า แรงดันไฟฟ้าด้านออกและกระแสไฟฟ้าด้านออก เป็นต้น ซึ่งในวงจรไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน ได้แก่ ตัวต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) ดังนั้นในตำราเล่มนี้จะกล่าวถึง รูปแบบวงจรข่ายสื่อสาร พื้นฐานการออกแบบเครือข่ายแบบ T แบบ $\pi$ และแบบ L รวมถึงการต่อเชื่อมวงจรข่ายสื่อสารแบบอนุกรม แบบขนาน และแบบเรียง

**บทที่ 2 สายส่งสัญญาณและมาตรฐานของสาย** กล่าวถึงความหมาย และหน้าที่ของสายส่ง ความถี่และความยาวคลื่น หน่วยในการวัดสายส่ง การสูญเสียภายในสายส่ง ชนิดของสายส่งและมาตรฐานของสายส่งในปัจจุบัน รวมถึงสายส่งแบบบาลาซ์ (Balance line) และอันบาลาซ์ (Unbalance line) ซึ่งจะส่งผลให้รู้จักสายส่งที่นำมาใช้งานในปัจจุบัน สามารถเลือกสายส่งให้ถูกต้องตามลักษณะงาน และทราบมาตรฐานของสายส่ง

**บทที่ 3 ทฤษฎีสายส่ง** กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางคลื่นที่เดินทางในตัวกลางที่ไม่มีขอบเขตมาอธิบายการเดินทางของคลื่นในช่องทางการนำคลื่นที่มีขอบเขตจำกัด ทำให้การวิเคราะห์สมการของคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเป็นวงจรทางไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐานทางไฟฟ้าคือ ตัวต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L) ตัวเก็บประจุ (C) และตัวนำ (G) ดังนั้นจึงต้องใช้ความรู้ทางทฤษฎีวงจรข่ายสื่อสารมาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้ทราบคุณสมบัติเฉพาะตัวของสายส่งที่มีต่อคลื่นที่เดินทางในสายส่ง เช่น ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ เป็นต้น เนื้อหาในบทนี้ครอบคลุมถึง สายส่งประเภทต่าง ๆ การสูญเสียภายในสายส่ง และทฤษฎีสายส่ง ทั้งเรื่องของวงจรสมมูลและสมการมูลฐานของสายส่ง การแพร่กระจายของคลื่นที่เกิดขึ้นตลอดสายส่ง

**บทที่ 4 คุณสมบัติของสายส่ง** ประกอบด้วย อิมพีแดนซ์ด้านเข้า สัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง กำลังด้านเข้าเฉลี่ย และการต่อปลายสายด้วยโหลดแบบต่าง ๆ เช่น ที่ปลายด้านรับอาจจะถูกลัดวงจร วงจรเปิด หรือถูกต่อปลายสายด้วยโหลดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ใด ๆ โดยใช้การวิเคราะห์สายส่งในรูปแบบของการส่งผ่านแรงดัน กระแส และพลังงานในสายส่งที่มีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสายส่ง โหลด และความยาวของสาย

**บทที่ 5 แผนภูมิสมิธ** กล่าวถึงเทคนิคการนำเอาแผนภูมิสมิธมาใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบสายส่ง ซึ่งแผนภูมิสมิธนี้ถือเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สายส่งที่ง่ายและรวดเร็ว สามารถช่วยลดความยุ่งยากในการแมตช์อิมพีแดนซ์ เช่น การแมตช์โดยใช้การปรับสตับ เป็นต้น

**บทที่ 6 การแมตช์อิมพีแดนซ์** มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานไปยังโหลดได้มากที่สุด หรือเพื่อลดการเกิดการสะท้อนที่โหลด ซึ่งการแมตช์อิมพีแดนซ์คือ การทำให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสาย

**บทที่ 7 วงจรเรโซแนนซ์ วงจรกรอง และวงจรลดทอนสัญญาณ** เป็นการศึกษาอุปกรณ์สื่อสารอื่น ๆ เช่น วงจรเรโซแนนซ์ วงจรกรอง และวงจรลดทอนสัญญาณ ซึ่งมีลักษณะวงจรข่ายสื่อสารแบบสองพอร์ต มักนำมาต่อใช้งานร่วมกับสายส่ง

**บทที่ 8 อภิวัสดุ สายส่ง และการประยุกต์** กล่าวถึงอภิวัสดุซึ่งเป็นวัสดุประดิษฐ์เชิงวิศวกรรม โดยใช้ทฤษฎีสายส่งมาวิเคราะห์และออกแบบอภิวัสดุ และยกตัวอย่างการนำมาประยุกต์ใช้ เช่น สายส่งสายอากาศ เซนเซอร์ และตัวกรอง เป็นต้น

ตำราเล่มนี้ได้ใช้ในการเรียนการสอนรายวิชาวงจรข่ายสื่อสารและสายส่งสัญญาณ สำหรับนักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม และถูกปรับปรุงเนื้อหามาอย่างต่อเนื่องมากกว่า 15 ปี ซึ่งผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะเป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจทั่วไป เพื่อใช้ศึกษา ค้นคว้า วิจัยต่อไป

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู นอกจากนั้นยังขอบคุณ นักศึกษาบัณฑิต และเพื่อนร่วมงานที่สนับสนุนการทำงานของผู้เขียนให้มีบรรยากาศทางวิชาการที่ดี สุดท้ายนี้ขอขอบคุณกำลังใจจากลูกและสามีที่คอยให้การสนับสนุนในทุกเรื่องเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา หากผู้อ่านได้นำความรู้ไปใช้ให้ก่อประโยชน์แก่ตนเองและส่วนรวมในอนาคต ผู้เขียนขอยกคุณความดีให้แก่บิดา มารดา ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่าน

รองศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์

# สารบัญ

**หน้า**

**คำนำ** ..... ก
**สารบัญ** ..... ค
**สารบัญรูป** ..... ซ
**สารบัญตาราง** ..... ด
**บทที่ 1 วงจรข่ายสื่อสารสองพอร์ต** ..... 1
1.1 บทนำ ..... 1
1.2 รูปแบบวงจรข่ายสื่อสาร ..... 4
1.2.1 วงจรข่ายสมมาตรแบบ T ..... 4
1.2.2 วงจรข่ายสมมาตรแบบ π ..... 8
1.2.3 วงจรข่ายสมมาตรแบบแลตทิซ ..... 10
1.2.4 วงจรข่ายสมมาตรแบบบริดจ์ตัว T ..... 11
1.2.5 การหาค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรข่ายเมื่อวงจรเปิดและลัดวงจร ..... 12
1.3 พารามิเตอร์วงจรข่ายสื่อสาร ..... 14
1.3.1 พารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ ..... 15
1.3.2 พารามิเตอร์แอดมิตแทนซ์ ..... 21
1.3.3 พารามิเตอร์ไฮบริด ..... 27
1.3.4 พารามิเตอร์เอบีซีดี ..... 32
1.4 การแปลงพารามิเตอร์วงจรข่าย ..... 36
1.5 การต่อเชื่อมวงจรข่ายสื่อสารสองพอร์ต ..... 40
1.5.1 การต่อวงจรข่ายแบบอนุกรม ..... 40
1.5.2 การต่อวงจรข่ายแบบขนาน ..... 41
1.5.3 การต่อวงจรข่ายแบบเรียง ..... 42
1.6 พารามิเตอร์เอส ..... 46
1.7 ตัวอย่างวงจรข่ายสื่อสาร ..... 50
1.7.1 วงจรข่ายสายไมโครสตริป ..... 50
1.7.2 วงจรข่ายสายส่งโคแอ็กซ์ต่อเชื่อมกับสายไมโครสตริป ..... 51
1.8 แบบฝึกหัดท้ายบท ..... 52
**บทที่ 2 สายส่งสัญญาณและมาตรฐานของสาย** ..... 55
2.1 บทนำ ..... 55
2.2 ความถี่และความยาวคลื่น ..... 57
2.3 หน่วยในการวัดสายส่งสัญญาณ ..... 58
2.4 การสูญเสียในสายส่งสัญญาณ ..... 59
2.4.1 การสูญเสียในตัวนำ ..... 59

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**


2.4.2 การสูญเสียในไดอิเล็กทริก ..... 60
2.4.3 การสูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสีและการเหนี่ยวนำ ..... 60
2.5 ชนิดของสายส่งและมาตรฐานของสายส่งในปัจจุบัน ..... 61
2.5.1 สายเส้นคู่ ..... 61
2.5.2 สายโคแอ็กซ์ ..... 68
2.5.3 สายไมโครสตริป ..... 72
2.5.4 สายสตริป ..... 75
2.5.5 สายร่วมระนาบ ..... 76
2.5.6 ท่อนำคลื่น ..... 77
2.6 สายส่งแบบบาลานซ์และอันบาลานซ์ ..... 78
2.7 แบบฝึกหัดท้ายบท ..... 79
**บทที่ 3 ทฤษฎีสายส่ง** ..... 81
3.1 บทนำ ..... 81
3.2 หลักการพื้นฐานการแพร่กระจายคลื่นบนสายส่ง ..... 82
3.2.1 คลื่นจรรูปไซน์ ..... 82
3.2.2 การเขียนสมการคลื่นในรูปแบบเฟสเซอร์ ..... 85
3.3 การวิเคราะห์วงจรสมมูลและสมการมูลฐานสำหรับสายส่ง ..... 87
3.3.1 การวิเคราะห์หาค่า R L C และ G ของสายส่ง ..... 88
3.3.2 พารามิเตอร์ของสายส่งชนิดต่าง ๆ ..... 89
3.4 สมการสายส่ง ..... 93
3.4.1 สายส่งแบบที่มีการสูญเสีย ..... 93
3.4.2 สายส่งแบบไร้การสูญเสีย ..... 96
3.4.3 สายส่งไม่มีความเพี้ยน ..... 97
3.5 แบบฝึกหัดท้ายบท ..... 102
**บทที่ 4 คุณสมบัติของสายส่ง** ..... 103
4.1 บทนำ ..... 103
4.2 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ..... 103
4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อน ..... 106
4.4 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ..... 108
4.5 กำลังด้านเข้าเฉลี่ย ..... 109
4.6 คุณสมบัติของสายส่งเมื่อมีการต่อโหลดปลายสาย ..... 112
4.6.1 เมื่อปลายสายลัดวงจร ..... 112
4.6.2 เมื่อปลายสายวงจรเปิด ..... 114

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**


4.6.3 เมื่อปลายสายแมตช์ ..... 114
4.6.4 ผลของสายส่งสัญญาณกรณีการแมตช์และไม่แมตช์อิมพีแดนซ์ ..... 119
4.6.5 สาเหตุและผลลัพธ์เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณเปลี่ยนแปลง ..... 119
4.7 ภาวะชั่วครู่บนสายส่ง ..... 121
4.8 แบบฝึกหัดท้ายบท ..... 126
**บทที่ 5 แผนภูมิสมิธ** ..... 129
5.1 บทนำ ..... 129
5.2 หลักการสร้างแผนภูมิสมิธ ..... 129
5.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแผนภูมิสมิธ ..... 136
5.3.1 การใช้งานวงกลมความต้านทานคงที่ ..... 136
5.3.2 การใช้งานวงกลมรีแอกแทนซ์คงที่ ..... 137
5.3.3 การใช้งานวงกลมความยาวคลื่น ..... 139
5.3.4 การใช้สเกลบนแผนภูมิสมิธ ..... 139
5.4 ประโยชน์ของแผนภูมิสมิธ ..... 140
5.5 การประยุกต์ใช้แผนภูมิสมิธ ..... 140
5.5.1 การวาดอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ..... 141
5.5.2 การหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ..... 142
5.5.3 การหาค่าแอดมิตแทนซ์ ..... 143
5.5.4 การหาค่าความยาวของสาย ..... 145
5.5.5 การหาตำแหน่งการเกิดคลื่นนิ่งสูงสุดและต่ำสุดจากโหลด ..... 148
5.5.6 การหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ระยะต่าง ๆ นับจากโหลด ..... 150
5.6 แบบฝึกหัดท้ายบท ..... 155
**บทที่ 6 การแมตช์อิมพีแดนซ์** ..... 157
6.1 บทนำ ..... 157
6.2 การแมตช์โดยการปรับลัมพ์อิลิเมนต์ ..... 158
6.2.1 การออกแบบโดยใช้วิธีการคำนวณ ..... 158
6.2.2 การออกแบบโดยใช้แผนภูมิสมิธ ..... 159
6.3 การแมตช์โดยการแปลงคลื่นความยาว $\lambda/4$ ..... 161
6.4 การแมตช์โดยใช้การปรับสตับ ..... 162
6.4.1 การแมตช์โดยใช้การปรับสตับเดี่ยว ..... 162
6.4.2 การแมตช์โดยใช้การปรับสตับขนานแบบคู่ ..... 170

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**


6.5 การแมตช์ด้วยไมโครสตริป ..... 172
6.5.1 การแมตช์วงจรโดยใช้สตับเดี่ยวสำหรับการแมตช์ค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ไปยังค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{in}$ ..... 172
6.5.2 การแมตช์โหลดที่มีค่า $Z_L$ ใด ๆ ไปยังอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่มีค่า 50 โอห์ม ..... 175
6.5.3 การแมตช์วงจรโดยใช้ไมโครสตริปที่มีความยาวคลื่น $\lambda/4$ ..... 178
6.6 แบบฝึกหัดท้ายบท ..... 181
**บทที่ 7 วงจรเรโซแนนซ์ วงจรกรอง และวงจรลดทอนสัญญาณ** ..... 183
7.1 บทนำ ..... 183
7.2 วงจรเรโซแนนซ์ ..... 183
7.2.1 วงจรเรโซแนนซ์โดยใช้ RLC ต่ออนุกรม ..... 183
7.2.2 วงจรเรโซแนนซ์โดยใช้ RLC ต่อขนาน ..... 186
7.2.3 วงจรเรโซแนนซ์ที่มีการต่อโหลดและไม่มีการต่อโหลด ..... 187
7.3 เรโซแนนซ์ในสายส่ง ..... 189
7.3.1 สายส่งความยาว $\lambda/2$ ที่ปลายสายลัดวงจร ..... 189
7.3.2 สายส่งความยาว $\lambda/4$ ที่ปลายสายลัดวงจร ..... 193
7.3.3 สายส่งความยาว $\lambda/2$ ที่ปลายสายวงจรเปิด ..... 193
7.4 วงจรกรอง ..... 195
7.4.1 การออกแบบวงจรกรองโดยใช้วิธีพารามิเตอร์เงา ..... 196
7.4.2 การออกแบบวงจรกรองโดยใช้วิธีการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก ..... 201
7.4.3 การออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำโดยใช้วิธีการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก ..... 210
7.4.4 การออกแบบวงจรกรองผ่านสูง วงจรกรองผ่านแถบ และวงจรกรองหยุดแถบ ..... 211
7.5 วงจรลดทอนสัญญาณ ..... 214
7.5.1 วงจรลดทอนสมมาตรแบบ T ..... 214
7.5.2 วงจรลดทอนสมมาตรแบบ $\pi$ ..... 215
7.5.3 วงจรลดทอนสมมาตรแบบแลตทิซ ..... 216
7.5.4 วงจรลดทอนสมมาตรแบบบริดจ์ตัว T ..... 218
7.5.5 วงจรลดทอนไม่สมมาตร ..... 219
7.6 แบบฝึกหัดท้ายบท ..... 223
**บทที่ 8 อภิวัสดุ สายส่ง และการประยุกต์** ..... 225
8.1 บทนำ ..... 225
8.2 อภิวัสดุ ..... 225
8.3 สายส่งอภิวัสดุ ..... 228
8.4 การวิเคราะห์สายส่งอภิวัสดุ ..... 230

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**

8.5 การใช้พารามิเตอร์เอบีซีดีวิเคราะห์วงจรข่ายสายส่งอภิวัสดุ....234
8.6 การออกแบบสายส่งอภิวัสดุ....237
8.6.1 สายส่งอภิวัสดุโดยใช้สายส่งโหลดด้วย $LC$ ....237
8.6.2 สายส่งอภิวัสดุโดยใช้สายส่งร่วมกับเรโซเนเตอร์....238
8.7 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบโหมดเดียว....239
8.7.1 เรโซเนเตอร์แบบมีความยาวครึ่งคลื่น....239
8.7.2 เรโซเนเตอร์แบบมีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น....239
8.7.3 เรโซเนเตอร์แบบแพทช์....240
8.7.4 เรโซเนเตอร์แบบวงแหวน....240
8.8 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบสองโหมด....241
8.8.1 เรโซเนเตอร์แบบแพทช์หรือวงแหวนดัดแปลง....241
8.8.2 เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น....242
8.8.3 เรโซเนเตอร์แบบลูปเปิด แบบแฮร์พินหรือแบบอิมพีแดนซ์แบบขั้นมาดัดแปลง.246
8.9 เรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโหมด....247
8.9.1 เรโซเนเตอร์วงเปิดสี่เหลี่ยมใช้โหลดความจุไฟฟ้า....247
8.9.2 เรโซเนเตอร์แบบโหลดความจุอินเตอร์ดิจิทัล....250
8.9.3 เรโซเนเตอร์แบบสองโหมดโดยใช้สตับ....253
8.10 การออกแบบสายส่งอภิวัสดุโดยใช้สายไมโครสริปร่วมกับเรโซเนเตอร์วงแหวนแยก..254
8.11 สายส่งอภิวัสดุโดยใช้สายส่งร่วมกับเรโซเนเตอร์วงแหวนแยกเสริม....256
8.12 การประยุกต์ใช้สายส่งอภิวัสดุ....257
8.12.1 สายอากาศความกว้างแถบกว้างหรือหลายความถี่....257
8.12.2 สายอากาศคลื่นรั่ว....260
8.12.3 เซนเซอร์....261
8.12.4 สายอากาศหลายความถี่โดยใช้สายส่งร่วมกับอินเตอร์ดิจิทัล....264
8.13 แบบฝึกหัดท้ายบท....270

**บรรณานุกรม**....271
**ดรรชนี**....275
**ผลงานผู้เขียน**....295

# สารบัญรูป

**รูปที่** **หน้า**

1.1 ระบบวงจรข่ายสื่อสาร ..... 2
1.2 ตัวอย่างการต่อวงจรข่ายสื่อสารแทรกระหว่างแหล่งกำเนิดและโหลด ..... 3
1.3 วงจรข่ายสื่อสาร ..... 4
1.4 วงจรข่ายสมมาตรแบบ T ..... 4
1.5 วงจรข่ายตัวอย่างที่ 1.1 ..... 5
1.6 วงจรข่ายตัวอย่างที่ 1.2 ..... 6
1.7 วงจรข่ายตัวอย่างที่ 1.4 ..... 7
1.8 วงจรข่ายสมมาตรแบบ π ..... 8
1.9 วงจรข่ายตัวอย่างที่ 1.5 ..... 9
1.10 วงจรข่ายตัวอย่างที่ 1.6 ..... 9
1.11 วงจรข่ายสมมาตรแบบแลตทิซ ..... 10
1.12 วงจรข่ายตัวอย่างที่ 1.7 ..... 11
1.13 วงจรข่ายสมมาตรแบบบริดจ์ตัว T ..... 12
1.14 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.8 ..... 14
1.15 วงจรข่ายสื่อสารสองพอร์ตที่ถูกป้อนด้วยแหล่งจ่ายกระแส ..... 15
1.16 การหาพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ ..... 15
1.17 วงจรสมมูลในรูปแบบของพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ ..... 16
1.18 สำหรับตัวอย่างที่ 1.9 ..... 17
1.19 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.9 ในการหาพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ ..... 17
1.20 สำหรับตัวอย่างที่ 1.10 ..... 17
1.21 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.11 ..... 18
1.22 สำหรับตัวอย่างที่ 1.12 ..... 19
1.23 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.13 ..... 20
1.24 วงจรข่ายสื่อสารสองพอร์ตที่ถูกป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน ..... 21
1.25 การหาพารามิเตอร์แอดมิตแทนซ์ ..... 21
1.26 วงจรสมมูลในรูปแบบของพารามิเตอร์แอดมิตแทนซ์ ..... 22
1.27 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.14 ..... 22
1.28 สำหรับตัวอย่างที่ 1.14 ในการหาพารามิเตอร์แอดมิตแทนซ์ ..... 23
1.29 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.15 ..... 23
1.30 สำหรับตัวอย่างที่ 1.16 ..... 24
1.31 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.17 ..... 25
1.32 สำหรับตัวอย่างที่ 1.18 ..... 25
1.33 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.19 ..... 26

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**

1.34 วงจรข่ายสื่อสารสองพอร์ตที่ถูกป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันและแหล่งจ่ายกระแส ..... 27
1.35 การหาพารามิเตอร์แบบไฮบริด ..... 27
1.36 วงจรสมมูลในรูปแบบของพารามิเตอร์แบบไฮบริด ..... 28
1.37 วงจรสมมูลในรูปแบบของพารามิเตอร์ส่วนกลับของพารามิเตอร์ไฮบริด ..... 30
1.38 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.20 ..... 30
1.39 สำหรับตัวอย่างที่ 1.21 ..... 31
1.40 วงจรข่ายสื่อสารสองพอร์ตในการหาพารามิเตอร์เอบีซีดี ..... 32
1.41 การหาพารามิเตอร์เอบีซีดี ..... 32
1.42 สำหรับตัวอย่างที่ 1.22 ..... 33
1.43 พารามิเตอร์ ABCD ของข่ายงานแบบต่าง ๆ ..... 34
1.44 วงจรข่ายที่มีการต่อเชื่อมแบบอนุกรม ..... 41
1.45 วงจรข่ายที่มีการต่อเชื่อมแบบขนาน ..... 41
1.46 วงจรข่ายที่มีการต่อเรียง ..... 42
1.47 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.27 ..... 43
1.48 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.27 ..... 43
1.49 วงจรข่ายสำหรับตัวอย่างที่ 1.27 ..... 44
1.50 วงจรข่ายที่มีการต่อเรียงและอิมพีแดนซ์เงา ..... 44
1.51 การต่อเชื่อมวงจรข่ายโดยใช้วงจรสมมูลอิมพีแดนซ์แบบ T และแบบ $\pi$ ..... 45
1.52 พารามิเตอร์เอสของวงจรกรอง ..... 48
1.53 เครื่องวิเคราะห์ข่ายงาน ..... 48
1.54 ค่าพารามิเตอร์เอสของตัวกรองในย่านต่าง ๆ ..... 48
1.55 วงจรข่ายสื่อสารของสายไมโครสตริป ..... 50
1.56 วงจรข่ายสื่อสารของสายส่งโคแอ็กซ์ที่ต่อเชื่อมกับสายไมโครสตริป ..... 51
2.1 การใช้สายส่งในระบบสื่อสาร ..... 55
2.2 ตัวอย่างการใช้งานสายส่งสัญญาณ ..... 57
2.3 แถบความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ..... 58
2.4 การเดินทางของคลื่นบนสายส่งที่ความยาวคลื่นและครึ่งความยาวคลื่น ..... 59
2.5 ประเภทสายส่งสัญญาณตามลักษณะโครงสร้าง ..... 61
2.6 สายคู่ขนานเปิด ..... 62
2.7 สายคู่ขนานปิด ..... 62
2.8 สายตีเกลียวคู่ในระบบ LAN ..... 63
2.9 สาย UTP ..... 64
2.10 สาย STP ..... 64

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**

2.11 ตัวอย่างสายส่งสำหรับระบบอีเทอร์เน็ต ..... 65
2.12 ข้อต่อ RJ45 สำหรับระบบ LAN ..... 67
2.13 สายคู่หุ้มชีลด์ ..... 68
2.14 สายร่วมแกนอากาศ ..... 69
2.15 สายโคแอ็กซ์โค้งงอได้ ..... 70
2.16 ตัวอย่างสายโคแอ็กซ์แบบต่าง ๆ ..... 71
2.17 ตัวอย่างข้อต่อสายโคแอ็กซ์ ..... 71
2.18 โครงสร้างและตัวอย่างสายส่งไมโครสตริป ..... 73
2.19 การหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายไมโครสตริป ..... 74
2.20 สภาพยอมประสิทธิผล ..... 75
2.21 ผลกระทบจากความหนาของสตริปที่มีต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ..... 75
2.22 สายส่งสตริป ..... 76
2.23 สายส่ง CPW ..... 76
2.24 ท่อนำคลื่น ..... 77
2.25 โครงสร้างสายส่งสัญญาณแบบท่อนำคลื่น ..... 78
2.26 การต่อเชื่อมสายแบบบาลานซ์เข้ากับสายแบบอันบาลานซ์ ..... 78
3.1 สัญญาณและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนสายส่ง ..... 83
3.2 คลื่นจรรูปไซน์ในทิศทาง $+z$ และ $-z$ ..... 84
3.3 แผนภาพเฟสเซอร์ ..... 86
3.4 วงจรสมมูลของสายส่งที่มี R L C และ G กระจายไปตลอดความยาวของสาย ..... 88
3.5 วงจรข่ายสื่อสารสายส่ง ณ ความยาว $\Delta z$ ใด ๆ ..... 88
3.6 พารามิเตอร์ของสายส่งแบบโคแอ็กซ์ ..... 89
3.7 โครงสร้างของสายส่งระนาบ ..... 90
3.8 โครงสร้างของสายส่งเส้นคู่ ..... 91
3.9 โครงสร้างของสายโคแอ็กซ์ ..... 91
3.10 วงจรข่ายสื่อสารของสายส่งแบบที่มีการสูญเสียในช่วงความยาวสั้น ๆ $\Delta z$ ..... 93
3.11 วงจรข่ายสื่อสารของสายส่งแบบไร้การสูญเสียในช่วงความยาวสั้น ๆ $\Delta z$ ..... 96
3.12 การลดทอนสัญญาณในสายโคแอ็กซ์ ..... 99
4.1 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าและวงจรข่ายสื่อสารที่ใช้หา $V_0$ และ $I_0$ ..... 104
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่าน ..... 107
4.3 สายส่งเมื่อต่อปลายสายด้วยโหลด ลัดวงจรและวงจรเปิดที่ปลายสาย ..... 113
4.4 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายส่งแบบไร้การสูญเสีย ..... 113
4.5 วงจรข่ายสื่อสารของสายส่งความยาวจำกัด ..... 117

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


4.6 อิมพีแดนซ์ การสูญเสียย้อนกลับ และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ..... 120
4.7 ภาวะชั่วครู่บนสายส่ง ..... 121
4.8 แผนภาพแลตทิซ ..... 122
4.9 สำหรับตัวอย่างที่ 4.7 ..... 123
4.10 แผนภาพของแรงดันคลื่น ณ เวลาใด ๆ สำหรับตัวอย่างที่ 4.7 ..... 124
4.11 วงจรข่ายสื่อสารของสายส่งสำหรับตัวอย่างที่ 4.7 ..... 124
4.12 แรงดัน ณ เวลาใด ๆ สำหรับตัวอย่างที่ 4.8 ..... 125
4.13 แผนภาพแลตทิซของกระแสสำหรับตัวอย่างที่ 4.8 ..... 125
5.1 วงจรข่ายสื่อสารสายส่งเมื่อสายส่งถูกต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดและโหลด ..... 129
5.2 ระนาบเชิงซ้อนของอิมพีแดนซ์และสัมประสิทธิ์การสะท้อน ..... 130
5.3 ตัวอย่างที่ 5.1 ..... 130
5.4 ระนาบเชิงซ้อนของสัมประสิทธิ์การสะท้อนสำหรับตัวอย่างที่ 5.1 ..... 131
5.5 วงกลมหนึ่งหน่วยซึ่งเป็นการสร้างแผนภูมิสมิธ ..... 132
5.6 วงกลม $r$ ที่ $r = 0, 0.5, 1, 2, 5, \infty$ ..... 134
5.7 วงกลม $x$ ที่ $x = 0, \pm 1/2, \pm 1, \pm 2, \pm 5, \pm \infty$ ..... 135
5.8 แผนภูมิสมิธ ..... 135
5.9 แผนภูมิสมิธแบบอิมพีแดนซ์-แอดมิตแทนซ์ (ZY chart) ..... 136
5.10 การใช้งานวงกลมความต้านทานคงที่ ..... 136
5.11 การวาดค่าความต้านทานสำหรับตัวอย่างที่ 5.2 ..... 137
5.12 การใช้งานวงกลมรีแอกแทนซ์คงที่ ..... 138
5.13 การวาดค่ารีแอกแทนซ์สำหรับตัวอย่างที่ 5.3 ..... 138
5.14 การใช้งานวงกลมความยาวคลื่น ..... 139
5.15 การใช้สเกลบนแผนภูมิสมิธ ..... 140
5.16 การวาดอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ..... 141
5.17 การวาดจุด P ลงในแผนภูมิสมิธ ..... 142
5.18 การหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแรงดัน ..... 142
5.19 การหาค่า VSWR สำหรับตัวอย่างที่ 5.4 ..... 143
5.20 การหาค่าแอดมิตแทนซ์ ..... 144
5.21 การหาค่าแอดมิตแทนซ์สำหรับตัวอย่างที่ 5.5 ..... 145
5.22 การหาค่าความยาวของสายโดยใช้แผนภูมิสมิธ ..... 145
5.23 การหาความยาวของสายเมื่อปลายสายถูกลัดวงจร ..... 146
5.24 การหาความยาวของสายสำหรับตัวอย่างที่ 5.6 ..... 147
5.25 การหาความยาวของสายที่ปลายสายวงจรเปิด ..... 147

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


5.26 การหาความยาวของสายสำหรับตัวอย่างที่ 5.7 ..... 148
5.27 การหาตำแหน่งการเกิดคลื่นนิ่งสูงสุดและต่ำสุดจากโหลด ..... 149
5.28 การหาระยะห่างที่เกิดคลื่นนิ่งแรงดันสูงสุดและต่ำสุดสำหรับตัวอย่างที่ 5.8 ..... 150
5.29 การหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ระยะต่าง ๆ นับจากโหลด ..... 150
5.30 การหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าสำหรับตัวอย่างที่ 5.9 ..... 151
5.31 การหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายส่งสำหรับตัวอย่างที่ 5.10 ..... 153
5.32 สำหรับตัวอย่างที่ 5.11 ..... 153
5.33 การหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับตัวอย่างที่ 5.12 ..... 154
6.1 การแมตช์อิมพีแดนซ์ ..... 157
6.2 ตำแหน่งการแมตช์อิมพีแดนซ์บนแผนภูมิสมิธ ..... 157
6.3 การแมตช์วงจรข่ายแบบ L ..... 158
6.4 การหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าประกอบด้วยวงจรลัมพ์ LC ในรูปแบบต่าง ๆ . 159
6.5 การออกแบบการแมตช์วงจรข่ายแบบ L สำหรับตัวอย่างที่ 6.1 ..... 160
6.6 การแมตช์โดยใช้การแปลงคลื่นความยาว $\lambda / 4$ ..... 161
6.7 สตับเดี่ยว ..... 163
6.8 การแมตช์สายโดยใช้สตับขนานแบบเดี่ยว ..... 163
6.9 วงกลมความนำคงที่ ..... 164
6.10 การหาค่าความนำสำหรับตัวอย่างที่ 6.3 ..... 164
6.11 เส้นโค้งซัสเซปแทนซ์คงที่ ..... 165
6.12 การหาค่าซัสเซปแทนซ์สำหรับตัวอย่างที่ 6.4 ..... 165
6.13 การออกแบบสตับขนานแบบเดี่ยว ..... 166
6.14 การหาตำแหน่งและความยาวของสตับสำหรับตัวอย่างที่ 6.5 ..... 167
6.15 การหาตำแหน่งและความยาวของสตับสำหรับตัวอย่างที่ 6.6 ..... 168
6.16 การหาสตับอนุกรมแบบเดี่ยว ..... 169
6.17 การหาตำแหน่งและความยาวของสตับสำหรับตัวอย่างที่ 6.7 ..... 170
6.18 สตับขนานแบบคู่ ..... 170
6.19 การออกแบบสตับขนานแบบคู่ ..... 171
6.20 การหาตำแหน่งและความยาวของสตับสำหรับตัวอย่างที่ 6.8 ..... 172
6.21 การแมตช์โหลด 50 โอห์มไปยังค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า $Z_{IN}$ ..... 173
6.22 การแมตช์ด้วยสายส่งไมโครสตริป ..... 174
6.23 ตัวอย่างการแมตช์วงจรขยายสัญญาณโดยใช้สตับแบบสายส่งไมโครสติป
ที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 50 โอห์ม ..... 175

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


6.24 การใช้แผนภาพสมิธเพื่อใช้ในการแมตช์วงจรความถี่สูง ออกแบบโดยใช้แผนภาพสมิธแอดมิตแทนซ์ $Y$ ....176
6.25 การแมตวงจรช์ด้วยไมโครสตริป ....177
6.26 การแมตช์ค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มไปค่าแอดมิตแทนซ์ด้านเข้า ....178
6.27 การแมตช์ค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มไปยังอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ....179
6.28 วงจรขยายสัญญาณใช้ทรานซิสเตอร์ซึ่งแมตช์ด้วยไมโครสตริป ....180
7.1 วงจรเรโซแนนซ์ *RLC* แบบอนุกรม ....184
7.2 วงจรเรโซแนนซ์ *RLC* แบบขนาน ....186
7.3 วงจรเรโซแนนซ์ที่ต่อเชื่อมเข้ากับโหลด ....188
7.4 การเกิดคลื่นนิ่งในสายส่ง ....191
7.5 สายส่งแบบที่มีการสูญเสียที่มีการลัดวงจรที่ปลายสาย และการกระจายของแรงดันสำหรับ $n=1\,(l=\lambda/2)$ และ $n=2\,(l=\lambda)$ ....192
7.6 สายส่งแบบที่มีการสูญเสียมีวงจรเปิดที่ปลายสาย และการกระจายของแรงดันสำหรับ $n=1\,(l=\lambda/2)$ และ $n=2\,(l=\lambda)$ ....194
7.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำ ....195
7.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านสูง ....196
7.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านแถบและวงจรกรองหยุดแถบ ....196
7.10 วงจรกรองผ่านต่ำแบบค่าคงตัว *k* ....197
7.11 วงจรกรองผ่านสูงแบบค่าคงตัว *k* ....198
7.12 การปรับปรุงวงจรกรองค่าคงตัว *k* โดยใช้วงจรกรองที่ได้มาจากค่า *m* ....198
7.13 วงจรกรองที่ได้มาจากค่า *m* ที่ใช้วงจรข่ายแบบ T ....199
7.14 วงจรกรองแบบผสม ....199
7.15 วงจรกรองผ่านต่ำแบบผสมสำหรับตัวอย่างที่ 7.3 ....201
7.16 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านต่ำแบบผสมสำหรับตัวอย่างที่ 7.3 ....201
7.17 ต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำ ที่ความถี่ตัดเท่ากับ 1 เรเดียนต่อวินาที ....202
7.18 ต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำ (LPP) โดยใช้องค์ประกอบ LC ....202
7.19 วงจรกรองผ่านสูง ....202
7.20 วงจรกรองผ่านแถบ ....202
7.21 ผลตอบสนองทางแอมพลิจูดของฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ท เชบีเชฟ และเอลลิปติก ....203
7.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรกและค่าการลดทอนกับความถี่นอร์มอลไลซ์สำหรับกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท ....205
7.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการลดทอนกับความถี่นอร์มอลไลซ์สำหรับต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบเชบีเชฟ ....207

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


7.24 ต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบเอลลิปติก ..... 209
7.25 ต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำสำหรับตัวอย่างที่ 7.6 ..... 212
7.26 ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำที่ความถี่ตัด 2.5 GHz และอิมพีแดนซ์ 50 $\Omega$ ..... 212
7.27 วงจรกรองแบบต่าง ๆ ..... 213
7.28 วงจรข่ายสื่อสารระหว่างเครื่องส่งและโหลด ..... 214
7.29 วงจรลดทอนแบบ T ..... 214
7.30 สำหรับตัวอย่างที่ 7.8 ..... 215
7.31 วงจรลดทอนแบบ $\pi$ ..... 215
7.32 สำหรับตัวอย่างที่ 7.9 ..... 216
7.33 วงจรข่ายลดทอนแบบแลตทิซ ..... 216
7.34 สำหรับตัวอย่างที่ 7.10 ..... 217
7.35 วงจรข่ายลดทอนแบบบริด ..... 218
7.36 สำหรับตัวอย่างที่ 7.11 ..... 218
7.37 วงจรลดทอนไม่สมมาตรแบบ T ..... 220
7.38 สำหรับตัวอย่างที่ 7.12 วงจรลดทอนไม่สมมาตรแบบ T ..... 220
7.39 วงจรลดทอนไม่สมมาตรแบบ $\pi$ ..... 220
7.40 สำหรับตัวอย่างที่ 7.12 วงจรลดทอนไม่สมมาตรแบบ $\pi$ ..... 221
7.41 วงจรลดทอนไม่สมมาตรแบบ L สำหรับตัวอย่างที่ 7.13 ..... 221
7.42 วงจรลดทอนสัญญาณแบบ L ..... 222
7.43 สำหรับตัวอย่างที่ 7.14 ..... 222
8.1 ประเภทของอภิวัสดุจำแนกตามค่าสภาพยอมและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ..... 225
8.2 อภิวัสดุสองความถี่โดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนแบบขั้นร่วมกับอินเตอร์ดิจิทัลคาปาซิเตอร์ ..... 227
8.3 ตัวอย่างสายส่งอภิวัสดุแบบ CRLH ..... 228
8.4 คุณสมบัติของสายส่งอภิวัสดุตามค่า $n, \beta$ ..... 229
8.5 วงจรข่ายของสายส่งอภิวัสดุ ..... 230
8.6 ประเภทของสายส่งอภิวัสดุตามการใช้งาน ..... 231
8.7 วงจรข่ายของสายส่งอภิวัสดุแบบ CRLH ..... 233
8.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์และแอดมิตแทนซ์กับความถี่เรโซแนนซ์ ..... 234
8.9 วงจรข่ายของสายส่ง ..... 234
8.10 การใช้ พารามิเตอร์เอบีซีดี วิเคราะห์วงจรข่ายสายส่งอภิวัสดุ ..... 235
8.11 สายส่งอภิวัสดุแบบ CRLH ในสภาวะสมดุล ..... 236
8.12 ค่า $LC$ ในสายส่งอภิวัสดุเมื่อเพิ่มความยาว ($l$) สายส่ง ..... 236
8.13 ค่าพารามิเตอร์เอสของสายส่งอภิวัสดุ CRLH ..... 237

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**

8.14 สายส่งอภิวัสดุโดยใช้โหลด $LC$ ....237
8.15 ตัวอย่างการออกแบบเรโซเนเตอร์ของสายส่งอภิวัสดุ ....238
8.16 เรโซเนเตอร์แบบมีความยาวครึ่งคลื่น ....239
8.17 รโซเนเตอร์แบบมีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น ....240
8.18 เรโซเนเตอร์แบบแพทช์ ....240
8.19 เรโซเนเตอร์แบบวงแหวน ....240
8.20 เรโซเนเตอร์ที่มีการตัดหรือเซาะร่อง ....241
8.21 เรโซเนเตอร์ที่มีการเพิ่มสตับ ....241
8.22 เรโซเนเตอร์ที่มีการปรับเปลี่ยนเป็นโครงสร้างประยุกต์ ....241
8.23 เรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น ....243
8.24 เรโซเนเตอร์แบบสองโหมดที่มีวงจรเปิดปลายสายส่ง ....247
8.25 เรโซเนเตอร์แบบสองโหมดที่มีการลัดวงจรปลายสายส่ง ....247
8.26 โครงสร้างเรโซเนเตอร์ปลายเปิดแบบต่าง ๆ ....248
8.27 วงจรข่ายสื่อสารของเรโซเนเตอร์วงเปิดสี่เหลี่ยม ....248
8.28 โครงสร้างเรโซเนเตอร์โหลดความจุไฟฟ้าอินเตอร์ดิจิทัล ....251
8.29 การออกแบบอภิวัสดุด้วยเรโซเนเตอร์ที่ให้ผลตอบสนองแบบหลายโหมดโดยใช้สตับ ....253
8.30 การเรโซแนนซ์ของเรโซเนเตอร์แบบสองโหมดโดยใช้สตับ ....254
8.31 สายส่งอภิวัสดุโดยใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนแยก ....255
8.32 สายส่งอภิวัสดุแบบ CRLH โดยใช้สายส่ง CPW เว้นระยะร่วมกับ SRR ....255
8.33 ค่า $S_{11}$ และ $S_{21}$ ของสายส่งอภิวัสดุเมื่อใช้สายส่งร่วมกับเรโซเนเตอร์วงแหวนแยก จำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST ....256
8.34 สายส่งอภิวัสดุแบบใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนแยกเสริม ....256
8.35 ค่า $S_{11}$ และ $S_{21}$ สายส่งอภิวัสดุแบบใช้เรโซเนเตอร์วงแหวนแยกเสริม จำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST ....257
8.36 การออกแบบสายส่งร่วมกับสตับเพื่อแมตช์อิมพีแดนซ์ ....257
8.37 การออกแบบสายส่งอภิวัสดุโดยใช้สายไมโครสตริปร่วมกับเรโซเนเตอร์รูปขดรูปก้นหอย ....258
8.38 เรโซแตอร์แบบโหมดหลายความถี่ ....259
8.39 ตัวอย่างสายส่งอภิวัสดุ CRLH รองรับการใช้งานสองย่านความถี่ โดยใช้ OSRR ร่วมกับ OCSRR ....259
8.40 สายอากาศที่รองรับคลื่นความถี่สี่แถบโดยใช้สายส่งอภิวัสดุ ....259
8.41 การบังคับทิศทางคลื่นตามค่าคงตัวเฟสที่เปลี่ยนไป ....260
8.42 สายอากาศคลื่นรั่วโดยใช้สายส่งอภิวัสดุ ....260
8.43 ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศคลื่นรั่ว ....261

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**

8.44 การใช้สายส่งอภิวัสดุออกแบบเซนเซอร์ ..... 261
8.45 การจัดวางตำแหน่งเรโซเนเตอร์ของอภิวัสดุสำหรับการออกแบบเซนเซอร์ โดยใช้โปรแกรม CST จำลองแบบ ..... 262
8.46 การออกแบบเซนเซอร์โดยใช้สายส่งอภิวัสดุ ..... 263
8.47 ตัวอย่างการออกแบบเซนเซอร์โดยใช้สายไมโครสตริปดิฟเฟอเรนเชียลร่วมกับวงแหวน ..... 264
8.48 เรโซเนเตอร์แบบ Jeriusalem cross ร่วมกับอินเตอร์ดิจิทัล ..... 265
8.49 ผลการจำลองแบบ Jeriusalem cross ร่วมกับอินเตอร์ดิจิทัลโดยใช้โปรแกรม CST ..... 266
8.50 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ เมื่อใช้สายอากาศไดโพลร่วมกับอภิวัสดุแบบ Jeriusalem cross ร่วมกับอินเตอร์ดิจิทัล ..... 266
8.51 โครงสร้างอภิวัสดุสามความถี่โดยใช้ช่องเปิดอินเตอร์ดิจิทัล ..... 267
8.52 ผลการจำลองแบบอภิวัสดุสามความถี่โดยใช้ช่องเปิดอินเตอร์ดิจิทัลโดยใช้โปรแกรม CST ..... 267
8.53 การออกแบบอภิวัสดุสองความถี่โดยใช้ SRR ร่วมกับอินเตอร์ดิจิทัล ..... 268
8.54 สายอากาศขนาดเล็กสามความถี่โดยใช้สายส่ง CPW ร่วมกับอินเตอร์ดิจิทัล ..... 269

# สารบัญตาราง

**ตารางที่** **หน้า**


1.1 พารามิเตอร์ของวงจรข่ายสื่อสารสองพอร์ต ..... 14
1.2 การแปลงพารามิเตอร์วงจรข่าย ..... 36
1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เอสกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ..... 47
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความลึกผิว ..... 60
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดตัวนำกับความลึกผิว ที่ความถี่ 10 GHz ..... 60
2.3 ข้อดีและข้อเสียของสาย UTP และ STP ..... 64
2.4 การแบ่งแยกสาย UTP และ STP ตามประเภทการใช้งาน ..... 65
2.5 ประเภทของสาย UTP และ STP สำหรับอีเทอร์เน็ต ..... 67
2.6 คุณสมบติของสายตีเกลียวคู่สำหรับอีเทอร์เน็ต ..... 68
2.7 ประเภทของสายโคแอ็กซ์และการประยุกต์ใช้งาน ..... 72
3.1 พามิเตอร์ของสายส่งแบบต่าง ๆ ที่ความถี่สูง ..... 92
3.2 คุณลักษณะของสายส่ง ..... 99
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SWR และเปอร์เซนต์กำลังสะท้อนกลับ ..... 120
5.1 ตัวอย่างรัศมีและจุดศูนย์กลางของวงกลม $r$ ($r$-circle) ..... 133
5.2 ตัวอย่างรัศมีและจุดศูนย์กลางของวงกลม $x$ ($x$-circle) ..... 134
7.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเรโซเนเตอร์แบบอนุกรมและแบบขนาน ..... 189
7.2 พารามิเตอร์เงาของวงจรข่ายแบบ T และแบบ $\pi$ ..... 197
7.3 สรุปการออกแบบวงจรกรองแบบผสม ..... 200
7.4 ต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ท ..... 205
7.5 ต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบเชบีเชฟ ..... 206
7.6 ต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำแบบเอลลิปติก ..... 209
7.7 การแปลงต้นแบบวงจรกรองผ่านต่ำไปเป็นค่าจริงของวงจรกรองแบบต่าง ๆ ..... 211
7.8 วงจรข่ายของตัวลดทอนแบบไม่สมมาตร ..... 219