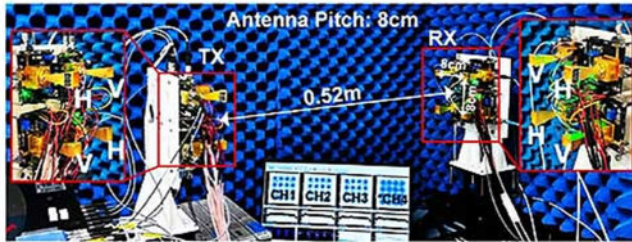


ความรู้เกี่ยวกับ เครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณ  
 ในย่านความถี่ คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ มิลลิเมตรเวฟ  
 และเทระเฮิรตซ์เวฟ

	คลื่นวิทยุ	ไมโครเวฟ	มิลลิเมตรเวฟ	เทระเฮิรตซ์เวฟ
ช่วงความถี่	กิโลเฮิรตซ์ถึงเมกะเฮิรตซ์	1 GHz ถึง 300 GHz	30-300 GHz	0.1-10 THz
การใช้งานหลัก	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AM/FM Radio</li> <li>• Amateur Radio</li> <li>• Acontuous radio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Satellite Communication</li> <li>• Radar</li> <li>• Wi-Fi</li> <li>• Wi-Fi-Rothi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5G NR mmWave</li> <li>• Automotive Radar</li> <li>• Automotive Radar</li> <li>• Horn transextation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Imaging</li> <li>• Spectroscopy</li> <li>• Electrocopy</li> <li>• Other</li> </ul>
ตัวอย่างเครื่องส่ง/ เครื่องรับ	 Transmitter    Radio receiver	 Satellite    Base Station	 Automotive Radar	 Ima...

ปวีณ ไชยคุณกุล

ความรู้เกี่ยวกับ เครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณ  
ในย่านความถี่ คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ มิลลิเมตรเวฟ  
และเทระเฮิรตซ์เวฟ



Liu et al. (2025)

ความรู้เกี่ยวกับ เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ ในย่านความถี่  
คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ มิลลิเมตรเวฟ และเทระเฮิรตซ์เวฟ

ปวีณ โขคนุกูล

ชื่อหนังสือ: ความรู้เกี่ยวกับ เครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณ ในย่านความถี่  
คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ มิลลิเมตรเวฟ และเทระเฮิรตซ์เวฟ

Book title: The Knowledge of Signal Transmitters and Receivers in  
Frequencies Band of Radiowave, Microwave, Millimeterwave,  
and Terahertzwave

ชื่อผู้เขียน: ปวีณ โชคนุกูล (Paween Chokenukul)

พิมพ์ครั้งที่ 1 เมษายน พุทธศักราช 2569

ลิขสิทธิ์ของ: ปวีณ โชคนุกูล

ราคา: 840 บาท

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

ปวีณ โชคนุกูล.

ความรู้เกี่ยวกับ เครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณ ในย่านความถี่ คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ  
มิลลิเมตรเวฟ และเทระเฮิรตซ์เวฟ.-- สงขลา : [ม.ป.พ.], 2569.

1826 หน้า.

1. เครื่องส่ง -- เครื่องรับสัญญาณ. I. ชื่อเรื่อง.

621.3841

ISBN 978-616-631-642-1

จัดทำโดย: ปวีณ โชคนุกูล

## คำนำ

หนังสือเล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อให้ความรู้เกี่ยวกับ พื้นฐานทางวงจรไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการสื่อสารไร้สาย เครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ รวมไปถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารไร้สายย่านความถี่วิทยุ ไมโครเวฟ และมีลิมิเตอร์เวฟได้แก่ สื่อกลางส่งสัญญาณ สมการของแมกซ์เวลล์ คุณลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและระดับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า สัญญาณรบกวน บรรจุภัณฑ์และการประกอบสำหรับวงจรเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ วงจรสองพอร์ต เอสพารามิเตอร์ แผนภาพการไหลของสัญญาณ การแมทซ์อิมพีแดนซ์ แผ่นวงจรพิมพ์และขั้วต่อ ซอฟแวร์สำหรับออกแบบและจำลองเกี่ยวกับเครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณ สำหรับในส่วนท้ายจะเป็นการแนะนำ การวัดที่เกี่ยวกับคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณ สุดท้ายเป็นเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีอีเล็กทรอนิกส์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง โดยหนังสือ นำเสนอข้อความเนื้อหาความรู้ พร้อมภาพประกอบ และมีตัวอย่างโจทย์การคำนวณเพื่อเสริมความเข้าใจให้ดียิ่งขึ้น

ที่ นิสิต นักศึกษา และผู้สนใจโดยทั่วไป สามารถอ่านศึกษาทำความเข้าใจและเรียนรู้ด้วยตนเองได้ เพื่อสร้างพื้นฐานความรู้ความเข้าใจ สำหรับ การศึกษา และค้นคว้า ข้อมูลเพิ่มเติมต่อไปได้ เพื่อประโยชน์ สำหรับการเรียน และการทำงานที่เกี่ยวข้อง

ปวีณ โชคนุกูล

## สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน	ii
	ใบรองปก	iii
	ชื่อหนังสือภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ชื่อผู้เขียน พิมพ์ครั้งที่ ปีพิมพ์	iv
	ราคา ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ และจัดทำโดย	
	คำนำ	v
0	บทนำ	1
1	สมการของวัสดุ สมการของแมกซ์เวลล์ และคุณลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	89
2	เครื่องส่งสัญญาณ	173
3	เครื่องรับสัญญาณ	264
4	สื่อกลางส่งสัญญาณ หรือตัวกลางส่งสัญญาณ หรือช่องสัญญาณ	344
5	เครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณ ในระบบสื่อสารไร้สาย และรายละเอียดที่สำคัญของระบบสื่อสารไร้สาย	347
6	ความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและระดับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า	396
7	สัญญาณรบกวน	417
8	สายอากาศ	421
9	ตัวเลื่อนเฟส	440
10	สวิตช์ควบคุมการไหลของสัญญาณ	446
11	เครื่องขยายกำลัง	452
12	เครื่องขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ	455
13	เครื่องกรองสัญญาณ	458
14	เครื่องผสมสัญญาณ	519

## สารบัญ (ต่อ 1)

บทที่	เรื่อง	หน้า
15	แหล่งกำเนิดสัญญาณอ้างอิง	524
16	มอดูเลเตอร์ และดีมอดูเลเตอร์	528
17	ตัวแปลงสัญญาณ แอนาล็อกเป็นดิจิตอล และตัวแปลงสัญญาณ ดิจิตอลเป็นแอนาล็อก	532
18	สายนำสัญญาณ สำหรับเครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณ ย่านความถี่ วิทยุและไมโครเวฟ ทฤษฎีสายนำสัญญาณ	561
19	ตัวถ่ายทอดกำลัง ตัวแบ่งกำลัง และตัวรวมกำลัง	705
20	ไดโอด สำหรับการสื่อสารไร้สาย ย่านความถี่ วิทยุและไมโครเวฟ	736
21	ทรานซิสเตอร์ สำหรับการสื่อสารไร้สาย ย่านความถี่ วิทยุและไมโครเวฟ	741
22	บรรจุภัณฑ์และการประกอบ สำหรับ วงจรเครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณ	750
23	วงจรสองพอร์ต เอสพารามิเตอร์ แผนภาพการไหลของสัญญาณ และการแมทซ์อิมพีแดนซ์	819
24	อุปกรณ์กำเนิดความถี่เรโซแนนซ์ หรือเรโซเนเตอร์	1005
25	อุปกรณ์แยกสัญญาณ หรือไอโซเลเตอร์ และอุปกรณ์หมุนเวียน สัญญาณ หรือเซอร์คูเลเตอร์	1016
26	แผ่นวงจรพิมพ์และขั้วต่อ สำหรับการใช้งานที่ย่าน ความถี่วิทยุ และ ไมโครเวฟ	1036
27	ซอฟต์แวร์ สำหรับออกแบบและจำลอง เกี่ยวกับ เครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณ	1104

## สารบัญ (ต่อ 2)

บทที่	เรื่อง	หน้า
28	การคำนวณเกี่ยวกับ เครื่องขยายสัญญาณ และเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่	1142
29	ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเหนี่ยวนำบนวงจรรวม วงจรที่มีการเหนี่ยวนำร่วม หรือเชื่อมต่อกันทางแม่เหล็ก หม้อแปลงบนวงจรรวม ตัวต้านทานบนวงจรรวม และตัวเก็บประจุบนวงจรรวม	1229
30	การแปลงลาปลาซ	1276
31	อนุกรมฟูรีเยร์ และการแปลงฟูรีเยร์	1298
32	การวัดเกี่ยวกับคลื่นความถี่วิทยุและไมโครเวฟ	1335
33	เครื่องส่งเคราะห์ความถี่	1428
34	ผลกระทบทางชีวภาพของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	1442
35	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ เครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณ	1457
36	เทระเฮิรตซ์อิเล็กทรอนิกส์ และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง	1559
37	สรุป	1679
	เอกสารอ้างอิง	1684
	ดัชนี	1767
	ประวัติผู้เขียน	1777

## สารบัญภาพ

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
0.1	ระบบสื่อสาร (1)	2
0.2	ระบบสื่อสาร (2)	2
0.3	ระบบสื่อสาร (3)	3
0.4	ระบบสื่อสาร (4)	3
0.5	ระบบสื่อสาร (5)	4
0.6	ระบบสื่อสาร (6)	4
0.7	ระบบสื่อสาร (7)	5
0.8	ระบบสื่อสาร ทางเดียว	5
0.9	ระบบสื่อสาร สองทาง	6
0.10	สัญญาณไซน์ (Sine) และสัญญาณโคไซน์ (Cosine)	9
0.11	ความสัมพันธ์ของสัญญาณ ในโดเมนเวลาและในโดเมนความถี่	10
0.12	กระแสที่ไหลเข้าและไหลออก ที่โหนด ตามหลัก KCL	12
0.13	กระแสที่ไหลเข้าและไหลออก ที่บริเวณปิด ตามหลัก KCL	12
0.14	กระแสที่ไหลในลูปเดียว ตามหลัก KVL	13
0.15	การแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน $R_1$ และ $R_2$	14
0.16	การแบ่งกระแสไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน $R_1$ กับ $R_2$	15
0.17	ความนำ และสภาพต้านทาน ของวัสดุตัวอย่าง ที่ 20 องศาเซลเซียส	16
0.18	ระบบกำหนดเบอร์สายไฟแบบอเมริกัน (AWG)	18
0.19	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดนำไฟฟ้า ตามระบบกำหนดเบอร์สายไฟแบบอเมริกัน (AWG)	19

## สารบัญภาพ (ต่อ 1)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
0.20	ตัวต้านทานแบบติดตั้งบนผิวหน้า	20
0.21	การอ่านค่าตัวต้านทานแบบติดตั้งบนผิวหน้า	21
0.22	ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้เช่น โปเทนซิโอมิเตอร์) และ ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่แบบฟิล์มคาร์บอนพร้อมการอ่านค่า	22
0.23	ตัวเก็บประจุอย่างง่าย และสัญลักษณ์ในวงจร	24
0.24	การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน	25
0.25	การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม	26
0.26	ตัวเก็บประจุประเภทต่าง ๆ (1)	27
0.27	ตัวเก็บประจุประเภทต่าง ๆ (2)	28
0.28	ตัวเก็บประจุประเภทต่าง ๆ (3)	29
0.29	ตัวเก็บประจุแบบติดตั้งบนผิวหน้า	29
0.30	ข้อตกลงมาตรฐานในการกำหนดทิศทางของกระแสและ ขั้วแรงดันไฟฟ้า	30
0.31	ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้า กับ กระแสไฟฟ้า ในโดเมนเวลา และ ในโดเมนความถี่	32
0.32	อิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์ ของ ตัว R, ตัว L, และตัว C	32
0.33	วงจรมุมูลของ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ที่ไฟฟ้ากระแสตรง และที่ความถี่สูง	33
0.34	คุณลักษณะที่สำคัญของ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และ ตัวเหนี่ยวนำ	34
0.35	ความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน ในโดเมนเวลา กับ ในโดเมนเฟเซอร์	38

## สารบัญภาพ (ต่อ 2)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
0.36	สัญญาณแอนาล็อก ซ้าย (a) และสัญญาณดิจิทัล ขวา (b)	47
0.37	สัญญาณแอนาล็อก (1)	47
0.38	สัญญาณแอนาล็อก (2)	48
0.39	สัญญาณดิจิทัล (1)	48
0.40	สัญญาณดิจิทัล (2)	49
0.41	ตัวอย่างการซัดของวงจรมัลติเพลกซ์สัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ	54
0.42	ตัวอย่างการซัดของวงจรมัลติเพลกซ์	55
0.43	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก หรือ ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ของวัสดุไดอิเล็กทริก โดยประมาณ	82
0.44	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ของวัสดุไดอิเล็กทริก	83
0.45	ค่าเพอร์เมียบิลิตีสัมพัทธ์ ของวัสดุแม่เหล็ก โดยประมาณ	84
1.1	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในทิศทางแกน z	93
1.2	หน้าคลื่นประเภทต่าง ๆ	94
1.3	คลื่นที่แพร่กระจายในทิศทาง $\hat{k} = \hat{z}$	95
1.4	โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	97
1.5	โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น	98
1.6	โพลาริเซชันแบบวงรีตามเวลา	99
1.7	ประเภทของโพลาริเซชันแบบวงรี	101
1.8	โพลาริเซชันแบบวงกลม	102

### สารบัญภาพ (ต่อ 3)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
1.9	คุณลักษณะของตัวกลางประเภทต่าง ๆ	114
1.10	การไหลของกำลังผ่านช่องเปิด A	115
1.11	คลื่นตกกระทบ สะท้อน และส่งผ่าน ที่รอยต่อสายนำสัญญาณ หรือตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกัน	118
1.12	การตกกระทบแบบตั้งฉาก และแบบเฉียง ต่อดูดตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะต่างกัน	119
1.13	รอยต่อระหว่าง สองตัวกลาง และสองสายส่ง	120
1.14	เปรียบเทียบความคล้ายคลึงระหว่าง สมการคลื่นระนาบที่ตกกระทบ ตั้งฉาก กับ สมการของสายส่งสัญญาณ ภายใต้เงื่อนไขการไร้การสูญเสีย	125
1.15	คลื่นที่ตกกระทบตั้งฉาก ที่ระนาบรอยต่อระหว่างสองตัวกลางที่มีการสูญเสีย	129
1.16	คลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่านที่หักเห ที่ขอบเขตระนาบระหว่างตัวกลางที่แตกต่างกัน	131
1.17	กฎของสเนลล์	134
1.18	มุมที่คลื่นออกจากตัวกลาง	136
1.19	การสะท้อน และส่งผ่าน ของคลื่นที่ตกกระทบแบบเฉียง กรณี โพลาริเซชันตั้งฉาก และโพลาริเซชันขนาน ที่รอยต่อตัวกลางที่แตกต่างกัน	138
1.20	คลื่นระนาบตกกระทบที่มีโพลาริเซชันตั้งฉาก ที่มีมุม $\theta_i$ ที่ระนาบรอยต่อระหว่างตัวกลางที่แตกต่างกัน	139

## สารบัญภาพ (ต่อ 4)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
1.21	คลื่นระนาบตกกระทบที่มีโพลาไรเซชันขนาน ที่มีมุม $\theta_i$ ที่ระนาบรอยต่อระหว่างตัวกลางที่แตกต่างกัน	144
1.22	การสะท้อนและการส่งผ่าน ของคลื่นลำคลื่นตกกระทบวงกลม ที่มีขนาดพื้นที่ A บนรอยต่อของตัวกลางที่แตกต่างกัน	148
1.23	สรุป สัมประสิทธิ์การสะท้อน สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่าน ของการตกกระทบ ตั้งฉากและเฉียง	152
2.1	ตัวอย่างส่วนประกอบเครื่องส่งสัญญาณ	173
3.1	ตัวอย่างส่วนประกอบเครื่องรับสัญญาณ	264
5.1	ตัวอย่างส่วนประกอบเครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณ ในระบบสื่อสาร	347
5.2	ส่วนประกอบของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่	349
5.3	สายอากาศรับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับเครื่องรับด้วยสายส่งที่มีการสูญเสีย	352
5.4	ระบบเชื่อมโยงด้วยวิทยุพื้นฐาน	355
5.5	การวิเคราะห์สัญญาณรบกวน	362

## สารบัญภาพ (ต่อ 5)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
5.6	ระบบเรดาร์พื้นฐานแบบโมโนสเตติกและไบสแตติก	371
5.7	ระบบเรดาร์แบบพัลส์	374
5.8	ระบบเรดาร์แบบคอปเปอเรอร์	377
5.9	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 5.5	385
5.10	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 5.7	388
5.11	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 5.8	390
6.1	สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	400
6.2	ความถี่ และความยาวคลื่น ของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	401
6.3	แหล่งกำเนิด ความยาวคลื่น พลังงาน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	401
6.4	ประเภทของการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และมาตราส่วน โดยประมาณของความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	402
6.5	ความยาวคลื่น ขนาดโดยประมาณ ความถี่ และชื่อเรียก ของ สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	403
6.6	ความถี่ การใช้งาน ชื่อแถบความถี่ และความยาวคลื่น ของ สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	404
6.7	สื่อ นำ ความถี่ ความยาวคลื่น และการใช้งาน ของสเปกตรัมคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า	405
6.8	สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า: ชื่อแถบความถี่, ความถี่, ความยาวคลื่น	406
6.9	อัตราขยายและการสูญเสีย ของวงจรที่เรียงซ้อนกัน	414

## สารบัญภาพ (ต่อ 6)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
8.1	สายอากาศ สำหรับการ ส่งหรือรับ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	421
8.2	ตัวอย่างลักษณะสายอากาศประเภทต่าง ๆ	424
8.3	ตัวอย่างลักษณะสายอากาศบนชิป	425
8.4	ลักษณะลำคลื่นของสายอากาศ แบบแผนภาพเชิงขั้ว	426
8.5	ลักษณะลำคลื่นของสายอากาศ แบบแผนภาพเชิงเส้น	427
8.6	ลักษณะระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	428
8.7	แบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แบบรอบทิศทาง	429
8.8	ลักษณะบริเวณของสนามต่าง ๆ รอบสายอากาศ	430
8.9	ลักษณะของลำคลื่นเกรตติง (Grating lobe)	431
8.10	ลักษณะสายอากาศ ยากิอูตะเชิงระนาบ (1)	432
8.11	ลักษณะสายอากาศ ยากิอูตะเชิงระนาบ (2)	433
8.12	ลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ยากิอูตะ เชิงระนาบ	434
8.13	สายอากาศไมโครสตริปแพตวางกลม แบบอาร์เรย์ 4x4	435
8.14	ลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ไมโครสตริปแพตวางกลม แบบอาร์เรย์ 4x4	436
8.15	ลักษณะสายอากาศไมโครสตริปแพตสี่เหลี่ยม แบบอาร์เรย์ 32 องค์ประกอบ	437
8.16	ลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศไมโครสตริป แพตสี่เหลี่ยม แบบอาร์เรย์ 32 องค์ประกอบ	438

## สารบัญภาพ (ต่อ 7)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
13.1	สรุปการออกแบบตัวกรองเชิงประกอบ	468
13.2	วงจรถองที่ออกแบบ สำหรับตัวอย่างการคำนวณที่ 13.1	469
13.3	กราฟการลดทอนเทียบกับค่ามาตรฐานของความถี่สำหรับ ตัวกรองที่เรียบที่สุด	470
13.4	ค่าองค์ประกอบสำหรับตัวกรองที่เรียบที่สุด	471
13.5	ลักษณะวงจรถองแถบความถี่ผ่านที่เรียบที่สุด สำหรับตัวอย่าง การคำนวณที่ 13.2	471
13.6	ค่าองค์ประกอบ สำหรับ ตัวกรองแถบความถี่ต่ำผ่านที่มี สัญญาณกระเพื่อมเท่ากัน	473
13.7	ลักษณะวงจรถองแถบความถี่ผ่าน สำหรับตัวอย่างการคำนวณ ที่ 13.3	474
13.8	การแปลงตัวกรอง	474
13.9	ค่าองค์ประกอบ สำหรับตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบสัญญาณ กระเพื่อมเท่ากัน	476
13.10	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.4 ที่1	477
13.11	การแปลงรีซาร์ด	477
13.12	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.4 ที่2	478
13.13	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.4 ที่3	478
13.14	สี่เอกลักษณะคู่โรดา	479
13.15	วงจรมุมูลของ เอกลักษณะคู่โรดา (a)	480
13.16	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.4 ที่4	481

## สารบัญภาพ (ต่อ 8)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
13.17	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.4 ที่5	481
13.18	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.4 ที่6	482
13.19	กราฟการลดทอนเทียบกับความถี่มาตรฐาน สำหรับ ตัวกรองเรียบที่สุด	483
13.20	การออกแบบตัวกรอง ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.5	484
13.21	ค่าองค์ประกอบของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเรียบที่สุด	484
13.22	ลักษณะตัวกรองแถบความถี่ผ่านสายคัปเปิ้ล $N+1$ ส่วน	490
13.23	กราฟการลดทอน เทียบกับ ความถี่มาตรฐาน สำหรับตัวกรอง สัญญาณกระเพื่อมเท่ากัน	491
13.24	ค่าองค์ประกอบสำหรับ ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีสัญญาณ กระเพื่อมเท่ากัน	492
13.25	กราฟการลดทอน เทียบกับ ความถี่มาตรฐาน สำหรับตัวกรอง สัญญาณกระเพื่อมเท่ากัน	497
13.26	ค่าองค์ประกอบสำหรับ ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีสัญญาณ กระเพื่อมเท่ากัน	498
13.27	วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ออกแบบ สำหรับตัวอย่างการ คำนวณที่ 13.7	501
13.28	ลักษณะของวงจรกรอง สำหรับตัวอย่างการคำนวณที่ 13.8	502
13.29	กราฟการลดทอน เทียบกับ ความถี่มาตรฐาน สำหรับตัวกรอง สัญญาณกระเพื่อมเท่ากัน	503

## สารบัญภาพ (ต่อ 9)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
13.30	ค่าองค์ประกอบสำหรับ ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีสัญญาณ กระเพื่อมเท่ากัน	504
13.31	ค่าองค์ประกอบสำหรับตัวกรองความถี่ต่ำผ่านแบบหน่วงเวลา แบบเรียบที่สุด	506
13.32	การแปลงตัวกรอง	507
13.33	ลักษณะวงจรถอง สำหรับ ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.9	507
13.34	ค่าองค์ประกอบ สำหรับตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่เรียบที่สุด	509
13.35	ลักษณะวงจรถองความถี่ต่ำผ่าน อันดับ 3 แอล และซี	509
13.36	ลักษณะวงจรถองที่ได้จากการแปลงรีซาร์ด	510
13.37	ลักษณะวงจรถองที่ใส่องค์ประกอบ 1 ทั้งสองด้าน	510
13.38	วงจรสมมูล ของ เอกลักษณะคูโรตา	511
13.39	วงจรสตบอนุกรม จากการใช้ เอกลักษณะคูโรตา	512
13.40	วงจรสตบอนุกรม อิมพีแดนซ์ 75 โอห์ม	512
13.41	ค่าองค์ประกอบ สำหรับตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่เรียบที่สุด	513
13.42	ลักษณะวงจรถองความถี่ต่ำผ่าน อันดับ 4 แอล และซี	513
13.43	ลักษณะวงจรถองที่ได้จากการแปลงรีซาร์ด	514
13.44	เอกลักษณะของคูโรตา	515
13.45	วงจรสมมูล ของ เอกลักษณะคูโรตา	516

## สารบัญภาพ (ต่อ 10)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
13.46	วงจรที่ได้จากการใช้เอกลักษณ์คูโรดา (1)	516
13.47	วงจรที่ได้จากการใช้เอกลักษณ์คูโรดา (2)	517
13.48	วงจรรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้ออกแบบสำหรับ ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.11	518
17.1	ตัวอย่างการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัล โดยแปลง แอนาล็อกอินพุต 11.7 โวลต์ เป็นเอาต์พุตดิจิทัล 4 บิต	532
17.2	ตัวอย่างการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนาล็อก โดยแปลง อินพุตดิจิทัล 4 บิต กลับเป็นแอนาล็อกเอาต์พุต 11.7 โวลต์	547
18.1	สายนำสัญญาณโคแอกเซียล (1)	564
18.2	สายนำสัญญาณโคแอกเซียล (2)	565
18.3	สายนำสัญญาณคู่ขนาน	567
18.4	สายนำสัญญาณไมโครสตริป	568
18.5	สายนำสัญญาณสตริป	569
18.6	สายนำสัญญาณสล็อต	570
18.7	สายนำสัญญาณท่อนำคลื่นแบบร่วมระนาบ	572
18.8	สายนำสัญญาณท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม	574
18.9	สายนำสัญญาณท่อนำคลื่นวงกลม	575
18.10	สายนำสัญญาณท่อนำคลื่นวงรี	576

## สารบัญภาพ (ต่อ 11)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
18.11	สายนำสัญญาณท่อนำคลื่นรีจ	577
18.12	สายนำสัญญาณที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดและโหลด	578
18.13	สายนำสัญญาณโคแอกเซียลที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดและโหลด	579
18.14	ลักษณะทั่วไปของวงจรสายนำสัญญาณ	580
18.15	ลักษณะทั่วไปของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าบนสายนำสัญญาณ	581
18.16	สายนำสัญญาณคู่ขนาน และแบบจำลองวงจรองค์ประกอบก่อน หรือ วงจรสมมูลของสายนำสัญญาณ	582
18.17	แบบจำลองวงจรองค์ประกอบก่อน ของสายยาว $\Delta Z$ (1)	583
18.18	แบบจำลองวงจรองค์ประกอบก่อน ของสายยาว $\Delta Z$ (2)	584
18.19	แบบจำลองวงจรองค์ประกอบก่อน ของสายยาว $\Delta Z$ (3)	585
18.20	คลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อน ในสายนำสัญญาณ	589
18.21	พารามิเตอร์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ	593
18.22	สายนำสัญญาณยาว $L$ ที่เชื่อมต่อกับโหลด อิมพีแดนซ์ $Z_L$	594
18.23	ขนาดและเฟส ของสัมประสิทธิ์การสะท้อน ของโหลดประเภทต่างๆ	597
18.24	รูปแบบของคลื่นนิ่ง สำหรับ (a) $ V(d) $ และ (b) $ I(d) $	599
18.25	รูปแบบของคลื่นนิ่ง ของกรณี แมทซ์โหลด, ลัดวงจร และเปิดวงจร	601

## สารบัญภาพ (ต่อ 12)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
18.26	การแทนปลายสายนำสัญญาณด้วยอินพุตอิมพีแดนซ์ $Z_{in}$	605
18.27	สายนำสัญญาณที่ต่อปลายสายแบบลัดวงจร	607
18.28	สายนำสัญญาณที่ต่อปลายสายแบบเปิดวงจร	610
18.29	คุณสมบัติของคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณไร้การสูญเสีย	612
18.30	กำลังเฉลี่ยตามเวลาของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนบนสายส่งสัญญาณไร้การสูญเสีย	615
18.31	ลักษณะทางเรขาคณิต และเส้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	622
18.32	ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ และค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ประสิทธิผลของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	623
18.33	ลักษณะทางเรขาคณิตของ สายนำสัญญาณโคแอกเชียล	631
18.34	เส้นสนามสำหรับ คลื่น TEM และคลื่น $TE_{11}$ ของสายโคแอกเชียล	635
18.35	ลักษณะทางเรขาคณิตของท่อนำคลื่นแบบแผ่นขนาน	636
18.36	ลักษณะการเดินทางของคลื่นระนาบของโหมด $TM_1$ ในท่อนำคลื่นแผ่นขนาน	642
18.37	การลดทอนเนื่องจากการสูญเสียของตัวนำสำหรับคลื่นโหมด TEM, $TM_1$ และ $TE_1$ ของท่อนำคลื่นแบบแผ่นขนาน	646
18.38	ข้อมูลสรุปสำหรับท่อนำคลื่นแบบแผ่นขนาน	647
18.39	เส้นสนามสำหรับ คลื่นโหมด TEM, $TM_1$ , และ $TE_1$ ของท่อนำคลื่นแบบแผ่นขนาน	648
18.40	ลักษณะทางเรขาคณิตของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม	649

## สารบัญภาพ (ต่อ 13)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
18.41	ข้อมูลสรุปของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม	658
18.42	เส้นสนาม สำหรับบางโหมดอันดับต่ำ ของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม	659
18.43	ข้อมูลของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม แบบมาตรฐาน	660
18.44	ลักษณะทางเรขาคณิตของท่อนำคลื่นที่บรรจุสารไดอิเล็กทริกบางส่วน	661
18.45	ลักษณะทางเรขาคณิตของท่อนำคลื่นแบบวงกลม	663
18.46	ค่า $p'_{mn}$ สำหรับ โหมด TE ของท่อนำคลื่นแบบวงกลม	667
18.47	ค่า $p_{nm}$ สำหรับโหมด TM ของท่อนำคลื่นแบบวงกลม	671
18.48	ความถี่ตัดของ จำนวนหนึ่งของโหมด TE และ TM ของท่อนำคลื่นแบบวงกลม ที่สัมพันธ์กับความถี่ตัดของ โหมด $TE_{11}$	672
18.49	ข้อมูลสรุปของท่อนำคลื่นแบบวงกลม	673
18.50	เส้นสนาม สำหรับบางโหมดอันดับต่ำ ของท่อนำคลื่นแบบวงกลม	674
18.51	ลักษณะทางเรขาคณิตของสายนำสัญญาณสตริป	675
18.52	ลักษณะเส้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายนำสัญญาณสตริป	675
18.53	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 18.7	685
19.1	ไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์ (1)	7077
19.2	ไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์ (2)	708
19.3	คัปเปิ้ลไลน์คัปเปิลอร์	709
19.4	แลงคัปเปิลอร์	710
19.5	บรานไลน์คัปเปิลอร์	711

## สารบัญภาพ (ต่อ 14)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
19.6	แรตเรสคัพเปลออร์	712
19.7	เบตโฮลคัพเปลออร์ แบบขนาน และแบบเอียง	714
19.8	เวฟไกด์คัพเปลออร์ (1)	715
19.9	เวฟไกด์คัพเปลออร์ (2)	716
19.10	เวฟไกด์คัพเปลออร์ (3)	717
19.11	รีซีสทีฟคัพเปลออร์	718
19.12	ตัวแบ่งกำลังที่จั้งขึ้น	720
19.13	ตัวแบ่งกำลังรีซีสทีฟ (1)	721
19.14	ตัวแบ่งกำลังรีซีสทีฟ (2)	722
19.15	ตัวแบ่งกำลังรีซีสทีฟ (3)	722
19.16	ตัวแบ่งกำลังวินคินสัน (1)	723
19.17	ตัวแบ่งกำลังวินคินสัน (2)	724
19.18	ตัวแบ่งกำลังวินคินสัน (3)	725
19.19	ตัวแบ่งกำลังไฮบริด 90 องศา (1)	726
19.20	ตัวแบ่งกำลังไฮบริด 90 องศา (2)	727
19.21	ตัวแบ่งกำลังไฮบริด 180 องศา (1)	728
19.22	ตัวแบ่งกำลังไฮบริด 180 องศา (2)	729
19.23	ตัวแบ่งกำลังไฮบริด 180 องศา (3)	730

## สารบัญภาพ (ต่อ 15)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
22.1	บรรจุภัณฑ์แบบคูอัลออนไลน์ (1)	751
22.2	บรรจุภัณฑ์แบบคูอัลออนไลน์ (2)	752
22.3	บรรจุภัณฑ์แบบทรานซิสเตอร์เอาต์ไลน์	753
22.4	บรรจุภัณฑ์แบบควอดแฟลต	754
22.5	บรรจุภัณฑ์แบบเอาต์ไลน์ไอซีขนาดเล็ก (1)	755
22.6	บรรจุภัณฑ์แบบเอาต์ไลน์ไอซีขนาดเล็ก (2)	756
22.7	บรรจุภัณฑ์แบบเอาต์ไลน์ทรานซิสเตอร์ขนาดเล็ก	757
22.8	บรรจุภัณฑ์แบบควอดแฟลตโนลิต	759
22.9	บรรจุภัณฑ์แบบคูอัลแฟลตโนลิต	769
22.10	บรรจุภัณฑ์แบบบอลกริดอาร์เรย์	761
22.11	บรรจุภัณฑ์แบบชิปสเกล (1)	762
22.12	บรรจุภัณฑ์แบบชิปสเกล (2)	763
22.13	บรรจุภัณฑ์แบบระดับเวเฟอร์ (1)	765
22.14	บรรจุภัณฑ์แบบระดับเวเฟอร์ (2)	766
22.15	บรรจุภัณฑ์แบบอีพ็อกซีโมลโมดูล	767
22.16	บรรจุภัณฑ์แบบซิสเต็มอินแพ็กเก็ต	768
22.17	บรรจุภัณฑ์แบบซิลด์เมทัล	770
22.18	บรรจุภัณฑ์แบบฟลิปชิปบอลกริดอาร์เรย์ (1)	773
22.19	บรรจุภัณฑ์แบบฟลิปชิปบอลกริดอาร์เรย์ (2)	774
22.20	บรรจุภัณฑ์แบบเซรามิกฉนวนหนา (1)	775

## สารบัญญภาพ (ต่อ 16)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
22.21	บรรจุภัณฑ์แบบเซรามิกผืนึกแน่นหนา (2)	776
22.22	บรรจุภัณฑ์แบบเซรามิกโคไฟอุนทภูมิสูง	777
22.23	บรรจุภัณฑ์แบบเซรามิกโคไฟอุนทภูมิต่ำ (1)	778
22.24	บรรจุภัณฑ์แบบเซรามิกโคไฟอุนทภูมิต่ำ (2)	779
22.25	บรรจุภัณฑ์แบบแก้วและควอตซ์	780
22.26	บรรจุภัณฑ์แบบโพรง (1)	782
22.27	บรรจุภัณฑ์แบบโพรง (2)	783
22.28	บรรจุภัณฑ์แบบมัลติชิปโมดูล (1)	785
22.29	บรรจุภัณฑ์แบบมัลติชิปโมดูล (2)	786
22.30	บรรจุภัณฑ์แบบมัลติชิปโมดูล (3)	787
22.31	บรรจุภัณฑ์แบบแอนทีนนาอิน	788
22.32	บรรจุภัณฑ์แบบแอนทีนนาออนชิป	789
22.33	บรรจุภัณฑ์แบบพินกริดอาเรย์ (1)	791
22.34	บรรจุภัณฑ์แบบพินกริดอาเรย์ (2)	792
22.35	บรรจุภัณฑ์แบบพินกริดอาเรย์ (3)	793
22.36	บรรจุภัณฑ์แบบซิกแซกอินไลน์	795
22.37	บรรจุภัณฑ์แบบแลนดกริดอาเรย์	797
22.38	บรรจุภัณฑ์แบบยึดติดด้วยเทปอัตโนมัติ (1)	799
22.39	บรรจุภัณฑ์แบบยึดติดด้วยเทปอัตโนมัติ (2)	800
22.40	บรรจุภัณฑ์แบบยึดติดด้วยเทปอัตโนมัติ (3)	801

## สารบัญภาพ (ต่อ 17)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
22.41	บรรจุภัณฑ์แบบซิปปบนบอร์ด (1)	802
22.42	บรรจุภัณฑ์แบบซิปปบนบอร์ด (2)	803
22.43	บรรจุภัณฑ์แบบซิปปบนบอร์ด (3)	803
22.44	บรรจุภัณฑ์แบบซิปปบนบอร์ด (4)	804
22.45	บรรจุภัณฑ์แบบขา J ขนาดเล็ก (1)	806
22.46	บรรจุภัณฑ์แบบขา J ขนาดเล็ก (2)	807
22.47	บรรจุภัณฑ์แบบขา J ขนาดเล็ก (3)	808
22.48	บรรจุภัณฑ์แบบซิปปพลาสติกแบบมีขา (1)	809
22.49	บรรจุภัณฑ์แบบซิปปพลาสติกแบบมีขา (2)	810
22.50	บรรจุภัณฑ์แบบซิปปพลาสติกแบบมีขา (3)	811
22.51	บรรจุภัณฑ์แบบระบบบนซิปป (1)	812
22.52	บรรจุภัณฑ์แบบระบบบนซิปป (2)	813
22.53	บรรจุภัณฑ์แบบระบบบนซิปป (3)	813
22.54	บรรจุภัณฑ์แบบเทคโนโลยีแพ็คเกจบนแพ็คเกจ	815
23.1	ลักษณะของ วงจรหนึ่งพอร์ต และวงจรสองพอร์ต	822
23.2	เครือข่ายสองพอร์ตเชิงเส้น	823
23.3	การหา พารามิเตอร์ z	824
23.4	วงจรสองพอร์ต รีซีพร็อคคอล สำหรับ พารามิเตอร์ z	826
23.5	วงจรมุมูลสำหรับ กรณีรีซีพร็อคคอล และกรณีทั่วไป สำหรับ พารามิเตอร์ z	827

## สารบัญภาพ (ต่อ 18)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
23.6	การหา พารามิเตอร์ $y$	828
23.7	วงจรมุมมูลสำหรับ กรณีสี่ขีพรอกคอล และกรณีทั่วไป สำหรับ พารามิเตอร์ $y$	831
23.8	วงจรมุมมูลของ พารามิเตอร์ $h$ ของเครือข่ายสองพอร์ต	833
23.9	แบบจำลอง พารามิเตอร์ $g$ สำหรับเครือข่ายสองพอร์ต	835
23.10	การกำหนดพารามิเตอร์ ADCB จากตัวแปรที่ซ้ำ	836
23.11	ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ $z, y, h, g, T,$ และ $t$	840
23.12	ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ $S, Z, Y, ABCD$	841
23.13	คลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนของวงจรสองพอร์ต	850
23.14	แผนภาพการไหลของสัญญาณ ของวงจรสองพอร์ต	852
23.15	แผนภาพการไหลของสัญญาณ ของวงจรสองพอร์ต ที่ปิด ปลายสายด้วยโหลด	852
23.16	วงจรสองพอร์ตที่ปิดปลายสายด้วยโหลด $L$ หรือต่อพอร์ตที่ 2 ด้วยโหลด $L$	852
23.17	วงจรสองพอร์ตที่ต่างกันต่อเรียงกัน โดยปิดปลายสายวงจรที่ สองด้วยโหลด $L$	853
23.18	แผนภาพการไหลของสัญญาณ ของวงจรสองพอร์ตที่ต่างกัน ต่อเรียงกัน โดยปิดปลายสายวงจรที่สองด้วยโหลด $L$	853
23.19	วงจรสองพอร์ตที่ต่างกันสองวงจร ต่อกันสายส่งสัญญาณ อิมพีแดนซ์ $Z_0$ ยาว $l$ โดยปิดปลายสายวงจรที่สองด้วยโหลด $L$	854

## สารบัญภาพ (ต่อ 19)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
23.20	แผนภาพการไหลของสัญญาณของ วงจรสองพอร์ตที่ต่างกันสองวงจร ต่อกันด้วยสายส่งสัญญาณ อิมพีแดนซ์ Z <sub>0</sub> ยาว L โดยปิดปลายสายวงจรที่สองด้วยโหลด L	854
23.21	แผนภาพการไหลของสัญญาณ สำหรับความสัมพันธ์ที่ 1	855
23.22	แผนภาพการไหลของสัญญาณ สำหรับความสัมพันธ์ที่ 2	855
23.23	แผนภาพการไหลของสัญญาณ สำหรับความสัมพันธ์ที่ 3	855
23.24	การบวกสัญญาณสองสัญญาณ	856
23.25	การบวกสัญญาณ ที่ขนานกัน	856
23.26	การคูณกันของสัญญาณ สามสัญญาณ	857
23.27	ผลคูณของสัญญาณต่อเรียงกัน	857
23.28	การสลับสับเปลี่ยน ของสัญญาณ	858
23.29	แผนภาพการไหลของสัญญาณ ที่มีลูปป้อนกลับที่โหนดเดียวกัน	858
23.30	แผนภาพการไหลของสัญญาณ ที่มีลูปป้อนกลับที่โหนดเดียวกัน และการลดรูป กำจัดลูปป้อนกลับที่โหนดเดียวกัน	859
23.31	ลูปป้อนกลับที่โหนดเดียวกัน และการลดรูป กำจัดลูปป้อนกลับที่โหนดเดียวกัน เพิ่มเติม	860
23.32	กรณีมีลูปป้อนกลับที่โหนดเดียวกันสองลูป และการลดรูป กำจัดลูปป้อนกลับที่โหนดเดียวกัน	861
23.33	การแยกสัญญาณ	861
23.34	ภาพสำหรับ ตัวอย่างการคำนวณสำหรับเครือข่าย 6 พอร์ต	871
23.35	ภาพสำหรับตัวอย่างการคำนวณสำหรับเครือข่าย 6 พอร์ต แบบเป็นตัวเลข	875

## สารบัญภาพ (ต่อ 20)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
25.1	ไอโซเลเตอร์ (1)	1018
25.2	ไอโซเลเตอร์ (2)	1018
25.3	ไอโซเลเตอร์ แบบท่อนาคลิ้น	1019
25.4	ไอโซเลเตอร์แบบโคแอกเซียล	1020
25.5	ไอโซเลเตอร์แบบไมโครสตริป	1021
25.6	ไอโซเลเตอร์แบบติดตั้งบนพื้นผิว	1022
25.7	ไอโซเลเตอร์แบบกำลังสูง	1023
25.8	ไอโซเลเตอร์แบบแถบความถี่กว้าง	1024
25.9	เซอร์คูเลเตอร์ (1)	1026
25.10	เซอร์คูเลเตอร์ (2)	1027
25.11	เซอร์คูเลเตอร์ (3)	1028
25.12	เซอร์คูเลเตอร์ แบบท่อนาคลิ้น	1029
25.13	เซอร์คูเลเตอร์ แบบโคแอกเซียล	1030
25.14	เซอร์คูเลเตอร์ แบบไมโครสตริป	1031
25.15	เซอร์คูเลเตอร์ แบบติดตั้งบนพื้นผิว	1032
25.16	เซอร์คูเลเตอร์ แบบกำลังสูง	1033
25.17	เซอร์คูเลเตอร์ แบบแถบความถี่กว้าง	1034

## สารบัญภาพ (ต่อ 21)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
26.1	แผ่นวงจรพิมพ์เฟราร์ไฟ (FR-4)	1045
26.2	แผ่นวงจรพิมพ์ของ Rogers Corporation	1048
26.3	แผ่นวงจรพิมพ์ Panasonic Megtron	1050
26.4	ขั้วต่อบีเอ็นซี (BNC) (1)	1056
26.5	ขั้วต่อบีเอ็นซี (BNC) (2)	1057
26.6	ขั้วต่อยูเอชเอฟ UHF (PL-259), UHF (SO-239) (1)	1058
26.7	ขั้วต่อยูเอชเอฟ UHF (PL-259), UHF (SO-239) (2)	1059
26.8	ขั้วต่อเอฟ F-Type (1)	1060
26.9	ขั้วต่อเอฟ F-Type (2)	1061
26.10	ขั้วต่อทีเอ็นซี TNC (1)	1062
26.11	ขั้วต่อทีเอ็นซี TNC (2)	1063
26.12	ขั้วต่อทีเอ็นซี TNC (3)	1064
26.13	ขั้วต่อเอ็น N-Type (1)	1065
26.14	ขั้วต่อเอ็น N-Type (2)	1066
26.15	ขั้วต่อเอสเอ็มเอ SMA (1)	1067
26.16	ขั้วต่อเอสเอ็มเอ SMA (2)	1067
26.17	ขั้วต่อเอ็มซีเอ็กซ์ (MCX)	1068
26.18	ขั้วต่อเอ็มเอ็มซีเอ็กซ์ (MMCX)	1069
26.19	ขั้วต่อเอสเอ็มบี (SMB)	1070
26.20	ขั้วต่อเอสเอ็มซี SMC (1)	1071
26.21	ขั้วต่อเอสเอ็มซี SMC (2)	1072

## สารบัญภาพ (ต่อ 22)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
26.22	ขั้วต่อดีไอเอ็น (DIN) 1.0/2.3 (1)	1073
26.23	ขั้วต่อดีไอเอ็น (DIN) 1.0/2.3 (2)	1074
26.24	ขั้วต่อเอพีซี 7 (APC-7)	1075
26.25	ขั้วต่อเอ็น N-Type (Precision)	1076
26.26	ขั้วต่อ 3.5 มิลลิเมตร	1077
26.27	ขั้วต่อ 2.92 มิลลิเมตร	1078
26.28	ขั้วต่อบีเอ็มเอ (BMA)	1079
26.29	ขั้วต่อเอสเอ็มพี SMP (1)	1080
26.30	ขั้วต่อเอสเอ็มพี SMP (2)	1081
26.31	ขั้วต่อเอสเอ็มพีเอ็ม SMPM (1)	1082
26.32	ขั้วต่อเอสเอ็มพีเอ็ม SMPM (2)	1083
26.33	ขั้วต่อเอสเอ็มพีเอ็ม SMPM (3)	1084
26.34	ขั้วต่อเอสเอ็มพีเอส (SMPS)	1085
26.35	ขั้วต่อ 2.4 มิลลิเมตร	1086
26.36	ขั้วต่อ 1.85 มิลลิเมตร	1087
26.37	ขั้วต่อ 1 มิลลิเมตร	1088
26.38	ท่อนำคลื่น WR-10 (1)	1089
26.39	ท่อนำคลื่น WR-10 (2)	1090
26.40	ท่อนำคลื่น WR-10 (3)	1091
26.41	ท่อนำคลื่น WR-10 (4)	1092

## สารบัญภาพ (ต่อ 23)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
26.42	ท่อนำคลื่น WR-10 (5)	1093
26.43	ท่อนำคลื่น WR-08 (1)	1094
26.44	ท่อนำคลื่น WR-08 (2)	1095
26.45	ท่อนำคลื่น WR-08 (3)	1096
26.46	ท่อนำคลื่น WR-06 (1)	1097
26.47	ท่อนำคลื่น WR-06 (2)	1098
26.48	ท่อนำคลื่น WR-06 (3)	1099
26.49	ท่อนำคลื่น WR-05 (1)	1100
26.50	ท่อนำคลื่น WR-05 (2)	1101
26.51	ท่อนำคลื่น WR-03	1102
27.1	Keysight Advanced Design System: ADS (1)	1105
27.2	Keysight Advanced Design System: ADS (2)	1106
27.3	Keysight Advanced Design System: ADS (3)	1107
27.4	Keysight Advanced Design System: ADS (4)	1108
27.5	Keysight Genesys (1)	1109
27.6	Keysight Genesys (2)	1110
27.7	Keysight Genesys (3)	1111
27.8	Keysight Nexus	1112

## สารบัญภาพ (ต่อ 24)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
27.9	Keysight GoldenGate	1113
27.10	Ansys HFSS (1)	1114
27.11	Ansys HFSS (2)	1115
27.12	Ansys Nuhertz FilterSolutions (1)	1116
27.13	Ansys Nuhertz FilterSolutions (2)	1117
27.14	Ansys SynMatrix Filter (1)	1118
27.15	Ansys SynMatrix Filter (2)	1119
27.16	Ansys RF Channel Modeler (1)	1120
27.17	Ansys RF Channel Modeler (2)	1121
27.18	Cadence Products	1123
27.19	Cadence Virtuoso Studio	1124
27.20	Cadence Allegro X PCB Designer	1125
27.21	Siemens: Electronic design Software	1128
27.22	Dassault Systèmes	1130
27.23	Dassault Systèmes: CST Studio Suite	1131
27.24	Dassault Systèmes: Antenna Magus	1132
27.25	COMSOL Multiphysics (1)	1134
27.26	COMSOL Multiphysics (2)	1135
27.27	Analog Devices LTspice	1136
27.28	Analog Devices LTspice 24	1137
27.29	ออเทียม (Altium) (1)	1138
27.30	ออเทียม (Altium) (2)	1139

## สารบัญภาพ (ต่อ 25)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
28.1	วงจรขยาย และอินพุตและเอาต์พุต แมทซิงเน็ตเวิร์ค สำหรับตัวอย่างการคำนวณที่ 28.3	1150
28.2	วงจรขยาย และอินพุตและเอาต์พุต แมทซิงเน็ตเวิร์ค สำหรับตัวอย่างการคำนวณที่ 28.4	1156
28.3	กราฟ $V_{GS}$ กับ $I_D$ สำหรับตัวอย่างการคำนวณที่ 28.6	1158
28.4	กราฟ $V_{DS}$ กับ $I_D$ สำหรับ ตัวอย่างการคำนวณที่ 28.7	1159
28.5	แบบจำลองสมมูลของเจเฟ็ด สำหรับตัวอย่างการคำนวณที่ 28.8	1160
28.6	วงจรขยาย เจเฟ็ด สำหรับตัวอย่างการคำนวณที่ 28.9	1161
28.7	วงจรขยายเจเฟ็ด สำหรับตัวอย่างการคำนวณที่ 28.10	1163
28.8	วงจรขยายเจเฟ็ด สำหรับตัวอย่างการคำนวณที่ 28.11	1165
28.9	วงจรขยายเจเฟ็ด สำหรับตัวอย่างการคำนวณที่ 28.12	1168
28.10	วงจรขยาย ตัวอย่างการคำนวณที่ 28.13	1170
28.11	วงจรขยาย ตัวอย่างการคำนวณที่ 28.14	1172
28.12	คุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ ตัวอย่างการคำนวณที่ 28.14	1172
28.13	วงจรขยาย ตัวอย่างการคำนวณที่ 28.15	1175
28.14	วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบจูนคอลเลกเตอร์	1203
28.15	วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบคอลพิด	1204
28.16	วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบฮาร์ตเลย์	1205
28.17	วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟส	1206
28.18	วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบเวนบริดจ์	1207

## สารบัญภาพ (ต่อ 26)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
29.1	ตัวเหนี่ยวนำ 1	1229
29.2	ตัวเหนี่ยวนำ 2	1230
29.3	ตัวเหนี่ยวนำ 3	1231
29.4	ตัวเหนี่ยวนำ 4	1232
29.5	ตัวเหนี่ยวนำ บนวงจรรวม	1233
29.6	การต่อตัวเหนี่ยวนำ แบบอนุกรม	1234
29.7	การต่อตัวเหนี่ยวนำ แบบขนาน	1235
29.8	คุณลักษณะตัวเหนี่ยวนำ เทียบกับ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ	1236
29.9	เส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างโดยขดลวดเดี่ยวจำนวน $N$ รอบ	1237
29.10	ความเหนี่ยวนำร่วม $M_{21}$ ของขดลวด 2 เมื่อเทียบกับขดลวด 1	1238
29.11	ความเหนี่ยวนำร่วม $M_{12}$ ของขดที่ 1 เนื่องจาก ขดที่ 2	1240
29.12	การแสดงสัญลักษณ์จุด ที่ขดลวดทั้งสอง ของหม้อแปลง	1242
29.13	การใช้งาน กฎของจุด	1244
29.14	กฎของจุด สำหรับ ขดลวด ที่ต่อ อนุกรมกัน	1246
29.15	การวิเคราะห์ ในโดเมนเวลาและในโดเมนความถี่ สำหรับวงจร ที่มีขดลวดที่มีการเชื่อมต่อกันทางแม่เหล็ก	1248
29.16	แบบจำลอง วิเคราะห์ ขดลวดที่มีการเหนี่ยวนำซึ่งกันและกัน	1250
29.17	หม้อแปลงเชิงเส้น	1252
29.18	วงจรสมมูลของหม้อแปลงเชิงเส้น	1254
29.19	วงจรสมมูลของ วงจร T	1255
29.20	วงจรสมมูล ของวงจรพาย	1255

## สารบัญภาพ (ต่อ 27)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
29.21	วงจรที่มีการคัปปลิ่ง	1256
29.22	หม้อแปลงในอุดมคติ	1258
29.23	ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ ในหม้อแปลงอุดมคติ	1259
29.24	วงจรที่แสดงขั้วแรงดัน และทิศทางกระแส ในหม้อแปลงอุดมคติ	1261
29.25	วงจรสมมูลของหม้อแปลงอุดมคติ	1263
29.26	$V_{Th}$ และ $Z_{Th}$ ของหม้อแปลงอุดมคติ ภาพ 29.25	1264
29.27	วงจรสมมูลของหม้อแปลงอุดมคติที่ได้จากการสะท้อนวงจร ทุติยภูมิไปยังด้านปฐมภูมิ	1265
29.28	วงจรสมมูลของหม้อแปลงอุดมคติที่ได้จากการสะท้อนวงจร ปฐมภูมิไปยังด้านทุติยภูมิ	1266
29.29	ภาพประกอบ ตัวอย่างการคำนวณที่ 29.1	1267
29.30	หม้อแปลงบนวงจรรวม (1)	1269
29.31	หม้อแปลงบนวงจรรวม (2)	1270
29.32	ตัวต้านทานบนวงจรรวม (1)	1271
29.33	ตัวต้านทานบนวงจรรวม (2)	1272
29.34	ตัวเก็บประจุบนวงจรรวม แบบ MOM (Metal-oxide-metal) (1)	1273
29.35	ตัวเก็บประจุบนวงจรรวม แบบ MOM (Metal-oxide-metal) (2)	1274

## สารบัญภาพ (ต่อ 28)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
30.1	บริเวณลู่เข้าของการแปลงลาปลาซ	1277
30.2	คู่มือการแปลงลาปลาซ (1)	1279
30.3	คู่มือการแปลงลาปลาซ (2)	1280
30.4	คู่มือการแปลงลาปลาซ (3)	1281
30.5	คุณสมบัติของการแปลงลาปลาซ (1)	1282
30.6	คุณสมบัติของการแปลงลาปลาซ (2)	1283
30.7	คุณสมบัติของการแปลงลาปลาซ (3)	1284
30.8	คุณสมบัติของอินทิกรัลการคอนโวลูชัน	1290
30.9	อิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบวงจร ในโดเมนเอส (s)	1292
30.10	ภาพสำหรับ ตัวอย่างการคำนวณที่ 30.4	1295
30.11	ภาพประกอบการคำนวณ ตัวอย่างการคำนวณที่ 30.4	1295
31.1	ค่าของ โคไซน์ ไฮเปอร์โบลิค และฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล สำหรับ อินทิกรัล ที่เป็นจำนวนเท่าของพาย ( $\pi$ )	1303
31.2	ตัวอย่างทั่วไปของฟังก์ชันคาบที่เป็นฟังก์ชันคู่	1304
31.3	ตัวอย่างทั่วไปของฟังก์ชันคาบที่เป็นฟังก์ชันคี่	1308
31.4	ตัวอย่างทั่วไปของฟังก์ชันสมมาตรครึ่งคาบแบบคี่	1311
31.5	ผลของความสมมาตรต่อสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์	1313
31.6	อนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณฟังก์ชันมาตรฐานที่ใช้บ่อย	1314
31.7	ฟังก์ชันไม่เป็นคาบ และฟังก์ชันเป็นคาบ	1317
31.8	การเพิ่มขึ้นของคาบบนสเปกตรัมของพัลส์เป็นคาบ	1318
31.9	คู่มือการแปลงฟูเรียร์ (1)	1322

## สารบัญภาพ (ต่อ 29)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
31.10	คู่มือการแปลงฟูเรียร์ (2)	1323
31.11	คู่มือการแปลงฟูเรียร์ (3)	1324
31.12	คุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ (1)	1326
31.13	คุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์ (2)	1327
31.14	ภาพสำหรับ ตัวอย่างการคำนวณที่ 31.3	1332
32.1	ดิจิทัลมัลติมิเตอร์	1335
32.2	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า	1337
32.3	เครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้ากระแสตรง	1338
32.4	แอลซีอาร์ มิเตอร์	1339
32.5	เครื่องวิเคราะห์ฮอิมพีแดนซ์	1340
32.6	เครื่องกำเนิดรูปคลื่นตามต้องการ (1)	1341
32.7	เครื่องกำเนิดรูปคลื่นตามต้องการ (2)	1342
32.8	เครื่องกำเนิดสัญญาณแบบเวกเตอร์	1343
32.9	เครื่องทดสอบอัตราส่วนบิดผิดพลาด	1344
32.10	ออสซิลโลสโคป	1346
32.11	เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม หรือเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ	1348
32.12	เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (1)	1350
32.13	เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (2)	1351
32.14	เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (3)	1352
32.15	ตัวอย่างลักษณะชุดอุปกรณ์เพื่อการสอบเทียบแบบกลไก	1354

## สารบัญภาพ (ต่อ 30)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
32.16	ตัวอย่างลักษณะชุดอุปกรณ์เพื่อการสอบเทียบแบบอิเล็กทรอนิกส์	1355
32.17	การเชื่อมต่อเครื่องวิเคราะห์โครมสายเพื่อทำการวัด (1)	1356
32.18	การเชื่อมต่อเครื่องวิเคราะห์โครมสายเพื่อทำการวัด (2)	1357
32.19	เครื่องทดสอบเฟสอินยอร์	1358
32.20	เครื่องวัดกำลังของสัญญาณ	1359
32.21	ตัวรับรูกำลังของสัญญาณ หรือเซ็นเซอร์กำลัง	1360
32.22	ลักษณะการเชื่อมต่อตัวรับรูกำลังของสัญญาณ (1)	1361
32.23	ลักษณะการเชื่อมต่อตัวรับรูกำลังของสัญญาณ (2)	1362
32.24	ลักษณะการเชื่อมต่อตัวรับรูกำลังของสัญญาณ (3)	1363
32.25	เครื่องวิเคราะห์หน่วยสปีทิกเกอร์	1364
32.26	แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน	1365
32.27	ห้องทดสอบสายอากาศ ขนาดกะทัดรัด (1)	1366
32.28	ห้องทดสอบสายอากาศ ขนาดกะทัดรัด (2)	1367
32.29	สถานีตรวจวัดด้วยโพรม (1)	1368
32.30	สถานีตรวจวัดด้วยโพรม (2)	1369
32.31	สถานีตรวจวัดด้วยโพรม (3)	1370
32.32	สถานีตรวจวัดด้วยโพรม (4)	1371
32.33	ส่วนประกอบของสถานีตรวจวัดด้วยโพรม (1)	1375
32.34	ส่วนประกอบของสถานีตรวจวัดด้วยโพรม (2)	1376
32.35	ส่วนประกอบของสถานีตรวจวัดด้วยโพรม (3)	1377
32.36	ส่วนประกอบของสถานีตรวจวัดด้วยโพรม (4)	1378

## สารบัญภาพ (ต่อ 31)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
32.37	ลักษณะโพรบที่ใช้กับสถานีตรวจวัดด้วยโพรบ (1)	1379
32.38	ลักษณะโพรบที่ใช้กับสถานีตรวจวัดด้วยโพรบ (2)	1380
32.39	ลักษณะโพรบที่ใช้กับสถานีตรวจวัดด้วยโพรบ (3)	1381
32.40	ลักษณะโพรบที่ใช้กับสถานีตรวจวัดด้วยโพรบ (4)	1382
32.41	ลักษณะโพรบที่ใช้กับสถานีตรวจวัดด้วยโพรบ (5)	1383
32.42	ลักษณะโพรบที่ใช้กับสถานีตรวจวัดด้วยโพรบ (6)	1384
32.43	ลักษณะการสัมผัสชิ้นงานตัวอย่างของโพรบ (1)	1385
32.44	ลักษณะการสัมผัสชิ้นงานตัวอย่างของโพรบ (2)	1386
32.45	ลักษณะการสัมผัสชิ้นงานตัวอย่างของโพรบ (3)	1387
32.46	ลักษณะการสัมผัสชิ้นงานตัวอย่างของโพรบ (4)	1388
32.47	ลักษณะของโพรบที่สัมผัสกับจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็ก บนอุปกรณ์ (1)	1389
32.48	ลักษณะของโพรบที่สัมผัสกับจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็ก บนอุปกรณ์ (2)	1390
32.49	ลักษณะของโพรบที่สัมผัสกับจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็ก บนอุปกรณ์ (3)	1391
32.50	ลักษณะของโพรบที่สัมผัสกับจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็ก บนอุปกรณ์ (4)	1392
32.51	ลักษณะของโพรบที่สัมผัสกับจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็ก บนอุปกรณ์ (5)	1393

## สารบัญภาพ (ต่อ 32)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
32.52	ลักษณะของโพรบที่สัมผัสกับจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็กบนอุปกรณ์ (6)	1394
32.53	การสัมผัสของโพรบกับจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็ก (1)	1395
32.54	การสัมผัสของโพรบกับจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็ก (2)	1395
32.55	การสัมผัสของโพรบกับจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็ก (3)	1396
32.56	ประเภทตัวเชื่อมต่อและขนาด	1396
32.57	ตัวเหนี่ยวนำและจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็กบนแผ่นเวเฟอร์	1397
32.58	การจัดเตรียมระบบการวัดเพื่อทำการวัดตัวเหนี่ยวนำบนเวเฟอร์	1397
32.59	ตัวอย่างการจัดเตรียมระบบของสถานีตรวจวัดด้วยโพรบเพื่อทำการวัดอุปกรณ์สองพอร์ต (1)	1398
32.60	ตัวอย่างการจัดเตรียมระบบของสถานีตรวจวัดด้วยโพรบเพื่อทำการวัดอุปกรณ์สองพอร์ต (2)	1399
32.61	ลักษณะของโพรบที่สัมผัสกับจุดเชื่อมต่อสัญญาณขนาดเล็กบนอุปกรณ์ที่ทำการวัด และซอฟต์แวร์แสดงผลการวัด	1400
32.62	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัดกรณีที่ 1	1401
32.63	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัดกรณีที่ 2	1402
32.64	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัดกรณีที่ 3	1403

## สารบัญภาพ (ต่อ 33)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
32.65	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 4	1404
32.66	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 5	1405
32.67	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 6	1406
32.68	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 7	1407
32.69	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 8	1408
32.70	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 9	1409
32.71	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 10	1410
32.72	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 11	1411
32.73	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 12	1412
32.74	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 13	1413
32.75	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 14	1414

## สารบัญภาพ (ต่อ 34)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
32.76	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 15	1415
32.77	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 16	1416
32.78	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 17	1417
32.79	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 18	1418
32.80	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 19	1419
32.81	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 20	1420
32.82	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 21	1421
32.83	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 22	1422
32.84	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 23	1423
32.85	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 24	1424
32.86	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 25	1425

## สารบัญภาพ (ต่อ 35)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
32.87	ลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อทำการวัด กรณีที่ 26	1426
33.1	เครื่องสังเคราะห์ความถี่แบบเฟสล็อกกลุ่	1433
33.2	เครื่องสังเคราะห์ความถี่แบบเฟสล็อกกลุ่ แบบเลขจำนวนเต็ม	1434
33.3	เครื่องสังเคราะห์ความถี่แบบเฟสล็อกกลุ่ แบบเศษส่วน	1435
33.4	เครื่องสังเคราะห์ความถี่แบบดิจิตอลโดยตรง (1)	1438
33.5	เครื่องสังเคราะห์ความถี่แบบดิจิตอลโดยตรง (2)	1438
33.6	เครื่องสังเคราะห์ความถี่แบบผสม	1440
36.1	ตำแหน่งของบริเวณเทระเฮิร์ตซ์ ในสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	1560
36.2	ตำแหน่งและความยาวคลื่นของ คลื่นเทระเฮิร์ตซ์	1560
36.3	ตำแหน่งและความยาวคลื่นของ คลื่นเทระเฮิร์ตซ์	1561
36.4	ความยาวคลื่น และตำแหน่ง ของคลื่นเทระเฮิร์ตซ์ ในสเปกตรัม คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	1561
36.5	ความถี่ ความยาวคลื่น เลขคลื่น และพลังงานโฟตอน ของคลื่นเทระเฮิร์ตซ์ ในสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	1562
36.6	ลักษณะแผนผังวงจร ออสซิลเลเตอร์คัปเปิ้ลไขว้แบบแอลซี	1588
36.7	ลักษณะแผนผังวงจร ออสซิลเลเตอร์แบบโคลพิต	1590
36.8	ลักษณะแผนผังวงจร ออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน	1593
36.9	แบบจำลองวงจรอย่างง่ายและค่า Q ของวาแรคเตอร์ ตัว เหนี่ยวนำ และ แอลซีแท่ง	1597

## สารบัญภาพ (ต่อ 36)

ภาพที่	ชื่อภาพ	หน้า
36.10	การเปรียบเทียบ IGV กับ MOS varactor แบบดั้งเดิม แบบ ภาพเลย์เอาต์เฉพาะหน่วยของอุปกรณ์	1599
36.11	ลักษณะแผนผัง วงจรเฟสล็อกดูแบบทั่วไป	1601
36.12	โครงสร้างของสายอากาศด้านโพโตคอนดักทีฟ	1608
36.13	กรณีทั้งสามของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฟตอน	1614
36.14	บ่อควอนตัม การเจาะอุโมงค์ ของเลเซอร์ควอนตัมแคสเคด	1619
36.15	กลไกของการแผ่คลื่นเทระเฮิรตซ์ ของเมทานอลเลเซอร์	1621
36.16	ตัวตรวจจับแบบ โบโลมิเตอร์และวงจรมุมูล	1623
36.17	ตัวตรวจจับแบบ ไพโรอิเล็กทริก	1624
36.18	ตัวตรวจจับแบบ เซลล์โกลีย์	1626
36.19	การตรวจจับคลื่นเทระเฮิรตซ์ด้วยสายอากาศโพโตคอนดักทีฟ	1631

## สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
0.1	ตัวอย่างค่ากราฟเฟสของสี่ที่ตี	70
6.1	ช่วงความถี่ที่กำหนดโดย IEEE	396
6.2	ช่วงความถี่ที่กำหนดโดยไอทียู (ITU)	397
6.3	ช่วงความถี่ไอเอสเอ็ม (ISM: Industrial, Scientific and Medical)	398
6.4	ตัวอย่างการใช้งานไร้สาย และช่วงความถี่	399
6.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนกำลัง กับ เดซิเบล	409
6.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง dBm กับ Watts	412
6.7	คำนำหน้าหน่วยในระบบเอสไอ (SI prefixes)	413
13.1	สรุปผลลัพธ์การออกแบบตัวกรอง ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.5	489
13.2	สรุปผลลัพธ์การออกแบบตัวกรอง ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.6	495
13.3	สรุปผลลัพธ์การออกแบบตัวกรอง ตัวอย่างการคำนวณที่ 13.7	501
18.1	การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของ สายนำสัญญาณโคแอกเซียล	631
31.1	คุณสมบัติของการแปลงฟูเรียร์	1325

## บทที่ 0. บทนำ

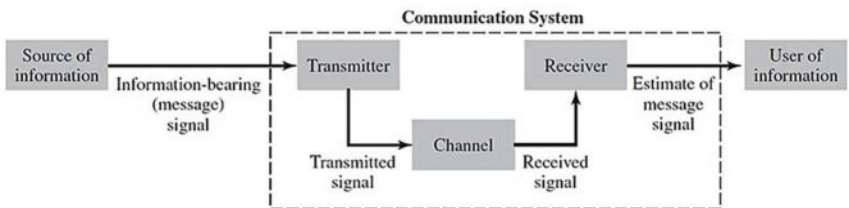
สำหรับในทาง ระบบการสื่อสารไร้สาย เครื่องส่งสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณ จะเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญที่ทำให้สามารถส่งและรับข้อมูลได้ โดยเฉพาะในช่วงความถี่ วิทยุ ไมโครเวฟ และมิลลิเมตรเวฟ ที่อุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณ มีบทบาทสำคัญในหลายการใช้งาน เช่น การส่งกระจายเสียงวิทยุ การกระจายสัญญาณโทรทรรศน์ (ระบบเรดาร์ของรถยนต์ เครื่องบินและการบิน อุตุนิยมวิทยา และทางการทหาร) ระบบการสื่อสารไร้สายของโดรน ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบการสื่อสารไร้สายในงานต่าง ๆ ระบบการสื่อสารไร้สายระยะไกล ระบบการสื่อสารไร้สายของตัวตรวจวัด ระบบบลูทูธ ระบบการสื่อสารไร้สายท้องถิ่น ระบบการสื่อสารในอวกาศลึก ระบบการสื่อสารไร้สายของเครื่องมือแพทย์และการแพทย์ ระบบการสื่อสารไร้สายของระบบเกษตรอัจฉริยะ ระบบเตือนภัยต่าง ๆ ระบบการระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม การสื่อสารด้วยดาวเทียม ระบบกล้องโทรทรรศน์วิทยุ ระบบอินเตอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง ระบบระบุตำแหน่งด้วยคลื่นวิทยุ เทคโนโลยีการสำรวจข้อมูลระยะไกลด้วยดาวเทียมหรือเครื่องบิน ขีปนาวุธนำวิถีที่ปล่อยจาก พื้นดิน ทะเล หรืออากาศ และระบบถ่ายโอนพลังงานไร้สายโดยที่อุปกรณ์

**เครื่องส่งสัญญาณ** คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแปลงข้อมูลที่ต้องการส่งไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยสัญญาณข้อมูลดั้งเดิมที่ต้องการส่งจะเรียกว่าสัญญาณเบสแบนด์ ซึ่งจะถูกมอดูเลตหรือผสมเข้ากับคลื่นพาไปเป็นความถี่เฉพาะในช่วงวิทยุหรือไมโครเวฟ โดยสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกส่งออกอากาศด้วยสายอากาศ โดยอาจเป็นการมอดูเลต แอมพลิจูด ความถี่ เฟส หรือตำแหน่งทางเวลา อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือใช้คุณสมบัติเหล่านี้ร่วมกัน ซึ่งจะทำให้ข้อมูลสามารถเดินทางได้ด้วยระยะไกล โดยประสิทธิภาพของ

เครื่องส่ง กำลังสัญญาณเอาต์พุต และความถี่ใช้งาน จะเป็นคุณลักษณะที่สำคัญในการกำหนด ระยะและคุณภาพของการสื่อสาร

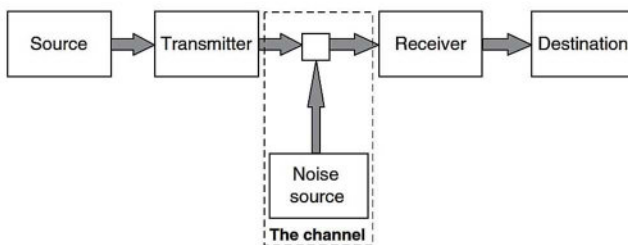
**เครื่องรับสัญญาณ** คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการตรวจจับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้ามายังอุปกรณ์และจะทำการตีמודูเลตสัญญาณ เพื่อกู้ข้อมูลกลับ เพื่อส่งไปยังส่วนต่อไป โดยเครื่องรับสัญญาณจะถูกรอกแบบให้กรองสัญญาณรบกวนออก เพื่อรักษาความถูกต้องของสัญญาณข้อมูล

ทั้งนี้สำหรับภาพรวมของระบบสื่อสารจะเป็นตามภาพดังต่อไปนี้



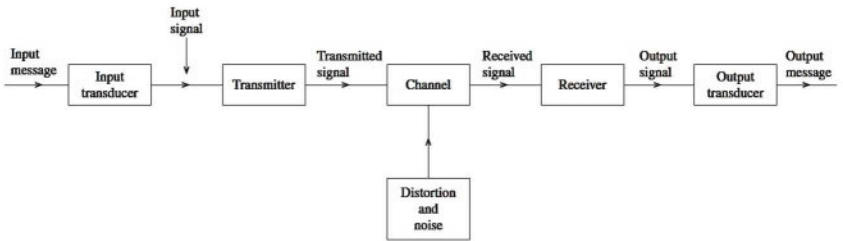
ภาพที่ 0.1 ระบบสื่อสาร (1)

ที่มา: Haykin and Moher (2007)



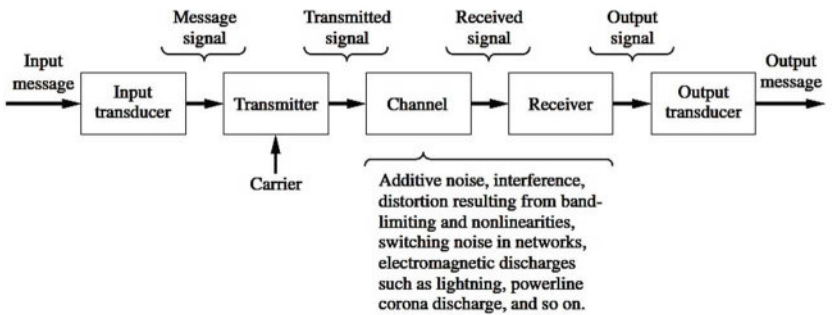
ภาพที่ 0.2 ระบบสื่อสาร (2)

ที่มา: Saunders and Aragón-Zavala (2007)



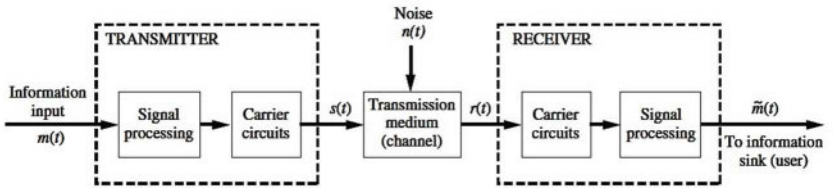
ภาพที่ 0.3 ระบบสื่อสาร (3)

ที่มา: Lathi and Ding (2019)



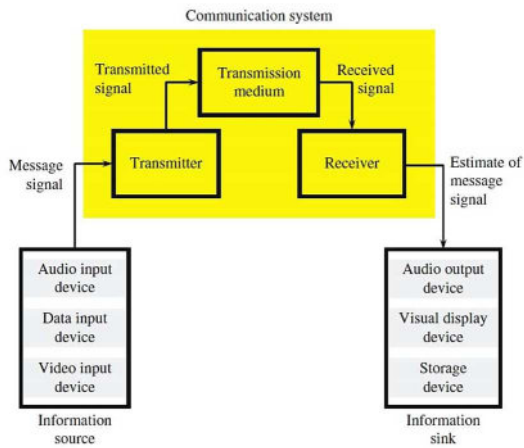
ภาพที่ 0.4 ระบบสื่อสาร (4)

ที่มา: Ziemer and Tranter (2015)



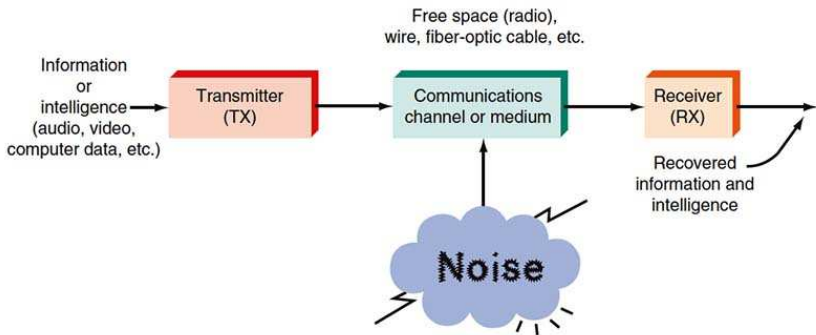
ภาพที่ 0.5 ระบบสื่อสาร (5)

ที่มา: Couch (2013)



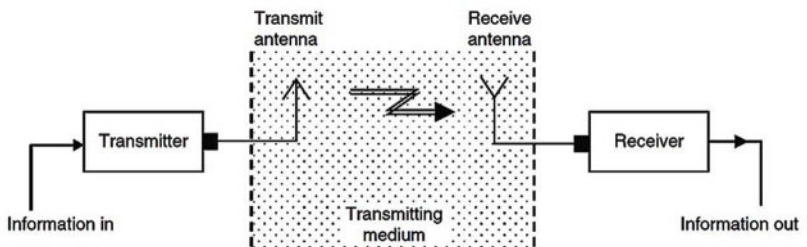
ภาพที่ 0.6 ระบบสื่อสาร (6)

ที่มา: Otung (2021)



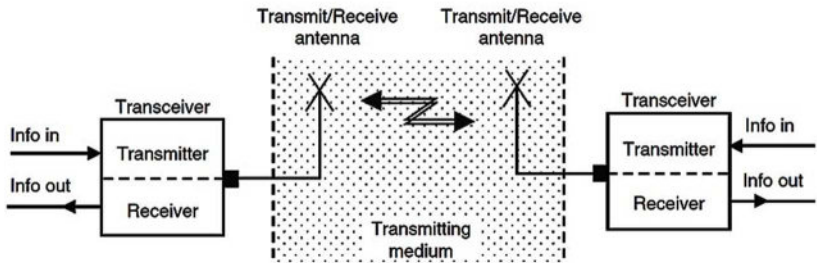
ภาพที่ 0.7 ระบบสื่อสาร (7)

ที่มา: Frenzel (2016)



ภาพที่ 0.8 ระบบสื่อสาร ทางเดียว

ที่มา: Luzzatto and Haridim (2017)



ภาพที่ 0.9 ระบบสื่อสาร สองทาง

ที่มา: Luzzatto and Haridim (2017)

**สัญญาณ (Signal)** คือ ชุดของข้อมูลหรือสารสนเทศ ที่เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ที่แสดงหรือใช้แทนข้อมูล ที่เป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณบางอย่างตามเวลา หรือบางครั้งตามพิกัดตำแหน่ง (Space) โดยที่ปริมาณนั้นอาจเป็น แรงดันไฟฟ้า (Voltage), กระแสไฟฟ้า (Current), ความดัน (Pressure), อุณหภูมิ (Temperature), ความเข้มแสง (Light Intensity), หรือปริมาณทางฟิสิกส์อื่น ๆ ที่สามารถวัดและแปลงเป็นข้อมูลได้ โดยสามารถวิเคราะห์ ประมวลผล หรือส่งผ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและพัฒนา ระบบสื่อสาร การควบคุม และอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ในแง่ของการวิเคราะห์ สัญญาณมักถูกแทนด้วยฟังก์ชัน เช่น  $x(t)$  สำหรับสัญญาณต่อเนื่อง หรือ  $x[n]$  สำหรับสัญญาณไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเราอาจวิเคราะห์คุณสมบัติได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด เฟส พลังงาน กำลัง รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงในโดเมนเวลาและในโดเมนความถี่ ของสัญญาณได้ ทั้งนี้เราอาจแบ่งประเภทของสัญญาณเป็น สัญญาณต่อเนื่อง สัญญาณไม่ต่อเนื่อง สัญญาณแอนะล็อก สัญญาณดิจิทัล สัญญาณคอซอล

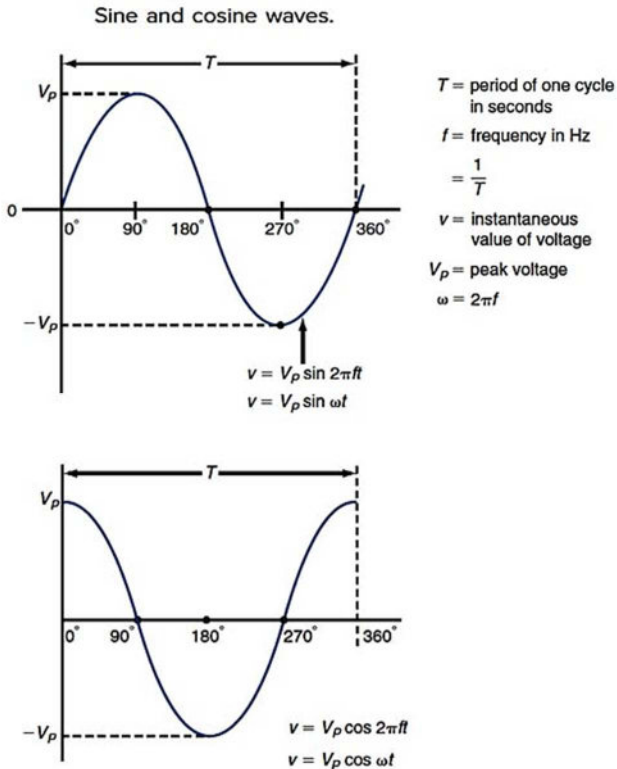
(Causal) สัญญาณนอนคอสอล (Noncausal) สัญญาณแอนติคอสอล (Anticausal) สัญญาณเป็นคาบ สัญญาณไม่เป็นคาบ สัญญาณกำลัง สัญญาณพลังงาน

ซึ่งในทาง วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์สื่อสาร สัญญาณมักหมายถึง ข้อมูลที่อยู่ในรูปของ แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า ที่สามารถใช้ในการส่งผ่านข้อมูลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ โดยสัญญาณจะมีหน้าที่เป็นตัวแทนของข้อมูล ที่ต้องการส่งจากผู้ส่ง (Transmitter) ไปยังผู้รับ (Receiver) ผ่านทางช่องสื่อสาร หรือช่องสัญญาณ หรือตัวกลาง ได้แก่ สายนำสัญญาณ อากาศ หรืออวกาศ

ส่วนในทาง วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สัญญาณจะเป็นการแสดงหรือตัวแทนของ ข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเป็นพลังงานหรือข้อมูลที่ถูกระบุส่งผ่านในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีทิศทางการแพร่กระจาย ที่เดินทางใน สุญญากาศหรืออวกาศ อากาศในบรรยากาศโลก และในสายนำสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและตำแหน่ง ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ในการส่งข้อมูลในระยะทางไกลได้ โดยสัญญาณวิทยุและไมโครเวฟจะมีความถี่ในช่วงประมาณ 3 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 300 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งในทางปฏิบัติ สัญญาณในระบบเหล่านี้ก็คือ รูปคลื่น (Waveform) ที่ประกอบด้วย สนามไฟฟ้า (Electric Field) และ สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ซึ่งแผ่กระจายออกจากแหล่งกำเนิด และสามารถส่งข้อมูล เช่น เสียง ภาพ วิดีโอ หรือข้อมูลอื่น ๆ ได้

ในทางฟิสิกส์ สัญญาณ คือ รูปแบบหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางกายภาพที่สามารถ ตรวจจับ วิเคราะห์ และนำมาใช้เพื่อสื่อสารหรือควบคุมระบบต่าง ๆ ได้ ช่วยให้สามารถเห็น หรือ เข้าสิ่งที่เกิดขึ้นได้ในรูปของข้อมูล โดยสามารถแทนสัญญาณได้ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ สัญญาณเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึง การเปลี่ยนแปลงของค่าบางอย่างตามเวลา เช่น (1) การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า บนเส้นลวดนำสัญญาณ (2) การเปลี่ยนแปลงของ ความดัน ในอากาศ (3) การเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสง และ (4) การเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างของสัญญาณในทางฟิสิกส์เช่น สัญญาณเสียง สัญญาณวิทยุ สัญญาณไฟฟ้า

ทั้งนี้ในทางการสื่อสาร สัญญาณพื้นฐานจะได้แก่ สัญญาณไซน์ (Sine) และ สัญญาณโคไซน์ (Cosine) หรือสัญญาณคอส (Cos) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

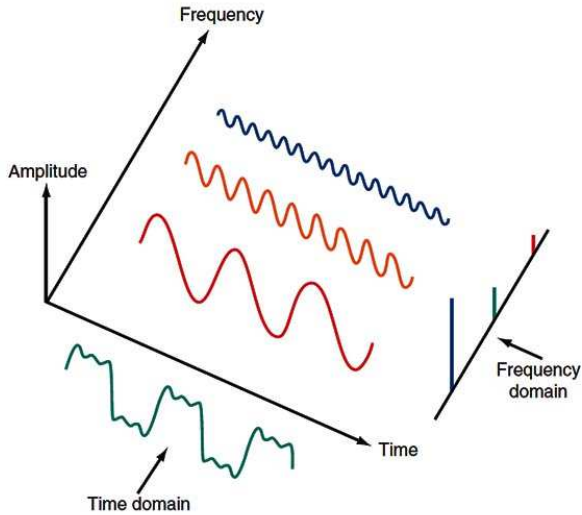


ภาพที่ 0.10 สัญญาณไซน์ (Sine) และสัญญาณโคไซน์ (Cosine)  
 ที่มา: Frenzel (2016)

Figure 2-55 Sine and cosine waves.

โดยสัญญาณ ในโดเมนเวลาและในโดเมนความถี่ จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

The relationship between time and frequency domains.



ภาพที่ 0.11 ความสัมพันธ์ของสัญญาณ ในโดเมนเวลาและในโดเมนความถี่  
ที่มา: Frenzel (2016)

Figure 2-62 The relationship between time and frequency domains.

## ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรไฟฟ้า

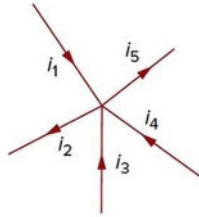
(Alexander and Sadiku, 2021)

Georg Simon Ohm ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ซึ่งผลงานของเขาเป็นที่รู้จักกันในชื่อ **กฎของโอห์ม (Ohm's law)** ที่ได้กล่าวว่า แรงดัน (Voltage:  $V$ ) ที่ตกคร่อมตัวต้านทาน (Resistor:  $R$ ) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส (Current:  $I$ ) ที่ไหลผ่านตัวต้านทาน โดย  $V = IR$

Gustav Robert Kirchhoff ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กับ กระแสไฟฟ้า ใน โครงข่ายวงจรไฟฟ้า ซึ่งได้มีผลงานที่รู้จักในชื่อของ กฎกระแสของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's Current Law: KCL) และกฎแรงดันของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's Voltage Law: KVL)

โดย **กฎกระแสของเคอร์ชอฟ** กล่าวว่า ผลบวกทางพีชคณิตของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่โหนด หรือ บริเวณปิด จะมีค่าเป็น 0 หรือ  $\sum_{n=1}^N i_n = 0$  โดยที่  $N$  เป็นจำนวนสาขาที่เชื่อมต่อไปยังโหนด ส่วน  $i_n$  คือ กระแสแต่ละค่าที่ไหลเข้าหรือไหลออกจากโหนด ซึ่งโดยทั่วไปจะพิจารณาว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าโหนดจะมีค่าเป็นบวก และกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากโหนดจะมีค่าเป็นลบ หรือ อาจกล่าวได้ว่าผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าโหนดจะเท่ากับผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากโหนด

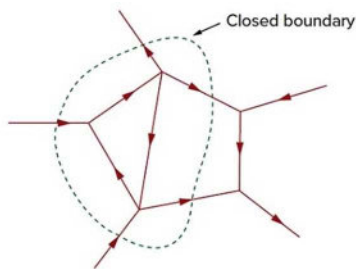
ส่วน **กฎแรงดันของเคอร์ชอฟ** กล่าวว่า ผลบวกทางพีชคณิตของแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดรอบเส้นทางปิด หรือ วงรอบหรือ ลูป (Loop) จะมีค่าเป็น 0 หรือ  $\sum_{m=1}^M v_m = 0$  โดยที่  $M$  คือ จำนวนของแรงดันไฟฟ้าในลูป หรือ จำนวนของสาขาในลูป ส่วน  $v_m$  คือ แรงดันแต่ละค่า



**Currents at a node illustrating KCL.**

ภาพที่ 0.12 กระแสที่ไหลเข้าและไหลออก ที่โหนด ตามหลัก KCL  
ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

Figure 2.16 Currents at a node illustrating KCL.



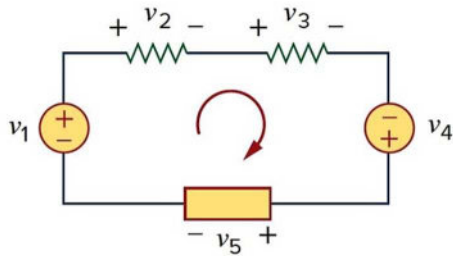
**Applying KCL to a closed boundary.**

ภาพที่ 0.13 กระแสที่ไหลเข้าและไหลออก ที่บริเวณปิด ตามหลัก KCL  
ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

Figure 2.17 Applying KCL to a closed boundary.

จากภาพที่ 0.12 จะได้ว่า  $i_1 + (-i_2) + i_3 + i_4 + (-i_5) = 0$

หรือ  $i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5$



A single-loop circuit illustrating KVL.

ภาพที่ 0.14 กระแสที่ไหลในลูปเดียว ตามหลัก KVL

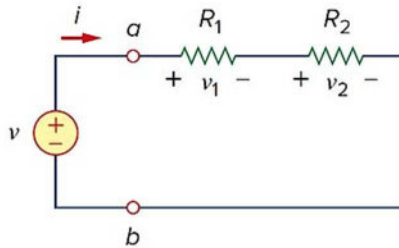
ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

Figure 2.19 A single-loop circuit illustrating KVL.

จากภาพข้างต้น จะได้ว่า  $-V_1 + V_2 + V_3 - V_4 + V_5 = 0$  หรือ

$$V_2 + V_3 + V_5 = V_1 + V_4$$

## การแบ่งแรงดันไฟฟ้า และการแบ่งกระแสไฟฟ้า



A single-loop circuit with two resistors in series.

ภาพที่ 0.15 การแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$   
ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

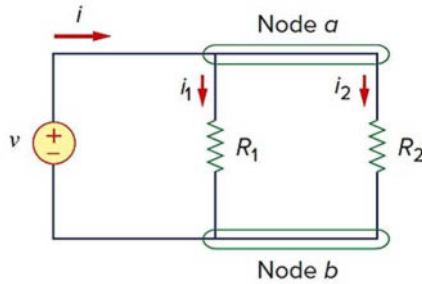
Figure 2.29 A single-loop circuit with two resistors in series.

จะได้ว่า แรงดัน  $v_1$  และ  $v_2$  เท่ากับ

$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v \quad , \quad v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v \quad (0.1)$$

สำหรับกรณีมีตัวต้านทาน  $N$  ตัว แรงดันที่ตัวต้านทานแต่ละตัว( อันดับที่  $n$ )  
จะเป็น

$$v_n = \frac{R_n}{R_1 + R_2 + \dots + R_N} v \quad (0.2)$$



Two resistors in parallel.

ภาพที่ 0.16 การแบ่งกระแสไฟฟ้าที่ตัวต้านทาน  $R_1$  กับ  $R_2$

ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

Figure 2.31 Two resistors in parallel.

จะได้ว่า แรงแดัน  $i_1$  และ  $i_2$  เท่ากับ

$$i_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i \quad , \quad i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i \quad (0.3)$$

เพื่อให้คำนวณง่ายจะใช้ ความนำ(G) ในการคำนวณ กรณี N ตัว

สำหรับกรณีมีตัวต้านทาน N ตัว กระแสที่ตัวต้านทานแต่ละตัว( อันดับที่ n)

จะเป็น

$$i_n = \frac{G_n}{G_1 + G_2 + \dots + G_N} i \quad (0.4)$$

เมื่อ G คือ ความนำ (Conductance) เท่ากับ  $1 / R$

**ความนำ** (Conductivity:  $\sigma$ ) ของวัสดุเป็นการวัดความง่ายของอิเล็กตรอนที่จะสามารถเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนผ่านวัสดุนั้นได้เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าภายนอกเข้ามากระทำ หรือเป็นความสามารถขององค์ประกอบในการนำกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น mhos ( $\mathcal{U}$ ) หรือ Siemens (S) หรือ Siemen- meters หรือ S/m โดยส่วนกลับของ ความนำ คือ สภาพต้านทาน หรือความต้านทานจำเพาะ (Resistivity:  $\rho$ ) หรือ  $\rho = 1 / \sigma$  หน่วยเป็น  $\Omega$ -m หรือ Ohm-meters ซึ่งได้แก่

Material	Conductivity $\sigma$ (S/m)	Resistivity $\rho$ ( $\Omega$ -m)
<b>Conductors</b>		
Silver	$6.17 \times 10^7$	$1.62 \times 10^{-8}$
Copper	$5.81 \times 10^7$	$1.72 \times 10^{-8}$
Gold	$4.10 \times 10^7$	$2.44 \times 10^{-8}$
Aluminum	$3.82 \times 10^7$	$2.62 \times 10^{-8}$
Iron	$1.03 \times 10^7$	$9.71 \times 10^{-8}$
Mercury (liquid)	$1.04 \times 10^6$	$9.58 \times 10^{-7}$
<b>Semiconductors</b>		
Carbon (graphite)	$7.14 \times 10^4$	$1.40 \times 10^{-5}$
Pure germanium	2.13	0.47
Pure silicon	$4.35 \times 10^{-4}$	$2.30 \times 10^3$
<b>Insulators</b>		
Paper	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^{10}$
Glass	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{12}$
Teflon	$\sim 3.3 \times 10^{-13}$	$\sim 3 \times 10^{12}$
Porcelain	$\sim 10^{-14}$	$\sim 10^{14}$
Mica	$\sim 10^{-15}$	$\sim 10^{15}$
Polystyrene	$\sim 10^{-16}$	$\sim 10^{16}$
Fused quartz	$\sim 10^{-17}$	$\sim 10^{17}$
<b>Common materials</b>		
Distilled water	$5.5 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^5$
Drinking water	$\sim 5 \times 10^{-3}$	$\sim 200$
Sea water	4.8	0.2
Graphite	$1.4 \times 10^{-5}$	$71.4 \times 10^3$
Rubber	$1 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{13}$
<b>Biological tissues</b>		
Blood	$\sim 1.5$	$\sim 0.67$
Muscle	$\sim 1.5$	$\sim 0.67$
Fat	$\sim 0.1$	10

ภาพที่ 0.17 ความนำ และสภาพต้านทาน ของวัสดุตัวอย่าง ที่ 20 องศาเซลเซียส  
ที่มา: Ulaby et al. (2018)

Table 2-1: Conductivity and resistivity of some common materials at 20 °C.

**ความต้านทาน** (Resistance: R) มีความสัมพันธ์กับ สภาพต้านทาน หรือ ความนำ ซึ่ง  $R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A}$  หน่วย  $\Omega$  หรือ โอห์ม เมื่อ  $l$  คือ ความยาว และ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด

**ระบบ American Wire Gauge (AWG)** คือ ระบบมาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดขนาดของเส้นลวดนำไฟฟ้า ได้แก่ สายทองแดง ที่ใช้กันแพร่หลายในอเมริกาเหนือและอีกหลายประเทศ โดยจะระบุ “ขนาด” หรือ “เบอร์สาย” ของสายไฟฟ้าในรูปของตัวเลข เช่น AWG 24, AWG 12 เป็นต้น สำหรับ ในภาษาไทยมักเรียกว่า “ระบบกำหนดเบอร์สายไฟแบบอเมริกัน” หรือ “มาตรฐานขนาดสายไฟแบบ AWG” บางครั้งจะพบเรียกสั้น ๆ ว่า “เบอร์สาย AWG”

หลักการของระบบ AWG คือ ยิ่งหมายเลข AWG มีค่าสูง ขนาดสายไฟยิ่งมีขนาดเล็กลง เช่น AWG 24 เล็กกว่า AWG 12 ระบบนี้เป็น ลอการิทึมแบบผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของสาย ซึ่งหมายความว่าเมื่อเบอร์เพิ่มขึ้น พื้นที่หน้าตัดและความสามารถในการนำกระแสจะลดลง

การใช้งาน ใช้ระบุขนาดสายไฟใน วงจรไฟฟ้า, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, ระบบสื่อสาร, และระบบเสียง ซึ่งช่วยให้สามารถเลือกสายที่เหมาะสมกับ กระแส, แรงดัน, และระยะทางของการเดินสายได้อย่างถูกต้อง ตัวอย่างเช่น เบอร์สาย (AWG) เท่ากับ 24, เส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณจะเท่ากับ 0.511 มิลลิเมตร (มม.), พื้นที่หน้าตัดจะเท่ากับ 0.205 ตารางมิลลิเมตร(มม<sup>2</sup>), กระแสสูงสุดที่รับได้ (โดยประมาณ) เท่ากับ 0.58 แอมป์

**Copper Wire Specifications (Bare and Enamel-Coated Wire)**

WIRE SIZE (AWG)	DIAMETER (MILS)*	AREA (CM) <sup>†</sup>	FEET PER POUND BARE	OHMS PER 1000 FT, 25°C	CURRENT CAPACITY (AMPS)
4	204.3	41738.49	7.918	0.2485	59.626
8	128.5	16512.25	25.24	0.7925	18.696
10	101.9	10383.61	31.82	0.9987	14.834
12	80.8	6528.64	50.61	1.5880	9.327
14	64.1	4108.81	80.39	2.5240	5.870
18	40.3	1624.09	203.5	6.3860	2.320
20	32	1024.00	222.7	10.1280	1.463
22	25.3	640.09	516.3	16.2000	0.914
24	20.1	404.01	817.7	25.6700	0.577
28	12.6	158.76	2081	65.3100	0.227
32	8.0	64.00	5163	162.0000	0.091
40	3.1	9.61	34364	1079.0000	0.014

\* 1 mil = 0.001 in or 0.0254 mm.

<sup>†</sup> A circular mil (CM) is a unit of area equal to that of a 1-mil-diameter circle. The CM area of a wire is the square of the mil diameter.

Diameters of wires in Fig. 2.26 are relative and not to scale.

ภาพที่ 0.18 ระบบกำหนดเบอร์สายไฟแบบอเมริกัน (AWG)

ที่มา: Scherz and Monk (2016)

TABLE 2.5 Copper Wire Specifications (Bare and Enamel-Coated Wire)

<b>AWG Size Designation</b>	<b>Diameter <math>d</math> (mm)</b>
0	8.3
2	6.5
4	5.2
6	4.1
10	2.6
14	1.6
18	1.0
20	0.8

ภาพที่ 0.19 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดนำไฟฟ้า ตามระบบกำหนดเบอร์  
สายไฟแบบอเมริกัน (AWG)

ที่มา: Ulaby et al. (2018)



การอ่านค่าตัวต้านทานแบบติดตั้งบนผิวหน้า

## Resistor codes calculation

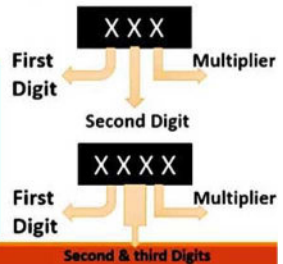
### Coding of SMD Resistor:

Generally the SMD resistor can have **3 or 4 digits**, the last digit represents the numbers of zeros. The letter **R** shows the position of decimal point when it is placed before or between digits.

examples:

<b>101</b>	= 100 Ω	
<b>102</b>	= 1000 Ω	= 1 KΩ
<b>123</b>	= 12000 Ω	= 12 KΩ
<b>155</b>	= 1500000 Ω	= 1.5 MΩ
<b>1421</b>	= 1420 Ω	= 1.42 KΩ
<b>1442</b>	= 14400 Ω	= 14.4 KΩ
<b>1204</b>	= 1200000 Ω	= 1.2 MΩ

<b>R10</b>	= 0.1 Ω
<b>5R4</b>	= 5.4 Ω
<b>7R50</b>	= 7.5 Ω
<b>50R0</b>	= 50 Ω



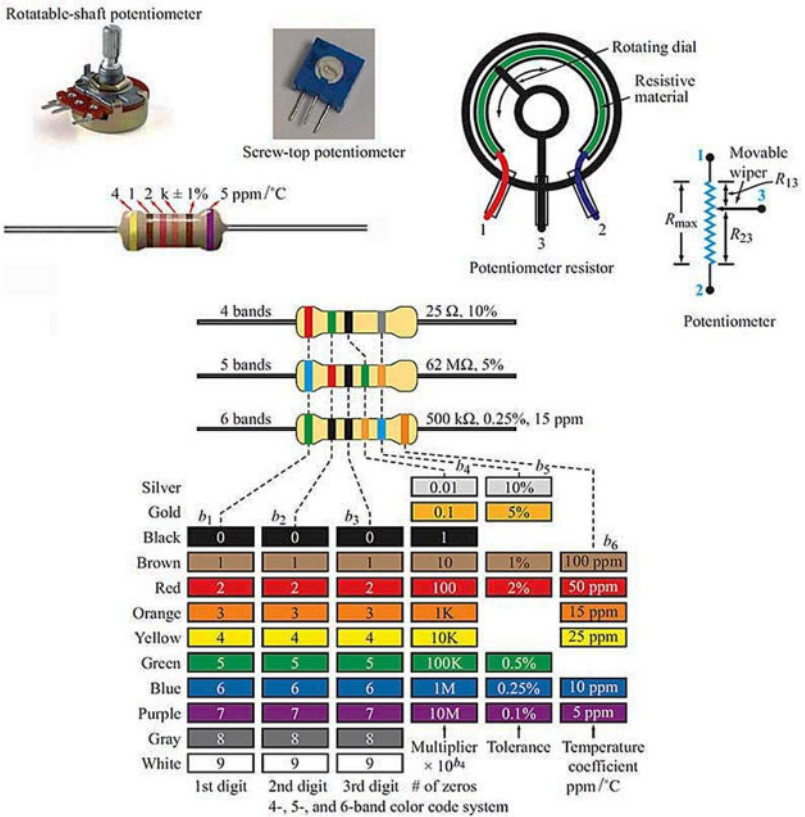
ภาพที่ 0.21 การอ่านค่าตัวต้านทานแบบติดตั้งบนผิวหน้า

ที่มา: Electronics Repair Basics\_ERB (2025)

Resistor codes calculation

<https://www.youtube.com/watch?v=tjISrZy5S9c>

สำหรับ ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้เช่น โปเทนชิโอมิเตอร์ และ ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่แบบฟิล์มคาร์บอน ได้แก่ (1) แบบรหัสสี่ 4 แฉบ ได้แก่  $R = (b_1b_2) \times 10^{b_4} \pm b_5$  (2) แบบรหัสสี่ 5 แฉบ ได้แก่  $R = (b_1b_2b_3) \times 10^{b_4} \pm b_5$  (3) แบบรหัสสี่ 6 แฉบ ที่เพิ่มแฉบ  $b_6$  สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของตัวต้านทาน ในหน่วย parts-per-million/ °C เข้ามา ถัดจากแฉบที่ห้า มีลักษณะตามภาพดังนี้



Various types of resistors. Tubular-shaped resistors usually are color-coded by 4-, 5-, or 6-band systems.

ภาพที่ 0.22 ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้เช่น โปเทนซิโอมิเตอร์) และ  
 ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่แบบฟิล์มคาร์บอนพร้อมการอ่านค่า  
 ที่มา: Ulaby et al. (2018)

Figure 2-2: Various types of resistors. Tubular-shaped resistors usually are color-coded by 4-, 5-, or 6-band systems.

การต่อตัวต้านทาน (Resistor) เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานสมมูล (Equivalent resistance) ของตัวต้านทาน  $N$  ตัว จะได้แก่

1). กรณีตัวต้านทาน  $N$  ตัว ต่ออนุกรมกัน ความต้านทานสมมูลจะได้แก่

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_N = \sum_{n=1}^N R_n \quad (0.5)$$

2). กรณีตัวต้านทาน  $N$  ตัว ต่อขนานกัน ความต้านทานสมมูลจะได้แก่

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} \quad (0.6)$$

เมื่อ  $G$  คือ ความนำ (Conductance) เท่ากับ  $1 / R$

การต่อความนำ (Conductance) เพื่อให้ได้ ค่าความนำสมมูล (Equivalent conductance) ของความนำ  $N$  ตัว จะได้แก่

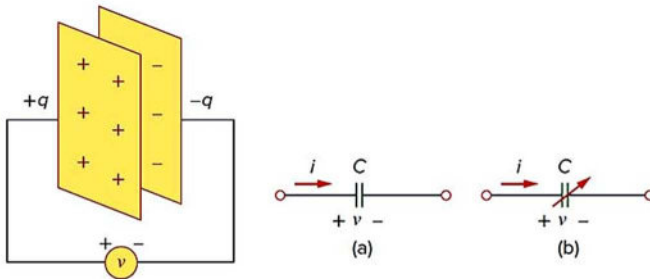
1). สำหรับความนำ  $N$  ตัว ต่อขนานกัน ความนำสมมูลจะได้แก่

$$G_{eq} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_N \quad (0.7)$$

2). สำหรับความนำ  $N$  ตัว ต่ออนุกรมกัน ความนำสมมูลจะได้แก่

$$\frac{1}{G_{eq}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \frac{1}{G_3} + \dots + \frac{1}{G_N} \quad (0.8)$$

**ตัวเก็บประจุ (Capacitor)** คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพาสซีฟ ที่ทำหน้าที่เก็บพลังงานในสนามไฟฟ้า หรือเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า ที่โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วย แผ่นตัวนำสองแผ่นที่แยกกันด้วยฉนวนหรือไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็น ฟารัด Farads (F)



A capacitor with applied voltage  $v$ .

Circuit symbols for capacitors: (a) fixed capacitor, (b) variable capacitor.

ภาพที่ 0.23 ตัวเก็บประจุอย่างง่าย และสัญลักษณ์ในวงจร

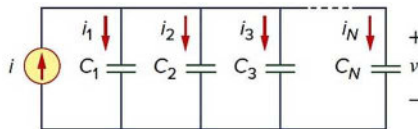
ที่มา: ดัดแปลงจาก Alexander and Sadiku (2021)

Figure 6.2 A capacitor with applied voltage  $v$ . ; Figure 6.3 Circuit symbols for capacitors: (a) fixed capacitor, (b) variable capacitor.

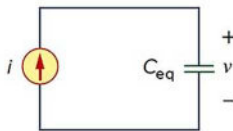
การต่อตัวเก็บประจุ เพื่อให้ได้ค่าความจุสมมูล (Equivalent capacitor:  $C_{eq}$ ) ของตัวเก็บประจุ  $N$  ตัว ได้แก่

1). การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน ความจุสมมูลได้แก่

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_N \quad (0.9)$$



(a)



(b)

(a) Parallel-connected  $N$  capacitors,  
(b) equivalent circuit for the parallel capacitors.

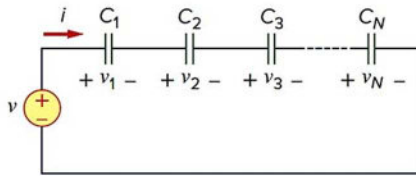
ภาพที่ 0.24 การต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน

ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

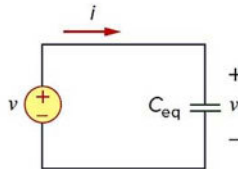
Figure 6.14 (a) Parallel-connected  $N$  capacitors, (b) equivalent circuit for the parallel capacitors.

2). การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม ความจุสมมูลได้แก่

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_N} \quad (0.10)$$



(a)



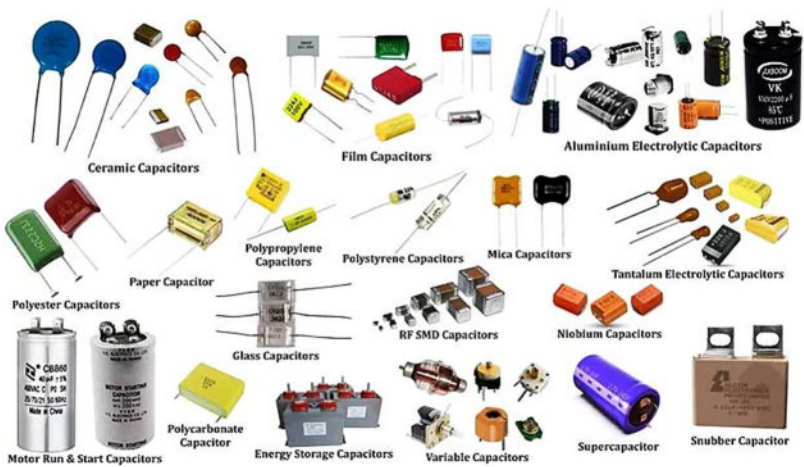
(b)

(a) Series-connected  $N$  capacitors,  
 (b) equivalent circuit for the series capacitor.

ภาพที่ 0.25 การต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรม

ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

Figure 6.15 (a) Series-connected  $N$  capacitors, (b) equivalent circuit for the series capacitor.



ภาพที่ 0.26 ตัวเก็บประจุประเภทต่าง ๆ (1)

ที่มา: hackatronic (2025)

Types of Capacitors with Symbol, Classification and Applications

<https://www.hackatronic.com/types-of-capacitors-with-symbol-classification-and-applications/>

# TYPES OF CAPACITORS



**SUPER CAPACITORS**



**TANTALUM CAPACITORS**



**CERAMIC CAPACITORS**



**FILM CAPACITORS**



**POLYESTER CAPACITORS**



**POLYPROPYLENE CAPACITORS**

**ENGINEERS**  
GUIDEBOOK



**SILVER MICA CAPACITORS**



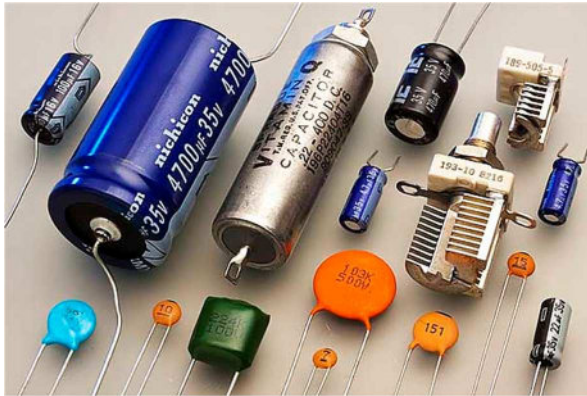
**VARIABLE CAPACITORS**

ภาพที่ 0.27 ตัวเก็บประจุประเภทต่าง ๆ (2)

ที่มา: Engineer's Guidebook (2025)

Types of capacitors

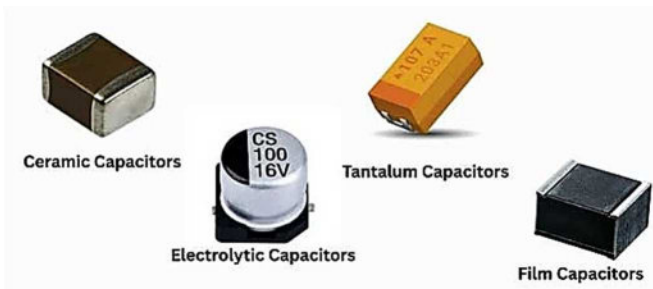
<https://engineersguidebook.com/12-types-of-capacitors-application-advantage/>



ภาพที่ 0.28 ตัวเก็บประจุประเภทต่าง ๆ (3)

ที่มา: Wikipedia (2025c)

Capacitor ; <https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor>



ภาพที่ 0.29 ตัวเก็บประจุแบบติดตั้งบนผิวหน้า

ที่มา: PCBTok (2025)

Types of smd capacitor

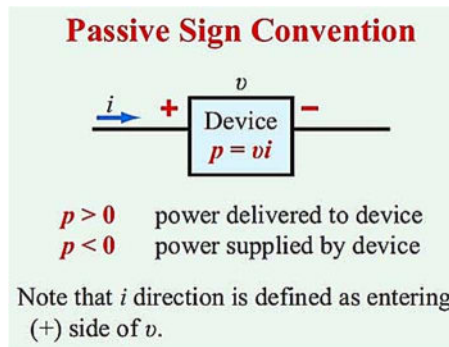
<https://www.pcbtok.com/smd-capacitor-sizes/>

กำลังไฟฟ้า (Power) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น Watt (W)

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} \quad (\text{W}) \quad (0.11)$$

$$p = vi = i^2R = \frac{v^2}{R} = v^2G = \frac{i^2}{G} \quad (\text{W}) \quad (0.12)$$

โดยสอดคล้องกับ ข้อตกลงมาตรฐานในการกำหนดทิศทางของกระแสและชั่วแรงดันไฟฟ้า (Passive sign convention) ได้แก่



ภาพที่ 0.30 ข้อตกลงมาตรฐานในการกำหนดทิศทางของกระแสและชั่วแรงดันไฟฟ้า

ที่มา: Ulaby et al. (2018)

Figure 1-22: Passive sign convention.

ทั้งนี้ กฎการอนุรักษ์กำลังไฟฟ้า ได้กล่าวไว้ว่า ผลบวกเชิงพีชคณิตของ กำลังทั้งหมดในวงจรจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับวงจรที่มีองค์ประกอบ  $n$  องค์ประกอบ  $\sum_{k=1}^n p_k = 0$  ซึ่งหมายความว่า กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่วงจรจ่ายออกไป จะต้องเท่ากับ กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่วงจรดูดซับไว้เสมอ

จากทฤษฎีวงจรไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้า กับ กระแสไฟฟ้า ในโดเมนเวลา และในโดเมนความถี่ จะเป็นดังนี้

### Summary of voltage-current relationships.

Element	Time domain	Frequency domain
$R$	$v = Ri$	$V = RI$
$L$	$v = L \frac{di}{dt}$	$V = j\omega LI$
$C$	$i = C \frac{dv}{dt}$	$V = \frac{I}{j\omega C}$

ภาพที่ 0.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้า กับ กระแสไฟฟ้า ในโดเมนเวลา และ โดเมนความถี่

ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

TABLE 9.2 Summary of voltage-current relationships.

สำหรับค่าอิมพีแดนซ์และแอดมิทแตนซ์ ขององค์ประกอบพาสซีฟได้แก่  $R$ ,  $L$ ,  $C$  เป็นดังนี้

### Impedances and admittances of passive elements.

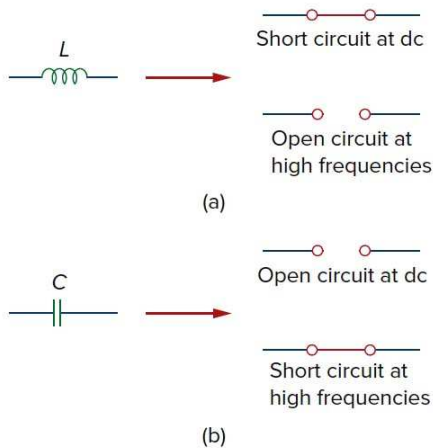
Element	Impedance	Admittance
$R$	$Z = R$	$Y = \frac{1}{R}$
$L$	$Z = j\omega L$	$Y = \frac{1}{j\omega L}$
$C$	$Z = \frac{1}{j\omega C}$	$Y = j\omega C$

ภาพที่ 0.32 อิมพีแดนซ์และแอดมิทแตนซ์ ของ ตัว  $R$ , ตัว  $L$ , และตัว  $C$

ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

TABLE 9.3 Impedances and admittances of passive elements.

พฤติกรรมของ ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ กรณีไฟฟ้ากระแสตรง และ กรณีที่ความถี่สูง จะมีลักษณะเป็นดังนี้



Equivalent circuits at dc and high frequencies: (a) inductor, (b) capacitor.

ภาพที่ 0.33 วงจรสมมูลของ ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ  
ที่ไฟฟ้ากระแสตรง และที่ความถี่สูง

ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

Figure 9.15 Equivalent circuits at dc and high frequencies:

(a) inductor, (b) capacitor.

คุณลักษณะที่สำคัญของ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ได้แก่

**Important characteristics of the basic elements.<sup>†</sup>**

<b>Relation</b>	<b>Resistor (R)</b>	<b>Capacitor (C)</b>	<b>Inductor (L)</b>
$v-i:$	$v = iR$	$v = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau + v(t_0)$	$v = L \frac{di}{dt}$
$i-v:$	$i = v/R$	$i = C \frac{dv}{dt}$	$i = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau + i(t_0)$
$p$ or $w:$	$p = i^2R = \frac{v^2}{R}$	$w = \frac{1}{2}Cv^2$	$w = \frac{1}{2}Li^2$
Series:	$R_{eq} = R_1 + R_2$	$C_{eq} = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}$	$L_{eq} = L_1 + L_2$
Parallel:	$R_{eq} = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}$	$C_{eq} = C_1 + C_2$	$L_{eq} = \frac{L_1L_2}{L_1 + L_2}$
At dc:	Same	Open circuit	Short circuit
Circuit variable that cannot change abruptly:	Not applicable	$v$	$i$

<sup>†</sup>Passive sign convention is assumed.

ภาพที่ 0.34 คุณลักษณะที่สำคัญของ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และ  
ตัวเหนี่ยวนำ

ที่มา: Alexander and Sadiku (2021)

TABLE 6.1 Important characteristics of the basic elements.

## พื้นฐานเกี่ยวกับจำนวนเชิงซ้อน

(Ulaby and Ravaioli, 2015)

จำนวนเชิงซ้อน  $z$  สามารถเขียนแสดงด้วย รูปเชิงสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือ รูปเชิงคาร์ทีเซียน ได้ว่า  $z = x + jy$  โดย  $x$  คือส่วนจริง (Re) และ  $y$  คือ ส่วนจินตภาพ (Im) และ  $j = \sqrt{-1}$  และ  $j^2 = -1$  ซึ่ง  $x = \text{Re}(z)$  และ  $y = \text{Im}(z)$  นอกจากนี้จำนวนเชิงซ้อน  $z$  สามารถเขียนในรูปเชิงขั้ว ได้ว่า  $z = |z|e^{j\theta} = |z|\angle\theta$  โดย  $|z|$  คือ ขนาดของ  $z$ ,  $\theta$  คือ มุมเฟส โดย เอกลิกซ์ทรีของออยเลอร์ จะได้แก่  $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$  ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างรูปเชิงขั้ว และรูปคาร์ทีเซียน จะได้แก่  $z = |z|e^{j\theta} = |z|\cos\theta + j|z|\sin\theta$  โดยที่  $x = |z|\cos\theta$  และ  $y = |z|\sin\theta$  ส่วนขนาดจะเท่ากับ  $|z| = \sqrt{x^2 + y^2}$  และมุมเฟสจะเท่ากับ  $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$  และขนาดของ  $z$  ยังสามารถหาได้จาก  $|z| = \sqrt{z \cdot z^*}$

การดำเนินการกับจำนวนเชิงซ้อนจะได้แก่

$$(1) \text{ การบวก ได้แก่ } z_1 + z_2 = (x_1 + x_2) + j(y_1 + y_2) \quad (0.13)$$

$$(2) \text{ การลบ ได้แก่ } z_1 - z_2 = (x_1 - x_2) + j(y_1 - y_2) \quad (0.14)$$

$$(3) \text{ การคูณ ได้แก่ } (z_1 \cdot z_2) = (x_1 + jy_1)(x_2 + jy_2) \quad (0.15)$$

$$(z_1 \cdot z_2) = (x_1x_2 - y_1y_2) + j(x_1y_2 + x_2y_1) \quad (0.16)$$

$$z_1 \cdot z_2 = |z_1|e^{j\theta_1} \cdot |z_2|e^{j\theta_2} = |z_1||z_2|e^{j(\theta_1+\theta_2)} \quad (0.17)$$

$$z_1 \cdot z_2 = |z_1||z_2|[\cos(\theta_1 + \theta_2) + j\sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (0.18)$$

(4) การหาร ได้แก่

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{|z_1|e^{j\theta_1}}{|z_2|e^{j\theta_2}} = \frac{|z_1|}{|z_2|}e^{j(\theta_1-\theta_2)} \quad (0.19)$$

$$\frac{z_1}{z_2} = [\cos(\theta_1 - \theta_2) + j\sin(\theta_1 - \theta_2)] \quad (0.20)$$

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{x_1+jy_1}{x_2+jy_2} = \frac{(x_1+jy_1)}{(x_2+jy_2)} \cdot \frac{(x_2-jy_2)}{(x_2-jy_2)} \quad (0.21)$$

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{(x_1x_2+y_1y_2)+j(x_2y_1-x_1y_2)}{x_2^2+y_2^2} \quad (0.22)$$

(5) การยกกำลัง

$$z^n = (|z|e^{j\theta})^n = |z|^n e^{jn\theta} = |z|^n (\cos n\theta + j\sin n\theta) \quad (0.23)$$

$$z^{1/2} = \pm |z|^{1/2} e^{j\theta/2} = \pm |z|^{1/2} \left[ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + j\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (0.24)$$

ความสัมพันธ์ที่สำคัญได้แก่

$$-1 = e^{j\pi} = e^{-j\pi} = 1 \angle 180^\circ \quad (0.25)$$

$$j = e^{j\pi/2} = 1 \angle 90^\circ \quad (0.26)$$

$$-j = -e^{j\pi/2} = e^{-j\pi/2} = 1 \angle -90^\circ \quad (0.27)$$

$$\sqrt{j} = (e^{j\pi/2})^{1/2} = \pm e^{j\pi/4} = \pm(1+j)/\sqrt{2} \quad (0.28)$$

$$\sqrt{-j} = \pm e^{-j\pi/4} = \pm(1-j)/\sqrt{2} \quad (0.29)$$

$$1/j = -j \quad (0.30)$$

**อิมพีแดนซ์ (Impedance) :**  $Z = V / I$  หรือ  $V = I Z$  หน่วย Ohms ( $\Omega$ )

$$Z = R \pm jX = |Z| \angle \theta \quad (0.31)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad , \quad \theta = \tan^{-1} \left( \frac{\pm X}{R} \right) \quad (0.32)$$

$$R = |Z| \cos \theta \quad (0.33)$$

$$X = |Z| \sin \theta \quad (0.34)$$

$$1 / j = -j \quad (0.35)$$

$$j^2 = -1 \quad (0.36)$$

$R$  = Resistance หรือ ความต้านทาน ส่วนจริงของ อิมพีแดนซ์ (0.37)

$X$  = Reactance หรือ รีแอกแตนซ์ ส่วนจินตภาพของ อิมพีแดนซ์ (0.38)

$$Z_L = j\omega L = jX \quad (0.39)$$

$$Z_C = 1 / j\omega C = -j / \omega C = -jX \quad (0.40)$$

**แอดมิตแตนซ์ (Admittance) :**

$$Y = 1 / Z = I / V \text{ หน่วย Siemens (S)} \quad (0.41)$$

$$Y = G + jB = 1 / (R + jX) \quad (0.42)$$

$G$  = Conductance หรือ ความนำ ส่วนจริงของ แอดมิตแตนซ์ (0.43)

$B$  = Susceptance หรือ ซัสเซปแตนซ์ ส่วนจินตภาพของ แอดมิตแตนซ์ (0.44)

**เอกลักษณ์ของออยเลอร์ (Euler's identity) :**

$$e^{\pm j\theta} = \cos \theta \pm j \sin \theta \quad (0.45)$$

$$\cos(n\omega_0 t) = \frac{1}{2} [e^{jn\omega_0 t} + e^{-jn\omega_0 t}] \quad (0.46)$$

$$\sin(n\omega_0 t) = \frac{1}{2j} [e^{jn\omega_0 t} - e^{-jn\omega_0 t}] \quad (0.47)$$

## ความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน ในโดเมนเวลา กับ ในโดเมนเฟเซอร์

(Ulaby and Ravaioli, 2015)

**Time-domain sinusoidal functions  $z(t)$  and their cosine-reference phasor-domain counterparts  $\tilde{Z}$ , where  $z(t) = \Re\{[\tilde{Z}e^{j\omega t}]\}$ .**

$z(t)$	$\tilde{Z}$
$A \cos \omega t$	$\longleftrightarrow A$
$A \cos(\omega t + \phi_0)$	$\longleftrightarrow Ae^{j\phi_0}$
$A \cos(\omega t + \beta x + \phi_0)$	$\longleftrightarrow Ae^{j(\beta x + \phi_0)}$
$Ae^{-\alpha x} \cos(\omega t + \beta x + \phi_0)$	$\longleftrightarrow Ae^{-\alpha x} e^{j(\beta x + \phi_0)}$
$A \sin \omega t$	$\longleftrightarrow Ae^{-j\pi/2}$
$A \sin(\omega t + \phi_0)$	$\longleftrightarrow Ae^{j(\phi_0 - \pi/2)}$
$\frac{d}{dt} z(t)$	$\longleftrightarrow j\omega \tilde{Z}$
$\frac{d}{dt} [A \cos(\omega t + \phi_0)]$	$\longleftrightarrow j\omega Ae^{j\phi_0}$
$\int z(t) dt$	$\longleftrightarrow \frac{1}{j\omega} \tilde{Z}$
$\int A \sin(\omega t + \phi_0) dt$	$\longleftrightarrow \frac{1}{j\omega} Ae^{j(\phi_0 - \pi/2)}$

ภาพที่ 0.35 ความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน ในโดเมนเวลา กับ ในโดเมนเฟเซอร์

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Table 1-5 Time-domain sinusoidal functions and their cosine-reference phasor-domain counterparts

## การตอบสนองความถี่ของวงจร และฟังก์ชันถ่ายโอน

(Alexander and Sadiku, 2021)

การตอบสนองทางความถี่ของวงจร (Frequency response of a circuit) คือ การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของวงจรเมื่อความถี่ของสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงไป

สำหรับ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function:  $H(\omega)$ ) หรือที่เรียกว่า ฟังก์ชันเครือข่าย (Network function) คือ เป็นเครื่องมือเชิงวิเคราะห์ที่มีประโยชน์สำหรับการหาผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร โดยที่ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร (Frequency response) คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร  $H(\omega)$  กับความถี่เชิงมุม  $\omega$  โดยที่  $\omega$  มีค่าตั้งแต่  $\omega = 0$  จนถึง  $\omega = \infty$

ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) คือ อัตราส่วนที่ขึ้นอยู่กับความถี่ของ ฟังก์ชันการตอบสนอง (Forced function) กับฟังก์ชันกระตุ้น (Forcing function) หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือ อัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตต่ออินพุตของระบบ หรือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร (Transfer function of a circuit:  $H(\omega)$ ) คือ อัตราส่วนที่ขึ้นกับความถี่ของ เอาต์พุตเฟเซอร์  $Y(\omega)$  ที่เป็นองค์ประกอบของ แรงดันหรือกระแสของวงจร กับ อินพุตเฟเซอร์  $X(\omega)$  ที่เป็น แรงดันหรือกระแสของแหล่งจ่าย โดย  $H(\omega) = Y(\omega) / X(\omega)$  สำหรับตัวอย่างของฟังก์ชันถ่ายโอนได้แก่ (1)  $H(\omega) =$  อัตราขยายแรงดัน (Voltage gain)  $= V_o(\omega) / V_i(\omega)$  (2)  $H(\omega) =$  อัตราขยายกระแส (Current gain)  $= I_o(\omega) / I_i(\omega)$  (3)  $H(\omega) =$  อิมพีแดนซ์ถ่ายโอน (Transfer impedance)  $= V_o(\omega) / I_i(\omega)$  (4)  $H(\omega) =$  แอดมิตแตนซ์ถ่ายโอน (Transfer admittance)  $= I_o(\omega) / V_i(\omega)$  หรือกล่าวได้ว่า การถ่ายโอน คือ อัตราส่วนระหว่าง เอาต์พุต

ต่อ อินพุต โดย  $H(\omega)$  จะเท่ากับ  $H(\omega) \angle \phi$  ที่มีขนาด (Magnitude:  $H(\omega)$ ) กับ เฟส (phase  $\phi$ )

นอกจากนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอน อาจแสดงในรูปของ พหุนามเศษ (Numerator polynomial:  $N(\omega)$ ) กับ พหุนามส่วน (Denominator polynomial:  $D(\omega)$ ) ได้แก่  $H(\omega) = N(\omega) / D(\omega)$  โดย รากของ  $N(\omega)$  ที่เท่ากับ 0 จะเรียกว่า ซีโร่ (Zeros) ของ  $H(\omega)$  ที่มักแสดงเป็น  $j\omega$  เท่ากับ  $z_1, z_2, z_3, \dots$  ส่วน รากของ  $D(\omega)$  ที่เท่ากับ 0 จะเรียกว่า โพล (Poles) ของ  $H(\omega)$  ที่มักแสดงเป็น  $j\omega$  เท่ากับ  $p_1, p_2, p_3, \dots$  ซึ่งเพื่อให้การคำนวณเป็นไปได้โดยง่าย เราจึงมักแทน  $j\omega$  ด้วย  $s$  และเมื่อคำนวณเสร็จเปลี่ยน  $s$  กลับมาเป็น  $j\omega$

หรือ อาจกล่าวได้ว่า **ซีโร่ (Zero)** เป็นรากของพหุนามในส่วนของ ตัวเศษ ที่เป็นค่าที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันมีค่าเป็นศูนย์ ส่วน **โพล (Pole)** เป็นรากของพหุนามในส่วนของตัวส่วน ที่เป็นค่าที่ทำให้ฟังก์ชันมีค่าเป็นอนันต์ หรือ อินฟินิตี้หรือไม่จำกัด (Infinite)

## ประวัติการสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

(Frenzel, 2016 ; Ulaby and Ravaioli, 2015)

1. ปี พ.ศ. 2380 หรือ ค.ศ. 1837 Samuel Morse ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องโทรเลข หรือ เทเลกราฟ (Telegraph) ขึ้น
2. ปี พ.ศ. 2386 หรือ ค.ศ. 1843 Alexander Bain ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องโทรสาร แฟกซ์ไมล์ (Facsimile)
3. ปี พ.ศ. 2409 หรือ ค.ศ. 1866 United States and England ได้ทำการวางสายเคเบิล โทรเลขข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกสายแรก
4. ปี พ.ศ. 2419 หรือ ค.ศ. 1876 Alexander Bell ได้ทำการประดิษฐ์โทรศัพท์
5. ปี พ.ศ. 2420 หรือ ค.ศ. 1877 Thomas Edison ได้ทำการประดิษฐ์โฟโนกราฟเป็นเครื่องเล่นเสียงเครื่องแรกที่สามารถบันทึกและเล่นเสียงกลับได้
6. ปี พ.ศ. 2422 หรือ ค.ศ. 1879 George Eastman ได้การประดิษฐ์การถ่ายภาพ
7. ปี พ.ศ. 2430 หรือ ค.ศ. 1887 Heinrich Hertz ได้ค้นพบคลื่นวิทยุ
8. ปี พ.ศ. 2430 หรือ ค.ศ. 1887 Guglielmo Marconi ได้สาธิตการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นวิทยุ
9. ปี พ.ศ. 2444 หรือ ค.ศ. 1901 Marconi ได้ทำการติดต่อสื่อสารทางวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกเป็นครั้งแรก
10. ปี พ.ศ. 2446 หรือ ค.ศ. 1903 John Fleming ได้ทำการประดิษฐ์หลอดสุญญากาศแบบ สองขั้วสำหรับแปลงกระแสไฟฟ้า
11. ปี พ.ศ. 2449 หรือ ค.ศ. 1906 Reginald Fessenden ได้ทำการประดิษฐ์การมอดูเลชัน แบบแอมพลิจูด โดยทำการสาธิต การสื่อสารด้วยเสียงทางอิเล็กทรอนิกส์ ขึ้นเป็นครั้งแรก

12. ปี พ.ศ. 2449 หรือ ค.ศ. 1906 Lee de Forest ได้ทำการประดิษฐ์หลอดสูญญากาศแบบ ไตรโอดขึ้น
13. ปี พ.ศ. 2457 หรือ ค.ศ. 1914 Hiram P. Maxim ได้ทำการก่อตั้งสมาคมวิทยุสมัครเล่นแห่งแรก คือ American Radio Relay League (ARRL)
14. ปี พ.ศ. 2463 หรือ ค.ศ. 1920 KDKA Pittsburgh ได้ทำการกระจายเสียงทางวิทยุเป็นครั้งแรก
15. ปี พ.ศ. 2466 หรือ ค.ศ. 1923 Vladimir Zworykin ได้ทำการประดิษฐ์และการสาธิตโทรทัศน์
16. ปี พ.ศ. 2469 หรือ ค.ศ. 1926 John Baird มีการส่งสัญญาณภาพโทรทัศน์ผ่าน สายโทรศัพท์จากลอนดอนไปยังกลาสโกว์เป็นครั้งแรก
17. ปี พ.ศ. 2469 หรือ ค.ศ. 1926 บริการโทรศัพท์ข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกระหว่างลอนดอนและนิวยอร์ก
18. ปี พ.ศ. 2475 หรือ ค.ศ. 1932 มาร์โคนี ได้ทำการติดตั้งเชื่อมโยงโทรศัพท์ไมโครเวฟขึ้นเป็น ครั้งแรกโดย ระหว่างนครวาติกันและที่ประทับฤดูร้อนของพระสันตะปาปา
19. ปี พ.ศ. 2476 ถึง พ.ศ. 2482 หรือ ค.ศ. 1933 ถึง 1939 Edwin Armstrong ได้ทำการประดิษฐ์การมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation: FM) สำหรับการส่ง สัญญาณวิทยุขึ้น และประดิษฐ์เครื่องรับสัญญาณแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ ขึ้น
20. ปี พ.ศ. 2478 หรือ ค.ศ. 1935 Robert Watson-Watt ได้ประดิษฐ์เรดาร์ขึ้น

21. ปี พ.ศ. 2481 หรือ ค.ศ. 1938 H. A. Reeves ได้ประดิษฐ์พัลส์โค้ดมอดูเลชัน (Pulse Code Modulation: PCM) ขึ้น
22. ปี พ.ศ. 2482 หรือ ค.ศ. 1939 United States ได้มีการใช้งานเครื่องวิทยุสื่อสารสองทาง (วอล์คกี้ท็อกกี้) เป็นครั้งแรก
23. ปี พ.ศ. 2483 ถึง พ.ศ. 2488 หรือ ค.ศ. 1940 ถึง 1945 Britain, United States ได้ประดิษฐ์เรดาร์สำหรับสงครามโลกครั้งที่สอง
24. ปี พ.ศ. 2490 และ พ.ศ. 2491 หรือ ค.ศ. 1947 และ 1948 William Shockley, Walter Brattain, and John Bardeen ได้ทำการประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์รอยต่อ ขึ้นที่ Bell Labs
25. ปี พ.ศ. 2496 หรือ ค.ศ. 1953 RCA/NBC ได้ทำการออกอากาศโทรทัศน์สีขึ้นเป็นครั้งแรก
26. ปี พ.ศ. 2498 หรือ ค.ศ. 1955 ได้มีการนำเพจเจอร์ (Pager) เข้ามาใช้เป็นอุปกรณ์สื่อสารวิทยุในโรงพยาบาลและโรงงานเป็นครั้งแรก
27. ปี พ.ศ. 2501 หรือ ค.ศ. 1958 Jack Kilby ได้สร้างวงจรรวม Integrated Circuit (IC) บนเจอร์มาเนียม ขึ้นเป็นครั้งแรก ส่วน Robert Noyce ได้สร้างวงจรรวม บนซิลิคอน
28. ปี พ.ศ. 2501 หรือ ค.ศ. 1958 United States ได้ทดสอบการสื่อสารผ่านดาวเทียมขึ้นเป็นครั้งแรก
29. ปี พ.ศ. 2504 หรือ ค.ศ. 1961 United States ได้มีการใช้งานวิทยุช่วงความถี่สำหรับพลเมืองขึ้นเป็นครั้งแรก
30. ปี พ.ศ. 2512 หรือ ค.ศ. 1969 มีการก่อตั้ง ARPANET โดยกระทรวงกลาโหมของสหรัฐอเมริกา ซึ่งต่อมาได้พัฒนาเป็นอินเทอร์เน็ต
31. ปี พ.ศ. 2526 หรือ ค.ศ. 1983 United States ได้มีการเริ่มใช้งานเครือข่ายโทรศัพท์เซลลูลาร์ ในสหรัฐอเมริกา

32. ปี พ.ศ. 2527 หรือ ค.ศ. 1984 ระบบอินเทอร์เน็ตทั่วโลกเริ่มใช้งาน  
ได้จริง
33. ปี พ.ศ. 2538 หรือ ค.ศ. 1995 United States นำระบบโกลบอล  
โพซิซันนิ่ง (Global Positioning System: GPS) มาใช้อย่างเป็นทางการ
34. ปี พ.ศ. 2539 หรือ ค.ศ. 1996 ทั่วโลกเริ่มใช้งานสมาร์ตโฟน ของ  
BlackBerry, Nokia, Palm
35. ปี พ.ศ. 2540 หรือ ค.ศ. 1997 ยานมาร์พาร์โฟนเดอร์ ส่งภาพมายังโลก
36. ปี พ.ศ. 2540 หรือ ค.ศ. 1997 United States เริ่มใช้งานเครือข่าย  
ท้องถิ่นไร้สายขึ้น เป็นครั้งแรก
37. ปี พ.ศ. 2543 หรือ ค.ศ. 2000 ทั่วโลกมีการใช้งานระบบ  
โทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สาม
38. ปี พ.ศ. 2547 หรือ ค.ศ. 2004 การสื่อสารไร้สายที่มีให้บริการตาม  
สนามบิน มหาวิทยาลัย และสถานที่อื่น ๆ เป็นจำนวนมาก
39. ปี พ.ศ. 2552 หรือ ค.ศ. 2009 ทั่วโลกมีการใช้งานระบบโทรศัพท์ยุคที่สี่  
LTE cellular networks
40. ปี พ.ศ. 2555 หรือ ค.ศ. 2012 จำนวนสมาร์ตโฟนทั่วโลกมีเกิน  
1 พันล้าน เครื่อง

## สัญญาณ แอนาล็อก และดิจิทัล (Analog and Digital Signals)

(Sedra et al., 2020)

**สัญญาณแอนาล็อก (Analog signal)** คือ สัญญาณที่สามารถแสดงค่าได้อย่างต่อเนื่อง (Continuous) ซึ่งเปรียบเทียบกับสัญญาณจริงทางกายภาพ ที่มันพยายามจะแสดง เลียนแบบ หรือแทนที่ เช่น แรงดันไฟฟ้า (Voltage), กระแสไฟฟ้า (Current), หรือความถี่ (Frequency) ที่ใช้แทนเสียง อุณหภูมิ หรือความเข้มแสง เป็นต้น ขนาดของสัญญาณแอนาล็อกสามารถมีค่าได้ทุกค่า โดยมีค่าแอมพลิจูด (Amplitude) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่าง ต่อเนื่องไม่จำกัดจำนวนค่า หรือ แอมพลิจูดของสัญญาณแอนาล็อกจะแปรผันอย่างต่อเนื่อง มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเรียบเนียน (Smooth) ไม่กระโดดแบบสัญญาณดิจิทัล โดยส่วนใหญ่แล้วสัญญาณต่างๆ ที่พบในธรรมชาติรอบตัวเรานั้นล้วนเป็นสัญญาณแอนาล็อก ทั้งนี้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ทำหน้าที่จัดการสัญญาณแอนาล็อกจะเรียกว่า “วงจรแอนาล็อก (Analog circuits)”

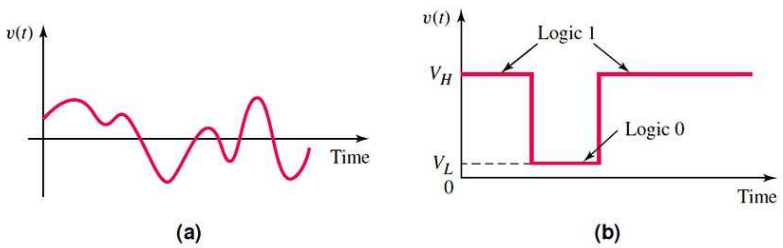
**สัญญาณดิจิทัล (Digital signal)** คือ สัญญาณที่มีค่าไม่ต่อเนื่อง มีค่าจำกัด โดยมีค่าเพียงสองระดับ (Binary) ได้แก่ 0 หรือ Low และ 1 หรือ High อย่างไรก็ตาม ค่า 0 หรือ ลอจิก 0 อาจเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง 0.8 โวลต์ ส่วนค่า 1 หรือ ลอจิก 1 อาจเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 2 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ สำหรับระบบ TTL ส่วนวงจรรวมสมัยใหม่อาจมีค่าเป็น 2 โวลต์ ถึง 3.3 โวลต์ หรือมีค่าประมาณ 1.8 โวลต์ หรือ 0.8 โวลต์ สำหรับวงจรรวมที่ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าสมัยใหม่เช่น Low power cmos ทั้งนี้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่จัดการสัญญาณดิจิทัลจะเรียกว่า “วงจรรดิจิทัล (Digital circuits)”

ส่วนวงจรที่ประกอบ ส่วนของวงจรแอนะล็อก และวงจรดิจิทัล ทำงานร่วมกันจะเรียกว่า “**วงจรผสมสัญญาณ**” หรือ “**Mixed-Signal Circuit**”

วงจรผสมสัญญาณ (Mixed-Signal Circuit) คือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการทำงานรวมกันระหว่าง สัญญาณแอนะล็อก (Analog) และ สัญญาณดิจิทัล (Digital) ภายในวงจรเดียวกัน เพื่อให้สามารถรับสัญญาณจากโลกภายนอกซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบแอนะล็อก และประมวลผลหรือควบคุมด้วยระบบดิจิทัลได้ หรือวงจรผสมสัญญาณ คือ วงจรที่มีทั้งสัญญาณแอนะล็อก และสัญญาณดิจิทัลทำงานร่วมกัน นั่นเอง

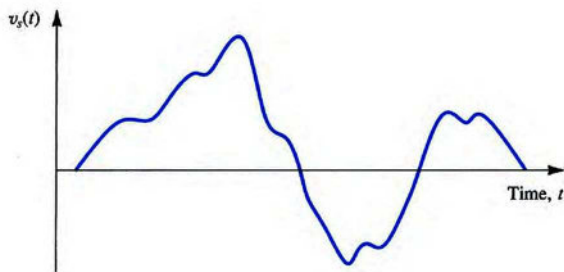
สำหรับในโลกแห่งความเป็นจริง ข้อมูลต่าง ๆ รอบตัวเรา เช่น เสียง, ความเข้มแสง, อุณหภูมิ, ความชื้น, แรงดัน ฯลฯ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบ สัญญาณแอนะล็อก ซึ่งเป็นสัญญาณที่ต่อเนื่องตามเวลา แต่ระบบอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันส่วนมากจะใช้การประมวลผลแบบ ดิจิตอล เพราะมีความแม่นยำ ทนทานต่อสัญญาณรบกวน และจัดเก็บข้อมูลได้ง่าย ดังนั้น "วงจรผสมสัญญาณ" จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญใน การแปลงสัญญาณจากโลกแอนะล็อกให้เข้าสู่ระบบดิจิทัล เพื่อการประมวลผลสัญญาณด้วยความแม่นยำ และแปลงผลลัพธ์กลับไปเป็นสัญญาณแอนะล็อกเพื่อควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ

การออกแบบวงจรผสมสัญญาณมีความซับซ้อนสูงกว่าวงจรแยกประเภท เพราะต้องพิจารณาหลายปัจจัยได้แก่ (1) ความเข้ากันได้ของแรงดัน โดยส่วนแอนะล็อกอาจใช้แรงดันต่างจากส่วนดิจิทัล ซึ่งจะต้องมีการจัดการไม่ให้อุปกรณ์รบกวนกัน (2) สัญญาณรบกวน (Noise Interference) สำหรับส่วนดิจิทัลมักก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนสูง ซึ่งอาจรบกวนวงจรแอนะล็อกที่มีความไวสูง (3) การจัดวางแผ่นวงจรพิมพ์ PCB (Layout) จะต้องทำการแยกเส้นทางของกราวด์, พื้นที่วงจร และตำแหน่งของแต่ละส่วนอย่างรอบคอบ และ (4) การเชื่อมต่อข้อมูล จะต้องออกแบบให้ระบบสามารถสื่อสารระหว่างโลกแอนะล็อกและระบบดิจิทัล ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว



ภาพที่ 0.36 สัญญาณแอนาล็อก ซ้าย (a) และสัญญาณดิจิทัลขวา (b)  
ที่มา: Neamen (2010)

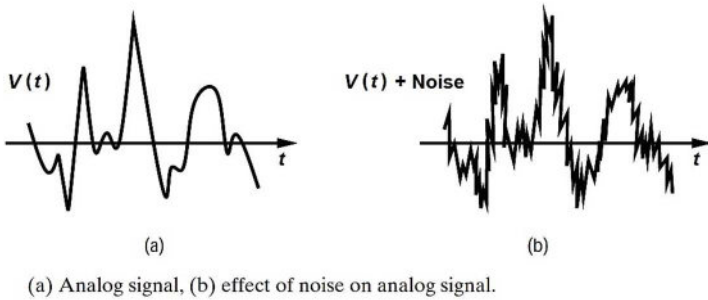
Figure PR1.2 Graphs of analog and digital signals: (a) analog signal versus time and (b) digital signal versus time



An arbitrary voltage signal  $v_s(t)$ .

ภาพที่ 0.37 สัญญาณแอนาล็อก (1)  
ที่มา: Sedra et al. (2020)

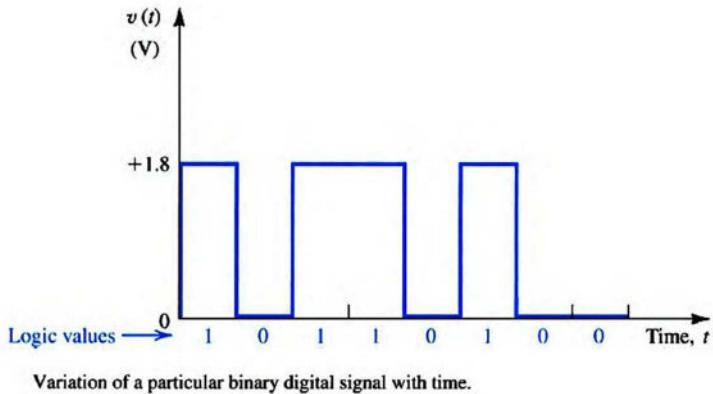
Figure 1.3 An arbitrary voltage signal  $v$  (r).



ภาพที่ 0.38 สัญญาณแอนะล็อก (2)

ที่มา: Razavi (2014)

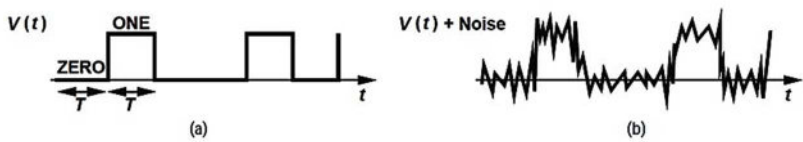
Figure 1.9 (a) Analog signal, (b) effect of noise on analog signal.



ภาพที่ 0.39 สัญญาณดิจิทัล (1)

ที่มา: Sedra et al. (2020)

Figure 1.9 Variation of a particular binary digital signal with time.



(a) Digital signal, (b) effect of noise on digital signal.

ภาพที่ 0.40 สัญญาณดิจิทัล (2)

ที่มา: Razavi (2014)

Figure 1.10 (a) Digital signal, (b) Effect of noise on digital signal.

## อุปกรณ์ พาสซีฟ และแอคทีฟ (Passive and Active Devices) (Neamen, 2010)

**อุปกรณ์พาสซีฟ (Passive device)** คือ อุปกรณ์ที่ไม่สามารถจ่ายพลังงานหรือกำลังไฟฟ้าออกมาได้ โดยกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตามเวลาจะเป็นศูนย์หรือมากกว่าเสมอ หรือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตามเวลา (Time average power) ที่ส่งเข้าสู่อุปกรณ์ ตลอดช่วงเวลานั้น จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์เสมอ ตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทนี้เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และ ตัวเหนี่ยวนำ โดยอุปกรณ์จะไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่มากกว่าศูนย์ได้ เมื่อพิจารณาในระยะเวลาที่ยาวนานมาก เป็นอนันต์

**อุปกรณ์แอคทีฟ (Active devices)** คือ อุปกรณ์ที่สามารถจ่ายพลังงานหรือกำลังไฟฟ้าในรูปแบบเฉพาะได้ ตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทนี้ เช่น แบตเตอรี่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสสลับ และรวมไปถึง ทรานซิสเตอร์ ที่สามารถจ่ายกำลังสัญญาณให้กับโหลดได้มากกว่ากำลังที่รับเข้ามา โดยปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่า การขยายสัญญาณ (Amplification) โดย พลังงานหรือกำลังไฟฟ้าส่วนเพิ่มในสัญญาณเอาต์พุต จะเกิดจากการจัดสรร พลังงานหรือกำลังไฟฟ้า กระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ภายในอุปกรณ์ใหม่

## กราวด์

**กราวด์ (Ground)** ในทางไฟฟ้า คือ จุดอ้างอิงศักย์ไฟฟ้า ที่ถือว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น ศูนย์โวลต์ (0 Volt) ซึ่งเป็นจุดที่ใช้อ้างอิงการวัดแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดของวงจรไฟฟ้า หรือ เป็นการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าเข้ากับโลกจริงทางกายภาพ ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าเข้ากับพื้นดินจริง เพื่อความปลอดภัย โดยหากเกิดไฟรั่วในอุปกรณ์ ไฟฟ้าจะไหลลงกราวด์ แทนที่จะไหลผ่านร่างกายมนุษย์ หรือป้องกันอุปกรณ์เสียหายจากไฟฟาสถิตหรือฟ้าผ่า ของระบบไฟฟ้าในบ้านพักอาศัย หรือ อุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่

ซึ่งในทางอิเล็กทรอนิกส์ กราวด์ เป็น จุดอ้างอิงของศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ร่วมกันภายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ ศูนย์โวลต์ ซึ่งจะ เป็นแกนหลักของการอ้างอิงแรงดันสัญญาณทุกจุดของวงจร และยังเป็นช่องทางในการไหลกลับของกระแสไฟฟ้าจากโหลด โดยหน้าที่ของกราวด์จะ ได้แก่ (1) เป็นจุดอ้างอิงแรงดันไฟฟ้า (Reference Point) ของวงจร โดยทุกแรงดันไฟฟ้าของวงจรจะถูกวัดเทียบกับกราวด์ (2) ป้องกันสัญญาณรบกวน (Noise Protection) คือ การต่อกราวด์อย่างเหมาะสมจะช่วยลดการรบกวนทางไฟฟ้าเช่น สัญญาณรบกวนจากคลื่นวิทยุ หรือแรงดันกระชาก (Surge) (4) ช่วยให้อุปกรณ์ทำงานได้อย่างเสถียร โดยเฉพาะในวงจรที่มีการส่งข้อมูล เพราะหากไม่มีกราวด์ร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ อาจทำให้การส่งข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้

สำหรับ **ดีซีกราวด์ (Dc ground)** จะเป็นจุดอ้างอิงที่ศักย์ไฟฟ้าเป็น ศูนย์โวลต์ สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ส่วน **เอซีกราวด์ (Ac ground)** หรือจุดกราวด์สำหรับสัญญาณเอซี (Ac) จะเป็นจุดที่แรงดันไฟฟ้าเอซีเทียบกับกราวด์มีค่าเป็นศูนย์ สำหรับสัญญาณความถี่ที่เราสนใจ หรือเป็นจุดในวงจรที่พิจารณาว่า แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ

แรงดันสำหรับสัญญาณ เอซี ในย่านความถี่ที่สนใจ เป็นจุดอ้างอิงของสัญญาณเอซี โดย เอซีกราวด์ เป็นแนวคิดในการวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะในวงจรสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal) โดยจุด จ่ายไฟฟ้า  $V_{cc}$  หรือ  $V_{dd}$  จะถือว่าเป็น Ac กราวด์ ด้วย เพราะมีแรงดันคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือเป็นกราวด์สำหรับสัญญาณ Ac นอกจากนั้น ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุมาก ที่สามารถใช้เชื่อมต่อให้จุดต่าง ๆ อยู่ในศักย์ไฟฟ้าเดียวกันสำหรับสัญญาณ เอซี ก็จะเป็น เอซีกราวด์ด้วยเช่นกัน รวมทั้ง จุดปลาย C-bypass หรือ ดีซีกราวด์บางกรณี ก็ถือว่าเป็น เอซีกราวด์ด้วยเช่นกัน

## การชิลด์

**การชิลด์ (Shielding)** วงจร สำหรับในทาง วงจรความถี่วิทยุ ไมโครเวฟ และ วงจรอิเล็กทรอนิกส์สื่อสาร คือ กระบวนการหรือเทคนิคในการป้องกัน วงจรจากการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก (EMI: Electromagnetic Interference) หรือ เป็นการป้องกันไม่ให้วงจรปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนออกไปรบกวนวงจรอื่นภายนอก ซึ่งทำได้โดยใช้วัสดุนำไฟฟ้า (เช่น โลหะ) ล้อมรอบหรือครอบ วงจรไว้ เพื่อให้งจรทำงานได้อย่างถูกต้องและไม่ถูกรบกวน วัตถุประสงค์หลักของการชิลด์ได้แก่ (1) ป้องกันการรบกวนจากภายนอก (2) ป้องกันไม่ให้วงจรของเราส่งคลื่นออกไปรบกวนอุปกรณ์อื่นภายนอก (3) เพิ่มความเสถียรของวงจร โดยเฉพาะในวงจรที่ทำงานในช่วงความถี่สูง ที่อาจเกิดการ คัปปลิง (Coupling) กันระหว่างส่วนต่าง ๆ ของวงจร ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้วงจรทำงานผิดพลาดได้

**ตัวอย่างลักษณะการชิลด์ได้แก่** (1) ใช้กล่องโลหะครอบวงจร (Metal Enclosure) ที่เป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไป เช่น ใช้กล่องอลูมิเนียมหรือทองแดง

(2) ใช้แผ่นพอยส์นำไฟฟ้าหรือแผ่นซีลด์เฉพาะทาง เช่น แผ่นทองแดงบาง ๆ หรือแผ่น Ferrite (3) ใช้ PCB Ground Plane โดย วาง Ground Plane ขนาดใหญ่ไว้ได้สายส่งหรือส่วนสำคัญของวงจร (4) การใช้ Shielded Cable หรือ Shielded Connector ซึ่งเป็น การใช้สายนำสัญญาณหรือ ขั้วต่อ (คอนเนกเตอร์) ที่มีการซีลด์ในตัว

ตัวอย่างวงจรที่ควรมีการซีลด์ ได้แก่ (1) วงจรรับและส่งสัญญาณวิทยุ เช่น ตัวส่งรับสัญญาณ ตัวส่งสัญญาณ ตัวรับสัญญาณ ออสซิลเลเตอร์ (2) วงจรที่ทำงานในช่วงความถี่ไมโครเวฟ เช่น วงจรขยายสัญญาณ วงจรกรองสัญญาณ วงจรผสมสัญญาณ (3) อุปกรณ์สื่อสารไร้สายเช่น อุปกรณ์ไวไฟ อุปกรณ์บลูทูธ อุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยจีพีเอส (4) อุปกรณ์อุตสาหกรรมที่มีการใช้งานสัญญาณความถี่สูง (5) อุปกรณ์การแพทย์ และระบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่ต้องการความแม่นยำสูง (6) อุปกรณ์ของอากาศยาน เช่น ระบบเรดาร์ ระบบควบคุมการบิน เพื่อป้องกันอุปกรณ์เหล่านี้จากคลื่นความถี่ต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมภายนอก และจากอุปกรณ์อื่น ๆ ที่แผ่คลื่นรบกวนในระบบของอากาศยาน รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้งานในอวกาศต่าง ๆ ควรมีการซีลด์ เพื่อป้องกันวงจร จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่าง ๆ ในอวกาศ และอนุภาคพลังงานสูงในอวกาศ

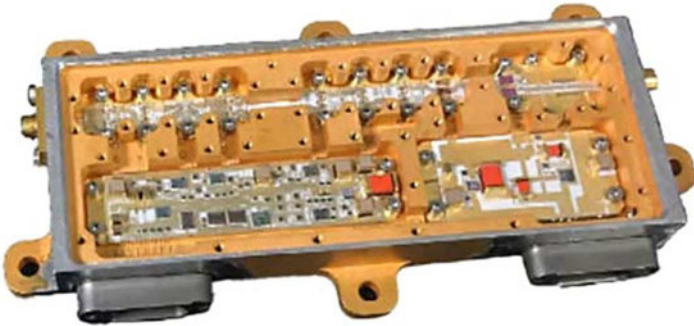
สำหรับตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ที่มีการซีลด์ ของอุปกรณ์ที่ใช้งานใน  
ย่านความถี่ไมโครเวฟได้แก่



ภาพที่ 0.41 ตัวอย่างการซีลด์ของวงจรรขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ  
ที่มา: Pasternack (2025a)

43 dB Gain, 20 dBm IP3, 2 dB NF, 12 dBm P1dB, 26.5 GHz to 40  
GHz, Low Noise Amplifier, 2.92mm : Product ID: PE15A3300

[https://www.pasternack.com/43-db-gain-2-db-40-ghz-low-noise-amplifier-2.92mm-pe15a3300-p.aspx?srsltid=AfmBOop4bL-A8RrmCzo4j67KoZCkWo\\_wb-ujJEQlv7hDYbEDgZYYGPrb](https://www.pasternack.com/43-db-gain-2-db-40-ghz-low-noise-amplifier-2.92mm-pe15a3300-p.aspx?srsltid=AfmBOop4bL-A8RrmCzo4j67KoZCkWo_wb-ujJEQlv7hDYbEDgZYYGPrb)



ภาพที่ 0.42 ตัวอย่างการซีลด์ วงจรขยายกำลัง

ที่มา: everything RF (2025a)

Stellant Systems Introduces GaN-based Linearized Power Amplifier that Operates in the K-Band

<https://www.everythingrf.com/news/details/14943-stellant-systems-introduces-gan-based-linearized-power-amplifier-that-operates-in-the-k-band>

## ความยาวเชิงไฟฟ้า

**ความยาวเชิงไฟฟ้า (Electrical Length)** คือ ความยาวของสายนำสัญญาณหรือสายอากาศ ที่พิจารณาตามจำนวนความยาวคลื่น (Wavelengths) ของคลื่นความถี่ที่ใช้งาน หรือคือการวัดความยาวของสายส่งหรืออุปกรณ์เชิงคลื่นโดยใช้ “มุมเฟสของคลื่น” หรือ “จำนวนเท่าของความยาวคลื่น” ซึ่งความยาวเชิงไฟฟ้ามักแสดงเป็น มุมเฟส หรือ จำนวนเท่าของความยาวคลื่น ตามความสัมพันธ์  $\theta = \beta L$  หรือ ความยาวเชิงไฟฟ้า (Electrical Length) เท่ากับ  $2\pi L / \lambda$  เมื่อ (1)  $\theta$  คือ ความยาวเชิงไฟฟ้า ที่มีหน่วยเป็น เรเดียน หรือ องศา (2)  $\beta$  คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายของคลื่น (Propagation constant) เท่ากับ  $2\pi / \lambda$  (3)  $L$  คือความยาวทางกายภาพของสายนำสัญญาณ (Physical length) (4)  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นในตัวกลาง

ตัวอย่างเช่น สัญญาณความถี่ 100 MHz มีความยาวคลื่นในอากาศ เท่ากับ  $c / f$  เท่ากับ  $(3 \times 10^8) / (100 \times 10^6)$  เท่ากับ 3 เมตร โดยสมมติใช้สายนำสัญญาณแบบ โคแอกเซียล ซึ่งคลื่นมีความยาว 1.98 เมตร ซึ่งถ้าเรามีสายนำสัญญาณยาว 0.495 เมตร จะได้ว่า ความยาวเชิงไฟฟ้าเท่ากับ  $0.495 / 1.98 = 0.25 \lambda = 360 \times 0.25 = 90$  องศา

ความยาวเชิงไฟฟ้าจะแปรผันตามความถี่ของสัญญาณ ดังนั้นตัวนำที่มีความยาวทางกายภาพเท่ากัน อาจมีความยาวเชิงไฟฟ้าไม่เท่ากันหากใช้งานที่ความถี่ต่างกัน มักแสดงในรูปของเศษส่วนของความยาวคลื่น  $\lambda$  หรือในหน่วยขององศา โดย 360 องศา เท่ากับ 1 ความยาวคลื่น ทั้งนี้ความเร็วของสัญญาณในตัวนำ (เช่น สายเคเบิล) จะช้ากว่าความเร็วแสงในสุญญากาศ ซึ่งทำให้ความยาวเชิงไฟฟ้ามักจะยาวกว่าความยาวทางกายภาพ ปัจจุบันนี้เรียกว่า "ปัจจัยความเร็ว (Velocity Factor)"

## แบนด์วิดท์

**แบนด์วิดท์ (Bandwidth)** คือช่วงความถี่ของสัญญาณที่ระบบหรืออุปกรณ์สามารถส่งผ่าน ประมวลผล หรือรับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อปริมาณข้อมูลที่สามารถส่งได้และคุณภาพของสัญญาณในระบบสื่อสารทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็นระบบไมโครเวฟ ระบบไร้สาย เสาอากาศ ตัวกรอง (Filter) หรือวงจรความถี่สูง หรือเป็นช่วงความถี่ที่มีข้อมูลอยู่ สำหรับในเชิงพื้นฐาน แบนด์วิดท์ หมายถึง ช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่างความถี่ต่ำสุด ( $f_{\text{low}}$ ) และ ความถี่สูงสุด ( $f_{\text{high}}$ ) ที่สัญญาณยังสามารถผ่านได้อย่างมีค่าสัญญาณ (Amplitude) หรือกำลัง (Power) อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เช่น  $\text{Bandwidth} = f_{\text{high}} - f_{\text{low}}$  ซึ่งในกรณีที่ความถี่ที่ใช้งานอยู่ในช่วง 70.4 GHz ถึง 70.9 GHz จะมีแบนด์วิดท์เท่ากับ  $f_2 - f_1 = 70.9 - 70.4 = 0.5 \text{ GHz} = 500 \text{ MHz}$  ส่วน แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ คือ ช่วงความถี่ที่ต้องการเพื่อส่งข้อมูลที่ต้องการ หรือเป็นความกว้างของแถบความถี่ที่ถูกจัดสรรให้กับช่องสัญญาณหนึ่งช่อง

## ความไวของเครื่องรับสัญญาณ

ความไวของเครื่องรับสัญญาณ (Receiver Sensitivity) คือ ระดับพลังงานหรือกำลังของสัญญาณที่ต่ำที่สุดที่ เครื่องรับสัญญาณสามารถตรวจจับ และแปลงสัญญาณได้อย่างถูกต้อง โดยที่คุณภาพของสัญญาณยังคงเพียงพอต่อการถอดรหัสหรือประมวลผลข้อมูลได้ หรือกล่าวอีกความหมายหนึ่งได้ว่า ความไวของเครื่องรับสัญญาณเป็น ขีดจำกัดขั้นต่ำของสัญญาณอินพุต ที่ทำให้ระบบยังสามารถทำงานได้ ซึ่งโดยทั่วไป ค่าความไวของสัญญาณจะระบุในหน่วย dBm หรือ เดซิเบลมิลลิวัตต์ และมักจะมีเครื่องหมายติดลบเช่น -90 dBm, -100 dBm เป็นต้น ซึ่งหมายความว่า เครื่องรับสัญญาณ สามารถตรวจจับสัญญาณที่มีกำลังต่ำมาก ๆ ได้ หรือความไวของเครื่องรับ เป็นความสามารถของเครื่องรับที่จะตรวจจับสัญญาณอินพุตที่มีกำลังต่ำที่สุดได้ โดยยังสามารถถอดรหัสข้อมูลได้ถูกต้อง ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการออกแบบเครื่องรับสัญญาณให้มีความไวเหมาะสมกับประเภทของระบบที่ใช้งาน เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบไวไฟ หรือระบบวิทยุสื่อสารของเครื่องบิน ทั้งนี้ หากเครื่องรับมีความไวไม่ดีพอ หรือไม่สามารถรับสัญญาณอ่อน ๆ ได้ อาจทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูล หรือรับสัญญาณได้ไม่ชัดเจน

ปัจจัยที่มีผลต่อความไวของเครื่องรับสัญญาณ (1) นอยส์ฟิกเกอร์ (Noise Figure: NF) คือ ค่าความไวของเครื่องรับมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับค่าความรบกวนภายในเครื่อง (Noise figure) ยิ่ง Noise figure มีค่าต่ำเท่าใด เครื่องรับยิ่งมีความสามารถในการแยกแยะสัญญาณที่มีกำลังอ่อนจากสัญญาณรบกวนได้ดี (2) แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของตัวรับ คือ ช่วงความถี่ที่เครื่องรับทำการเปิดรับสัญญาณ ถ้าช่วงกว้างเกินไปจะรับ สัญญาณรบกวนมากขึ้น ทำให้ความไวลดลง (3) อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)

คือ การที่ความไว้มักถูกนิยามว่าเป็นระดับพลังงานขั้นต่ำของสัญญาณที่ทำให้มีค่า SNR เพียงพอ เช่น  $SNR \geq 10 \text{ dB}$  (4) ค่าอัตราบิตผิดพลาด (Bit Error Rate: BER) หรือ Frame Error Rate (FER) คือ การที่ในระบบดิจิทัล ความไว้มักสัมพันธ์กับ ค่าอัตราบิตผิดพลาด เช่น ความไวเป็นระดับสัญญาณที่ทำให้ ค่าอัตราบิตผิดพลาด ไม่เกิน  $10^{-5}$

ตัวอย่างเช่น สมมติว่าเครื่องรับสัญญาณวิทยุมีความไวอยู่ที่  $-100 \text{ dBm}$  นั้นหมายความว่า ถ้ามีสัญญาณเข้าที่มีกำลัง มากกว่าหรือเท่ากับ  $-100 \text{ dBm}$  เครื่องรับจะสามารถประมวลผลข้อมูลจากสัญญาณนั้นได้ แต่ถ้าสัญญาณมีกำลังอ่อนกว่านี้ เช่น  $-110 \text{ dBm}$  เครื่องรับอาจไม่สามารถแยกสัญญาณที่ต้องการจาก สัญญาณรบกวน ได้

ความสำคัญของความไวของเครื่องรับสัญญาณ ในระบบสื่อสาร (1) ระยะทางการรับส่งข้อมูล คือ การที่ถ้าเครื่องรับที่มีความไวสูงก็จะสามารถรับสัญญาณที่ส่งมาจากระยะไกลได้ดีกว่า ช่วยเพิ่มระยะการครอบคลุมของเครือข่ายการให้บริการ (2) คุณภาพสัญญาณ คือ การที่เครื่องรับมีความไวที่ดี จะช่วยให้คุณภาพของการรับสัญญาณมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง (3) ลดการใช้พลังงานของเครื่องส่ง คือ ถ้าเครื่องรับมีความไวสูง เครื่องส่งไม่จำเป็นต้องใช้กำลังส่งสูงมากในการส่งสัญญาณ

## พื้นของสัญญาณรบกวน

**พื้นของสัญญาณรบกวน (Noise Floor)** คือ ระดับกำลังต่ำสุดของสัญญาณรบกวน (Noise) ที่มีอยู่ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือช่องสัญญาณของการสื่อสาร โดยที่ไม่มีสัญญาณที่ต้องการ (Useful signal) ปรากฏอยู่เลย หรือคือ ส่วนที่เป็นพื้นของสัญญาณรบกวน ที่เป็นฉากหลัง ซึ่งปรากฏอยู่ตลอดเวลา ไม่ว่าจะมีการส่งสัญญาณหรือไม่ หรือคือ ระดับพื้นฐานของสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ในระบบ แม้จะไม่มีสัญญาณที่ต้องการอยู่เลย ซึ่งเราสามารถควบคุมหรือออกแบบระบบเพื่อลด ระดับพื้นของสัญญาณรบกวนให้ต่ำลงได้ เพื่อให้ระบบสื่อสารมีความไวที่สูงขึ้น และรับสัญญาณได้แม่นยำมากขึ้น สำหรับระบบรับส่งข้อมูลเช่น วิทยุ ไมโครเวฟ เรดาร์ และดาวเทียม

แหล่งกำเนิดของ พื้นของสัญญาณรบกวน ได้แก่ (1) สัญญาณรบกวนความร้อน (Thermal Noise หรือ Johnson–Nyquist Noise) ที่เกิดจากความร้อนของตัวต้านทานและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ที่มีอยู่ตลอดเวลา และเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ (2) สัญญาณรบกวนชอต (Shot Noise) คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเช่น ไดโอด และทรานซิสเตอร์ (3) สัญญาณรบกวนฟลิคเกอร์ (Flicker Noise) คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่ต่ำ ๆ ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (4) สัญญาณรบกวนที่มาจากภายนอก (External Noise) คือ สัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งกำเนิดภายนอกอุปกรณ์ของเรา เช่น คลื่นวิทยุจากแหล่งอื่น สัญญาณรบกวนจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ไฟฟ้าใกล้เคียง และสัญญาณรบกวนจากชั้นบรรยากาศและอวกาศ (5) สัญญาณรบกวนคลอสทอร์ก (Crosstalk) คือ สัญญาณรบกวนที่มาจากสายนำสัญญาณหรือช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกัน

แนวทางสำหรับการลด ระดับพื้นของสัญญาณรบกวน ได้แก่ (1) ใช้อุปกรณ์ที่มีน้อยสปีกเกอร์ต่ำ (2) ควบคุมอุณหภูมิของระบบ (3) จัดวางอุปกรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ให้เหมาะสม (4) ใช้การชิลด์ และใช้การกราวด์ ที่เหมาะสม (5) ใช้ตัวกรองสัญญาณ เพื่อลด สัญญาณรบกวนที่มาจากภายนอก

ตัวอย่างของ ระดับพื้นของสัญญาณรบกวนเช่น สำหรับเครื่องรับสัญญาณวิทยุทั่วไป จะมีค่าประมาณ -100 dBm ส่วนในห้องปฏิบัติการหรือระบบที่ได้รับการออกแบบเป็นอย่างดี จะมีค่าประมาณ -120 dBm

ความสำคัญของ ระดับพื้นของสัญญาณรบกวน ในระบบสื่อสาร ได้แก่ (1) ส่งผลต่อ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR: Signal-to-Noise Ratio) โดยถ้า ระดับพื้นของสัญญาณรบกวนสูง จะส่งผลให้ SNR มีค่าต่ำ ทำให้คุณภาพของการรับสัญญาณจะแยกลง (2) จำกัด ค่าความไวของเครื่องรับสัญญาณ ถ้าระดับพื้นของสัญญาณรบกวนสูง จะทำให้เครื่องรับไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่ต้องการที่มีกำลังอ่อน ๆ ได้ (3) มีผลต่อการออกแบบระบบ คือ ควรที่จะออกแบบระบบให้มีระดับพื้นของสัญญาณรบกวน ที่ต่ำ ด้วยการใช่วางกระจายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ และออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ให้มีการชิลด์และการกราวด์ที่ดี

## ช่วงไดนามิกของตัวรับสัญญาณ

ช่วงไดนามิกของตัวรับสัญญาณ (Dynamic Range of Receiver) คือ ช่วงของระดับกำลังสัญญาณ (Signal power levels) ที่ตัวรับสัญญาณสามารถจัดการได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ตั้งแต่สัญญาณที่มีกำลังอ่อนที่สุดที่สามารถตรวจจับได้ (Minimum Detectable Signal: MDS) ไปจนถึงสัญญาณที่กำลังแรงที่สุด (Maximum Input Level) ที่สามารถรับได้ โดยไม่ทำให้เกิดการผิดเพี้ยน  $\text{Dynamic Range (dB)} = \text{Maximum Input Level} - \text{Minimum Detectable Signal}$  ช่วงไดนามิกของตัวรับสัญญาณ มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) ทั้งนี้ หากช่วงไดนามิก ยิ่งกว้างเท่าไร เครื่องรับสัญญาณยิ่งมีความสามารถในการทำงานในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน มีสัญญาณรบกวน หรือมีความแปรปรวนของระดับสัญญาณสูง ได้มากเท่านั้น ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นมากในการสื่อสารยุคใหม่

ปัจจัยที่ส่งผลต่อช่วงไดนามิก ได้แก่ (1) คุณภาพของวงจรขยาย ได้แก่ ตัวขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (2) การออกแบบตัวกรอง และการป้องกันสัญญาณรบกวน (3) การใช้เทคนิค ลดสัญญาณรบกวน และมีการปรับอัตราขยายโดยอัตโนมัติ (AGC – Automatic Gain Control) (4) การแปลงสัญญาณจาก แอนาล็อกเป็นดิจิตอล คือ ความละเอียดของตัวแปลงแอนาล็อกเป็นดิจิตอล จะมีผลต่อ ช่วงไดนามิกของตัวรับสัญญาณด้วย

ทั้งนี้ในการใช้งานจริง ตัวรับสัญญาณจะต้องสามารถทำงานได้ดีในสภาพที่ระดับสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก เช่น (1) ถ้าเป็นสัญญาณที่อยู่ใกล้เครื่องส่งมากสัญญาณอาจมีกำลังแรงมาก (2) ถ้าเป็นสัญญาณที่อยู่ไกลหรือมีสิ่งกีดขวาง สัญญาณอาจมีกำลังอ่อนมาก (3) มีสัญญาณรบกวน (Noise) หรือสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณ

ข้างเคียง (Adjacent Channel Interference) ซึ่งช่วงไตนามิกของตัวรับสัญญาณ มีค่าไม่กว้างพอ จะทำให้เครื่องรับสัญญาณไม่สามารถรับสัญญาณที่มีกำลังอ่อน ๆ ได้ หรืออาจรับสัญญาณที่มีกำลังแรงได้แล้วเกิดการผิดเพี้ยน

ตัวอย่างการใช้งานเช่นในระบบวิทยุสื่อสาร เครื่องรับสัญญาณอาจต้องรับสัญญาณจากสถานีที่อยู่ห่างกันมาก ทั้งในเชิงความแรงของกำลังของสัญญาณและตำแหน่ง เช่น สถานีที่อยู่ใกล้ สัญญาณแรงมาก ซึ่งมีค่าประมาณ  $-10$  dBm ส่วนสถานีที่อยู่ไกล สัญญาณอ่อนมาก ซึ่งมีค่าประมาณ  $-120$  dBm ดังนั้น ตัวเครื่องรับควรมีช่วงไตนามิก อย่างน้อยเท่ากับ  $-10 - (-120) = 110$  dB เพื่อให้สามารถแยกแยะและประมวลผลสัญญาณทั้งสองได้

### สัญญาณผลคูณการผสมความถี่

สัญญาณผลคูณการผสมความถี่ (Intermodulation Product Signal) หรือ สัญญาณมอดูเลตระหว่างกัน (Intermodulation Signal) คือ สัญญาณที่เกิดขึ้นใหม่จากการผสมกันของความถี่ต่าง ๆ ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมักเป็นสัญญาณที่เราไม่ต้องการ และอาจรบกวนระบบสื่อสารได้เป็นอย่างมาก ซึ่งการควบคุมสัญญาณผลคูณการผสมความถี่เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบและใช้งานระบบอิเล็กทรอนิกส์สื่อสารอย่างมีประสิทธิภาพ หรือกล่าวได้ว่า สัญญาณผลคูณการผสมความถี่ เกิดจากการผสมกันของสัญญาณความถี่หลายตัวภายในวงจรที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นได้แก่ ตัวขยายสัญญาณ ตัวผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์

สาเหตุที่ต้องระวัง สัญญาณผลคูณการผสมความถี่ ได้แก่ (1) ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Interference) โดยสัญญาณผลคูณการผสมความถี่ มักไปรบกวนสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียง (2) ลดคุณภาพ

สัญญาณ ในระบบการสื่อสารไร้สายเช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบวิทยุสื่อสาร ระบบโทรทัศน์

เมื่อมีสัญญาณ ความถี่มากกว่าหนึ่งตัว (เช่น  $f_1$  และ  $f_2$ ) ถูกป้อนเข้าสู่อุปกรณ์ที่มีลักษณะ ไม่เป็นเชิงเส้น จะเกิดปฏิกิริยาภายในวงจรที่ทำให้เกิดสัญญาณใหม่ ๆ ซึ่งไม่ได้มีอยู่ในอินพุตเดิม โดยความถี่ของสัญญาณใหม่นี้ เรียกว่า Intermodulation products ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรทั่วไป  $f_{IM} = |m \cdot f_1 \pm n \cdot f_2|$  โดยที่  $f_1$  และ  $f_2$  คือ ความถี่ของสัญญาณอินพุต,  $m$  และ  $n$  คือ จำนวนเต็ม ได้แก่ 1, 2, 3, ... และ  $f_{IM}$  คือ ความถี่ของผลคูณการผสมความถี่ (Intermodulation product)

ตัวอย่างเช่น มีสัญญาณอินพุตสองความถี่ได้แก่  $f_1 = 100$  MHz และ  $f_2 = 110$  MHz สัญญาณผลคูณการผสมความถี่ ที่เกิดขึ้นได้แก่  $2f_1 - f_2 = 2(100) - 110 = 90$  MHz,  $2f_2 - f_1 = 2(110) - 100 = 120$  MHz,  $f_1 + f_2 = 210$  MHz,  $f_2 - f_1 = 10$  MHz

ลำดับของผลคูณการผสมความถี่ (Intermodulation Order) คือ การที่ลำดับของผลคูณการผสมความถี่ ถูกกำหนดโดย ค่า  $m + n$  โดย ผลคูณการผสมความถี่ อันดับที่สองจะได้แก่  $f_1 + f_2$ ,  $f_1 - f_2$  ส่วนผลคูณการผสมความถี่ อันดับที่สาม จะได้แก่  $2f_1 - f_2$ ,  $2f_2 - f_1$  ทั้งนี้สัญญาณผลคูณการผสมความถี่ อันดับที่สาม อาจเกิดการรบกวนต่อสัญญาณที่ต้องการได้ง่าย

วิธีลดสัญญาณผลคูณการผสมความถี่ได้แก่ (1) ใช้อุปกรณ์ที่มีความเป็นเชิงเส้นสูง (High linearity) เช่น ตัวขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ ที่ออกแบบเป็นพิเศษ (2) หลีกเลี่ยงการส่งสัญญาณที่มีความแรงเกินไป (3) ใช้ตัวกรอง กรองความถี่ที่ไม่ต้องการออก (4) จัดวางสายอากาศส่งสัญญาณหรือเครื่องส่งสัญญาณวิทยุ ให้ห่างกันพอสมควร เพื่อป้องกันการผสมกันของสัญญาณ

## สัญญาณสปีวเรียส

**สัญญาณสปีวเรียส (Spurious signal)** คือ สัญญาณปลอมเทียม หรือเป็นสัญญาณรบกวนที่เราไม่พึงประสงค์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยที่ไม่ได้ตั้งใจ และไม่ใช่ส่วนหนึ่งของสัญญาณหลักที่เราต้องการส่งหรือรับ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นจากความผิดปกติของระบบ ความไม่สมบูรณ์ของวงจร อิเล็กทรอนิกส์ การมอดูเลตผิดพลาด ผลข้างเคียงจากการทำงานของอุปกรณ์วิทย์ หรือคือสัญญาณที่เราไม่ต้องการ ซึ่งปรากฏอยู่ในระบบสื่อสาร หรือวงจรวิทย์ อันเกิดจากผลของ การผสมความถี่ ฮาร์โมนิก การรบกวนภายนอก หรือความผิดพลาดของวงจร ที่มีอยู่ในความถี่ที่ไม่เกี่ยวข้องกับสัญญาณหลัก และมีความสามารถที่จะทำการรบกวนการทำงานของระบบสื่อสารของตนเองหรือระบบอื่นได้

ลักษณะของสัญญาณสปีวเรียส ได้แก่ (1) มีความถี่ที่แตกต่างจากสัญญาณหลักที่เราต้องการ (2) มีแอมพลิจูดต่ำกว่าสัญญาณหลัก (3) ไม่ได้อยู่ในแบนด์วิดท์ของการสื่อสารที่กำหนด (4) เกิดขึ้นชั่วคราวหรือถาวร ที่ขึ้นอยู่กับสาเหตุ

แหล่งกำเนิดของสัญญาณสปีวเรียส ได้แก่ (1) การผสมสัญญาณ (Mixing products) คือ ในระบบวิทย์ เมื่อมีการผสมของความถี่ต่าง ๆ เพื่อสร้างสัญญาณใหม่ เช่นในวงจรผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ อาจทำให้เกิดความถี่อื่นที่ไม่ได้ต้องการซึ่งเรียกว่า สัญญาณผลคูณการผสมความถี่ (Intermodulation products) ที่อาจตกอยู่ในช่วงความถี่ที่รบกวนระบบได้ (2) ฮาร์โมนิก (Harmonics) คือ การทำงานของวงจรไม่เชิงเส้น เช่น วงจรขยาย หรือออสซิลเลเตอร์ อาจสร้างฮาร์โมนิกของสัญญาณความถี่หลัก  $f$  ได้แก่ สัญญาณที่ความถี่  $2f, 3f, 4f, 5f$  ซึ่งเป็นสัญญาณสปีวเรียส (3) เฟสโนยส์ของออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Phase Noise) คือ

สัญญาณที่ไม่ได้มีความถี่เดียว แต่มีการสั้นอยู่รอบ ๆ ความถี่หลัก (4) สัญญาณคอสทอร์ก (Crosstalk) หรือ สัญญาณคัปปลิง (Coupling) จากแหล่งอื่น ๆ คือ สัญญาณจากสายสัญญาณใกล้เคียง หรือสัญญาณจากอุปกรณ์อื่นในระบบอาจถูกคัปปลิงเข้ามาในระบบ ทำให้เกิดเป็นสัญญาณสปีวเรียส (5) สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI: Electromagnetic Interference) คือ สัญญาณจากภายนอกเช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากบรรยากาศหรืออวกาศ อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง หรืออุปกรณ์ส่งสัญญาณอื่น ๆ อาจทำให้เกิดสัญญาณสปีวเรียสขึ้นได้

ผลกระทบของ สัญญาณสปีวเรียส ได้แก่ (1) การรบกวน (Interference) คือ อาจเกิดการรบกวนสัญญาณในระบบเดียวกันหรือระบบอื่น โดยทำให้ การรับส่งข้อมูลเกิดข้อผิดพลาด สัญญาณขาดหาย หรือมีเสียงรบกวนในระบบเสียง (2) ผิดมาตรฐานของการสื่อสาร คือ เป็นสัญญาณแปลกปลอมอยู่นอกย่านที่อนุญาต (3) ลดประสิทธิภาพของระบบ เช่นในระบบนำทาง สัญญาณสปีวเรียสอาจทำให้เกิดการวัดค่าที่ผิดพลาดได้

วิธีลดหรือควบคุม สัญญาณสปีวเรียส ได้แก่ (1) ออกแบบวงจรอย่างรอบคอบ เช่น ใช้วงจรกรองความถี่ เพื่อตัดความถี่ที่ไม่ต้องการ (2) ใช้การชิลด์ เพื่อป้องกันการแผ่คลื่น หรือการรับสัญญาณปลอมเทียม (3) ใช้วงจรขยายที่มีความเป็นเชิงเส้น และใช้ออสซิลเลเตอร์ที่มีเฟสลอยส์ต่ำ (4) ปฏิบัติตามมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC: Electromagnetic Compatibility)

## สัญญาณอิมเมจ

สัญญาณอิมเมจ (Image Signal) คือ สัญญาณที่เราไม่ต้องการมาจากความถี่อิมเมจ ซึ่งเกิดจากมิกเซอร์ ในเครื่องรับสัญญาณ โดยเมื่อถ้า  $f_s$  คือ ความถี่ของสัญญาณที่ต้องการ (Desired signal),  $f_{LO}$  คือ ความถี่ของ Local oscillator และ  $f_{IF}$  คือ ความถี่ IF ที่ต้องการ ความถี่อิมเมจด้านบนจะได้แก่  $f_s + 2f_{IF}$  และความถี่อิมเมจด้านล่างจะได้แก่  $f_s - 2f_{IF}$

ผลกระทบของสัญญาณอิมเมจ จะได้แก่ (1) อาจทำให้เกิด สัญญาณปลอมเทียม ซึ่งทำให้เครื่องรับตีความผิด (2) คุณภาพของการรับสัญญาณแยกลง

วิธีป้องกันสัญญาณอิมเมจ จะได้แก่ (1) ใช้ตัวกรอง ที่ออกแบบให้มีการลดทอนความถี่อิมเมจมากที่สุด (2) ใช้เครื่องรับสัญญาณที่มีการแปลงความถี่สองครั้ง (3) ใช้ตัวผสมสัญญาณหรือมิกเซอร์ แบบกำจัดความถี่อิมเมจ

## สัญญาณรบกวนทางเฟส หรือเฟสโนยส์

สัญญาณรบกวนทางเฟส หรือเฟสโนยส์ (Phase Noise) คือ การแปรผันเล็กน้อยที่ไม่ต้องการในทางเฟสของสัญญาณคลื่นพา (Carrier signal) ซึ่งเกิดขึ้นแบบสุ่มเมื่อเวลาผ่านไป หรือ เป็นความแปรผันแบบสุ่มในเฟสของสัญญาณที่ส่งผลให้พลังงานกระจายออกจากความถี่กลางของคลื่นพา โดยปรากฏออกมาเป็น สัญญาณรบกวนที่อยู่รอบ ๆ ความถี่ของสัญญาณคลื่นพา มักแสดงในหน่วย dBc/Hz และพล็อตกับ Offset frequency ซึ่งสัญญาณรบกวนทางเฟส จะมีผลต่อคุณภาพของการส่งข้อมูล ความคมของ ความถี่ ความเสถียรของระบบ และระดับการรบกวนที่สามารถควบคุมและลดได้ผ่านการออกแบบวงจรที่เหมาะสมและเลือกใช้อุปกรณ์ที่ดี

โดยเมื่อมองในโดเมนความถี่ เช่น เมื่อดูสัญญาณของออสซิลเลเตอร์ บนสเปกตรัมแอนาไลเซอร์ (Spectrum analyzer) จะเห็นสัญญาณหลักที่ ความถี่กลาง (Center carrier frequency) และจะมีหาง ที่มีลักษณะ กระจายตัวที่ลดลงทั้งสองข้างของความถี่พาตรงกลาง สิ่งนี้เรียกว่า เฟสนอยส์

ความหมายพื้นฐานของเฟสนอยส์ ในทางอุดมคติ สัญญาณความถี่ เดียว จากออสซิลเลเตอร์ ควรจะเป็นสัญญาณไซน์ที่บริสุทธิ์ เช่น  $v(t) = A \cdot \cos(2\pi f_0 t)$  แต่ในโลกความเป็นจริงจะมีการสั่น (Jitter) ใน เฟสเล็กน้อย ทำให้สัญญาณจริงกลายเป็น  $v(t) = A \cdot \cos(2\pi f_0 t + \phi(t))$  โดยที่  $\phi(t)$  คือความแปรปรวนของเฟสตามเวลา ซึ่งมักจะเป็นฟังก์ชันสุ่ม (Random process) ผลที่ได้คือ สเปกตรัมของสัญญาณจะไม่เป็นเส้น เดียว (Delta function) ที่  $f_0$  แต่จะกระจายออกในรูปของ "Skirts" หรือ รูปคล้ายกระโปรงของผู้หญิง หรือ "Sidebands" รอบความถี่  $f_0$

สาเหตุของที่มีเฟสนอยส์ เนื่องจากความไม่เสถียรของ Oscillator เช่น ความผันผวนของอุณหภูมิ, แรงดันไฟฟ้า, หรือคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ สร้างออสซิลเลเตอร์ การรบกวนจาก Thermal noise และ Flicker noise ภายในอุปกรณ์เช่น ทรานซิสเตอร์ หรือ ไดโอด รวมไปถึงการออกแบบวงจรที่ไม่เหมาะสม เช่น วงจรป้อนกลับที่ขาดการควบคุมที่ดีใน PLL

ผลกระทบจากเฟสนอยส์ในระบบสื่อสาร ได้แก่ (1) ลดความไวของ ระบบรับสัญญาณ (Receiver Sensitivity) (2) สัญญาณที่มี Phase noise มากอาจทำให้ไม่สามารถแยกแยะสัญญาณที่อ่อนหรืออยู่ใกล้กันในความถี่ได้ (3) ทำให้เกิดการรบกวนกัน (Interference) ระหว่างช่องสัญญาณ (Channel Crosstalk) เนื่องจาก Sidebands จาก Phase noise ไปทับซ้อน กับช่องใกล้เคียง (4) ลด Bit Error Rate (BER) ในระบบดิจิทัล คือ เฟสที่ไม่

เสถียรส่งผลต่อการดีมอดูเลต (Demodulate) สัญญาณอย่างถูกต้อง โดยเฉพาะมอดูเลต (Modulation) แบบ QPSK, QAM (5) มีผลในเฟสล็อก ลูป PLL และ Clock generation circuits โดย หาก Phase noise สูง อาจ ทำให้ Clock jitter มาก ซึ่งกระทบต่อระบบดิจิทัลความเร็วสูง เช่น CPU, FPGA

วิธีสำหรับการลดเฟสnoise ได้แก่ (1) เลือกใช้ ออสซิลเลเตอร์ คุณภาพสูง (เช่น Crystal Oscillator, TCXO, OCXO) (2) การออกแบบ วงจรที่มีค่า Q สูงใน Resonator (3) ใช้วงจรเฟสล็อก ลูป PLL อย่างเหมาะสม และควบคุม Loop bandwidth ให้พอดี (4) การป้องกัน EMI และการ จ่ายไฟให้สะอาด (5) การควบคุมอุณหภูมิของวงจรให้อยู่ในช่วงเหมาะสม

สำหรับการวัด เฟสnoise มักใช้หน่วย dBc/Hz (Decibels relative to the carrier per Hertz of bandwidth) โดยแสดงค่าเฟสnoise เมื่อห่าง จากความถี่คลื่นพาที่ระยะต่างๆ เช่น: -90 dBc/Hz @ 1 kHz offset ซึ่ง หมายถึง กำลังของสัญญาณรบกวน ที่ห่างจาก Carrier เท่ากับ 1 kHz มีค่า ต่ำกว่าความแรงของ Carrier อยู่ 90 dB ภายในแบนด์วิดท์ 1 Hz ซึ่ง โดยทั่วไปจะทำการวาดกราฟของเฟสnoise บนกราฟลอการิทึม ที่แกนนอน เป็น ความถี่ Offset จากความถี่คลื่นพา หรือ Carrier หน่วย (Hz) และแกน ตั้ง เป็น ระดับของเฟสnoise (dBc/Hz)

ลักษณะของค่าเฟสnoiseที่ดี คือ ควรมีค่าต่ำ (Low Phase Noise) โดยเฟสnoiseที่ดีควรมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งในกราฟของเฟสnoise จะแสดงเป็น dBc/Hz เทียบกับความถี่ Offset จากความถี่คลื่นพา (Carrier) โดยควรมีค่าต่ำ ที่เป็นตัวเลข ติดลบมากๆ เช่น -100 dBc/Hz, -120 dBc/Hz, -140 dBc/Hz) และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ Offset เพิ่มขึ้น ทั้งนี้กราฟของเฟสnoise ควรมีลักษณะที่ ลาดลง (Slope ติดลบ)

เมื่อ ความถี่ Offset มากขึ้นจาก Carrier เช่น ที่ Offset 1 kHz อาจเป็น -90 dBc/Hz และที่ 100 kHz อาจเป็น -120 dBc/Hz ไม่มี สเปนอร์ (Spur) หรือ สเปนอร์ (Spur) มีค่าต่ำมาก โดย สเปนอร์ (Spur) หรือ Spurious tones คือ สัญญาณรบกวนเฉพาะจุดที่อาจสูงผิดปกติในกราฟของเฟสnoise ซึ่งเฟสnoiseที่ดีไม่ควรมี สเปนอร์ (Spur) หรือ สเปนอร์มีค่าต่ำมากจนไม่กระทบการทำงาน

ตัวอย่างกราฟเฟสnoiseที่ดี ควรมีค่าดังนี้

ตารางที่ 0.1 ตัวอย่างค่ากราฟเฟสnoiseที่ดี

Offset Value (Hz)	Phase Noise (dBc/Hz)
1 kHz	-90
10 kHz	-105
100 kHz	-120
1 MHz	-135

สาเหตุที่ค่าเฟสnoiseต่ำถึงมีความสำคัญ เนื่องจาก ในระบบ วิทย์ หรือไมโครเวฟ ถ้าค่าเฟสnoiseมีค่าสูงจะทำให้เกิด สัญญาณรบกวน รอบ ๆ ความถี่คลื่นพา ซึ่งจะลดความคมชัดของการตีโมดูลิตสัญญาณ ที่จะทำให้ อัตราบิดผิดพลาดเพิ่มขึ้น โดยในระบบสื่อสารความเร็วสูง เช่น ระบบห้ำจี้ระบบไวไฟหกหรือเจ็ด หากค่าเฟสnoiseมีค่าสูง จะส่งผลต่อความแม่นยำของ สัญญาณดิจิทัล สำหรับในวงจรเฟสล็อกกลูบ (PLL) หรือออสซิลเลเตอร์ ควบคุมด้วยแรงดัน (VCO) ถ้าเฟสnoiseมีค่าต่ำ แสดงว่า ออสซิลเลเตอร์มีความนิ่ง คือ ความถี่ที่ผลิตได้ไม่แกว่งหรือสั่นมาก ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาณของระบบมีคุณภาพดี

## การต่อวงจรพื้นฐานของ ทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟต

การต่อวงจรพื้นฐานของ ทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟต (MOSFET: Metal–Oxide–Semiconductor Field–Effect Transistor) มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ควบคุมกระแสระหว่างขา Drain (D) และ Source (S) โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่ขา Gate (G) เป็นตัวควบคุม ในเชิงวงจร เราสามารถต่อวงจรมอสเฟต ได้หลายแบบเพื่อให้ได้ลักษณะการขยายสัญญาณหรือคุณสมบัติที่ต่างกันไป ซึ่ง 3 แบบหลักของวงจรได้แก่ (1) แบบขอสสร่วม (Common Source: CS) (2) แบบเกตร่วม (Common Gate: CG) และ (3) แบบเดรนร่วม (Common Drain: CD) โดยคำว่า “Common” หมายถึง “ขาที่ร่วมกันของวงจรขาเข้าและวงจรขาออก” เช่น ถ้าขาซอส (Source) ถูกใช้เป็นจุดอ้างอิงร่วม (Common) ทั้งด้าน อินพุต และ เอาต์พุต วงจรแบบนี้จะเรียกว่า “Common Source” ซึ่งรายละเอียดของการต่อวงจรทั้งสามแบบจะได้แก่

1. วงจรขยายขอสสร่วม (Common Source Amplifier: CS) สำหรับโครงสร้างของวงจรแบบขอสสร่วม (Common Source) ขาซอส (Source) จะถูกต่อร่วมกันระหว่างสัญญาณขาเข้าและขาออก โดยมักต่อกับกราวด์ผ่านตัวต้านทานหรือต่อโดยตรง ส่วนสัญญาณขาเข้า (Input) ป้อนที่ขาเกต (Gate: G) และสัญญาณขาออก (Output) ออกจากขาเดรน (Drain: D) ส่วนขา Source (S) จะต่อกับ กราวด์ (Ground) มีหลักการทำงานคือ แรงดันที่ขาเกตจะควบคุมกระแสที่ไหลจากขาเดรนไปขาซอส (Drain  $\rightarrow$  Source) ทั้งนี้ เมื่อแรงดันที่ขาเกตเพิ่มขึ้น เกินค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) มอสเฟต จะนำกระแสมากขึ้น ทำให้แรงดันที่เดรนลดลงเกิดเป็นสัญญาณขาออกที่ “กลับเฟส” กับสัญญาณขาเข้า โดยกลับเฟส  $180^\circ$

การทำงานและคุณสมบัติ วงจรขอส่วร่วม (Common Source) ทำหน้าที่เป็น ตัวขยายแรงดัน (Voltage Amplifier) สัญญาณเอาต์พุตจะกลับเฟส (Inverted) จากสัญญาณอินพุต คือกลับเฟส  $180^\circ$  มี อัตราขยายแรงดัน (Voltage Gain) สูง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ขาเกต (Gate) จะทำให้กระแสที่ขาเดรน (Drain) เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน วงจรแบบนี้มี อิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance) สูง เพราะขาเกตของมอสเฟต มีความต้านทานสูงมาก ส่วนอิมพีแดนซ์ขาออก (Output Impedance) มีค่าปานกลางถึงสูง

คุณสมบัติของวงจรขยายขอส่วร่วม ได้แก่ (1) มีอัตราขยายแรงดัน (Voltage Gain) ที่สูง (2) มีอัตราขยายกระแส (Current Gain) ปานกลางถึงสูง (3) เฟสสัญญาณเอาต์พุต เป็นแบบกลับเฟส  $180^\circ$  (4) อิมพีแดนซ์ขาเข้า มีค่าสูง เนื่องจากขาเกตมีความต้านทานสูง และ (5) อิมพีแดนซ์ขาออก มีค่าปานกลาง

การใช้งาน ได้แก่ (1) ใช้เป็นวงจรขยายสัญญาณทั่วไป เช่น ภาคขยายเสียง (Audio amplifier) ภาคขยายความถี่วิทยุ (RF amplifier) วงจรขยายสัญญาณในระบบสื่อสาร

2. **วงจรขยายเกต่วร่วม (Common Gate Amplifier: CG)** สำหรับ โครงสร้างการต่อวงจรแบบเกต่วร่วม (Common Gate) ขาเกต (Gate) จะถูกต่อ่วร่วมกัน โดยมีก่ต่อกับแรงดันกระแสตรงที่มีค่าคงที่ โดยสัญญาณขาเข้าหรืออินพุตจะถูกป้อนเข้าที่ขาซอส (Source: S) ส่วนสัญญาณขาออกหรือเอาต์พุต จะถูกนำออกจากขาเดรน (Drain: D) ส่วนขาเกต Gate (G) จะถูกต่อกับแรงดันคงที่ หรือกราวด์ผ่านตัวเก็บประจุในกรณี AC วงจรขยายเกต่วร่วมมี หลักการทำงาน คือ แรงดันที่ขาเกตจะถูกตรึงไว้ ส่วนสัญญาณขาเข้ามีการ

เปลี่ยนแปลงแรงดันโดยป้อนเข้าที่ขาซอส ซึ่งมีผลต่อกระแสในช่องนำกระแสของมอสเฟต และกระแสนี้จะส่งผลต่อแรงดันที่ขาเดรน

การทำงานและคุณสมบัติของวงจรรขยายเกตร่วม วงจรเกตร่วม Common Gate ทำหน้าที่เป็น ตัวขยายกระแส (Current Amplifier) หรือใช้เป็น วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่ความถี่สูง สัญญาณเอาต์พุตจะเป็นแบบไม่กลับเฟส (Non-inverted) จากสัญญาณอินพุต มีอัตราขยายแรงดัน (Voltage Gain) ปานกลางถึงสูง มีอิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance) ที่ต่ำ เพราะสัญญาณอินพุตเข้าที่ขาซอส (Source) โดยตรง และมีอิมพีแดนซ์ขาออก (Output Impedance) ที่สูง เหมาะสำหรับการใช้งาน ที่ความถี่สูง (High Frequency) เพราะไม่มีผลของ Miller Effect (ผลที่ทำให้ความจุระหว่างขา Gate-Drain ส่งผลต่อการขยาย)

คุณสมบัติของวงจรแบบนี้ได้แก่ (1) ขนาดแรงดันมีการขยาย ปานกลาง (2) กระแสมีการขยายประมาณ 1 (Unity gain) (3) เฟสของสัญญาณเอาต์พุต เป็นแบบไม่กลับเฟส (In-phase) (4) อิมพีแดนซ์ขาเข้ามีค่าต่ำ (5) อิมพีแดนซ์ขาออกมีค่าสูง

การใช้งานได้แก่ (1) นิยมใช้กับงานที่ต้องการ อิมพีแดนซ์ขาเข้าที่ต่ำ และมีการตอบสนองต่อความถี่สูง เช่น วงจรรขยายความถี่วิทยุ (RF) (2) ใช้เป็นตัวบัฟเฟอร์ระหว่างแหล่งสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกับวงจรถัดไป (3) ใช้เป็นวงจรรขยายสัญญาณไมโครเวฟ (4) วงจรแมทซิ่งอินพุต (Matching Input) ของเสาอากาศหรือ ส่วน RF front-end ของเครื่องรับสัญญาณ

3. วงจรขยายเดรนร่วม (Common Drain Amplifier: CD) หรือ Source Follower สำหรับโครงสร้างของวงจรแบบเดรนร่วม (Common Drain) ขาเดรนจะถูกใช้เป็นการร่วม ที่มักต่อกับแรงดันไฟฟ้าบวกที่มีค่าคงที่ โดยสัญญาณขาเข้าหรืออินพุตจะถูกป้อนเข้าที่ขาเกต (Gate: G) ส่วนสัญญาณขาออกหรือเอาต์พุตจะออกจากรูขาสอส (Source: S) ส่วนขา (Drain: D) จะต่อกับแรงดันกระแสตรงที่คงที่ หรือกราวด์ขึ้นอยู่กับชนิดของมอสเฟต

มีหลักการการทำงาน คือ แรงดันที่ขาเกตจะควบคุมแรงดันที่ขาซอสให้ตามแรงดันที่ขาเกต แต่จะต่ำกว่าเล็กน้อยเท่ากับแรงดันเกณฑ์ของมอสเฟต ดังนั้นแรงดันที่ขาซอสจึงมีค่าตามแรงดันที่ขาเกต ดังนั้นจึงเรียกววงจรแบบนี้ว่า Source Follower

การทำงานและคุณสมบัติ ของวงจขยายเดรนร่วม วงจรเดรนร่วม (Common Drain) มีอีกชื่อว่า Source Follower เพราะแรงดันที่ขาซอสตามแรงดันที่ขาเกต สัญญาณเอาต์พุตจะไม่กลับเฟส (Non-inverted) มี อัตราขยายแรงดัน (Voltage Gain) ประมาณ 1 หรือน้อยกว่าเล็กน้อย มีอิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance) สูงมาก มีอิมพีแดนซ์ขาออก (Output Impedance) ที่ต่ำ ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (Buffer) ระหว่างวงจรถูกเข้าความต้านทานสูงและวงจรถูกออกความต้านทานต่ำ

คุณสมบัติวงจขยายเดรนร่วมได้แก่ (1) แรงดันมีการขยายใกล้เคียง 1 (แต่น้อยกว่า 1 เล็กน้อย) (2) กระแสมีการขยายสูง (3) สัญญาณเอาต์พุตมีเฟสของสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (4) ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้ามีค่าสูงมาก (5) ค่าอิมพีแดนซ์ขาออกมีค่าต่ำ

การใช้งาน (1) เหมาะสำหรับการใช้งานเป็น บัฟเฟอร์ (Buffer) เนื่องจาก รับสัญญาณจากแหล่งที่มีอิมพีแดนซ์สูง ส่งต่อให้วงจรถัดไปที่มี

อิมพีแดนซ์ต่ำ เช่น ในวงจรอินพุตของเครื่องมีอวด หรือภาคขยาย สัญญาณเสียงขั้นต้น

สรุป วงจรทั้งสามแบบเป็นการเลือก "ขาร่วม" ที่ต่างกัน เพื่อปรับ ลักษณะทางไฟฟ้าให้เหมาะกับการใช้งาน โดย (1) วงจรซอร์สรวม (Common Source) ใช้ขยายแรงดัน (2) วงจรเกตร่วม (Common Gate) ใช้ในงาน ความถี่สูง หรืองานที่มีค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าต่ำ และ (3) วงจรเดรนร่วม (Common Drain) นิยมใช้เป็นบัฟเฟอร์ หรือใช้เป็นตัวตามสัญญาณ

### การต่อวงจรพื้นฐานของ ทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อไบโพลาร์

หลักการพื้นฐานของโครงสร้างวงจรของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ (Bipolar Junction Transistor: BJT) ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ที่มีขา 3 ขา ได้แก่ (1) ขาอีมิเตอร์ (Emitter: E) (2) ขาเบส (Base: B) หรือ ขาควมุมการไหลของกระแส (3) ขาคอลเลกเตอร์ (Collector: C) การทำงานของ BJT สามารถอธิบายอย่างง่ายได้ว่า กระแสฐาน ( $I_B$ ) จะควบคุมกระแสคอลเลกเตอร์ ( $I_C$ ) ซึ่งมักมีขนาดมากกว่า โดยมีความสัมพันธ์โดยประมาณว่า  $I_C = \beta I_B$  โดยที่  $\beta$  คือ Current gain (อัตราขยายกระแส) สำหรับโครงสร้างการต่อวงจรพื้นฐานของทรานซิสเตอร์รอยต่อไบโพลาร์ สามโครงสร้างหลักได้แก่

1. โครงสร้างแบบอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter: CE Configuration) สำหรับ โครงสร้างพื้นฐาน ในวงจร Common Emitter ขา Emitter จะถูก "ใช้ร่วม" เป็นจุดอ้างอิงหรือจุดร่วม (Common) ระหว่างวงจรขาเข้า และวงจรขาออก หมายความว่า ขา Emitter จะเชื่อมต่อเป็นจุดอ้างอิง (Common) ของทั้งสองฝั่ง โดย ขาเข้า คือ ระหว่าง Base และ Emitter ขาออก คือ ระหว่าง Collector และ Emitter

ตำแหน่งการต่อ Common คือ ขา Emitter ต่อกับกราวด์ (Ground) ในวงจรส่วนใหญ่ ดังนั้น ขา Common ของ CE คือ ขาอีมิเตอร์ที่ต่อกับกราวด์ ( $E = \text{Ground}$ ) คุณสมบัติของวงจรอีมิเตอร์ร่วมได้แก่ (1) แรงดันขาเข้า ได้แก่  $V_{BE}$  (2) แรงดันขาออกได้แก่  $V_{CE}$  (3) อัตราขยายแรงดันมีค่าสูง (4) อัตราขยายกระแสมีค่าสูง (5) สัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบกลับเฟส  $180^\circ$

ลักษณะสำคัญของวงจรอีมิเตอร์ร่วม (Common Emitter)

- (1) อัตราขยายแรงดันมีค่าสูง
- (2) อัตราขยายกระแส มีค่าปานกลางถึงสูง
- (3) อัตราขยายกำลัง (Power gain) มีค่าสูง
- (4) เฟสของสัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบกลับเฟส (Inverted)
- (5) ความต้านทานขาเข้า มีค่าปานกลาง
- (6) ความต้านทานขาออก มีค่าปานกลางถึงสูง

การใช้งาน นิยมใช้งานกันแพร่หลายในวงจร ขยายสัญญาณ (Amplifier) เช่น วงจรขยายสัญญาณเสียง (Audio Amplifier) วงจรขยายสัญญาณความถี่กลาง (Intermediate Frequency: IF Amplifier) วงจรสื่อสาร และวงจรสวิตชิง (Switching Circuit) กรณีที่ใช้ทรานซิสเตอร์เป็น สวิตช์

## 2. โครงสร้างแบบเบสร่วม (Common Base: CB Configuration)

โครงสร้างพื้นฐาน ในวงจร Common Base ขาเบส (Base) จะถูกใช้ร่วมเป็น จุดอ้างอิงระหว่าง วงจร ขาเข้าและขาออก หมายความว่า ขาเบส จะเป็น จุดอ้างอิงร่วมระหว่างวงจรขาเข้าและขาออก โดย วงจรขาเข้า คือ ระหว่าง Emitter และ Base วงจรขาออก คือ ระหว่าง Collector และ Base ตำแหน่งการต่อ Common คือ ขาเบส (Base) ต่อกับกราวด์ผ่านตัวเก็บ ประจุ (Capacitor coupling) หรือ ต่อผ่านตัวต้านทานแบบแบ่งแรงดัน (Biasing network) หรือจุดอ้างอิงแรงดันคงที่ เพื่อให้ Base มีแรงดันคงที่ และเป็นจุดอ้างอิงสำหรับทั้งขาเข้าและขาออก

คุณสมบัติของวงจรเบสร่วม (1) แรงดันขาเข้า:  $V_{EB}$  (2) แรงดันขาออก:  $V_{CB}$  (3) กระแสขาเข้า ( $I_E$ ) ประมาณ กระแสขาออก ( $I_C$ ) เนื่องจากกระแสฐานมีค่าน้อยมาก (4) สัญญาณเอาต์พุต มีเฟสของสัญญาณแบบไม่กลับเฟส หรือมีเฟสเดียวกัน (In-phase)

ลักษณะสำคัญของวงจรเบสร่วม (Common Base) (1) อัตราขยายแรงดันมีค่าสูง (2) อัตราขยายกระแส มีค่าน้อยกว่า 1 (3) อัตราขยายกำลังมีค่าปานกลาง (4) เฟสของสัญญาณเอาต์พุต เป็นแบบไม่กลับเฟส (5) ความต้านทานขาเข้า มีค่าต่ำมาก (6) ความต้านทานขาออก มีค่าสูงมาก

การใช้งาน (1) นิยมใช้ในวงจรขยายสัญญาณความถี่สูง (High-Frequency Amplifier) เช่น RF Amplifier เพราะมีความต้านทานขาเข้าต่ำ และความเสถียรสูง (2) ใช้ในวงจรแมทชิงอิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) ระหว่างจุดเชื่อมต่อ หรือวงจร หรือสายนำสัญญาณ ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกัน

3. **โครงสร้างแบบคอลเลกเตอร์ร่วม (Common Collector: CC Configuration)** โครงสร้างพื้นฐาน ในวงจรคอลเลกเตอร์ร่วม (Common Collector) จะมีขาคอลเลกเตอร์ จะเป็นจุดอ้างอิงร่วมระหว่างขาเข้าและขาออก หมายความว่า ขาคอลเลกเตอร์ จะเชื่อมเป็นจุดอ้างอิงระหว่างวงจร ขาเข้าและวงจรขาออก โดยวงจรขาเข้าคือ ระหว่าง Base และ Collector วงจรขาออกคือ ระหว่าง Emitter และ Collector ตำแหน่งการต่อ Common คือ ขาคอลเลกเตอร์ต่อกับกราวด์ (Ground) โดยตรงหรือผ่านตัวต้านทาน  $R_C$  (ในบางกรณี) ส่วน สัญญาณขาออกจะอยู่ที่ Emitter ซึ่งมีแรงดันใกล้เคียงกับแรงดันขาเข้า หรือกล่าวได้ว่า ขา Common หรือ ขาคอลเลกเตอร์ (Collector) จะต่อกับ กราวด์ (Ground) หรือแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ เช่น  $V_{CC}$

วงจรมักเรียกว่า Emitter Follower เพราะแรงดันขาออกที่ Emitter จะตาม แรงดันที่ขาเบส (Base)

คุณสมบัติ (1) แรงดันขาเข้าได้แก่  $V_{BC}$  (2) แรงดันขาออกได้แก่  $V_{EC}$  (3) แรงดันขาออก ประมาณ แรงดันขาเข้า ประมาณ 0.7 V (ในกรณีทรานซิสเตอร์ซิลิคอน) (4) เฟสของสัญญาณเอาต์พุต เป็นแบบไม่กลับเฟส

ลักษณะสำคัญ ของวงจรคอลเลกเตอร์ร่วม (Common Collector)

(1) อัตราขยายแรงดันมีค่าประมาณ 1 (น้อยกว่าเล็กน้อย) (2) อัตราขยายกระแส มีค่าสูงมาก (3) อัตราขยายกำลังมีค่าปานกลางถึงสูง (4) เฟสของสัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบไม่กลับเฟส (5) ความต้านทานขาเข้ามีค่าสูงมาก (6) ความต้านทานขาออก มีค่าต่ำมาก

การใช้งานได้แก่ (1) ใช้เป็นวงจร Buffer หรือวงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching Circuit) เพื่อเชื่อมต่อวงจรที่มีอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน (2) ใช้เป็นวงจร Voltage Follower เพื่อรักษาระดับแรงดันแต่เพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแส

สรุป (1) วงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter) ได้รับความนิยมมากที่สุดเพราะให้อัตราขยายสูง เหมาะสำหรับวงจรขยายทั่วไป (2) วงจรเบสร่วม (Common Base) ใช้ในงานความถี่สูงและงานที่ต้องการความต้านทานขาเข้าต่ำ (3) วงจรคอลเลกเตอร์ร่วม (Common Collector) ใช้เป็นวงจรบัฟเฟอร์ หรือ วงจรที่แรงดันขาออกตามแรงดันขาเข้า

## ค่าเพอร์มิตติวิตี้ ค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ค่าเพอร์เมียบิลิตี และค่าเพอร์เมียบิลิตีสัมพัทธ์

ค่าเพอร์มิตติวิตี้ (Permittivity:  $\epsilon$ ) คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุนั้น ในการยอมให้สนามไฟฟ้าผ่านเข้าไปในวัสดุนั้นได้มากน้อยเพียงใด หรือเป็นค่าที่แสดงว่าวัสดุนั้น "ยอมให้ประจุไฟฟ้ากระจายตัวภายในได้ดีเพียงใด" เมื่อมีสนามไฟฟ้าเข้ามากระทำ วัสดุที่มีค่าเพอร์มิตติวิตี้สูง จะสามารถ กักเก็บประจุ หรือ ลดความแรงของสนามไฟฟ้าในตัวมัน ได้ดีกว่าในทางกลับกัน วัสดุที่มีค่าเพอร์มิตติวิตี้ต่ำ จะยอมให้สนามไฟฟ้าแทรกผ่านได้ง่าย ทั้งนี้วัสดุใด ๆ จะมีค่าเพอร์มิตติวิตี้ มากกว่าหรือน้อยกว่า ในสุญญากาศ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอะตอมและโมเลกุลภายใน เช่น การจัดเรียงตัวของประจุบวกและประจุลบภายในวัสดุเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ ในกรณีนี้ ถ้าเราใช้วัสดุที่มี  $\epsilon$  สูง เช่น เซรามิก หรือพลาสติกบางชนิด ทำตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุนั้นจะสามารถเก็บประจุได้มากขึ้นได้ โดยไม่ต้องเพิ่มขนาด

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (Dielectric constants or relative permittivities:  $\epsilon_r$ ) คือคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างหนึ่งของสารหรือวัสดุ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัตถุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในสนามไฟฟ้า ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก เป็นค่าที่ขึ้นกับความถี่ และเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ หรือเป็นค่าที่บ่งบอกว่าวัสดุหนึ่งๆ สามารถกักเก็บสนามไฟฟ้าได้มากเพียงใดเมื่อเทียบกับสุญญากาศ โดยเป็น อัตราส่วนของ เพอร์มิตติวิตี้ของวัสดุ ( $\epsilon$ ) เทียบกับ เพอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ ( $\epsilon_0$ ) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง ทั้งนี้วัสดุที่มีค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์สูง จะทำให้สัญญาณเดินทางช้าลงและมีขนาดสายเล็กลงที่ความถี่เดียวกัน นอกจากนี้

มีค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ต่างกัน ส่งผลต่อความยาวคลื่นภายในแผ่นวงจร, การออกแบบเสาอากาศ, และความถี่เรโซแนนซ์

**ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangents:  $\tan \delta$ )** คือค่าที่แสดงความสามารถของสารที่จะยอมให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านไปได้และแสดงระดับการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้นสูงสารจะเกิดความร้อนได้ดีขึ้น

**ค่าเพอร์เมียบิลิตี (Permeability:  $\mu$ )** คือ ค่าความสามารถของวัสดุในการนำเส้นแรงแม่เหล็กผ่านวัสดุ นั้น ทั้งนี้วัสดุบางชนิดปล่อยให้สนามแม่เหล็กผ่านได้ง่าย (เช่น เหล็ก, เหล็กกล้า) ในขณะที่วัสดุบางชนิดต้านทานการผ่านของสนามแม่เหล็ก (เช่น อากาศ, น้ำ, ทองแดง และพลาสติก) หรือค่าที่บอกถึงความสามารถของวัสดุในการยอมให้เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Lines) ผ่านเข้าไปในวัสดุนั้นได้ง่ายเพียงใด หรือวัสดุที่มี ค่า  $\mu$  สูง จะนำสนามแม่เหล็กได้ดี ในขณะที่วัสดุที่มี ค่า  $\mu$  ต่ำ จะต้านสนามแม่เหล็ก ทำให้สนามผ่านได้ยาก หรือ เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกว่าวัสดุนั้น ยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านได้มากน้อยเพียงใด วัสดุแต่ละชนิดจะมีค่า  $\mu$  ที่แตกต่างกัน เนื่องจากโครงสร้างของอะตอมภายในวัสดุ จะมีผลต่อการจัดเรียงของสปิน (Spin) ของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นตัวกำหนดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของวัสดุ

**ค่าเพอร์เมียบิลิตีสัมพัทธ์ (Relative permeabilities:  $\mu_r$ )** คือ อัตราส่วนระหว่างค่าการนำแม่เหล็กของวัสดุ ( $\mu$ ) ต่อค่าการนำแม่เหล็กของสุญญากาศ ( $\mu_0$ ) หรือเป็นการบอกว่า วัสดุนั้นนำสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าสุญญากาศกี่เท่า โดย ถ้า  $\mu_r$  มีค่าเท่ากับ 1 วัสดุจะสามารถนำสนามแม่เหล็กได้เท่ากับสุญญากาศ เช่น อากาศ และอะลูมิเนียม ส่วนถ้า  $\mu_r$  มีค่ามากกว่า 1

จะหมายถึงวัสดุนั้นสามารถนำสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าสุญญากาศเช่น เหล็ก นิกเกิล และถ้า  $\mu_r$  มีค่าน้อยกว่า 1 จะหมายถึงว่า วัสดุนั้นสามารถต้านทานสนามแม่เหล็กได้มากกว่าสุญญากาศ เช่น วัสดุไดอะแมกเนติก ได้แก่ บิสมัท เงิน และคาร์บอนกราไฟต์ ทั้งนี้ แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ามักทำจากเหล็ก เหล็กซิลิคอน หรือเฟอร์ไรต์ที่มีค่า  $\mu_r$  สูง เพื่อให้สนามแม่เหล็กผ่านได้ดี ลดการสูญเสียพลังงาน สำหรับตัวเหนี่ยวนำ ถ้าใช้แกนที่มี  $\mu_r$  สูง จะได้ค่าความเหนี่ยวนำที่สูงในขนาดที่เล็กลง และหากวัสดุมีค่า  $\mu_r$  สูง จะส่งผลให้คลื่นจะเดินทางในวัสดุนั้นช้าลง

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก หรือค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ ของวัสดุไดอิเล็กทริก

Material	Static dielectric constant ( $\epsilon_r$ )
Air	1.0006
Styrofoam	1.03
Paraffin	2.1
Teflon	2.1
Plywood	2.1
RT/duroid 5880	2.20
Polyethylene	2.26
RT/duroid 5870	2.35
Glass-reinforced teflon (microfiber)	2.32–2.40
Teflon quartz (woven)	2.47
Glass-reinforced teflon (woven)	2.4–2.62
Cross-linked polystyrene (unreinforced)	2.56
Polyphenylene oxide (PPO)	2.55
Glass-reinforced polystyrene	2.62
Amber	3
Soil (dry)	3
Rubber	3
Plexiglas	3.4
Lucite	3.6
Fused silica	3.78
Nylon (solid)	3.8
Quartz	3.8
Sulfur	4
Bakelite	4.8
Formica	5
Lead glass	6
Mica	6
Beryllium oxide (BeO)	6.8–7.0
Marble	8
Sapphire	$\epsilon_x = \epsilon_y = 9.4$ $\epsilon_z = 11.6$
Flint glass	10
Ferrite (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	12–16
Silicon (Si)	12
Gallium arsenide (GaAs)	13
Ammonia (liquid)	22
Glycerin	50
Water	81
Rutile (TiO <sub>2</sub> )	$\epsilon_x = \epsilon_y = 89$ $\epsilon_z = 173$

ภาพที่ 0.43 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก หรือ ค่าเพอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ ของวัสดุ ไดอิเล็กทริก โดยประมาณ

ที่มา: Balanis (2012)

TABLE 2-1 Approximate static dielectric constants (relative permittivities) of dielectric materials

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ของวัสดุไดอิเล็กทริก

Material	$\epsilon'_r$	$\tan \delta$
Air	1.0006	
Alcohol (ethyl)	25	0.1
Aluminum oxide	8.8	$6 \times 10^{-4}$
Bakelite	4.74	$22 \times 10^{-3}$
Carbon dioxide	1.001	
Germanium	16	
Glass	4–7	$1 \times 10^{-3}$
Ice	4.2	0.1
Mica	5.4	$6 \times 10^{-4}$
Nylon	3.5	$2 \times 10^{-2}$
Paper	3	$8 \times 10^{-3}$
Plexiglas	3.45	$4 \times 10^{-2}$
Polystyrene	2.56	$5 \times 10^{-5}$
Porcelain	6	$14 \times 10^{-3}$
Pyrex glass	4	$6 \times 10^{-4}$
Quartz (fused)	3.8	$7.5 \times 10^{-4}$
Rubber	2.5–3	$2 \times 10^{-3}$
Silica (fused)	3.8	$7.5 \times 10^{-4}$
Silicon	11.8	
Snow	3.3	0.5
Sodium chloride	5.9	$1 \times 10^{-4}$
Soil (dry)	2.8	$7 \times 10^{-2}$
Styrofoam	1.03	$1 \times 10^{-4}$
Teflon	2.1	$3 \times 10^{-4}$
Titanium dioxide	100	$15 \times 10^{-4}$
Water (distilled)	80	$4 \times 10^{-2}$
Water (sea)	81	4.64
Wood (dry)	1.5–4	$1 \times 10^{-2}$

ภาพที่ 0.44 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ของวัสดุ ไดอิเล็กทริก

ที่มา: Balanis (2012)

TABLE 2-5 Dielectric constants and loss tangents of typical dielectric materials

ค่าเพอร์เมียบิลิตีที่สัมพันธ์ ของวัสดุแม่เหล็ก

Material	Class	Relative permeability ( $\mu_{sr}$ )
Bismuth	Diamagnetic	0.999834
Silver	Diamagnetic	0.99998
Lead	Diamagnetic	0.999983
Copper	Diamagnetic	0.999991
Water	Diamagnetic	0.999991
Vacuum	Nonmagnetic	1.0
Air	Paramagnetic	1.0000004
Aluminum	Paramagnetic	1.00002
Nickel chloride	Paramagnetic	1.00004
Palladium	Paramagnetic	1.0008
Cobalt	Ferromagnetic	250
Nickel	Ferromagnetic	600
Mild steel	Ferromagnetic	2,000
Iron	Ferromagnetic	5,000
Silicon iron	Ferromagnetic	7,000
Mumetal	Ferromagnetic	100,000
Purified iron	Ferromagnetic	200,000
Supermalloy	Ferromagnetic	1,000,000

ภาพที่ 0.45 ค่าเพอร์เมียบิลิตีที่สัมพันธ์ ของวัสดุแม่เหล็ก โดยประมาณ  
ที่มา: Balanis (2012)

TABLE 2-2 Approximate static relative permeabilities of magnetic materials

## สรุปสำหรับ บทที่ 0

1. เครื่องส่งสัญญาณ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลออกไปในอากาศ โดยการแปลงข้อมูลที่ต้องการส่งไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยสัญญาณข้อมูลดั้งเดิมที่ต้องการส่งจะเรียกว่าสัญญาณเบสแบนด์ ซึ่งจะถูกลมอดูเลตหรือผสมเข้ากับคลื่นพาไปเป็นความถี่เฉพาะในช่วงวิทยุหรือไมโครเวฟ ซึ่งสัญญาณที่ถูกลมอดูเลตแล้วจะถูกส่งออกอากาศด้วยสายอากาศ โดยอาจเป็นการมอดูเลต แอมพลิจูด ความถี่ เฟส หรือตำแหน่งทางเวลาอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือใช้คุณสมบัติเหล่านี้ร่วมกัน ซึ่งจะทำให้ข้อมูลสามารถเดินทางได้ในในอากาศด้วยทางระยะไกล

2. เครื่องรับสัญญาณ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลที่อยู่ในอากาศเข้ามา โดยจะตรวจจับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้ามายังอุปกรณ์และจะทำการดีมอดูเลตสัญญาณ เพื่อกู้ข้อมูลกลับ เพื่อส่งไปยังส่วนต่อไป โดยเครื่องรับสัญญาณจะถูกออกแบบให้กรองสัญญาณรบกวนออก เพื่อรักษาความถูกต้องของสัญญาณข้อมูล

3. ระบบสื่อสารอย่างง่าย คือ ระบบที่ประกอบด้วย เครื่องส่งสัญญาณ ช่องสัญญาณหรือสื่อกลางส่งสัญญาณ และเครื่องรับสัญญาณ

4. สัญญาณ คือ ชุดของข้อมูลหรือสารสนเทศ ที่เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แสดงหรือใช้แทนข้อมูล ที่เป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณบางอย่างตามเวลา หรือบางครั้งตามพิกัดตำแหน่ง ที่สามารถวัดและแปลงเป็นข้อมูลได้ โดย สามารถวิเคราะห์ประมวลผล หรือส่งผ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและพัฒนา ระบบสื่อสาร การควบคุม และอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

5. ความนำ คือความสามารถขององค์ประกอบในการนำกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น mhos ( $\mathbf{U}$ ) หรือ Siemens (S) หรือ Siemen- meters หรือ S/m โดยส่วนกลับของความนำ คือ สกาทันตทาน หรือความต้านทานจำเพาะ มีหน่วยเป็น  $\Omega\text{-m}$  หรือ Ohm-meters

6. อุปกรณ์ของวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน 3 ประเภท ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีทั้ง แบบใช้งานทั่วไป แบบติดตั้งบนผิวหน้าแผ่นวงจร และแบบบนวงจรรวม

7. กำลังไฟฟ้า คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt: W)

8. อุปกรณ์พาสซีฟ คือ อุปกรณ์ที่ไม่สามารถจ่ายพลังงานหรือกำลังไฟฟ้าออกมาได้ โดยกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตามเวลาจะเป็นศูนย์หรือมากกว่าเสมอ หรือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตามเวลา ที่ส่งเข้าสู่อุปกรณ์ ตลอดช่วงเวลาอนันต์ จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์เสมอ

9. อุปกรณ์แอกทีฟ คือ อุปกรณ์ที่สามารถจ่ายพลังงานหรือกำลังไฟฟ้าในรูปแบบเฉพาะได้

10. กราวด์ในทางไฟฟ้า คือ จุดอ้างอิงศักย์ไฟฟ้า โดยดีซีกราวด์ จะเป็นจุดอ้างอิงที่ศักย์ไฟฟ้าเป็น ศูนย์โวลต์ สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ส่วน เอซีกราวด์ หรือจุดกราวด์สำหรับสัญญาณเอซี จะเป็นจุดที่แรงดันไฟฟ้าเอซีเทียบกับกราวด์มีค่าเป็นศูนย์ สำหรับสัญญาณความถี่ที่เราสนใจ หรือเป็นจุดในวงจรที่พิจารณาว่า แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันสำหรับสัญญาณ เอซี ในย่านความถี่ที่สนใจ

11. การชิลด์วงจรหรืออุปกรณ์ คือ กระบวนการหรือเทคนิคในการป้องกัน วงจรหรืออุปกรณ์ จากการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก หรือเป็นการป้องกันไม่ให้วงจรปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนออกไปรบกวนวงจรอื่นภายนอก ซึ่งทำได้โดยใช้ วัสดุนำไฟฟ้า (เช่น โลหะ) ล้อมรอบ หรือครอบวงจรไว้ เพื่อให้วงจรทำงานได้อย่างถูกต้อง และไม่ถูกรบกวน

12. ความยาวเชิงไฟฟ้า คือ ความยาวของสายนำสัญญาณหรือสายอากาศ ที่พิจารณาตามจำนวนความยาวคลื่นของคลื่นความถี่ที่ใช้งาน หรือคือการวัดความยาวของสายส่งหรืออุปกรณ์เชิงคลื่นโดยใช้ “มุมเฟสของคลื่น” หรือ “จำนวนเท่าของความยาวคลื่น” ซึ่งความยาวเชิงไฟฟ้ามักแสดงเป็น มุมเฟส หรือ จำนวนเท่าของความยาวคลื่น

13. แบนด์วิดท์ หมายถึง ช่วงความถี่ที่อยู่ระหว่างความถี่ต่ำสุด และความถี่สูงสุด ที่สัญญาณยังสามารถส่งผ่านได้ โดยมีค่าสัญญาณ หรือกำลัง อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

14. ความไวของเครื่องรับสัญญาณ คือ ระดับพลังงานหรือกำลังของสัญญาณที่ต่ำที่สุดที่ เครื่องรับสัญญาณสามารถตรวจจับ และแปลงสัญญาณได้อย่างถูกต้อง

15. พื้นของสัญญาณรบกวน คือ ระดับกำลังต่ำสุดของสัญญาณรบกวน ที่มีอยู่ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือช่องสัญญาณของการสื่อสาร โดยที่ไม่มีสัญญาณที่ต้องการปรากฏอยู่เลย

16. ช่วงไดนามิกของตัวรับสัญญาณ คือ ช่วงของระดับกำลังสัญญาณ ที่ตัวรับสัญญาณสามารถจัดการได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ตั้งแต่สัญญาณที่มีกำลังอ่อนที่สุดที่สามารถตรวจจับได้ ไปจนถึงสัญญาณที่กำลังแรงที่สุด ที่สามารถรับได้ โดยไม่ทำให้เกิดการผิดเพี้ยน

17. สัญญาณผลคูณการผสมความถี่ หรือสัญญาณอินเตอร์มอดูเลชัน หรือสัญญาณมอดูเลตระหว่างกัน คือ สัญญาณที่เกิดขึ้นใหม่จากการผสมกันของความถี่ต่าง ๆ ในระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมักเป็นสัญญาณที่เราไม่ต้องการ

18. สัญญาณสปีวเรียส คือ สัญญาณปลอมเทียม หรือเป็นสัญญาณรบกวนที่เราไม่ต้องการ ซึ่งเกิดขึ้นโดยที่ไม่ได้ตั้งใจ และไม่ใช้ส่วนหนึ่งของสัญญาณหลักที่เราต้องการส่งหรือรับ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นจากความผิดปกติของระบบ ความไม่สมบูรณ์ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การมอดูเลตผิดพลาด ผลข้างเคียงจากการทำงานของอุปกรณ์วิทยุ

19. สัญญาณอิมเมจ คือ สัญญาณที่เราไม่ต้องการมาจากความถี่อิมเมจ ซึ่งเกิดจากมิกเซอร์ ในเครื่องรับสัญญาณ

20. สัญญาณรบกวนทางเฟส หรือเฟสโนยส์ คือ การแปรผันเล็กน้อยที่ไม่ต้องการในทางเฟสของสัญญาณคลื่นพา ซึ่งเกิดขึ้นแบบสุ่มเมื่อเวลาผ่านไป หรือ เป็นความแปรผันแบบสุ่มในเฟสของสัญญาณที่ส่งผลให้พลังงานกระจายออกจากความถี่กลางของคลื่นพา โดยปรากฏออกมาเป็น สัญญาณรบกวนที่อยู่รอบ ๆ ความถี่ของสัญญาณคลื่นพามากแสดงในหน่วย dBc/Hz และพล็อตกับ Offset frequency

21. ค่าเพอร์มิตติวิตี คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุนั้น ในการยอมให้สนามไฟฟ้าผ่านเข้าไปในวัสดุนั้นได้มากน้อยเพียงใด หรือเป็นค่าที่แสดงว่าวัสดุนั้น "ยอมให้ประจุไฟฟ้ากระจายตัวภายในได้ดีเพียงใด" เมื่อมีสนามไฟฟ้าเข้ามากระทำ วัสดุที่มีค่าเพอร์มิตติวิตีสูง จะสามารถ กักเก็บประจุ หรือ ลดความแรงของสนามไฟฟ้าในตัวมันได้ดีกว่า ในทางกลับกัน วัสดุที่มีค่าเพอร์มิตติวิตีต่ำ จะยอมให้สนามไฟฟ้าแทรกผ่านได้ง่าย

22. ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ คือคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างหนึ่งของสารหรือวัสดุ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในสนามไฟฟ้า ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มาก เป็นค่าที่ขึ้นกับความถี่ และเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ หรือเป็นค่าที่บ่งบอกว่า วัสดุหนึ่งๆ สามารถกักเก็บสนามไฟฟ้า

ได้มากเพียงใดเมื่อเทียบกับสุญญากาศ โดยเป็น อัตราส่วนของ เพอร์มิตติวิตีของวัสดุ เทียบกับ เพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ

23. ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย คือ ค่าที่แสดงความสามารถของสารที่จะยอมให้ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านไปได้และแสดงระดับการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็น พลังงานความร้อน ถ้าค่านี้นสูงสารจะเกิดความร้อนได้ดีขึ้น

24. ค่าเพอร์เมียบิลิตี คือ ค่าความสามารถของวัสดุในการนำเส้นแรงแม่เหล็กผ่านวัสดุนั้น ทั้งนี้วัสดุบางชนิดปล่อยให้สนามแม่เหล็กผ่านได้ง่าย (เช่น เหล็ก, เหล็กกล้า) ค่าที่บอกถึงความสามารถของวัสดุในการยอมให้เส้นแรงแม่เหล็ก ผ่านเข้าไปในวัสดุนั้นได้ง่ายเพียงใด หรือวัสดุที่มี ค่าเพอร์เมียบิลิตีสูง จะนำสนามแม่เหล็กได้ดี ในขณะที่วัสดุที่มี ค่าเพอร์เมียบิลิตีต่ำ จะต้านสนามแม่เหล็ก ทำให้สนามผ่านได้ยาก หรือ เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกว่าวัสดุนั้น ยอมให้สนามแม่เหล็กผ่านได้มากน้อยเพียงใด

25. ค่าเพอร์เมียบิลิตีสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างค่าการนำแม่เหล็กของ วัสดุ ต่อค่าการนำแม่เหล็กของสุญญากาศ หรือเป็นการบอกว่า วัสดุนั้นนำสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าสุญญากาศกี่เท่า

## บทที่ 1. สมการของวัสดุ สมการของแมกซ์เวลล์ และคุณลักษณะ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ปริมาณทางไฟฟ้าพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ได้แก่ (1)  $E$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) หน่วย V/m (2)  $D$  คือ การกระจัดไฟฟ้า (Electric displacement) หน่วย C/m<sup>2</sup> (Coulombs per square metre) (3)  $H$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) หน่วย A/m (4)  $B$  คือ การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetic induction) หน่วย T (Tesla) (5)  $J$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Electric current density) หน่วย A/m<sup>2</sup> (Amperes per square metre) (6)  $\rho$  คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (Electric charge density) หน่วย C/m<sup>3</sup> (Coulombs per cubic metre) (7)  $\sigma$  คือ ความนำไฟฟ้า (Conductivity) หน่วย S/m (Siemens per meter) (8)  $\epsilon$  คือ เพอร์มิตติวิตี หรือสภาพยอม (Permittivity) หน่วย F/m (Farads per meter) เป็นค่าความสามารถในการเก็บประจุ (9)  $\mu$  คือ เพอร์เมียบิลิตี หรือความซาบซึมได้ (Permeability) หน่วย H/m (Henries per meter) เป็นค่าความสามารถในการเหนี่ยวนำ (10)  $Q$  คือ ประจุไฟฟ้า หน่วย C (Coulomb) (11) ค่าเพอร์มิตติวิตีในสุญญากาศ  $\epsilon_0$  เท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  ฟารัดต่อเมตร (F/m) หรือประมาณ  $(1/36\pi) \times 10^{-9}$  (12) ค่าเพอร์เมียบิลิตีในสุญญากาศ  $\mu_0$  เท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  เฮนรีต่อเมตร (H/m)

สมการของวัสดุจะ ได้แก่

$$J = \sigma E \quad (1.1)$$

$$D = \epsilon E \quad (1.2)$$

$$B = \mu H \quad (1.3)$$

สมการของแมกซ์เวลล์ ที่อธิบายพฤติกรรมของ สนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็ก ใน สูญญากาศ ในรูป (อนุพันธ์) Differential Form และ (ปริพันธ์) Integral Form ได้แก่ (Zahid, 2015)

1. กฎของเกาส์ สำหรับสนามไฟฟ้า

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{หรือ} \quad \oint_S E \cdot da = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \, dV \quad (1.4)$$

2. กฎของเกาส์ สำหรับสนามแม่เหล็ก

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \text{หรือ} \quad \oint_S B \cdot da = 0 \quad (1.5)$$

3. กฎของฟาราเดย์

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{หรือ} \quad \oint_C E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_S B \cdot da \quad (1.6)$$

4. กฎของแอมแปร์

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad \text{หรือ}$$

$$\oint_C B \cdot dl = \mu_0 \int_S J \cdot da \quad (\text{or } \mu_0 \cdot I) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S E \cdot da \quad (1.7)$$

สมการของแมกซ์เวลล์ ที่อธิบายพฤติกรรมของ สนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็ก ใน วัสดุ (Matter) ในรูป (อนุพันธ์) Differential Form และ (ปริพันธ์) Integral Form ได้แก่ (Zahid, 2015)

1. กฎของเกาส์ สำหรับสนามไฟฟ้า

$$\nabla \cdot D = \rho \quad \text{หรือ} \quad \oint_S D \cdot da = Q = \int_V \rho \cdot dV \quad (1.8)$$

2. กฎของเกาส์ สำหรับสนามแม่เหล็ก

$$\nabla \cdot H = 0 \quad \text{หรือ} \quad \oint_S H \cdot da = 0 \quad (1.9)$$

3. กฎของฟาราเดย์

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{หรือ} \quad \oint_C E \cdot dl = -\mu \frac{d}{dt} \int_S H \cdot da \quad (1.10)$$

4. กฎของแอมแปร์

$$\nabla \times H = J + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad \text{หรือ} \quad \int_C H \cdot dl = \int_S J \cdot da \quad (\text{or I}) + \frac{d}{dt} \int_S D \cdot da \quad (1.11)$$

### คำอธิบายสมการแมกซ์เวลล์ทั้ง 4 สมการ

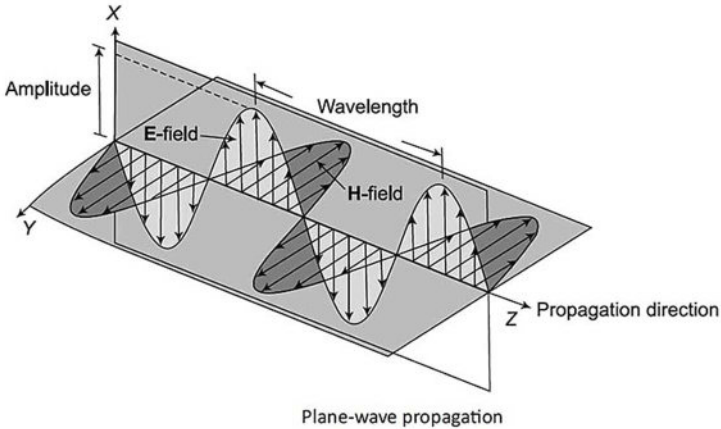
(1) **กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า** มีความหมายว่า ฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิที่ผ่านผิวปิดใดๆจะเท่ากับ ประจุสุทธิภายในผิวปิดนั้น ภายใต้ภาวะสมดุลทางไฟฟ้าสถิตจะไม่มีประจุสุทธิใดๆ ภายในตัวนำกลวง ซึ่งเส้นสนามไฟฟ้าจะออกจากประจุบวกและสิ้นสุดที่ประจุลบ

(2) **กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก** มีความหมายว่า ฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิที่ผ่านผิวปิดใดๆ จะมีค่าเป็นศูนย์ เส้นสนามแม่เหล็กที่พุ่งเข้าสู่ปริมาตรภายในผิวปิดจะพุ่งออกจากปริมาตรภายในผิวปิดเท่าเดิม เป็นการบ่งชี้ว่าเส้นสนามแม่เหล็กจะไม่เริ่มต้นและสิ้นสุดที่จุดใด โดยเส้นสนามแม่เหล็กจะวนเป็นวงปิด บอกได้ว่าในชีวิตประจำวันเราจะไม่พบแม่เหล็กที่มีขั้วแยกจากกันโดยชัดเจน นั่นคือเราจะไม่พบแม่เหล็กที่มีขั้วเหนือเพียงขั้วเดียวหรือแม่เหล็กที่มีขั้วใต้เพียงขั้วเดียว

(3) **กฎของฟาราเดย์** มีความหมายว่า ปรากฏการณ์ที่มีกระแสเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในวงตัวนำ เมื่อตัวนำอยู่ในสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะสร้างสนามไฟฟ้า ทั้งนี้สนามไฟฟ้าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในหนึ่งหน่วยเวลา และจะเกิดในทิศทางหมุนวน

(4) **กฎของแอมแปร์** มีความหมายว่า สนามแม่เหล็กจะเกิดจากกระแสไฟฟ้าหรือประจุที่เคลื่อนที่ และเกิดจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไฟฟ้า ปรากฏการณ์การเกิดแรงแม่เหล็กระหว่างตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งเป็นการแสดงว่า สนามแม่เหล็กเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุ และเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ไฟฟ้า และฟลักซ์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจะสร้างสนามแม่เหล็ก ทั้งนี้สนามแม่เหล็กเกิดได้จากกระแสไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในหนึ่งหน่วยเวลาโดยจะเกิดในทิศทางหมุนวน

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในทิศทางแกน  $z$  จะมีลักษณะดังนี้

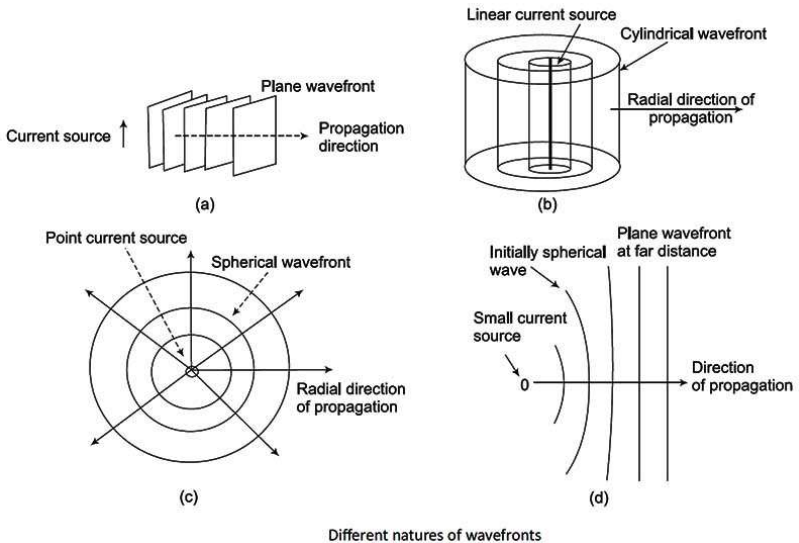


ภาพที่ 1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายในทิศทางแกน  $z$   
ที่มา: Das and Das (2015)

Fig. 2.1 Plane-wave propagation

เมื่อแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ามีการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแพร่กระจายไปในตัวกลาง ซึ่งองค์ประกอบของสนามจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนที่มีทั้ง แอมพลิจูด และเฟส ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระบบพิกัดและเวลา ทั้งนี้พื้นผิวที่มีค่าเฟสคงที่จะถูกเรียกว่า หน้าคลื่น (Wavefront) โดยแหล่งกำเนิดแบบจุด หรือแหล่งกำเนิดที่มีขนาดเล็กมาก จะให้คลื่นที่เท่ากันในทุกทิศทางและมีหน้าคลื่นเป็นทรงกลมซึ่งจะเรียกคลื่นนี้ว่า คลื่นทรงกลม (Spherical wave) ส่วนแหล่งกำเนิดกระแสเชิงเส้นจะให้คลื่นที่มีหน้าคลื่นเป็นทรงกระบอกโดยเรียกคลื่นนี้ว่า คลื่นทรงกระบอก

(Cylindrical wave) และถ้าคลื่นมีหน้าคลื่นเป็นระนาบ คลื่นนี้จะถูกเรียกว่า คลื่นระนาบ (Plane wave) ทั้งนี้คลื่นทรงกลมและคลื่นทรงกระบอกที่ระยะทางไกลมากอาจพิจารณาได้ว่าเป็น คลื่นระนาบ



ภาพที่ 1.2 หน้าคลื่นประเภทต่างๆ

ที่มา: Das and Das (2015)

Different natures of wavefronts

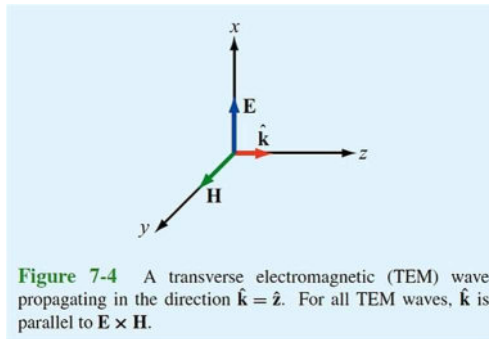
สนามไฟฟ้า ในพิกัดคาร์ทีเซียน หรือพิกัดฉาก ได้แก่

$$E(x, y, z; t) = \text{Re} \left[ \tilde{E}(x, y, z) e^{j\omega t} \right] \quad (1.12)$$

สมการคลื่นสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้แก่

$$\nabla^2 E = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1.13)$$

$$\nabla^2 H = \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (1.14)$$



ภาพที่ 1.3 คลื่นที่แพร่กระจายในทิศทาง  $\hat{\mathbf{k}} = \hat{\mathbf{z}}$

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Figure 7-4 A transverse electromagnetic (TEM) wave

propagating in the direction  $\hat{\mathbf{k}} = \hat{\mathbf{z}}$

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่แพร่กระจายในทิศทาง +z โดยมี

สนาม E ตามทิศทาง  $\hat{x}$

$$\tilde{E}(z) = \hat{x}\tilde{E}_x^+(z) = \hat{x}E_{x0}^+ e^{-jkz} \quad (1.15)$$

$$\tilde{H}(z) = \hat{y} \frac{\tilde{E}_x^+(z)}{\eta} = \hat{y} \frac{E_{x0}^+}{\eta} e^{-jkz} \quad (1.16)$$

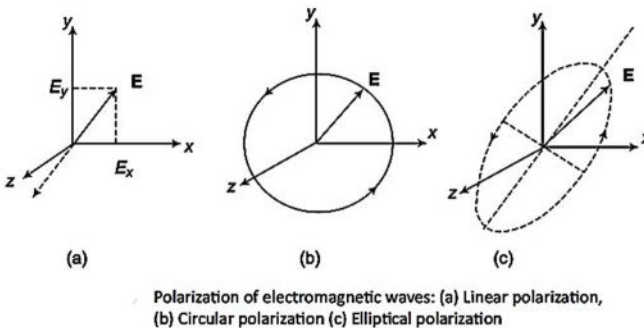
สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ณ ขณะใดขณะหนึ่ง ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง จะได้แก่

$$E_{x0}^+ = |E_{x0}^+| e^{j\phi^+} \quad (1.17)$$

$$E(z, t) = \text{Re}[\tilde{E}(z) e^{j\omega t}] = \hat{x} |E_{x0}^+| \cos(\omega t - kz + \phi^+) \text{ V/m} \quad (1.18)$$

$$H(z, t) = \text{Re}[\tilde{H}(z) e^{j\omega t}] = \hat{y} \frac{|E_{x0}^+|}{\eta} \cos(\omega t - kz + \phi^+) \text{ A/m} \quad (1.19)$$

**โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** (Polarization of electromagnetic waves) คือ การแสดงสถานะรูปแบบของทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า  $E$  ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็น โพลาริเซชันเชิงเส้น หรือโพลาริเซชันวงกลม หรือโพลาริเซชันวงรี (Das and Das, 2015)



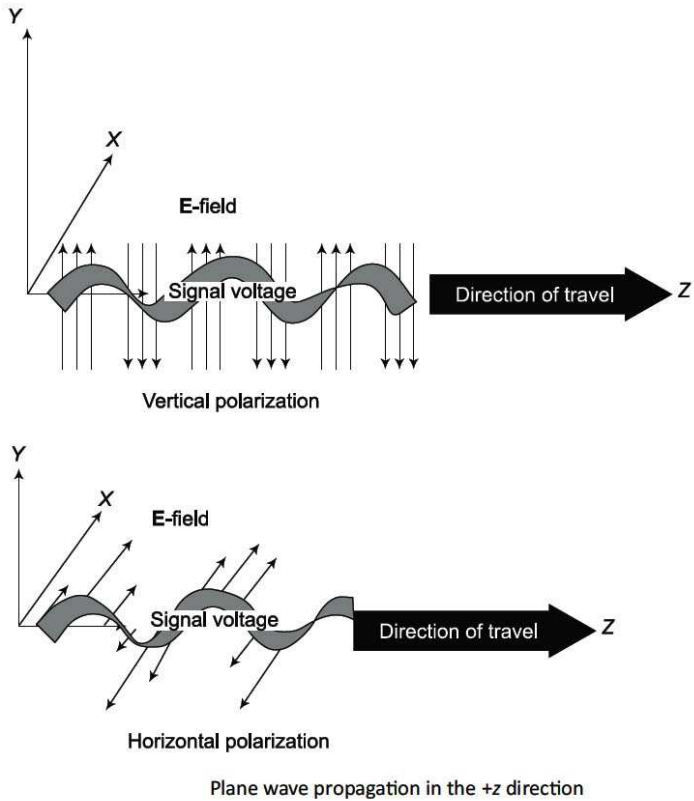
ภาพที่ 1.4 โพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: Das and Das (2015)

Fig. 2.24 Polarization of electromagnetic waves: (a) Linear polarization, (b) Circular polarization, (c) Elliptical polarization

### โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization)

สำหรับคลื่นระนาบที่แพร่กระจายตามทิศทาง  $+z$  สนามไฟฟ้า  $E = E(z, t)$  จะประกอบด้วยสององค์ประกอบที่ตั้งฉากกัน โดย  $E_x = E_{x0} \cos \omega t$  และ  $E_y = E_{y0} \cos(\omega t + \theta)$  ซึ่งในกรณีที่สนามไฟฟ้ามีเพียงหนึ่งองค์ประกอบในทิศทาง  $x$  หรือ  $y$  จะกล่าวว่คลื่นนี้มีโพลาริเซชันเป็นแบบเชิงเส้นในทิศทาง  $x$  หรือ  $y$



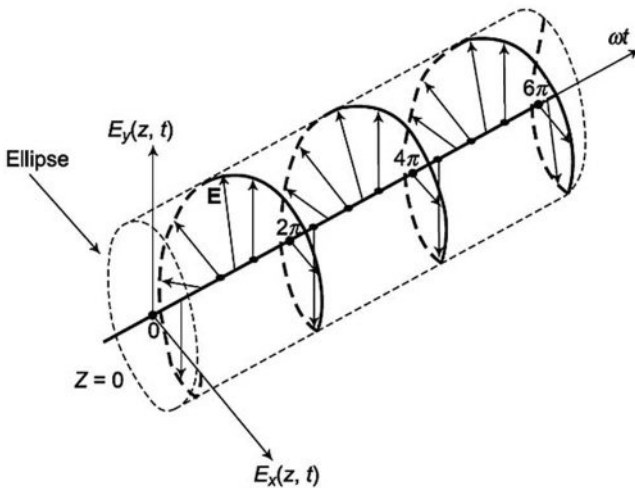
ภาพที่ 1.5 โพลาริเซชันแบบเชิงเส้น

ที่มา: Das and Das (2015)

Fig. 2.25 Plane wave propagation in the  $+z$  direction

### โพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical Polarization)

สำหรับคลื่นระนาบที่แพร่กระจายในทิศทาง  $+z$  สนามไฟฟ้าจะประกอบด้วยสององค์ประกอบที่ตั้งฉากกัน โดย  $\mathbf{E} = \hat{x}E_x + \hat{y}E_y$  ซึ่ง  $E_x = E_{x0} \cos \omega t$  และ  $E_y = E_{y0} \cos (\omega t + \theta)$  เมื่อ  $-\pi \leq \theta \leq \pi$  เวกเตอร์สนามไฟฟ้าตามเวลา จะมีลักษณะเป็นวงรีตามภาพดังนี้



Polarization of a plane electromagnetic wave at  $z = 0$  as a function of time

ภาพที่ 1.6 โพลาริเซชันแบบวงรีตามเวลา

ที่มา: Das and Das (2015)

Fig. 2.26 Polarization of a plane electromagnetic wave at  $z = 0$  as a function of time

กรณีนี้ ถ้า  $\theta = -\pi/2$  โดย  $E = x E_{x0} \cos(\omega t) + y E_{y0} \sin(\omega t)$  ซึ่ง

$\cos(\omega t) = E_x / E_{x0}$  และ  $\sin(\omega t) = E_y / E_{y0}$  จะได้ว่า

$(E_x^2 / E_{x0}^2) + (E_y^2 / E_{y0}^2) = 1$  ถ้า  $E_{x0} \neq E_{y0}$  คลื่นจะมีโพลาไรเซชันแบบวงรี  
ที่มี  $E_{x0}$  เป็นแกนหลัก และ  $E_{y0}$  เป็นแกนรอง

กรณีนี้ ถ้า  $\theta = +\pi/2$  โดย  $E = x E_{x0} \cos(\omega t) - y E_{y0} \sin(\omega t)$  ซึ่ง

$\cos(\omega t) = E_x / E_{x0}$  และ  $\sin(\omega t) = -E_y / E_{y0}$  จะได้ว่า

$(E_x^2 / E_{x0}^2) + (E_y^2 / E_{y0}^2) = 1$  ถ้า  $E_{x0} \neq E_{y0}$  คลื่นจะมีโพลาไรเซชันแบบวงรี  
ที่มี  $E_{x0}$  เป็นแกนหลัก และ  $E_{y0}$  เป็นแกนรอง

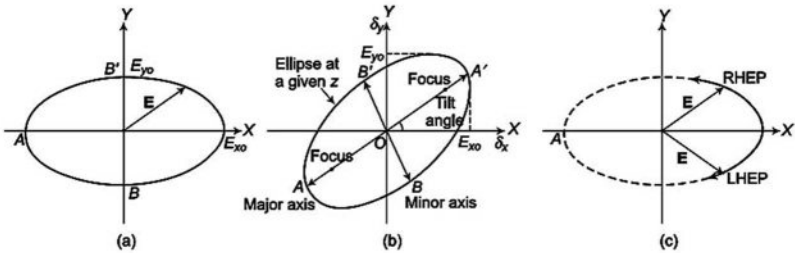
ทั้งนี้  $E_y$  อาจตาม หรือ นำ  $E_x$  ในทางเวลา โดยที่ สนามไฟฟ้ามีการ  
เปลี่ยนแปลงทั้ง ขนาด (Magnitude) และทิศทาง ซึ่งจะทำให้เกิด  
โพลาไรเซชันแบบวงรี ที่อัตราการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ารอบจุดกำเนิด  
จะเป็น  $\omega$  เรเดียนต่อวินาที (radian/second)

กรณีนี้ ถ้า  $\theta \neq \pm \pi / 2$  วงรีจะเอียงไปตามแกน  $x$  และ แกน  $y$  ซึ่งการเอียง  
ของแกนหลัก จะขึ้นกับ  $E_{x0}$ ,  $E_{y0}$  และ  $\theta$  ตามความสัมพันธ์นี้ได้แก่

$$\text{Tilt} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2 \cdot E_{x0} E_{y0} \cos \theta}{E_{x0}^2 - E_{y0}^2} \right] \quad (1.20)$$

โดยอัตราส่วน ความยาวของแกนหลักของวงรี ต่อ ความยาวของแกนรองของ  
วงรี จะเรียกว่า Axial ratio

ส่วนกรณีนี้ ถ้า  $-\pi/2 \leq \theta \leq 0$  คลื่นจะมีโพลาไรเซชันเป็นแบบวงรีมือขวา (Right-Handed Elliptical Polarization: RHEP) หรือหมุนทวนเข็มนาฬิกา และ ถ้า  $\pi/2 \geq \theta > 0$  คลื่นจะมีโพลาไรเซชันเป็นแบบวงรีมือซ้าย (Left-Handed Elliptical Polarization: LHEP) หรือ หมุนตามเข็มนาฬิกา



Polarization ellipse of a plane electromagnetic wave at  $z = 0$  on  $xy$  plane

ภาพที่ 1.7 ประเภทของโพลาไรเซชันแบบวงรี

ที่มา: Das and Das (2015)

Fig. 2.27 Polarization ellipse of a plane electromagnetic wave at  $z = 0$  on  $xy$  plane

### โพลาไรเซชันแบบวงกลม (Circular Polarization)

เมื่อ  $\theta = \pm \pi / 2$  และ  $E_{x0} = E_{y0} = E_0$  จะได้ว่า  $E_x^2 + E_y^2 = E_0^2$

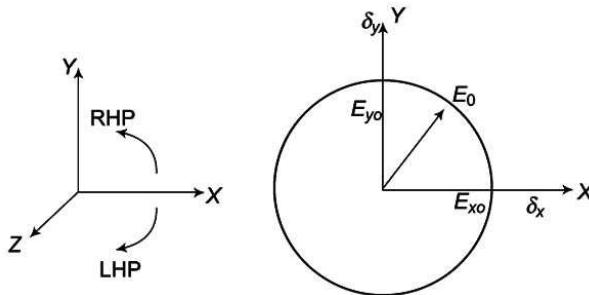
ซึ่งเป็นสมการวงกลม ที่มีรัศมี  $E_0$  มีจุดศูนย์กลางที่  $(0, 0)$

โดย ถ้า  $E_y$  ตาม  $E_x$  ด้วยค่า  $\pi / 2$  หรือ  $\theta = -\pi / 2$

คลื่นจะมีโพลาไรเซชันเป็นแบบวงกลมมือขวา (RHCP) หมุนทวนเข็มนาฬิกา

และถ้า  $E_y$  นำ  $E_x$  ด้วยค่า  $\pi / 2$  หรือ  $\theta = +\pi / 2$

คลื่นจะมีโพลาไรเซชันเป็นแบบวงกลมมือซ้าย (LHCP) หมุนตามเข็มนาฬิกา



Left and right-hand circular polarizations

ภาพที่ 1.8 โพลาไรเซชันแบบวงกลม

ที่มา: Das and Das (2015)

Fig. 2.28 Left and right-hand circular polarizations

## คลื่นระนาบแพร่กระจายในตัวกลางไร้การสูญเสีย

(Ulaby and Ravaioli, 2015)

สำหรับ สมการแมกซ์เวลล์ ในเฟเซอร์โดเมนจะได้แก่

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{E}} = \tilde{\rho}_v / \varepsilon$$

(1.21)

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = -j\omega\mu\tilde{\mathbf{H}} \quad (1.22)$$

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{H}} = 0 \quad (1.23)$$

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{J}} + j\omega\varepsilon\tilde{\mathbf{E}} \quad (1.24)$$

เขียนสมการที่ 1.24 ใหม่จะได้ว่า

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{J}} + j\omega\varepsilon\tilde{\mathbf{E}} = (\sigma + j\omega\varepsilon)\tilde{\mathbf{E}} = j\omega\left(\varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega}\right)\tilde{\mathbf{E}} \quad (1.25)$$

ค่าเพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนได้แก่

$$\varepsilon_c = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \quad (1.26)$$

เขียนสมการที่ 1.25 ใหม่จะได้ว่า

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = j\omega\varepsilon_c\tilde{\mathbf{E}} \quad (1.27)$$

ให้  $\tilde{\rho}_v = 0$  จะได้สมการ สมการแมกซ์เวลล์ ว่า

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{E}} = 0 \quad (1.28)$$

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = -j\omega\mu\tilde{\mathbf{H}} \quad (1.29)$$

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{H}} = 0 \quad (1.30)$$

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = j\omega\varepsilon_c\tilde{\mathbf{E}} \quad (1.31)$$

เขียนสมการที่ 1.26 ใหม่จะได้ว่า

$$\varepsilon_c = \varepsilon - j\frac{\sigma}{\omega} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1.32)$$

โดย

$$\varepsilon' = \varepsilon \quad (1.33)$$

$$\varepsilon'' = \sigma/\omega \quad (1.34)$$

จาก 1.29 ใส่ curl ทั้งสองด้านจะได้ว่า

$$\nabla \times (\nabla \times \tilde{\mathbf{E}}) = -j\omega\mu(\nabla \times \tilde{\mathbf{H}}) \quad (1.35)$$

แทนสมการ 1.31 ใน 1.35

$$\nabla \times (\nabla \times \tilde{\mathbf{E}}) = -j\omega\mu(j\omega\varepsilon_c\tilde{\mathbf{E}}) = \omega^2\mu\varepsilon_c\tilde{\mathbf{E}} \quad (1.36)$$

curl ของ curl ของ  $\tilde{\mathbf{E}}$  ได้แก่

$$\nabla \times (\nabla \times \tilde{\mathbf{E}}) = \nabla(\nabla \cdot \tilde{\mathbf{E}}) - \nabla^2\tilde{\mathbf{E}} \quad (1.37)$$

สำหรับในพิกัดคาร์ทีเซียนจะได้ว่า

$$\nabla^2\tilde{\mathbf{E}} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\tilde{\mathbf{E}} \quad (1.38)$$

$$\nabla^2\tilde{\mathbf{E}} + \omega^2\mu\varepsilon_c\tilde{\mathbf{E}} = 0 \quad (1.40)$$

ค่าคงที่การแพร่กระจาย

$$\gamma^2 = -\omega^2\mu\varepsilon_c \quad (1.41)$$

ดังนั้น สามารถเขียนสมการคลื่น สำหรับ  $\tilde{\mathbf{E}}$  ได้ว่า

$$\nabla^2\tilde{\mathbf{E}} - \gamma^2\tilde{\mathbf{E}} = 0 \quad (1.42)$$

ดังนั้น สามารถเขียนสมการคลื่น สำหรับ  $\tilde{\mathbf{H}}$  ได้ว่า

$$\nabla^2\tilde{\mathbf{H}} - \gamma^2\tilde{\mathbf{H}} = 0 \quad (1.43)$$

ในตัวกลางไร้การสูญเสีย  $\varepsilon_c = \varepsilon$  สมการ 1.41 เขียนใหม่ได้ว่า

$$\gamma^2 = -\omega^2\mu\varepsilon \quad (1.44)$$

เลขคลื่น (Wavenumber) จะได้แก่

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \quad (1.45)$$

สามารถเขียนสมการ 1.42 ใหม่ได้ว่า

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}} + k^2 \tilde{\mathbf{E}} = 0 \quad (1.46)$$

เฟเซอร์ของสนามไฟฟ้า ในพิกัดคาร์ทีเซียนจะได้แก่

$$\tilde{\mathbf{E}} = \hat{x}\tilde{E}_x + \hat{y}\tilde{E}_y + \hat{z}\tilde{E}_z \quad (1.47)$$

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) (\hat{x}\tilde{E}_x + \hat{y}\tilde{E}_y + \hat{z}\tilde{E}_z) + k^2 (\hat{x}\tilde{E}_x + \hat{y}\tilde{E}_y + \hat{z}\tilde{E}_z) = 0 \quad (1.48)$$

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \tilde{E}_x = 0 \quad (1.49)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{\partial \tilde{E}_x}{\partial x} = \frac{\partial \tilde{E}_x}{\partial y} = 0 \quad (1.50)$$

จะได้ว่า

$$\frac{d^2 \tilde{E}_x}{dz^2} + k^2 \tilde{E}_x = 0 \quad (1.51)$$

เมื่อ  $\tilde{E}_z = 0$  และ  $\tilde{H}_z = 0$

จะได้ว่า

$$\hat{z} \left( \frac{\partial \tilde{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \tilde{H}_x}{\partial y} \right) = \hat{z} j\omega\epsilon \tilde{E}_z \quad (1.52)$$

เมื่อ  $\frac{\partial \tilde{H}_y}{\partial x} = \frac{\partial \tilde{H}_x}{\partial y} = 0$

จะได้ว่า เวกเตอร์  $\tilde{E}_x$

$$\tilde{E}_x(z) = \tilde{E}_x^+(z) + \tilde{E}_x^-(z) = E_{x0}^+ e^{-jkz} + E_{x0}^- e^{jkz} \quad (1.53)$$

เมื่อ

$$\tilde{E}(z) = \hat{x} \tilde{E}_x^+(z) = \hat{x} E_{x0}^+ e^{-jkz} \quad (1.54)$$

เมื่อ  $\tilde{E}_y = \tilde{E}_z = 0$  จะได้ว่า

$$\nabla \times \tilde{E} = -j\omega\mu (\hat{x} \tilde{H}_x + \hat{y} \tilde{H}_y + \hat{z} \tilde{H}_z) \quad (1.55)$$

ดังนั้นสำหรับคลื่นระนาบสม่ำเสมอที่เดินทางในทิศทาง +z

$$\frac{\partial E_x^+(z)}{\partial x} = \frac{\partial E_x^+(z)}{\partial y} = 0 \quad (1.56)$$

เมื่อ  $\tilde{H}_x = 0$  (1.57)

$$\tilde{H}_y = \frac{1}{-j\omega\mu} \frac{\partial \tilde{E}_x^+(z)}{\partial z} \quad (1.58)$$

$$\tilde{H}_z = \frac{1}{-j\omega\mu} \frac{\partial E_x^+(z)}{\partial y} = 0 \quad (1.59)$$

จะได้ว่า

$$\tilde{H}_y(z) = \frac{k}{\omega\mu} E_{x0}^+ e^{-jkz} = H_{y0}^+ e^{-jkz} \quad (1.60)$$

โดย

$$H_{y0}^+ = \frac{k}{\omega\mu} E_{x0}^+ \quad (1.61)$$

อิมพีแดนซ์จำเพาะ (Intrinsic impedance) ของตัวกลางไร้การสูญเสีย

จะได้แก่

$$\eta = \frac{\omega\mu}{k} = \frac{\omega\mu}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad \Omega \quad (1.62)$$

$$\tilde{E}(z) = \hat{x} \tilde{E}_x^+(z) = \hat{x} E_{x0}^+ e^{-jkz} \quad (1.63)$$

$$\tilde{H}(z) = \hat{y} \frac{\tilde{E}_x^+(z)}{\eta} = \hat{y} \frac{E_{x0}^+}{\eta} e^{-jkz} \quad (1.64)$$

สำหรับกรณีทั่วไป  $E_{x0}^+$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน ที่มีขนาด  $|E_{x0}^+|$  และเฟส  $\phi^+$

$$E_{x0}^+ = |E_{x0}^+| e^{j\phi^+} \quad (1.65)$$

ดังนั้น สนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็ก ขณะใดขณะหนึ่ง จะได้แก่

$$E(z, t) = \text{Re}[\tilde{E}(z)e^{j\omega t}] = \hat{x}|E_{x0}^+| \cos(\omega t - kz + \phi^+) \quad \text{V/m} \quad (1.66)$$

$$H(z, t) = \text{Re}[\tilde{H}(z)e^{j\omega t}] = \hat{y} \frac{|E_{x0}^+|}{\eta} \cos(\omega t - kz + \phi^+) \quad \text{A/m} \quad (1.67)$$

ความเร็วเฟสของคลื่นจะได้แก่

$$u_p = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\omega\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad \text{m/s} \quad (1.68)$$

ความยาวคลื่นจะได้แก่

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{u_p}{f} \quad \text{m} \quad (1.69)$$

สำหรับในสุญญากาศ ความเร็วเฟสจะได้แก่

$$u_p = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \quad \text{m/s} \quad (1.70)$$

สำหรับในสุญญากาศ อิมพีแดนซ์จำเพาะ (Intrinsic impedance) จะได้แก่

$$\eta = \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \, \Omega \approx 120\pi \, \Omega \quad (1.71)$$

เฟเซอร์สนามไฟฟ้า  $\tilde{\mathbf{E}}$  เฟเซอร์สนามแม่เหล็ก  $\tilde{\mathbf{H}}$  และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยแสดงทิศทาง  $\hat{\mathbf{k}}$  จะมีความสัมพันธ์ได้แก่

$$\tilde{\mathbf{H}} = \frac{1}{\eta} \hat{\mathbf{k}} \times \tilde{\mathbf{E}} \quad (1.72)$$

$$\tilde{\mathbf{E}} = -\eta \hat{\mathbf{k}} \times \tilde{\mathbf{H}} \quad (1.73)$$

สำหรับคลื่นที่แพร่กระจายในทิศทาง  $\hat{\mathbf{k}} = \hat{\mathbf{z}}$ ,  $\tilde{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{x}} \tilde{E}_x^+(z)$  จะได้ว่า

$$\tilde{\mathbf{H}} = \frac{1}{\eta} \hat{\mathbf{k}} \times \tilde{\mathbf{E}} = \frac{1}{\eta} (\hat{\mathbf{z}} \times \hat{\mathbf{x}}) \tilde{E}_x^+(z) = \hat{\mathbf{y}} \frac{\tilde{E}_x^+(z)}{\eta} \quad (1.74)$$

สำหรับคลื่นที่เดินทางในทิศทาง  $-z$  สนามไฟฟ้าจะได้แก่

$$\tilde{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{x}} \tilde{E}_x^-(z) = \hat{\mathbf{x}} E_{x0}^- e^{jkz} \quad (1.75)$$

จะได้ว่าสนามแม่เหล็ก ได้แก่

$$\tilde{\mathbf{H}} = \frac{1}{\eta} (-\hat{\mathbf{z}} \times \hat{\mathbf{x}}) \tilde{E}_x^-(z) = -\hat{\mathbf{y}} \frac{\tilde{E}_x^-(z)}{\eta} = -\hat{\mathbf{y}} \frac{E_{x0}^-}{\eta} e^{jkz} \quad (1.76)$$

สำหรับในกรณีทั่วไป คลื่นระนาบสม่ำเสมอ ที่เดินทางในทิศทาง  $+z$  ที่มีองค์ประกอบ  $x$  และ  $y$  จะได้แก่

$$\tilde{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{x}} \tilde{E}_x^+(z) + \hat{\mathbf{y}} \tilde{E}_y^+(z) \quad (1.77)$$

$$\tilde{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{x}} \tilde{H}_x^+(z) + \hat{\mathbf{y}} \tilde{H}_y^+(z) \quad (1.78)$$

$$\tilde{\mathbf{H}} = \frac{1}{\eta} \hat{\mathbf{z}} \times \tilde{\mathbf{E}} = -\hat{\mathbf{x}} \frac{\tilde{E}_y^+(z)}{\eta} + \hat{\mathbf{y}} \frac{\tilde{E}_x^+(z)}{\eta} \quad (1.79)$$

$$\tilde{H}_x^+(z) = -\frac{\tilde{E}_y^+(z)}{\eta}, \quad \tilde{H}_y^+(z) = \frac{\tilde{E}_x^+(z)}{\eta} \quad (1.80)$$

### คลื่นระนาบแพร่กระจายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

(Ulaby and Ravaioli, 2015)

สำหรับคลื่นที่แพร่กระจายในตัวกลางที่มีการสูญเสีย จะมีสมการคลื่นได้แก่

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}} - \gamma^2 \tilde{\mathbf{E}} = 0 \quad (1.81)$$

โดย

$$\gamma^2 = -\omega^2 \mu \epsilon_c = -\omega^2 \mu (\epsilon' - j\epsilon'') \quad (1.82)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (1.83)$$

$$(\alpha + j\beta)^2 = (\alpha^2 - \beta^2) + j2\alpha\beta = -\omega^2 \mu \epsilon' + j\omega^2 \mu \epsilon'' \quad (1.84)$$

$$\alpha^2 - \beta^2 = -\omega^2 \mu \epsilon' \quad (1.85)$$

$$2\alpha\beta = \omega^2 \mu \epsilon'' \quad (1.86)$$

ค่าคงที่การลดทอน (Attenuation constant) ของตัวกลาง จะได้แก่

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu \epsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad \text{Np/m} \quad (1.87)$$

ค่าคงที่เฟส (Phase constant) จะได้แก่

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu \epsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad \text{rad/m} \quad (1.88)$$

คลื่นระนาบสม่ำเสมอ ที่มีสนามไฟฟ้า  $\tilde{E} = \hat{x}\tilde{E}_x(z)$  ที่เดินทางในทิศทาง  $z$  มีสมการคลื่นได้แก่

$$\frac{d^2\tilde{E}_x(z)}{dz^2} - \gamma^2\tilde{E}_x(z) = 0 \quad (1.89)$$

จะได้ว่า

$$\tilde{E}(z) = \hat{x}\tilde{E}_x(z) = \hat{x}E_{x0}e^{-\gamma z} = \hat{x}E_{x0}e^{-\alpha z}e^{-j\beta z} \quad (1.90)$$

$$\tilde{H}(z) = \hat{y}\tilde{H}_y(z) = \hat{y}\frac{\tilde{E}_x(z)}{\eta_c} = \hat{y}\frac{E_{x0}}{\eta_c}e^{-\alpha z}e^{-j\beta z} \quad (1.91)$$

เมื่อ

$$\eta_c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_c}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}}\left(1 - j\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^{-1/2} \quad \Omega \quad (1.92)$$

ขนาดของ  $\tilde{E}_x(z)$  จะได้แก่

$$|\tilde{E}_x(z)| = |E_{x0}e^{-\alpha z}e^{-j\beta z}| = |E_{x0}|e^{-\alpha z} \quad (1.93)$$

เมื่อ ระยะทาง  $\delta_s$  จะเรียกว่า ความลึกผิว (Skin depth) ของตัวกลาง ที่เป็น การอธิบายถึงความลึกที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถ ทะลุผ่านเข้าไปในตัวกลางที่เป็นตัวนำ

$$\delta_s = 1/\alpha \quad (1.94)$$

ทั้งนี้เมื่อ

กรณี  $\epsilon''/\epsilon' \ll 1$  จะเรียกดัวยกกลางนี้ว่า ไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสียต่ำ

(Low-loss dielectric) โดยในทางปฏิบัติกรณีนี้จะมีค่าประมาณ

$$\epsilon''/\epsilon' < 10^{-2}$$

กรณี  $\epsilon''/\epsilon' \gg 1$  จะเรียกดัวยกกลางนี้ว่า ตัวนำที่ดี (Good conductor) โดย

ในทางปฏิบัติกรณีนี้จะมีค่าประมาณ  $\epsilon''/\epsilon' > 10^{-2}$

$$\text{กรณี } 10^{-2} \leq \epsilon''/\epsilon' \leq 10^2$$

จะเรียกว่า ดัวยกกลางกึ่งตัวนำ (Quasi-conductor)

สำหรับดัวยกกลางที่เป็น ไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสียต่ำ จะมีค่าคงตัวการ

แพร่กระจายว่า

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left(1 - j\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^{1/2} \quad (1.95)$$

โดย กรณีที่  $|x| \ll 1$  พังก์ชัน  $(1-x)^{1/2}$  สามารถประมาณการได้ด้วย

อนุกรมไบนอมิเยล (Binomial series) สองพจน์แรกได้แก่

$(1-x)^{1/2} \approx 1 - x/2$  สำหรับดัวยกกลางที่เป็น ไดอิเล็กทริกที่มีการสูญเสีย

ต่ำ โดย  $x = j\epsilon''/\epsilon'$  และ  $\epsilon''/\epsilon' \ll 1$  จะได้ว่า

$$\gamma \approx j\omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left(1 - j\frac{\epsilon''}{2\epsilon'}\right) \quad (1.96)$$

ซึ่งมี ส่วนจริง และส่วนจินตภาพ ได้แก่

$$\alpha \approx \frac{\omega\epsilon''}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \text{Np/m} \quad (1.97)$$

$$\beta \approx \omega\sqrt{\mu\epsilon'} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad \text{rad/m} \quad (1.98)$$

จาก การประมาณไบโนเมียล  $(1 - x)^{-1/2} \approx (1 + x/2)$  จะได้ว่า

$$\eta_c \approx \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \left(1 + j \frac{\epsilon''}{2\epsilon'}\right) = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left(1 + j \frac{\sigma}{2\omega\epsilon}\right) \quad (1.99)$$

เมื่อ  $\epsilon''/\epsilon' = \sigma/\omega\epsilon < 10^{-2}$  สามารถตัดพจน์ที่สองของสมการ 1.99 ออกได้ ซึ่งจะได้ว่า

$$\eta_c \approx \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.100)$$

สำหรับกรณีที่  $\epsilon''/\epsilon' > 100$  จะได้ว่า ค่าคงที่การลดทอน ค่าคงที่เฟส และ อิมพีแดนซ์จำเพาะ จะได้แก่

$$\alpha \approx \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon''}{2}} = \omega \sqrt{\frac{\mu\sigma}{2\omega}} = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad \text{Np/m} \quad (1.101)$$

$$\beta = \alpha \approx \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad \text{rad/m} \quad (1.102)$$

$$\eta_c \approx \sqrt{j \frac{\mu}{\epsilon''}} = (1 + j) \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} = (1 + j) \frac{\alpha}{\sigma} \quad \Omega \quad (1.103)$$

คุณลักษณะของตัวกลางประเภทต่าง ๆ

**Expressions for  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta_c$ ,  $u_p$ , and  $\lambda$  for various types of media.**

	Any Medium	Lossless Medium ( $\sigma = 0$ )	Low-loss Medium ( $\epsilon''/\epsilon' \ll 1$ )	Good Conductor ( $\epsilon''/\epsilon' \gg 1$ )	Units
$\alpha =$	$\omega \left[ \frac{\mu\epsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right] \right]^{1/2}$	0	$\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$	$\sqrt{\pi f \mu \sigma}$	(Np/m)
$\beta =$	$\omega \left[ \frac{\mu\epsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right] \right]^{1/2}$	$\omega \sqrt{\mu\epsilon}$	$\omega \sqrt{\mu\epsilon}$	$\sqrt{\pi f \mu \sigma}$	(rad/m)
$\eta_c =$	$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \left( 1 - j \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^{-1/2}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$	$(1 + j) \frac{\alpha}{\sigma}$	( $\Omega$ )
$u_p =$	$\omega/\beta$	$1/\sqrt{\mu\epsilon}$	$1/\sqrt{\mu\epsilon}$	$\sqrt{4\pi f/\mu\sigma}$	(m/s)
$\lambda =$	$2\pi/\beta = u_p/f$	$u_p/f$	$u_p/f$	$u_p/f$	(m)

Notes:  $\epsilon' = \epsilon$ ;  $\epsilon'' = \sigma/\omega$ ; in free space,  $\epsilon = \epsilon_0$ ,  $\mu = \mu_0$ ; in practice, a material is considered a low-loss medium if  $\epsilon''/\epsilon' = \sigma/\omega\epsilon < 0.01$  and a good conducting medium if  $\epsilon''/\epsilon' > 100$ .

ภาพที่ 1.9 คุณลักษณะของตัวกลางประเภทต่าง ๆ

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Table 7-1 Expressions for  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta_c$ ,  $u_p$ , and  $\lambda$  for various types of media.

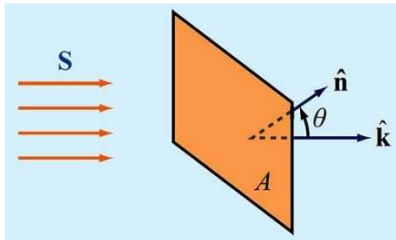
## ความหนาแน่นกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

(Ulaby and Ravaioli, 2015)

สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เวกเตอร์พอยน์ติง (Poynting vector:  $S$ ) คือ ปริมาณที่แสดงความหนาแน่นของการไหลของพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร โดยมีความสัมพันธ์ได้แก่

$$S = E \times H \quad \text{W/m}^2 \quad (1.104)$$

เวกเตอร์พอยน์ติง จะแสดงกำลังต่อหน่วยพื้นที่ ที่ถูกพาโดยคลื่น โดยถ้าคลื่น ตกกระทบ บนช่องเปิดของพื้นที่  $A$  ด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ออกจากพื้นผิว  $\hat{n}$  ตามภาพได้แก่



ภาพที่ 1.10 การไหลของกำลังผ่านช่องเปิด  $A$

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Figure 7-17 EM power flow through an aperture.

กำลังทั้งหมดที่ไหลผ่านช่องเปิดจะได้แก่

$$P = \int_A S \cdot \hat{n} \, dA \quad \text{W} \quad (1.105)$$

สำหรับคลื่นระนาบสม่ำเสมอที่แพร่กระจายในทิศทาง  $\hat{k}$  โดยทำมุม  $\theta$  กับ  $\hat{n}$

เมื่อ  $P = S A \cos \theta$  โดย  $S = |S|$

ความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยของคลื่น  $S_{av}$  ที่เป็นค่าเฉลี่ยตามเวลาของ  
เวกเตอร์พอยน์ติง ซึ่งจะได้แก่

$$S_{av} = \frac{1}{2} \text{Re} [\tilde{\mathbf{E}} \times \tilde{\mathbf{H}}^*] \quad \text{W/m}^2 \quad (1.106)$$

ทั้งนี้ กำลังเฉลี่ยตามเวลาที่ ถูกพาโดยสายนำสัญญาณจะได้แก่

$$P_{av}(z) = \frac{1}{2} \text{Re} [\tilde{V}(z) \tilde{I}^*(z)] \quad (1.107)$$

คลื่นระนาบในตัวกลางไร้การสูญเสีย

สำหรับสนามไฟฟ้าของคลื่นระนาบสม่ำเสมอ ที่เดินทางในทิศทาง  $+z$   
จะได้แก่

$$\tilde{\mathbf{E}}(z) = \hat{x} \tilde{E}_x(z) + \hat{y} \tilde{E}_y(z) = (\hat{x} E_{x0} + \hat{y} E_{y0}) e^{-jkz} \quad (1.108)$$

โดยขนาดของสนามไฟฟ้าจะได้แก่

$$|\tilde{\mathbf{E}}| = (\tilde{\mathbf{E}} \cdot \tilde{\mathbf{E}}^*)^{1/2} = \left[ |E_{x0}|^2 + |E_{y0}|^2 \right]^{1/2} \quad (1.109)$$

เฟเซอร์ของสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับ เฟเซอร์สนามไฟฟ้า ได้แก่

$$\tilde{\mathbf{H}}(z) = (\hat{x} \tilde{H}_x + \hat{y} \tilde{H}_y) e^{-jkz} \quad (1.110)$$

$$\tilde{\mathbf{H}}(z) = \frac{1}{\eta} \hat{z} \times \tilde{\mathbf{E}} = \frac{1}{\eta} (-\hat{x} E_{y0} + \hat{y} E_{x0}) e^{-jkz} \quad (1.111)$$

ซึ่งในตัวกลางไร้การสูญเสียจะได้ว่า

$$S_{av} = \hat{z} \frac{1}{2\eta} \left( |E_{x0}|^2 + |E_{y0}|^2 \right) = \hat{z} \frac{|\tilde{\mathbf{E}}|^2}{2\eta} \quad \text{W/m}^2 \quad (1.112)$$

โดยกำลังที่ไหลในทิศทาง  $z$  ด้วยความหนาแน่นกำลังเฉลี่ย จะเท่ากับ ผลรวม  
ของความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยของคลื่น  $(\tilde{E}_x, \tilde{H}_y)$  และ  $(\tilde{E}_y, \tilde{H}_x)$

สำหรับคลื่นระนาบในตัวกลางที่มีการสูญเสีย

โดยคลื่นระนาบที่มี x-polarized ที่แพร่กระจายตามทิศทาง z ในตัวกลางที่มีการสูญเสีย ด้วยค่าคงที่การแพร่กระจาย  $\gamma = \alpha + j\beta$  จะได้แก่

$$\tilde{E}(z) = \hat{x} \tilde{E}_x(z) + \hat{y} \tilde{E}_y(z) = (\hat{x} E_{x0} + \hat{y} E_{y0}) e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (1.113)$$

$$\tilde{H}(z) = \frac{1}{\eta_c} (-\hat{x} E_{y0} + \hat{y} E_{x0}) e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (1.114)$$

เมื่อ  $\eta_c$  คือ อิมพีแดนซ์จำเพาะ (Intrinsic impedance) ของตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ทั้งนี้ เมื่อ

$$S_{av}(z) = \frac{1}{2} \text{Re}[\tilde{E} \times \tilde{H}^*] = \frac{\hat{z} (|E_{x0}|^2 + |E_{y0}|^2)}{2} e^{-2\alpha z} \text{Re}\left(\frac{1}{\eta_c^*}\right) \quad (1.115)$$

$$\text{โดย } \eta_c = |\eta_c| e^{j\theta_\eta} \quad (1.116)$$

ดังนั้น สำหรับตัวกลางที่มีการสูญเสีย สามารถเขียน สมการ 1.115 ใหม่ได้ว่า

$$S_{av}(z) = \hat{z} \frac{|\tilde{E}(0)|^2}{2|\eta_c|} e^{-2\alpha z} \cos\theta_\eta \quad \text{W/m}^2 \quad (1.117)$$

โดยเมื่อ  $|\tilde{E}(0)|^2 = [ |E_{x0}|^2 + |E_{y0}|^2 ]^{1/2}$  คือขนาดของเฟเซอร์สนามไฟฟ้า ที่  $z = 0$

ดังนั้น

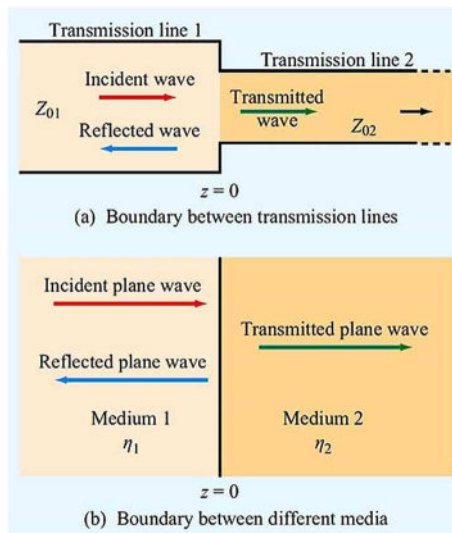
$$S_{av}(z) = \hat{z} \frac{[ |E_{x0}|^2 + |E_{y0}|^2 ]^{1/2}}{2|\eta_c|} e^{-2\alpha z} \cos\theta_\eta \quad \text{W/m}^2 \quad (1.118)$$

ทั้งนี้ ขนาดของ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะลดลงตามทิศทาง z ด้วย  $e^{-\alpha z}$  ส่วน ความหนาแน่นกำลัง  $S_{av}$  ลดลงด้วย  $e^{-2\alpha z}$

## การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นที่การตกกระทบแบบตั้งฉาก

(Ulaby and Ravaioli, 2015)

เมื่อคลื่นมีการแพร่กระจายไปยังรอยต่อระหว่างสองสายส่งสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่แตกต่างกัน คลื่นที่ตกกระทบรอยต่อ ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิด และอีกส่วนหนึ่งจะส่งผ่านรอยต่อไปยังอีกสายนำสัญญาณอีกเส้นหนึ่ง ซึ่งคล้ายคลึงกันกับคลื่นระนาบที่สม่ำเสมอที่แพร่กระจายตกกระทบบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะต่างกัน คลื่นตกกระทบส่วนหนึ่งก็จะสะท้อนกลับ และอีกส่วนหนึ่งก็จะส่งผ่าน ตามภาพดังนี้

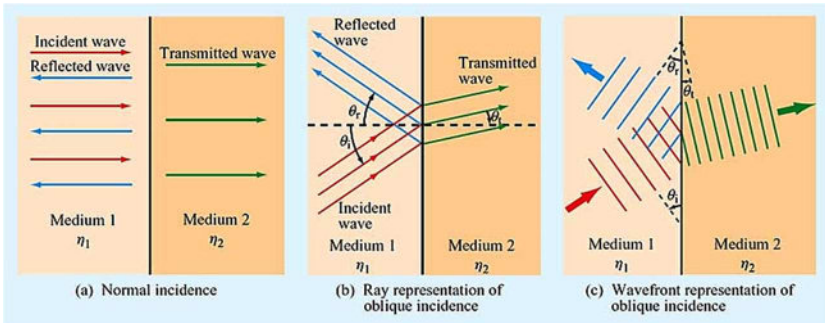


ภาพที่ 1.11 คลื่นตกกระทบ สะท้อน และส่งผ่าน ที่รอยต่อสายนำสัญญาณหรือตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกัน

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Figure 8-2 Discontinuity between two different transmission lines is analogous to that between two dissimilar media.

สำหรับคลื่นที่ตกกระทบตั้งฉาก และตกกระทบเฉียง ต่อตัวกลางที่มีค่า  
อิมพีแดนซ์คุณลักษณะต่างกันจะเป็นตามภาพดังนี้



ภาพที่ 1.12 การตกกระทบแบบตั้งฉาก และแบบเฉียง ต่อต่อตัวกลางที่มีค่า  
อิมพีแดนซ์คุณลักษณะต่างกัน

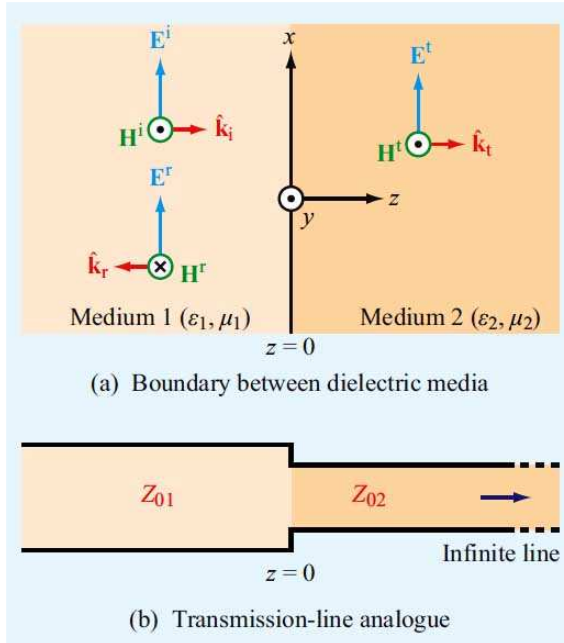
ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Figure 8-3 Ray representation of wave reflection and transmission at (a) normal incidence and (b) oblique incidence, and (c) wavefront representation of oblique incidence.

ทั้งนี้ รังสี จะเป็นเส้นที่แสดงทิศทางของการไหลของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ถูกพาโดยคลื่น ซึ่งจะขนานกับการแพร่กระจายของ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย  $\hat{k}$  โดยหน้าคลื่นจะเป็นพื้นผิวที่มีเฟสของคลื่นเป็นค่าคงที่ ซึ่งจะตั้งฉากกับ เวกเตอร์คลื่น  $\hat{k}$  ดังนั้น รังสี จะตั้งฉากกับหน้าคลื่น ทั้งนี้ เส้นรังสีจะแสดง คลื่นที่ ตกกระทบ สะท้อน และส่งผ่าน

การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นที่การตกกระทบแบบตั้งฉาก:  
ที่ขอบเขตระหว่างตัวกลางที่ไร้การสูญเสีย

(Ulaby and Ravaioli, 2015)



ภาพที่ 1.13 รอยต่อระหว่าง สองตัวกลาง และสองสายส่ง

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Figure 8-4 The two dielectric media separated by the  $x$ - $y$  plane in (a) can be represented by the transmission-line analogue in (b).

จากภาพข้างต้น ตัวกลางที่หนึ่ง มี Permittivity  $\epsilon_1$  และมี permeability  $\mu_1$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $z$  น้อยกว่าเท่ากับ 0 ส่วนตัวกลางที่สอง มี Permittivity  $\epsilon_2$  และมี permeability  $\mu_2$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $z$  มากกว่าเท่ากับ 0 โดยมีคลื่นระนาบที่มีโพลาไรซ์ตามแกน  $x$  ตกกระทบ ( $E^i, H^i$ ) แพร่กระจายจากตัวกลางที่หนึ่งไปยังตัวกลางที่สอง คลื่นสะท้อน ( $E^r, H^r$ ) ตามทิศทาง  $\hat{k}_r = -\hat{z}$  ในตัวกลางที่หนึ่ง และคลื่นส่งผ่าน ( $E^t, H^t$ ) ที่รอยต่อตัวกลางที่  $z=0$  ตามทิศทาง  $\hat{k}_t = \hat{z}$  ในตัวกลางที่สอง

คลื่นตกกระทบ

$$\tilde{E}^i(z) = \hat{x}E_0^i e^{-jk_1 z} \quad (1.119)$$

$$\tilde{H}^i(z) = \hat{z} \times \frac{\tilde{E}^i(z)}{\eta_1} = \hat{y} \frac{E_0^i}{\eta_1} e^{-jk_1 z} \quad (1.120)$$

คลื่นสะท้อน

$$\tilde{E}^r(z) = \hat{x}E_0^r e^{jk_1 z} \quad (1.121)$$

$$\tilde{H}^r(z) = (-\hat{z}) \times \frac{\tilde{E}^r(z)}{\eta_1} = -\hat{y} \frac{E_0^r}{\eta_1} e^{jk_1 z} \quad (1.122)$$

คลื่นส่งผ่าน

$$\tilde{E}^t(z) = \hat{x}E_0^t e^{-jk_2 z} \quad (1.123)$$

$$\tilde{H}^t(z) = \hat{z} \times \frac{\tilde{E}^t(z)}{\eta_2} = \hat{y} \frac{E_0^t}{\eta_2} e^{-jk_2 z} \quad (1.124)$$

โดยแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของคลื่น ตกกระทบ สะท้อน และส่งผ่าน จะได้แก่  $E_0^i, E_0^r, E_0^t$  ตามลำดับ ที่รอยต่อ  $z = 0$  ส่วนเลขคลื่น และ อินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ ของตัวกลางที่หนึ่งจะได้แก่

$k_1 = \omega\sqrt{\mu_1\varepsilon_1}$  และ  $\eta_1 = \sqrt{\mu_1/\varepsilon_1}$  ของตัวกลางที่สองได้แก่  $k_2 = \omega\sqrt{\mu_2\varepsilon_2}$  และ  $\eta_2 = \sqrt{\mu_2/\varepsilon_2}$  ตามลำดับ

โดยสนามไฟฟ้าทั้งหมด  $\tilde{E}_1(\mathbf{z})$  และสนามแม่เหล็กทั้งหมด  $\tilde{H}_1(\mathbf{z})$  ในตัวกลางที่หนึ่ง จะเป็นผลรวมของ สนามตกกระทบ และสนามสะท้อน ได้แก่ ตัวกลางที่หนึ่ง

$$\tilde{E}_1(\mathbf{z}) = \tilde{E}^i(\mathbf{z}) + \tilde{E}^r(\mathbf{z}) = \hat{x} \left( E_0^i e^{-jk_1 z} + E_0^r e^{jk_1 z} \right) \quad (1.125)$$

$$\tilde{H}_1(\mathbf{z}) = \tilde{H}^i(\mathbf{z}) + \tilde{H}^r(\mathbf{z}) = \hat{y} \frac{1}{\eta_1} \left( E_0^i e^{-jk_1 z} - E_0^r e^{jk_1 z} \right) \quad (1.126)$$

ส่วนในตัวกลางที่สอง สนามทั้งหมดจะเท่ากับ ตัวกลางที่สอง

$$\tilde{E}_2(\mathbf{z}) = \tilde{E}^t(\mathbf{z}) = \hat{x} E_0^t e^{-jk_2 z} \quad (1.127)$$

$$\tilde{H}_2(\mathbf{z}) = \tilde{H}^t(\mathbf{z}) = \hat{y} \frac{E_0^t}{\eta_2} e^{-jk_2 z} \quad (1.128)$$

ซึ่งที่ขอบเขต  $z = 0$  องค์กรประกอบแนวขนานเส้นสัมผัส ของ สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก จะต่อเนื่อง ได้แก่

$$\tilde{E}_1(0) = \tilde{E}_2(0) \text{ or } E_0^i + E_0^r = E_0^t \quad (1.129)$$

$$\tilde{H}_1(0) = \tilde{H}_2(0) \text{ or } \frac{E_0^i}{\eta_1} - \frac{E_0^r}{\eta_1} = \frac{E_0^t}{\eta_2} \quad (1.130)$$

สนามสะท้อน และสนามส่งผ่าน เขียนในรูปสนามตกกระทบ ได้ว่า

$$E_0^r = \left( \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \right) E_0^i = \Gamma E_0^i \quad (1.131)$$

$$E_0^t = \left( \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \right) E_0^i = \tau E_0^i \quad (1.132)$$

เมื่อ

$$\Gamma = \frac{E_0^r}{E_0^i} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad \text{การตกกระทบตั้งฉาก} \quad (1.133)$$

$$\tau = \frac{E_0^t}{E_0^i} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad \text{การตกกระทบตั้งฉาก} \quad (1.134)$$

โดย  $\Gamma$  และ  $\tau$  คือ สัมประสิทธิ์ การสะท้อน และ การส่งผ่าน สำหรับตัวกลาง ไดอิเล็กทริกไร้การสูญเสีย  $\eta_1$  และ  $\eta_2$  จะเป็นจำนวนจริง ส่วนตัวกลางที่มีการสูญเสีย  $\eta_1$  และ  $\eta_2$  จะเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การสะท้อน และ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน จะได้แก่

$$\tau = 1 + \Gamma \quad \text{การตกกระทบตั้งฉาก} \quad (1.135)$$

สำหรับตัวกลางที่ไม่เป็นแม่เหล็ก

$$\eta_1 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r1}}}, \quad \eta_2 = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1.136)$$

เมื่อ  $\eta_0$  คือ อินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของที่ว่าง

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad \text{ตัวกลางที่ไม่เป็นแม่เหล็ก} \quad (1.137)$$

**การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นที่การตกกระทบแบบตั้งฉาก:  
แบบจำลองที่มีพฤติกรรมเหมือนสายส่ง**

(Ulaby and Ravaioli, 2015)

จากภาพที่ 1.13 สายส่งสัญญาณที่ประกอบด้วย สายส่งไร้การสูญเสียที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $Z_{01}$  ที่เชื่อมต่อกับที่  $z = 0$  กับ สายส่งไร้การสูญเสียที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $Z_{02}$  โดยค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสาย เท่ากับ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ที่ตำแหน่ง  $z = 0$  สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแรงดันจะ ได้แก่

$$\Gamma = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} \quad (1.138)$$

ความคล้ายคลึงระหว่างคลื่นระนาบและคลื่นบนสายส่งสัญญาณจะได้อีก

Plane Wave	Transmission Line
$\tilde{\mathbf{E}}_1(z) = \hat{x}E_0^i(e^{-jk_1z} + \Gamma e^{jk_1z})$ (8.11a)	$\tilde{V}_1(z) = V_0^+(e^{-j\beta_1z} + \Gamma e^{j\beta_1z})$ (8.11b)
$\tilde{\mathbf{H}}_1(z) = \hat{y}\frac{E_0^i}{\eta_1}(e^{-jk_1z} - \Gamma e^{jk_1z})$ (8.12a)	$\tilde{I}_1(z) = \frac{V_0^+}{Z_{01}}(e^{-j\beta_1z} - \Gamma e^{j\beta_1z})$ (8.12b)
$\tilde{\mathbf{E}}_2(z) = \hat{x}\tau E_0^i e^{-jk_2z}$ (8.13a)	$\tilde{V}_2(z) = \tau V_0^+ e^{-j\beta_2z}$ (8.13b)
$\tilde{\mathbf{H}}_2(z) = \hat{y}\tau\frac{E_0^i}{\eta_2} e^{-jk_2z}$ (8.14a)	$\tilde{I}_2(z) = \tau\frac{V_0^+}{Z_{02}} e^{-j\beta_2z}$ (8.14b)
$\Gamma = (\eta_2 - \eta_1)/(\eta_2 + \eta_1)$	$\Gamma = (Z_{02} - Z_{01})/(Z_{02} + Z_{01})$
$\tau = 1 + \Gamma$	$\tau = 1 + \Gamma$
$k_1 = \omega\sqrt{\mu_1\epsilon_1}, \quad k_2 = \omega\sqrt{\mu_2\epsilon_2}$	$\beta_1 = \omega\sqrt{\mu_1\epsilon_1}, \quad \beta_2 = \omega\sqrt{\mu_2\epsilon_2}$
$\eta_1 = \sqrt{\mu_1/\epsilon_1}, \quad \eta_2 = \sqrt{\mu_2/\epsilon_2}$	$Z_{01}$ and $Z_{02}$ depend on transmission-line parameters

ภาพที่ 1.14 เปรียบความคล้ายคลึงระหว่าง สมการคลื่นระนาบที่ตกกระทบตั้งฉาก กับ สมการของสายส่งสัญญาณ ภายใต้เงื่อนไขการไร้การสูญเสีย

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Table 8-1 Analogy between plane-wave equations for normal incidence and transmission-line equations, both under lossless conditions.

จากภาพที่ 1.13 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ในตัวกลางที่ 1 จะได้แก่

$$S = \frac{|\tilde{E}_1|_{\max}}{|\tilde{E}_1|_{\min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (1.139)$$

ถ้าสองตัวกลางมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน  $\eta_1$  เท่ากับ  $\eta_2$  จะได้ว่า  $\Gamma = 0$  และ  $S = 1$  ส่วนถ้าตัวกลางที่สองเป็น ตัวนำที่สมบูรณ์ (perfect conductor) ที่มีอิมพีแดนซ์  $\eta_2 = 0$  กรณีนี้จะเหมือนสายส่งสัญญาณลัดวงจร ที่  $\Gamma = -1$  และ  $S = \infty$

ส่วนระยะทางจากขอบเขตรอยต่อที่ขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้า ในตัวกลางที่ 1 มีค่าสูงสุดจะแสดงด้วย  $l_{\max}$  โดยแรงดันที่มีค่าสูงสุดบนสายส่ง สัญญาณจะได้แก่

$$-z = l_{\max} = \frac{\theta_r + 2n\pi}{2k_1} = \frac{\theta_r \lambda_1}{4\pi} + \frac{n\lambda_1}{2} \quad (1.140)$$

$$\begin{cases} n = 1, 2, \dots, & \text{if } \theta_r < 0 \\ n = 0, 1, 2, \dots, & \text{if } \theta_r \geq 0 \end{cases}$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, \text{ if } \theta_r \geq 0$$

เมื่อ

$\lambda_1 = 2\pi/k_1$  และ  $\theta_r$  เป็นมุมเฟสของ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแรงดัน  $\Gamma$  ตัวอย่างเช่น  $\Gamma = |\Gamma|e^{i\theta_r}$  โดย  $\theta_r$  มีขอบเขตในช่วง  $-\pi < \theta_r \leq \pi$  ซึ่งนิพจน์สำหรับ  $l_{\max}$  ใช้ได้กับ กรณีสองตัวกลางเป็นไดอิเล็กทริกไร้การสูญเสีย และกรณี ที่ตัวกลางที่หนึ่งเป็น ไดอิเล็กทริกสูญเสียต่ำ นอกจากนั้น ตัวกลางที่สองอาจเป็น ไดอิเล็กทริก หรือ ตัวนำ สำหรับกรณีที่ทั้งสองตัวนำ เป็นไดอิเล็กทริกไร้การสูญเสีย  $\theta_r = 0$  โดย ถ้า  $\eta_2 > \eta_1$  และ  $\theta_r = \pi$  ถ้า  $\eta_2 < \eta_1$

ระยะระหว่างตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดที่อยู่ติดกันได้แก่  $\lambda_1 / 2$  และระยะระหว่างตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดและตำแหน่งที่มีค่าต่ำสุดที่ใกล้ที่สุดได้แก่  $\lambda_1 / 4$  โดยตำแหน่งที่สนามไฟฟ้ามีค่าน้อยที่สุดได้แก่

$$l_{min} = \begin{cases} l_{max} + \frac{\lambda_1}{4}, & \text{if } l_{max} < \lambda_1/4 \\ l_{max} - \frac{\lambda_1}{4}, & \text{if } l_{max} \geq \lambda_1/4 \end{cases} \quad (1.141)$$

**การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นที่การตกกระทบแบบตั้งฉาก:**

**การไหลของกำลังในตัวกลางที่ไร้การสูญเสีย**

(Ulaby and Ravaioli, 2015)

จากภาพที่ 1.13 ความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยสุทธิที่ไหลในตัวกลางที่ 1 ได้แก่

$$\begin{aligned} S_{av1}(z) &= \frac{1}{2} \text{Re} \left[ \tilde{E}_1(z) \times \tilde{H}_1^*(z) \right] \\ &= \frac{1}{2} \text{Re} \left[ \hat{x} E_0^i (e^{-jk_1 z} + \Gamma e^{jk_1 z}) \times \hat{y} \frac{E_0^{i*}}{\eta_1} (e^{jk_1 z} - \Gamma^* e^{-jk_1 z}) \right] \\ &= \hat{z} \frac{|E_0^i|^2}{2\eta_1} (1 - |\Gamma|^2) \end{aligned} \quad (1.142)$$

สำหรับความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยของคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนได้แก่

$$S_{av1} = S_{av}^i + S_{av}^r \quad (1.143)$$

$$S_{av}^i = \hat{z} \frac{|E_0^i|^2}{2\eta_1} \quad (1.144)$$

$$S_{av}^r = -\hat{z} |\Gamma|^2 \frac{|E_0^i|^2}{2\eta_1} = -|\Gamma|^2 S_{av}^i \quad (1.145)$$

กรณีนี้  $\Gamma$  จะมีค่าเป็นเชิงซ้อน

ความหนาแน่นกำลังเฉลี่ยของคลื่นส่งผ่านในตัวกลางที่สองได้แก่

$$\begin{aligned} S_{av2}(z) &= \frac{1}{2} \text{Re} \left[ \tilde{E}_2(z) \times \tilde{H}_2^*(z) \right] \\ &= \frac{1}{2} \text{Re} \left[ \hat{x} \tau E_0^i e^{-jk_2 z} \times \hat{y} \tau^* \frac{E_0^{i*}}{\eta_2} e^{jk_2 z} \right] \\ &= \hat{z} |\tau|^2 \frac{|E_0^i|^2}{2\eta_2} \end{aligned} \quad (1.146)$$

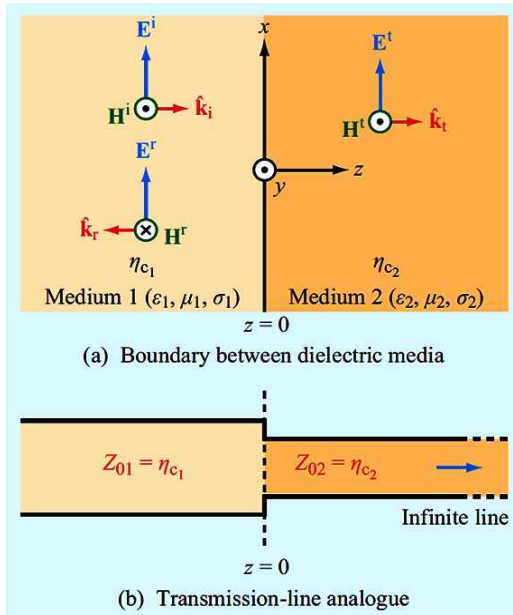
สำหรับตัวกลางไร้การสูญเสีย

$$\frac{\tau^2}{\eta_2} = \frac{1-\Gamma^2}{\eta_1} \quad \text{ตัวกลางไร้การสูญเสีย} \quad (1.147)$$

$$S_{av1} = S_{av2} \quad (1.148)$$

การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นที่การตกกระทบแบบตั้งฉาก:  
ที่ขอบเขตระหว่างตัวกลางที่มีการสูญเสีย

(Ulaby and Ravaioli, 2015)



ภาพที่ 1.15 คลื่นที่ตกกระทบตั้งฉาก ที่ระนาบรอยต่อระหว่างสองตัวกลางที่มีการสูญเสีย

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Figure 8-7 Normal incidence at a planar boundary between two lossy media.

ซึ่งจากภาพข้างต้น สำหรับในส่วนนี้เราจะพิจารณาตัวกลางที่มีการสูญเสีย (Lossy media) ที่มีค่าคงที่การแพร่กระจาย  $\gamma = \alpha + j\beta$  อินทรีนซิกอิมพีแดนซ์  $\eta_c$  และค่าพารามิเตอร์ตัวกลางได้แก่  $\epsilon, \mu, \sigma$  ทั้งนี้สำหรับ  $\gamma$  และ  $\eta_c$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน ตัวกลางที่หนึ่ง มีค่าพารามิเตอร์ได้แก่  $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$  และตัวกลางที่สอง มีค่าพารามิเตอร์ได้แก่  $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$

ตัวกลางที่หนึ่ง

$$\tilde{E}_1(z) = \hat{x} E_0^i (e^{-\gamma_1 z} + \Gamma e^{\gamma_1 z}) \quad (1.149)$$

$$\tilde{H}_1(z) = \hat{y} \frac{E_0^i}{\eta_{c1}} (e^{-\gamma_1 z} - \Gamma e^{\gamma_1 z}) \quad (1.150)$$

ตัวกลางที่สอง

$$\tilde{E}_2(z) = \hat{x} \tau E_0^i e^{-\gamma_2 z} \quad (1.151)$$

$$\tilde{H}_2(z) = \hat{y} \tau \frac{E_0^i}{\eta_{c2}} e^{-\gamma_2 z} \quad (1.152)$$

เมื่อ  $\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1$  และ  $\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$

$$\Gamma = \frac{\eta_{c2} - \eta_{c1}}{\eta_{c2} + \eta_{c1}}$$

(1.153)

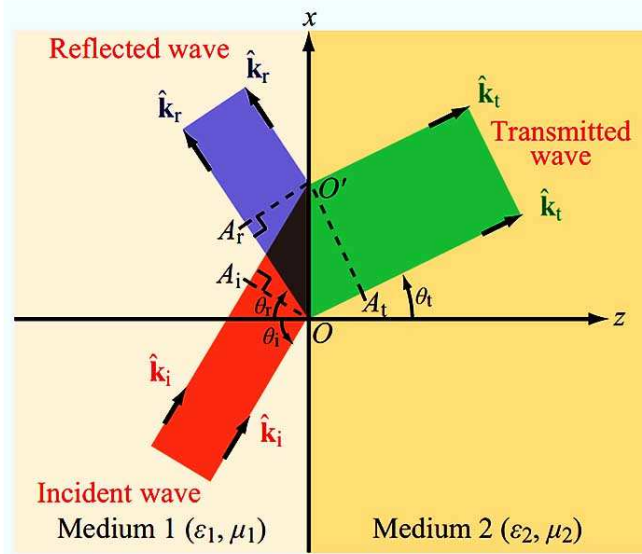
$$\tau = 1 + \Gamma = \frac{2\eta_{c2}}{\eta_{c2} + \eta_{c1}}$$

(1.154)

ทั้งนี้  $\eta_{c1}, \eta_{c2}, \Gamma$  และ  $\tau$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน

## กฎของสเนลล์

(Ulaby and Ravaioli, 2015)



ภาพที่ 1.16 คลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่านที่หักเห  
ที่ขอบเขตระนาบระหว่างตัวกลางที่แตกต่างกัน

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Figure 8-9 Wave reflection and refraction at a planar boundary  
between different media.

จากภาพข้างต้น เป็นการพิจารณาการตกกระทบในแนวเฉียงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่  $z = 0$  เป็นขอบเขตรอยต่อระหว่าง ตัวกลางที่หนึ่ง และตัวกลางที่สอง ที่มีพารามิเตอร์  $\epsilon_1, \mu_1$  และ  $\epsilon_2, \mu_2$  โดย เวกเตอร์ทิศทาง  $k$  แสดงเส้นรังสีที่ตั้งฉากกับหน้าคลื่นของคลื่นตกกระทบ ซึ่งทิศทางตกกระทบ สะท้อน และส่งผ่าน จะแสดงด้วยเวกเตอร์  $\hat{k}_i, \hat{k}_r, \hat{k}_t$  ตามลำดับ ส่วนมุมของ การตกกระทบ การสะท้อน และการส่งผ่าน ที่ตั้งฉากกับขอบเขต แกน  $z$  จะได้แก่  $\theta_i, \theta_r, \theta_t$  ตามลำดับ ทั้งนี้ รังสีของคลื่นตกกระทบจะตัดขอบเขตรอยต่อที่  $O$  และ  $O'$  ซึ่ง  $A_iO$  จะแสดงหน้าคลื่นที่มีเฟสคงที่ของคลื่นตกกระทบ ส่วนหน้าคลื่นที่มีเฟสคงที่ของ คลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่าน จะได้แก่  $A_rO'$  และ  $A_tO'$  ตามลำดับ คลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อน แพร่กระจายในตัวกลางที่หนึ่ง ด้วยความเร็วเฟสเดียวกันได้แก่  $u_{p1} = 1/\sqrt{\mu_1\epsilon_1}$  ขณะที่คลื่นส่งผ่านในตัวกลางที่สองจะแพร่กระจายด้วยความเร็ว  $u_{p2} = 1/\sqrt{\mu_2\epsilon_2}$  โดยเวลาที่คลื่นตกกระทบใช้ในการเดินทางจาก  $A_i$  ไปยัง  $O'$  จะเหมือนกับ เวลาที่คลื่นสะท้อนใช้ในการเดินทางจาก  $O$  ไปยัง  $A_r$  และเหมือนกับเวลาที่คลื่นส่งผ่านเดินทางจาก  $O$  ไปยัง  $A_t$  ซึ่งเวลาเท่ากับ ระยะทางหารด้วย ความเร็ว ที่ได้แก่

$$\frac{\overline{A_iO'}}{u_{p1}} = \frac{\overline{OA_r}}{u_{p1}} = \frac{\overline{OA_t}}{u_{p2}} \quad (1.155)$$

จากเรขาคณิตของรูปสามเหลี่ยมตามภาพข้างต้นจะได้ว่า

$$\overline{A_iO'} = \overline{OO'} \sin\theta_i \quad (1.156)$$

$$\overline{OA_r} = \overline{OO'} \sin\theta_r \quad (1.157)$$

$$\overline{OA_t} = \overline{OO'} \sin\theta_t \quad (1.158)$$

$$\theta_i = \theta_r \quad \text{กฎของสเนลล์สำหรับการสะท้อน} \quad (1.159)$$

$$\frac{\sin\theta_t}{\sin\theta_i} = \frac{u_{p2}}{u_{p1}} = \sqrt{\frac{\mu_1 \epsilon_1}{\mu_2 \epsilon_2}} \quad \text{กฎของสเนลล์สำหรับการหักเห} \quad (1.160)$$

สำหรับกฎของสเนลล์สำหรับการสะท้อน กล่าวไว้ว่า ค่ามุมตกกระทบ จะเท่ากับ ค่ามุมสะท้อน ส่วน กฎของสเนลล์สำหรับการหักเห เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sin \theta_i$  และ  $\sin \theta_t$  ในรูปของอัตราส่วน ความเร็วเฟส

ดัชนีของการหักเหของตัวกลาง (Index of refraction of a medium)  $n$  คือ อัตราส่วนของ ความเร็วเฟสในที่ว่าง เช่น ความเร็วแสงในสุญญากาศ  $c$  ต่อ ความเร็วเฟส ในตัวกลาง

$$n = \frac{c}{u_p} = \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{\mu_0 \epsilon_0}} = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad \text{ดัชนีของการหักเห} \quad (1.161)$$

$$\frac{\sin\theta_t}{\sin\theta_i} = \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{\mu_{r1} \epsilon_{r1}}{\mu_{r2} \epsilon_{r2}}} \quad (1.162)$$

สำหรับ วัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็ก  $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$  ซึ่งจะได้ว่า

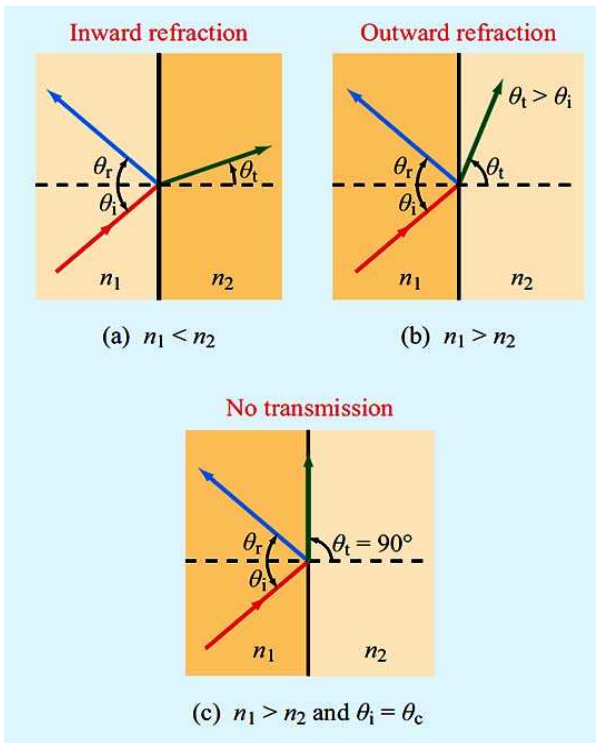
$$\frac{\sin\theta_t}{\sin\theta_i} = \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad ; \mu_1 = \mu_2 \quad (1.163)$$

สำหรับอากาศ จะมีค่า  $\mu_r = \epsilon_r = 1$

ดัชนีหักเห (index of refraction:  $n_0$ ) ของอากาศจะเท่ากับ 1

สำหรับ วัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็ก  $n = \sqrt{\epsilon_r}$  โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นมากกว่า วัสดุหนึ่งจะมีค่าดัชนีหักเหมากกว่าวัสดุนั้นด้วย

สำหรับกรณีที่  $\theta_t = \pi / 2$  จะเป็นกรณีที่คลื่นหักเหมีการเดินทางตามผิวหน้า และไม่มีพลังงานมากพอที่จะส่งผ่านไปยังตัวกลางที่สอง ซึ่งค่าของมุมตกกระทบ  $\theta_i$  ที่สอดคล้องกับ  $\theta_t = \pi / 2$  จะเรียกว่า มุมวิกฤต (Critical angle:  $\theta_c$ )



ภาพที่ 1.17 กฎของสเนลล์

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015) ; Figure 8-10

จากภาพข้างต้น กฎของสเนลล์ ที่  $\theta_r = \theta_i$  และ  $\sin\theta_t = (n_1/n_2)\sin\theta_i$  โดย (a) เป็นการหักเหเข้าข้างใน กรณี  $n_1 < n_2$  ส่วน (b) เป็นการหักเหที่ออกข้างนอก กรณี  $n_1 > n_2$  และ (c) เป็นการหักเหที่มุมเท่ากับ 90 องศา กรณี  $n_1 > n_2$  และ  $\theta_i$  มีค่าเท่ากับ หรือมากกว่า ค่ามุมวิกฤต (Critical angle) โดย  $\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$

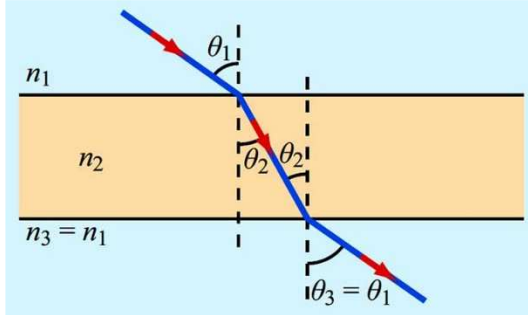
มุมวิกฤต (Critical angle)

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \sin\theta_t |_{\theta_t=\pi/2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.164)$$

$$= \sqrt{\frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}} \quad \text{สำหรับ } \mu_1 = \mu_2 \quad (1.165)$$

ถ้า  $\theta_i$  มีค่าเกิน  $\theta_c$  คลื่นตกกระทบจะเกิดการสะท้อนกลับหมด คลื่นหักเหจะกลายเป็น คลื่นผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform surface wave) ที่เดินทางตามขอบเขตระหว่างสองตัวกลาง ซึ่งพฤติกรรมนี้ของคลื่นจะเรียกว่า การสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection)

สำหรับคลื่นที่ตกกระทบตัวกลางที่หนึ่ง แล้วเดินทางทะลุผ่านตัวกลางที่สอง ไปยังตัวกลางที่สามจะเป็นตามภาพดังนี้



ภาพที่ 1.18 มุมที่คลื่นออกจากตัวกลาง

ที่มา: Ulaby and Ravaioli (2015)

Figure 8-11 The exit angle  $\theta_3$  is equal to the incidence angle  $\theta_1$  if the dielectric slab has parallel boundaries and is surrounded by media with the same index of refraction on both sides