วิศวกรรมสายอากาศ

ANTENNA ENGINEERING

รศ.ดร. วิทวัส สิฏฐกุล
ผศ.ดร. ปาลีรัตน์ วงจำปา

ซีเอ็ด

วิศวกรรมสายอากาศ (Antenna Enginerring)

โดย รศ.ดร. วิทวัส สิฏฐกุล และ ผศ.ดร. ปาลีรัตน์ วงจำปา

สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย โดย รศ.ดร. วิทวัส สิฏฐกุล © พ.ศ. 2563

ห้ามคัดลอก ลอกเลียน ดัดแปลง ทำซ้ำ จัดพิมพ์ หรือกระทำอื่นใด โดยวิธีการใดๆ ในรูปแบบใดๆ ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ เพื่อเผยแพร่ในสื่อทุกประเภท หรือเพื่อวัตถุประสงค์ใดๆ นอกจากจะได้รับอนุญาต

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

วิทวัส สิฏฐกุล.

วิศวกรรมสายอากาศ = Antenna Engineering. - - กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2563.

244 หน้า.

1. สายอากาศ.

I. ชื่อเรื่อง.

621.3824

Barcode (e-book) 9786160839476

ผลิตและจัดจำหน่ายโดย

บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
SE-EDUCATION PUBLIC COMPANY LIMITED

เลขที่ 1858/87-90 ถนนเทพรัตน แขวงบางนาใต้ เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260
โทรศัพท์ 0-2826-8000

หากมีคำแนะนำหรือติชม สามารถติดต่อได้ที่ comment@se-ed.com

คำนำ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่ง มีหน้าที่เปลี่ยนปริมาณทางไฟฟ้าในรูปของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือในทางกลับกัน มันสามารถรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสามารถเปลี่ยนไปในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับดังกล่าวสามารถถูกใช้เป็นคลื่นพาห์ นำพาสัญญาณข้อมูลออกไปสู่อากาศ ทั้งนี้ย่านความถี่ของคลื่นพาห์จะแปรผันตามลักษณะการประยุกต์ใช้งานเป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่น การสื่อสารทางวิทยุ โทรทัศน์ เรดาร์ หรือโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น ทำให้ระบบการสื่อสารไร้สายใดๆ ต้องมีสายอากาศเป็นส่วนประกอบด้วยเสมอ

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ปัจจุบันสายอากาศจำนวนมากถูกออกแบบและศึกษา แต่ก็ยังไม่สามารถตอบโจทย์การใช้งานทางด้านวิชาวิศวกรรมสายอากาศได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากการสื่อสารในปัจจุบันถูกพัฒนาไปอย่างก้าวกระโดด ทำให้สายอากาศรูปแบบใหม่ๆ ต้องถูกออกแบบและนำไปใช้โดยใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมสายอากาศ เช่น ปัจจุบันเทคโนโลยี 5G ได้รับความนิยมสูงมากทั่วโลก ทำให้สายอากาศในย่านความถี่ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ หรือย่าน 28 กิกะเฮิรตซ์ ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุผลความจำเป็นดังกล่าวทำให้วิชา *"วิศวกรรมสายอากาศ"* ถูกรวมเป็นหนึ่งในวิชาเฉพาะทางวิศวกรรมตามระเบียบคณะกรรมการสภาวิศวกร

เนื่องด้วยหนังสือวิชา *"วิศวกรรมสายอากาศ"* ที่ถูกตีพิมพ์ส่วนใหญ่เป็นภาษาต่างประเทศมีราคาแพง และหนังสือภาษาไทยมีน้อยและล้าสมัย หนังสือเล่มนี้จึงถูกออกแบบให้มีเนื้อหาตรงตามระเบียบคณะกรรมการสภาวิศวกร เหมาะสำหรับ นิสิต นักศึกษา วิศวกร และผู้สนใจ อีกทั้งยังเพิ่มเติมเนื้อหาทางด้านหลักการทดสอบสายอากาศและการประยุกต์ใช้สายอากาศในระบบ 5G เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงเนื้อหาดังกล่าวได้อย่างครอบคลุมทั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำคือ การออกแบบ การวิเคราะห์ การทดสอบและการนำไปประยุกต์ใช้งาน ผ่านประสบการณ์ของผู้เขียนเอง และการรวบรวมเนื้อหาต่างๆ จากหนังสือตำราทั้งในประเทศและต่างประเทศ เอกสาร และมาตรฐานการวัดสายอากาศต่างๆ เป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้สนใจศึกษาวิชานี้สามารถใช้หนังสือเล่มนี้เพียงเล่มเดียวในการศึกษาและออกแบบสายอากาศได้ด้วยตนเอง

รศ. ดร. วิทวัส สิฏฐกุล

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำและความสำคัญของสายอากาศ **21**

วัตถุประสงค์ 21

บทนำ 22

1.1 ประวัติศาสตร์ของสายอากาศ 22

1.2 คำจำกัดความของสายอากาศ (Definitions of Antenna) 23

1.3 กลไกการทำงานของสายอากาศ 24

1.3.1 การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากสายส่ง 24

1.3.2 การกระจายของกระแสและแรงดันในสายอากาศ 25

1.3.3 สายอากาศแบบเรโซแนนซ์ 26

1.3.4 สายอากาศแบบไม่เรโซแนนซ์ 27

1.3.5 การเหนี่ยวนำระหว่างสายอากาศทั้งสอง 27

1.4 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 28

1.5 สภาวะการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization) 30

1.5.1 สภาวะการเกิดโพลาไรเซชันเชิงเส้นตรง 31

1.5.2 สภาวะการเกิดโพลาไรเซชันเชิงเส้นตรงรูปวงรีและวงกลม 34

1.6 ผลกระทบของพื้นดินต่อสายอากาศ 37

1.7 สายอากาศแบบต่อกับพื้นดิน 38

1.8 สายอากาศแบบไม่ได้ต่อกับพื้นดิน 39

1.9 การสื่อสารไร้สายโดยใช้สายอากาศ 39

1.10 การขับสายอากาศโดยใช้สายส่ง 40

1.11 โหมดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 41

1.11.1 การแพร่กระจายคลื่นดิน 41

1.11.2 การแพร่กระจายคลื่นฟ้า 41

1.11.3 การแพร่กระจายคลื่นในแนวเส้นตรง (Line-of-sight) 41

1.12 ระบบพิกัด (Coordinate System) 42
1.12.1 ระบบพิกัดทรงเหลี่ยมหรือระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate) 43
1.12.2 ระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate) 43
1.12.3 ระบบพิกัดทรงกลม (Spherical Coordinate) 43
1.13 ตัวดำเนินการทางเวกเตอร์ 44
1.13.1 ตัวดำเนินการเดล (∇) 44
1.13.2 ตัวดำเนินการเกรเดียนต์ (∇f) 45
1.13.3 ตัวดำเนินการไดเวอร์เจนต์ ($\nabla .A$) 45
1.13.4 ตัวดำเนินการเคิร์ล (∇xA) 46
สรุป 47
โจทย์ปัญหาบทที่ 1 *48*

บทที่ 2 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ **49**
วัตถุประสงค์ 49
บทนำ 50
2.1 แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) 50
2.1.1 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Pattern) 52
2.2.2 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Pattern) 52
2.2.3 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง (Directional Pattern) 52
2.2 ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) 55
2.2.1 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-power Beamwidth: HPBW) 55
2.2.2 ความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรก (First-null Beamwidth: FNBW) 56
2.3 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) 56
2.3.1 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดี่ยว (Omnidirectional Patterns) 59
2.4 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency) 60
2.5 อัตราขยายของสายอากาศ (Antenna Gain) 62
2.6 ประสิทธิภาพลำคลื่นของสายอากาศ (Beam Efficiency) 63
2.7 แบนด์วิดท์ (Bandwidth) 64
2.8 ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า (Input Impedance) 65
2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศ 65
2.10 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 65
2.10.1 ค่าความต้านทานการแผ่กระจายกำลังงาน 66
2.10.2 วงจรสมมูลของสายอากาศในขณะที่ทำหน้าที่เป็นภาคส่ง 66

2.10.3 วงจรสมมูลของสายอากาศในขณะที่ทำหน้าที่เป็นภาครับ 68
2.11 ประสิทธิภาพการแผ่กระจายกำลังงานและการสูญเสียของสายอากาศ 70
2.12 พื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศ (Effective Antenna Aperture: A_e) 71
2.13 ปัจจัยการสูญเสียจากการโพลาไรซ์ (Polarization Loss Factor: PLF) 72
2.14 สมการการส่งผ่านของฟริส (Friis Transmission Equation) 74
2.15 สมการพิสัยเรดาห์ 76
2.16 อุณหภูมิสายอากาศ 79
2.17 กำลังที่ถูกดูดซับ (Absorbed Power) 82
2.18 อัตราการดูดซับเฉพาะ (Specific Absorption Rate) 82
สรุป 83
โจทย์ปัญหาบทที่ 2 *84*

บทที่ 3 สายอากาศพื้นฐาน **85**
วัตถุประสงค์ 85
บทนำ 86
3.1 สายอากาศเส้นลวดตรง (Linear Wire Antennas) 86
3.1.1 สายอากาศไดโพลจิ๋ว (Infinitesimal Dipole) 86
3.1.2 สายอากาศไดโพลเล็ก (Small Dipole) 91
3.1.3 สายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น (Half-Wavelength Dipole) 93
3.2 สายอากาศแบบบ่วง (Loop Antenna) 96
3.2.1 สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก (Small Loop Antenna) 96
3.2.2 สายอากาศแบบบ่วงขนาดใหญ่ (Large Loop Antenna) 98
3.3 สายอากาศยากิ (Yagi-Uda Antenna) 99
3.4 สายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) 102
3.5 สายอากาศแถวลำดับ (Array Antenna) 107
3.5.1 สายอากาศแถวลำดับขนาด 2x1 108
3.5.2 สายอากาศแถวลำดับขนาด N x1 111
3.5.3 สายอากาศแถวลำดับแบบขบวนด้านข้าง (Broadside Array) 112
3.5.4 สายอากาศแถวลำดับขนานใกล้ (Collinear Array) 114
3.5.5 สายอากาศแถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์สามัญ (Ordinary End-Fire Array) 115
3.5.6 สายอากาศแถวลำดับแบบซ้อนกันแนวตั้งและแนวนอน (Vertical and Horizontal Stacking) 116
3.5.7 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array Antenna) 117

3.5.8 สายอากาศแถวลำดับเชิงวงกลม (Circular Array Antenna) 118
3.5.9 การคัปปลิ้งของสายอากาศในสายอากาศแถวลำดับ 119
3.6 สายอากาศแบบใช้จานพาราโบลิก 120
3.7 สายอากาศแบบระนาบพื้นดิน (Ground-Plane Antenna) 121
3.8 สายอากาศปีกไก่ (Adcock Antenna) 122
3.9 สายอากาศสี่เหลี่ยมเปียกปูน (Rhombic Antenna) 123
3.10 สายอากาศรูปตัววี (V Antenna) 124
3.11 สายอากาศไดโพลแบบพับ (Folder Dipole Antenna) 125
สรุป 126
โจทย์ปัญหาบทที่ 3 *127*

บทที่ 4 สายอากาศสมัยใหม่ **129**
วัตถุประสงค์ 129
บทนำ 130
4.1 สายอากาศสมัยใหม่ 130
4.1.1 สายอากาศประเภทอภิวัสดุ (Metamaterials) 130
4.1.1.1 สายอากาศคลื่นรั่ว (LWAs) 131
4.1.1.2 สายอากาศเรโซแนนซ์ขนาดเล็ก 134
4.1.2 สายอากาศประเภทแอกทีฟ (Active Antenna) 136
4.1.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบหลายแถบความถี่ (Multiple-Band Microstrip Antenna) 137
4.1.4 สายอากาศที่ปรับค่าได้ 150
4.1.4.1 การใช้พารามิเตอร์ของสายอากาศในการปรับค่า 151
4.1.4.2 การใช้ระยะห่างในการปรับค่า 151
4.1.4.3 การใช้ความต่อเนื่องในการปรับค่า 151
4.2 เทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ในสายอากาศแบบปรับค่าได้ 154
4.2.1 สวิตช์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS Switch) 155
4.2.1.1 สวิตช์โครงสร้างปลายยื่น (Cantilever Switch) 155
4.2.1.2 สวิตช์โครงสร้างสะพานอากาศ (Air-bridge Switch) 156
4.2.2 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ในสายอากาศแบบปรับค่าได้ 156
4.2.2.1 สวิตช์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคกับสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่น 157
4.2.2.2 สวิตช์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคกับสายอากาศแบบร่องครึ่งคลื่น 158
4.2.2.3 สวิตช์ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคกับสายอากาศแบบไมโครสตริป 158

สรุป 159
โจทย์ปัญหาบทที่ 4 *160*

บทที่ 5 การวัดคุณสมบัติสายอากาศ **161**
วัตถุประสงค์ 161
บทนำ 162
5.1 พื้นที่ทดสอบแบบเปิดโล่ง (Open Area Test Site: OATS) 163
5.1.1 ค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐาน (Normalized-site-attenuation: NSA) 163
5.2 กล่องกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทรานสเวอร์อิเล็กโทรแมกนีติกส์ในช่วงความถี่สูงระดับกิกะเฮริตซ์ (GTEM Cell) 166
5.2.1 การทดสอบค่าความสม่ำเสมอของสนาม (Field Uniformity) ของ GTEM Cell 168
5.3 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Anechoic Chamber) 170
5.3.1 การเลือกระยะในการทดสอบภายในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 170
5.3.2 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสมบูรณ์ (Fully Anechoic Chamber) 171
5.3.3 ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi Anechoic Chamber) 175
5.4 การทดสอบห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 175
5.4.1 วิธีการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR Measurement Method) 177
5.4.1.1 การหาค่าปริมาตรการทดสอบจากอัตราส่วนคลื่นนิ่ง 178
5.4.2 วิธีการวัดค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐาน (Normalized-Site-Attenuation: NSA) 181
5.4.2.1 วิธีการวัดสำหรับห้องปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสมบูรณ์ 181
5.4.2.2 วิธีการวัดสำหรับห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า 182
5.5 การวัดสายอากาศ (Antenna Measurement) 184
5.5.1 เครื่องมือที่ต้องการในการวัดสายอากาศ 184
5.5.2 การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) 188
5.5.3 ค่าความกว้างลำ (Beamwidth) ของสายอากาศ 189
5.5.4 การวัดอัตราการขยายและค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ 190
5.5.5 การวัดค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ของสายอากาศ 191
5.5.6 การวัดค่าเฟสของสายอากาศ 191
5.5.7 การวัดค่าโพลาไรเซชั่นของสายอากาศ 192
5.5.8 การวัดค่าความต้านทานขาเข้า (Input Impedance) และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) 194
5.5.9 การวัดค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศ (Bandwidth) 195
สรุป 196
โจทย์ปัญหาบทที่ 5 *197*

บทที่ 6 การประยุกต์ใช้สายอากาศ 199
วัตถุประสงค์ 199
บทนำ 200
6.1 สายอากาศรวมสำหรับการสื่อสารส่วนบุคคลไร้สาย (Integrated Antennas for Wireless Personal Communications) 200
6.1.1 ความรู้พื้นฐานในการออกแบบ 202
6.1.2 การประยุกต์ใช้สายอากาศกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ 203
6.1.2.1 สายอากาศภายนอกที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ 203
6.1.2.2 สายอากาศภายในที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ 204
6.1.2.3 การประยุกต์ใช้สายอากาศกับเครื่องคอมพิวเตอร์วางตัก (Laptop) 204
6.1.2.4 การประยุกต์ใช้สายอากาศกับเทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายแบบหลากหลายสัญญาณส่งและรับ (MIMO) 206
6.2 การประยุกต์ใช้สายอากาศสำหรับสถานีฐาน (Antennas for Base Stations) 212
6.2.1 การออกแบบสายอากาศสำหรับสถานีฐาน 213
6.2.1.1 การปรับลำคลื่นสายอากาศในแนวตั้ง 214
6.2.1.2 การลดลำคลื่นด้านข้าง (Sidelobe) โดยการออกแบบสายอากาศแถวลำดับ 215
6.2.1.3 การรวมระบบสื่อสารวิทยุเข้ากับสายอากาศ 218
6.2.1.4 การใช้เทคโนโลยีแอกทีฟกับสายอากาศ (Active Antenna System: AAS) 218
6.2.1.5 การออกแบบสายอากาศสำหรับใช้กับเทคโนโลยีระบบสื่อสารไร้สายแบบหลากหลายสัญญาณส่งและรับ (Massive MIMO) 220
6.3 การประยุกต์ใช้สายอากาศในระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสง 223
6.3.1 สายอากาศสำหรับเครือข่ายไร้สายในระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสง 223
6.3.2 สายอากาศรวมกับอุปกรณ์เชิงแสง (Photonic Active Integrated Antennas: PhAIAs) 225
6.3.3 ระบบการแพร่กระจายสัญญาณเครือข่ายไร้สายผ่านเส้นใยนำแสงโดยใช้สายอากาศรวมกับอุปกรณ์เชิงแสง 228
6.3.4 สายอากาศสำหรับระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสงในระบบ 5G 229
สรุป 232
โจทย์ปัญหาบทที่ 6 *233*
บรรณานุกรม 235
ประวัติผู้เขียน 241

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แผนภาพการทำงานของสายอากาศของนายกูลเยลโม มาร์โกนี 22
รูปที่ 1.2 แผนภาพการทำงานของสายอากาศ 23
รูปที่ 1.3 การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากสายส่ง 24
รูปที่ 1.4 การแยกปลายเปิดสายส่งทั้งสองให้ห่างออกจากกัน 25
รูปที่ 1.5 การกระจายของแรงดันและกระแสในทางอุดมคติ 25
รูปที่ 1.6 การเหนี่ยวนำระหว่างเสาอากาศทั้งสอง 26
รูปที่ 1.7 การกระจายของกระแสบนสายอากาศเรโซแนนซ์ที่ค่าความยาวต่าง ๆ 26
รูปที่ 1.8 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศเรโซแนนซ์ไดโพลที่ค่าความยาวต่าง ๆ 27
รูปที่ 1.9 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศแบบไม่เรโซแนนซ์ 27
รูปที่ 1.10 การเหนี่ยวนำระหว่างเสาอากาศทั้งสอง 28
รูปที่ 1.11 แถบย่านความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 29
รูปที่ 1.12 ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 29
รูปที่ 1.13 การเกิดโพลาไรซ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (ก) แบบเส้นตรง (ข) แบบวงกลม และ (ค) แบบวงรี 30
รูปที่ 1.14 โพลาไรเซชันในแนวแกนนอน 32
รูปที่ 1.15 โพลาไรเซชันในแนวแกนตั้ง 32
รูปที่ 1.16 สายอากาศที่มีแนวแกนโพลาไรเซชันในแนวแกนใดแกนหนึ่ง 33
รูปที่ 1.17 คลื่นลัพธ์สองลูกในแนวระนาบที่มีค่า σ เท่ากับศูนย์ และเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีการโพลาไรซ์แบบเส้นตรง 34
รูปที่ 1.18 คลื่นลัพธ์ของแสงที่เกิดโพลาไรเซชันในแนวเชิงเส้นที่มีค่ายอดคลื่นไม่เท่ากัน และมีเฟสระหว่างกัน σ ที่ไม่เท่ากับศูนย์ 35
รูปที่ 1.19 การรวมกันของสองยอดคลื่นที่เท่ากันซึ่งมีค่าความสัมพันธ์ของเฟสที่แตกต่างกัน $\sigma = \pi/2 + 2m\pi$ เป็นผลให้เกิดโพลาไรเซชันรูปวงกลม 36
รูปที่ 1.20 สายอากาศและการเกิดโพลาไรเซชันในแนวแกนใดแกนหนึ่ง 36
รูปที่ 1.21 ภาพสะท้อน (Image) เหนือพื้นดินที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าสมบูรณ์ 37
รูปที่ 1.22 ระบบพื้นกราวด์สำหรับสายอากาศในแนวตั้งแบบต่อลงดิน 38
รูปที่ 1.23 คุณลักษณะของสายอากาศแนวตั้งแบบต่อลงดินที่ค่าความยาวของสายอากาศต่าง ๆ 38
รูปที่ 1.24 คุณลักษณะของสายอากาศแนวตั้งแบบไม่ต่อลงดินที่ค่าความยาวของสายอากาศต่าง ๆ 39

รูปที่ 1.25 การสื่อสารไร้สายโดยใช้สายอากาศ 40
รูปที่ 1.26 การขับสายอากาศโดยใช้สายส่ง 40
รูปที่ 1.27 การการแพร่กระจายคลื่นดิน 41
รูปที่ 1.28 การการแพร่กระจายคลื่นดิน 42
รูปที่ 1.29 การการแพร่กระจายคลื่นดิน 42
รูปที่ 1.30 ระบบพิกัดฉากสามมิติ 43
รูปที่ 1.31 ระบบพิกัดทรงกระบอก 43
รูปที่ 1.32 ระบบพิกัดทรงกลม 44

รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 50
รูปที่ 2.2 (ก) แบบรูปสนาม (Field Pattern) และ (ข) แบบรูปการแผ่กำลังงาน (Power Pattern) 51
รูปที่ 2.3 แบบรูปการแผ่กำลังงานหลัก ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศปากแตร 51
รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ (ก) แบบไอโซทรอปิก (ข) แบบรอบตัวในระนาบเดี่ยว และ (ค) แบบมีทิศทาง 52
รูปที่ 2.5 โหลบของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบมีทิศทาง 53
รูปที่ 2.6 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังและความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรก 56
รูปที่ 2.7 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งกรณีที่มีและไม่มีโหลบย่อย 60
รูปที่ 2.8 สายอากาศภาคส่งและวงจรสมมูลเทเวนินของภาคส่ง 67
รูปที่ 2.9 สายอากาศภาครับและวงจรสมมูลเทเวนินของภาครับ 68
รูปที่ 2.10 แสดงทิศทางของเวกเตอร์การโพลาไรซ์ของสายอากาศภาครับและภาคส่งที่ทำให้เกิดค่า PLF ต่างกัน 73
รูปที่ 2.11 สายอากาศภาคส่งและภาครับสำหรับวิเคราะห์สมการการส่งผ่านของฟริส 74
รูปที่ 2.12 สายอากาศภาคส่งและภาครับสำหรับวิเคราะห์สมการพิสัยเรดาร์ 77
รูปที่ 2.13 การพิจารณาอุณหภูมิของระบบในส่วนของภาครับ 80

รูปที่ 3.1 การจัดวางตัวของไดโพลจิ๋วและองค์ประกอบสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวทรงกลม 87
รูปที่ 3.2 การแจงรูปกระแสบนสายอากาศไดโพลเล็ก 91
รูปที่ 3.3 สายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นที่นำมาประยุกต์ใช้งานจริง 94
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบสามมิติของไดโพลที่มีความยาว $\lambda/2$ 94
รูปที่ 3.5 สายอากาศแบบบ่วงขนาดเล็ก 96
รูปที่ 3.6 สายอากาศยากิพื้นฐาน 99
รูปที่ 3.7 รูปแบบการแผ่คลื่นของไดโพล $\lambda/2$ และรีเฟลกเตอร์ในระนาบแนวราบ 100
รูปที่ 3.8 รูปแบบการแผ่คลื่นของไดโพล $\lambda/2$ และรีเฟลกเตอร์ในระนาบแนวตั้ง 100

รูปที่ 3.9 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศยากิ 101
รูปที่ 3.10 โครงสร้างทั่วๆ ไปของสายอากาศไมโครสตริป 103
รูปที่ 3.11 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป 104
รูปที่ 3.12 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป 105
รูปที่ 3.13 การคำนวณสายอากาศไมโครสตริป 106
รูปที่ 3.14 การประยุกต์ใช้งานสายอากาศไมโครสตริป 107
รูปที่ 3.15 สายอากาศไมโครสตริปชนิดอาร์เรย์ชนิด 4x4 108
รูปที่ 3.16 สายอากาศ 2 ต้น ที่ระยะห่างกัน d ในกรณีที่จุดสังเกตอยู่ที่ (ก) ระยะใกล้ (ข) ระยะไกล 109
รูปที่ 3.17 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศไดโพลสองเสาที่มีระยะระหว่างเสาคือ $d = \lambda/4$ และ $\xi = 0$ 111
รูปที่ 3.18 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศไดโพลสองเสาที่มีระยะระหว่างเสาคือ $d = \lambda/4$ และ $\xi = \pi/2$ 111
รูปที่ 3.19 รูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศไดโพลสองเสาที่มีระยะระหว่างเสาคือ $d = \lambda/4$ และ $\xi = -\pi/2$ 111
รูปที่ 3.20 สายอากาศ N ต้นที่ระยะห่างกัน d ในกรณีที่จุดสังเกตอยู่ที่ระยะไกล 112
รูปที่ 3.21 แบบรูปที่แสดงแอมพลิจูดของสนามสามมิติแบบแผ่ด้านข้างและแบบแผ่ด้านข้าง/เอนด์ไฟร์ 113
รูปที่ 3.22 สายอากาศแถวลำดับขนานใกล้ 114
รูปที่ 3.23 แบบรูปสามมิติแสดงแอมพลิจูดของสนามของแถวลำดับเอนด์ไฟร์ ที่มีทิศพุ่งไปที่ $\theta = 180^\circ$ และ $\theta = 0^\circ$ 115
รูปที่ 3.24 สายอากาศแถวลำดับแบบซ้อนกัน (ก) แนวตั้ง และ (ข) แนวนอน 116
รูปที่ 3.25 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด MxN ต้นที่ระยะห่างกัน d 117
รูปที่ 3.26 การแพร่กระจายของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 6x6 118
รูปที่ 3.27 สายอากาศแถวลำดับเชิงวงกลมจำนวน N ต้น 118
รูปที่ 3.28 การแพร่กระจายของสายอากาศแถวลำดับเชิงวงกลม 119
รูปที่ 3.29 สายอากาศแบบใช้จานพาราโบลิกและทิศทางการรับคลื่น 120
รูปที่ 3.30 การแพร่กระจายของสายอากาศแบบใช้จานพาราโบลิก 121
รูปที่ 3.31 สายอากาศแบบระนาบพื้นดิน 121
รูปที่ 3.32 การแพร่กระจายของสายอากาศแบบระนาบพื้นดิน 122
รูปที่ 3.33 สายอากาศรูปตัววีและทิศทางการแพร่กระจายคลื่น 122
รูปที่ 3.34 การแพร่กระจายของสายอากาศปีกไก่ 123
รูปที่ 3.35 สายอากาศสี่เหลี่ยมเปียกปูนและทิศทางการแพร่กระจายคลื่น 124
รูปที่ 3.36 สายอากาศรูปตัววีและทิศทางการแพร่กระจายคลื่น 124

รูปที่ 3.37 สายอากาศไดโพลแบบพับที่มีความยาว L 125

รูปที่ 4.1 หลักการทำงานของอภิวัสดุและภาพจำลองของวัสดุดังกล่าวที่ใช้ออกแบบสายอากาศ 131
รูปที่ 4.2 การออกแบบวงแหวนเรโซแนนซ์แบบวงเปิดและวงปิด 132
รูปที่ 4.3 แสดงการออกแบบวงแหวนคู่เรโซแนนซ์ 132
รูปที่ 4.4 การออกแบบวงจรวงแหวนเรโซแนนซ์แบบปรับค่าได้ 133
รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ของวงจรวงแหวนเรโซแนนซ์แบบปรับค่าได้ 133
รูปที่ 4.6 (ซ้าย) สายอากาศคลื่นรั่วทั่วไป (ขวา) สายอากาศคลื่นรั่วโดยอาศัยสมบัติอภิวัสดุ 134
รูปที่ 4.7 การแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ในทิศทางที่ตรงกันข้ามโดยอาศัยสมบัติอภิวัสดุ 134
รูปที่ 4.8 สายอากาศเรโซแนนซ์ขนาดเล็กโดยใช้คุณสมบัติอภิวัสดุ 135
รูปที่ 4.9 สายอากาศขนาดเล็กโดยใช้คุณสมบัติอภิวัสดุ 135
รูปที่ 4.10 สายอากาศที่ใช้หลักการเรโซแนนซ์โดยใช้วงแหวนเรโซแนนซ์ 135
รูปที่ 4.11 สายอากาศที่ใช้ชั้นผิวเป็นอภิวัสดุ (ซ้าย) ด้านหน้า (ขวา) ด้านหลัง 136
รูปที่ 4.12 โครงสร้างการทำงานของสายอากาศประเภทแอกทีฟ 136
รูปที่ 4.13 โครงสร้างทั่ว ๆ ไปของสายอากาศไมโครสตริป 137
รูปที่ 4.14 ลักษณะงานการขยายเครือข่ายสัญญาณ 138
รูปที่ 4.15 การออกแบบสายอากาศชนิดแพตช์ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮริตซ์ 139
รูปที่ 4.16 (ซ้าย) สายอากาศไมโครสตริปรูปตัวแอล (ขวา) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศ 139
รูปที่ 4.17 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปตัวแอล (ซ้าย) มุมมองด้านบน (ขวา) มุมมองด้านหลัง 140
รูปที่ 4.18 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปรูปตัวแอล (ซ้าย) ไม่มีวงแหวนคู่เรโซแนนซ์ (ขวา) มีวงแหวนคู่เรโซแนนซ์ 141
รูปที่ 4.19 แสดงการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปตัวเอฟ 142
รูปที่ 4.20 โครงสร้างของการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสายฟีดรูปตัวเอฟ 142
รูปที่ 4.21 โครงสร้างของการออกแบบสายอากาศรูปเอฟในงานวิจัยของ (Kurma) 143
รูปที่ 4.22 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปตัวแอฟ (ซ้าย) มุมมองด้านบน (ขวา) มุมมองด้านหลัง 143
รูปที่ 4.23 ผลของสายอากาศไมโครสตริปรูปตัวเอฟ (ซ้าย) ไม่มีวงแหวนคู่เรโซแนนซ์ (ขวา) มีวงแหวนคู่เรโซแนนซ์ 144
รูปที่ 4.24 สายอากาศไมโครสตริปรูปตัวเอฟที่สร้างขึ้นจริง (ซ้าย) มุมมองด้านบน (ขวา) มุมมองด้านหลัง 144

รูปที่ 4.25 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ของสายอากาศไมโครสตริปรูปตัวเอฟที่สร้างขึ้นโดยมีวงแหวนคู่เรโซแนนซ์ 145
รูปที่ 4.26 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ระหว่างสายอากาศทั้งสองผ่านอากาศ 146
รูปที่ 4.27 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ระหว่างสายอากาศทั้งสองผ่านอากาศโดยเว้นระยะห่าง 30 ซม. 146
รูปที่ 4.28 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (ERA-1+) 147
รูปที่ 4.29 การต่อวงจรของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (ERA-1+) 147
รูปที่ 4.30 การต่ออุปกรณ์ขยายสัญญาณเข้ากับสายอากาศไมโครสตริปบนสายส่งสัญญาณด้านหน้า 147
รูปที่ 4.31 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}) ระหว่างสายอากาศทั้งสองผ่านอากาศโดยเว้นระยะห่าง 30 ซม. (มีการใช้ตัวขยายสัญญาณ) 148
รูปที่ 4.32 รูปทรงต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ เพื่อให้เกิดค่าความถี่เรโซแนนซ์ใหม่ 149
รูปที่ 4.33 การออกแบบสายอากาศโดยการนำเอารูปทรงตัวยูและตัวอีมาผสมผสานกัน 149
รูปที่ 4.34 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศโดยการนำเอารูปทรงตัวยูและตัวอีมาผสมผสานกัน 150
รูปที่ 4.35 สายอากาศไดโพลแบบปรับค่าความถี่ได้ 152
รูปที่ 4.36 สายอากาศไดโพลแบบปรับค่าความถี่ได้โดยใช้สวิตช์ควบคุม 152
รูปที่ 4.37 สายอากาศไดโพลแบบปรับค่าความถี่ได้โดยใช้สวิตช์ไดโอดควบคุม 154
รูปที่ 4.38 สวิตช์โครงสร้างปลายยื่น (Cantilever Switch) 155
รูปที่ 4.39 สวิตช์โครงสร้างสะพานอากาศ (Air-bridge Switch) 156
รูปที่ 4.40 โครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นที่ใช้สวิตช์ MEMS 157
รูปที่ 4.41 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ของสายอากาศไดโพลแบบครึ่งคลื่นที่ใช้สวิตช์ MEMS 157
รูปที่ 4.42 โครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบช่องคลื่นที่ใช้สวิตช์ MEMS 158
รูปที่ 4.43 โครงสร้างสายอากาศแบบไมโครสตริปที่ใช้สวิตช์ MEMS 159

รูปที่ 5.1. รูปร่างของพื้นที่ทดสอบแบบเปิดโล่ง (OAT) 163
รูปที่ 5.2. กำลังส่งสัญญาณจากสายอากาศภาครับไปยังภาคส่งตามหลักการของฟริส 164
รูปที่ 5.3 การคำนวณค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐาน 165
รูปที่ 5.4 แสดงค่า NSA ที่คำนวณได้จากสมการ (5.5) 166
รูปที่ 5.5 ตัวอย่างของ TEM Cell 167
รูปที่ 5.6 การออกแบบและรูปสำเร็จของ GTEM Cell 167
รูปที่ 5.7 ตำแหน่งการวัดค่าสนามไฟฟ้าของ GTEM Cell 168
รูปที่ 5.8 การตั้งค่าระบบการวัดสนามไฟฟ้าของ GTEM Cell 169

รูปที่ 5.9 ระยะทดสอบสนามไกลเทียบกับขนาดมิติของสายอากาศ 171
รูปที่ 5.10 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสมบูรณ์ 172
รูปที่ 5.11 แผ่นและคุณสมบัติของเฟอร์ไรต์ 172
รูปที่ 5.12 วัสดุที่มีอยู่ภายในประเทศไทยในการสร้างเป็นวัสดุดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า: ข้าวเปลือก ข้าวเปลือกปน ยางพารา และผงถ่าน ตามลำดับ 173
รูปที่ 5.13 แม่แบบอัดขึ้นรูปวัสดุดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 174
รูปที่ 5.14 วัสดุดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำจาก ข้าวเปลือก ข้าวเปลือกปน ยางพารา และผงถ่าน 174
รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุดูดซับ 174
รูปที่ 5.16 ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า 175
รูปที่ 5.17 การวัดปริมาตรการทดสอบตามมาตรฐาน CISPR 16-1-4 176
รูปที่ 5.18 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสมบูรณ์ขนาด 3 เมตร 177
รูปที่ 5.19 การวางตำแหน่งสายอากาศภาคส่งที่ระยะทางทั้งสิ้น 6 ตำแหน่งในแนวเส้นตรงไปยังจุดที่สายอากาศภาครับ 178
รูปที่ 5.20 ผลการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ระยะทางทั้งสิ้น 6 ตำแหน่งในแนวเส้นตรงไปยังจุดที่สายอากาศภาครับ 178
รูปที่ 5.21 ปริมาตรทดสอบภายในห้องปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 179
รูปที่ 5.22 การหาค่าความสูงของปริมาตรทดสอบภายในห้องปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 179
รูปที่ 5.23 การหาค่า NSA ภายในห้องปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสมบูรณ์ 180
รูปที่ 5.24 ผลการวัดค่า NSA ภายในห้องปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสมบูรณ์ 180
รูปที่ 5.25 การหาค่า NSA โดยการเบนลงภายในห้องปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสมบูรณ์ 182
รูปที่ 5.26 การหาค่า NSA ภายในห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า 182
รูปที่ 5.27 การวัดค่า NSA ภายในห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า 183
รูปที่ 5.28 ผลการวัดค่า NSA ภายในห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า 183
รูปที่ 5.29 แผนผังการวัดคุณสมบัติสายอากาศ 185
รูปที่ 5.30 การแพร่กระจายของคลื่นไปยังสายอากาศภาครับ 186
รูปที่ 5.31 ระยะทดสอบแบบกะทัดรัด (Compact Range) 186
รูปที่ 5.32 การวัดสายอากาศขนาดเล็กโดยใช้กล่อง GTEM Cell 187
รูปที่ 5.33 การวัดรูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศประเภทไมโครสตริป 188
รูปที่ 5.34 ตัวอย่างการวัดรูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศประเภทไมโครสตริป 189
รูปที่ 5.35 ตัวอย่างการวัดค่าความกว้างลำที่นิยมทั้งสองแบบคือ HPBW และ FNBW 189
รูปที่ 5.36 แผนผังการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ 190
รูปที่ 5.37 แผนผังการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ (เมื่อแทนที่ด้วยสายอากาศทดสอบ) 190

รูปที่ 5.38 แผนผังการวัดค่าเฟสของสายอากาศ 191
รูปที่ 5.39 แผนผังการวัดค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศ 192
รูปที่ 5.40 ผลการวัดค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศ 193
รูปที่ 5.41 ผลการวัดค่าโพลาไรเซชันของสายอากาศแบบแนวแกนโพลาไรเซชันเป็นแบบวงกลม 193
รูปที่ 5.42 เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายสองพอร์ต 194
รูปที่ 5.43 ชุดอุปกรณ์สอบเทียบเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายสองพอร์ต (ซ้าย) หัวต่อชนิด N (ขวา) หัวต่อชนิด SMA 195
รูปที่ 5.44 ตัวอย่างค่า S_{11} และ VSWR จากเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายสองพอร์ต 175
รูปที่ 5.45 แบนด์วิดท์ของสายอากาศจากค่า S_{11} และ VSWR 196

รูปที่ 6.1 อุปกรณ์สื่อสารไร้สายส่วนบุคคล 201
รูปที่ 6.2 การออกแบบสายอากาศสำหรับอุปกรณ์สื่อสารไร้สายส่วนบุคคล 201
รูปที่ 6.3 สายอากาศภายนอกที่ใช้กับโทรศัพท์เคลื่อนที่(ซ้าย) สายอากาศแบบโมโนโพล (Monopoles) (ขวา) สายอากาศขนาดเล็ก(Stubby) 204
รูปที่ 6.4 สายอากาศแนวระนาบรูปทรงตัวเอฟกลับหัว (ซ้าย) สายอากาศโมโนโพลแบบขด (ขวา) 204
รูปที่ 6.5 สายอากาศชนิดโมโนโพลสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์วางตัก (Laptop) 206
รูปที่ 6.6 ผลการตอบสนอง (S_{11}) ของสายอากาศชนิดโมโนโพลสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์วางตัก (Laptop) 206
รูปที่ 6.7 ลักษณะการจัดวางสายอากาศบนคอมพิวเตอร์วางตัก (Laptop) 207
รูปที่ 6.8 ระบบการสื่อสารโดยเทคโนโลยี MIMO ทั่วไป 208
รูปที่ 6.9 แผนผังของเทคโนโลยี MIMO ที่มีการคัปปลิ้งของสายอากาศย่อยภาครับและภาคส่ง 211
รูปที่ 6.10 ตัวสะท้อนสัญญาณเชิงมุม (Corner Reflector) 213
รูปที่ 6.11 การตั้งสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับการใช้ช่องสัญญาณความถี่ซ้ำ f_1, f_2 และ f_3 214
รูปที่ 6.12 การปรับลำคลื่นสายอากาศในแนวตั้ง 215
รูปที่ 6.13 สายอากาศของสถานีฐานที่สามารถปรับลำคลื่นได้ 215
รูปที่ 6.14 วิวัฒนาการของสายอากาศของสถานีฐานแบบต่างๆ 216
รูปที่ 6.15 การรวมระบบสื่อสารวิทยุเข้ากับสายอากาศ 218
รูปที่ 6.16 วิวัฒนาการของการใช้เทคโนโลยีแอกทีฟกับสายอากาศ 219
รูปที่ 6.17 การใช้เทคโนโลยีแอกทีฟกับสายอากาศ 219
รูปที่ 6.18 การใช้เทคโนโลยี Massive MIMO ทำให้สามารถสื่อสารได้พร้อมกันหลากหลายเส้นทาง 220
รูปที่ 6.19 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นสำหรับ Massive MIMO รูปทรงกระบอก 221

รูปที่ 6.20 ค่าผลการตอบสนองทางความถี่ (S11) ของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นสำหรับ Massive MIMO รูปทรงกระบอก 222
รูปที่ 6.21 ความสามารถในการปรับมุมของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นสำหรับ Massive MIMO รูปทรงกระบอกในแนวระนาบแต่ละเซกเตอร์ที่ 30 องศา 222
รูปที่ 6.22 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นสำหรับเทคโนโลยี Massive MIMO รูปทรงระนาบ (ขวา) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (ซ้าย) 223
รูปที่ 6.23 การแพร่กระจายสัญญาณเครือข่ายไร้สายตามมาตรฐานต่างๆ ภายในอาคารและสนามบิน 224
รูปที่ 6.24 แผนผังการเชื่อมต่อของระบบแพร่กระจายสัญญาณเครือข่ายไร้สายในระบบเส้นใยนำแสง 225
รูปที่ 6.25 สายอากาศที่รวมกับอุปกรณ์เชิงแสง (ซ้าย) กับอุปกรณ์เลเซอร์ และ (ขวา) กับอุปกรณ์รับแสง 226
รูปที่ 6.26 ผลตอบสนองต่อความถี่ของสายอากาศรวมกับอุปกรณ์เชิงแสง (ซ้าย) กับเลเซอร์ และ (ขวา) กับอุปกรณ์รับแสง 226
รูปที่ 6.27 สายอากาศรวมกับอุปกรณ์เชิงแสงโดยการใช้วงจรแมตชิ่งประเภทสตับเดี่ยว (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง 227
รูปที่ 6.28 สายอากาศรวมกับอุปกรณ์เชิงแสงโดยการใช้วงจรแมตชิ่งประเภทสตับเดี่ยว 227
รูปที่ 6.29 ผลตอบสนองต่อความถี่ของสายอากาศรวมกับอุปกรณ์เชิงแสงโดยการใช้วงจรแมตชิ่งประเภทสตับเดี่ยวกับอุปกรณ์รับแสง 228
รูปที่ 6.30 ระบบกระจายสัญญาณเครือข่ายไร้สายผ่านเส้นใยนำแสงโดยใช้สายอากาศรวมกับอุปกรณ์เชิงแสง 229
รูปที่ 6.31 ค่าปริมาณข้อมูลสัมฤทธิผลและความแรงสัญญาณเทียบกับระยะทาง 229
รูปที่ 6.32 สายอากาศสำหรับระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสงในระบบ 5G 230
รูปที่ 6.33 ระบบสายอากาศสำหรับระบบการสื่อสารเส้นใยนำแสงในระบบ 5G 231
รูปที่ 6.34 แผนภาพดวงดาวของสัญลักษณ์ที่ภาครับที่การมอดูเลตข้อมูลแบบ 16-QAM, 32-QAM และ 64-QAM ตามลำดับ 231

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอรีที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปตัวแอล 141

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปตัวแอล 144

ตารางที่ 4.3 ตารางการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสวิตช์ 156

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน GTEM Cell ทั้ง 10 จุด 169

บทนำและความสำคัญของสายอากาศ

1

โดย รศ. ดร.วิทวัส สิฏฐกุล

วัตถุประสงค์

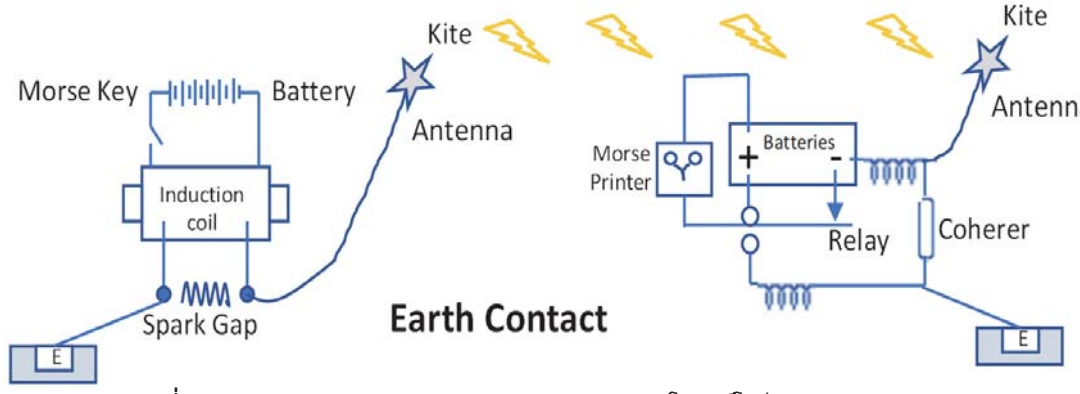
เพื่ออธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของการใช้สายอากาศในงานทางด้านวิศวกรรมสายอากาศ คำจำกัดความ และคุณลักษณะของสายอากาศ คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและผลกระทบของพื้นดินในระบบการสื่อสารไร้สายโดยใช้สายอากาศ และเข้าใจถึงระบบพิกัดแบบต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณทางเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ของสายอากาศในบทต่อไปได้

บทนำ

ปัจจุบันสายอากาศถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคมทั่วโลก เมื่อเรามองไปรอบตัวเราในสถานที่ต่างๆ เราจะพบสายอากาศอยู่ทุกหนทุกแห่ง ไม่ว่าสายอากาศจะถูกติดตั้งภายในหรือภายนอกอุปกรณ์ต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น โทรศัพท์ไร้สาย คอมพิวเตอร์ เมาส์ไร้สาย ลำโพงไร้สาย เซนเซอร์ไร้สาย โทรทัศน์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เกือบทุกชนิด

1.1 ประวัติศาสตร์ของสายอากาศ

ประวัติศาสตร์ของสายอากาศนั้น อาจจะต้องย้อนไปถึงสมัย นายเจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clark Maxwell) ผู้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างชุดของสมการที่อธิบายถึงปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลึกซึ้งที่รู้จักกันในนามของสมการของแมกซ์เวลล์ ผลงานของเขาได้รับการตีพิมพ์เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1873 นอกจากนี้เขายังแสดงให้เห็นว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นแสงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองเดินทางควบคู่กันไป ในปี ค.ศ. 1886 ศาสตราจารย์ไฮน์ริช รูดอล์ฟ เฮิรตซ์ (Heinrich Rudolph Hertz) สามารถผลิตระบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไร้สายในห้องปฏิบัติการของเขาที่ความยาวคลื่น 4 เมตร โดยการสร้างการเกิดประกายไฟ (Spark) ในช่องอากาศว่างผ่านสายอากาศไดโพลชนิดครึ่งคลื่น และสามารถตรวจพบประกายไฟในช่องอากาศว่างของวงรอบตัวมันได้ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1901 นายกูลเยลโม มาร์โกนี (Guglielmo Marconi) สามารถส่งสัญญาณไร้สายในระยะทางไกลได้ในปี ค.ศ. 1901 เขาแสดงการส่งผ่านสัญญาณไร้สายข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกเป็นครั้งแรกจากเมืองคอร์นวอลล์ ประเทศอังกฤษ ไปยังเมืองเซนต์จอนส์ ประเทศแคนาดา โดยสายอากาศส่งสัญญาณของเขาประกอบด้วยสายไฟวางในแนวตั้งจำนวน 50 เส้น ในรูปแบบของพัดที่เชื่อมต่อกับพื้นดินเพื่อส่งผ่านประกายไฟ สายไฟเหล่านี้ถูกขึงในแนวนอนด้วยระยะห่างระหว่างเสาไม้ 60 เมตร สายอากาศรับสัญญาณที่เมืองเซนต์จอห์นส์เป็นลวดยาว 200 เมตร ที่ดึงและขึงโดยว่าวดังรูปที่ 1.1

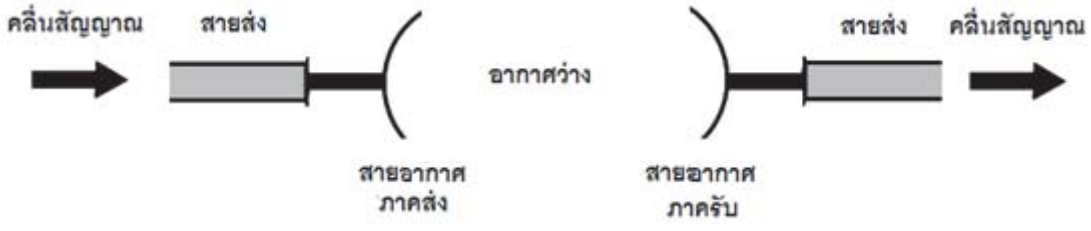


รูปที่ 1.1 แผนภาพการทำงานของสายอากาศของนายกูลเยลโม มาร์โกนี

ภายหลังจากนั้นเป็นต้นมา จึงเกิดการสร้างสายอากาศปากแตรและตัวสะท้อนสัญญาณเพื่อใช้กับงานทางด้านการสื่อสารไร้สายขึ้น นอกจากนี้ปัจจัยที่เอื้อต่อยุคใหม่นี้คือการประดิษฐ์แหล่งจ่ายสัญญาณไมโครเวฟที่มีความถี่ตั้งแต่ 1 GHz ขึ้นไป เทคโนโลยีสมัยใหม่ในยุคทศวรรษที่ 1960 ถึงทศวรรษที่ 1990 มีผลกระทบสำคัญต่อความก้าวหน้าของเทคโนโลยีสายอากาศอันทันสมัย และคาดว่าจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อวิศวกรรมสายอากาศในศตวรรษที่ 21 เริ่มต้นในช่วงต้นทศวรรษที่ 1960 โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลขเพื่อให้สามารถวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างสายอากาศอันซับซ้อนที่ก่อนหน้านี้ได้อย่างถูกต้อง

1.2 คำจำกัดความของสายอากาศ (Definitions of Antenna)

หากเราจะอ้างอิงถึงคำนิยามของสายอากาศตามมาตรฐานแล้ว คำนิยามของสายอากาศถูกให้ไว้ในมาตรฐาน IEEE 145-1983 ว่า *"วิธีการหนึ่งสำหรับการแพร่กระจายหรือการรับคลื่นวิทยุ"* แต่คำจำกัดความของสายอากาศโดยทั่วไปจะหมายถึงโครงสร้างซึ่งรองรับการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ไประหว่างท่อนำคลื่นและอากาศว่าง และในทางกลับกันก็สามารถหมายถึงโครงสร้างซึ่งรองรับการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ไประหว่างอากาศว่างและท่อนำคลื่น ในที่นี้คำว่า "อากาศว่าง" ในทางปฏิบัติอาจจะเกิดผลกระทบจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ ยกตัวอย่างเช่น ตึกอาคาร และต้นไม้ เป็นต้น ซึ่งขัดขวางการเดินทางของคลื่น ในการเคลื่อนที่ของคลื่นในอากาศนั้นคลื่นจะดูดซับพลังงานจากสายส่งและส่งผ่านพลังงานไปในอากาศว่างจนไปถึงสายอากาศภาครับสัญญาณ สายอากาศจะทำหน้าที่ในการรวบรวมพลังงานจากคลื่นกระทบและส่งพลังงานต่อไปยังสายส่งดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แผนภาพการทำงานของสายอากาศ

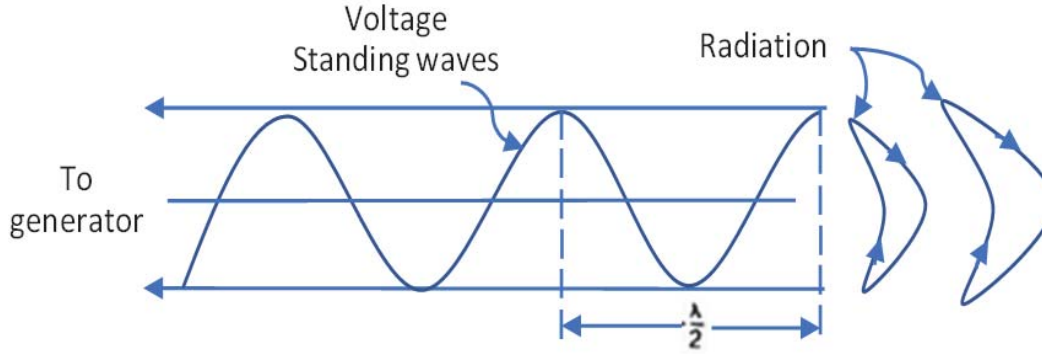
เมื่อเราพูดถึงสายอากาศ โดยมากเราจะพูดถึงคุณสมบัติของสายอากาศภาคส่งเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วคุณสมบัติของสายอากาศภาครับและภาคส่งจะเหมือนกัน หากเป็นสายอากาศชนิดเดียวกันที่เหมือนกันทุกประการ เช่น ลักษณะการแพร่กระจายของสายอากาศ และอัตราขยายของสายอากาศ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วสายอากาศภาคส่งและภาครับอาจไม่จำเป็นต้องมีคุณสมบัติเหมือนกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ระบบการสื่อสารของโทรศัพท์ไร้สายซึ่งต้องการการสื่อสารระหว่างสายอากาศภายในโทรศัพท์ไร้สายและสายอากาศของสถานีฐาน โดยสายอากาศของโทรศัพท์ไร้สายจะต้องมีขนาดที่เล็กและอัตราขยายต่ำ ในขณะที่สายอากาศของสถานีฐานจะมีขนาดใหญ่และอัตราขยายสูง นอกจากนั้นโครงสร้างของสายอากาศยังแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานอีกด้วย เช่น รูปร่างของ

สายอากาศ ซึ่งมันจะขึ้นกับลักษณะการแพร่กระจายของสายอากาศ และยังขึ้นอยู่กับวิธีการต่อสายอากาศอีกด้วย เช่น การใช้สายอากาศเดี่ยวหรือการต่อสายอากาศแบบแถวลำดับ

1.3 กลไกการทำงานของสายอากาศ

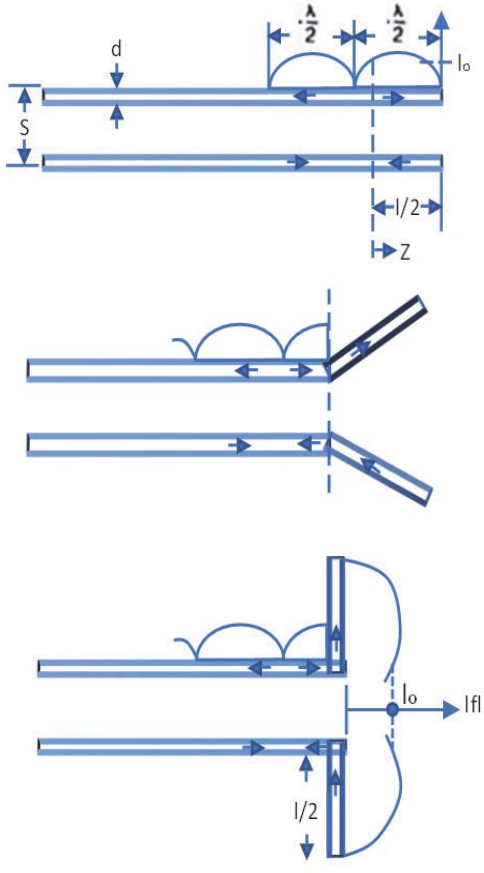
1.3.1 การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากสายส่ง

เมื่อมีการป้อนสัญญาณเข้าไปในสายส่งวงจรเปิด กระแสไฟฟ้าจะเดินทางไปตามสายส่งและเมื่อถึงปลายเปิดของสายส่งจะเกิดการสะท้อนกลับ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งและอากาศว่างไม่เท่ากัน หรือการเกิดภาวะไม่แมตชิ่งเชิงอิมพีแดนซ์ (Impedance Matching) ผลรวมของสัญญาณที่เดินทางไปข้างหน้าและสัญญาณที่สะท้อนกลับจะทำให้เกิดเป็นผลรวมของคลื่นเป็นคลื่นนิ่ง (Standing Wave) บนสาย ดังรูปที่ 1.3 สัญญาณที่สะท้อนกลับจะมีค่าไม่เท่ากับสัญญาณที่ป้อนเข้าไปทั้งหมด เพราะว่ามีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกแพร่กระจายออกไป



รูปที่ 1.3 การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากสายส่ง

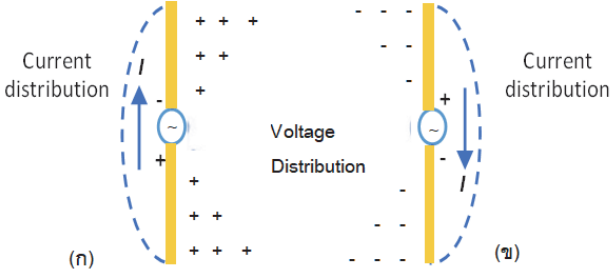
ทั้งนี้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนหนึ่งถูกแพร่กระจายออกไปที่ปลายสายนี้ จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพื้นที่บริเวณปลายเปิดของสาย ซึ่งหากต้องการให้เกิดภาวะแมตชิ่งอิมพีแดนซ์ระหว่างปลายสายอากาศและอิมพีแดนซ์ของอากาศ (377 Ω) จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานสูงสุด และอีกประเด็นหนึ่งคือขั้วปลายสายของสายอากาศที่นำกระแสไฟฟ้าขั้วบวกและลบ หากขั้วปลายสายทั้งสองอยู่ติดกันมาก จะส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่รั่วออกเกิดการหักล้างกัน ทำให้สายส่งแบบคู่ขนานมีการแพร่กระจายน้อยมาก ดังนั้นเพื่อให้เกิดการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากสายส่งได้มากสุด เราจึงนิยมแยกปลายสายทั้งสองให้ห่างออกจากกันดังรูปที่ 1.4 ทำให้เกิดการหักล้างของการแพร่กระจายจากปลายสายน้อยลง ทั้งนี้หากเราแยกปลายสายให้ออกห่างกันจนทำมุม 180 องศา เราจะเรียกสายอากาศประเภทนี้ว่า *สายอากาศแบบไดโพล* ซึ่งรายละเอียดของสายอากาศดังกล่าวจะถูกอธิบายอย่างละเอียดในบทที่ 3 ต่อไป



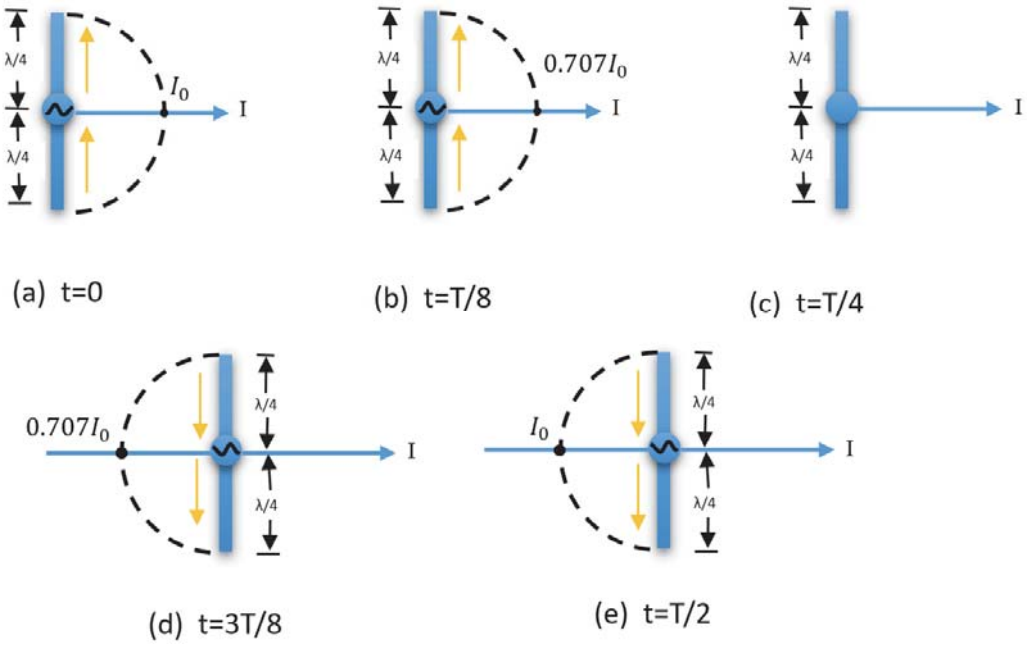
รูปที่ 1.4 การแยกปลายเปิดสายส่งทั้งสองให้ห่างออกจากกัน

1.3.2 การกระจายของกระแสและแรงดันในสายอากาศ

การกระจายของกระแสและแรงดันในสายอากาศจะคล้ายกับกระจายของกระแสและแรงดันในสายส่ง รูปที่ 1.5 แสดงการกระจายของแรงดันและกระแสในทางอุดมคติตลอดความยาวของไดโพลครึ่งคลื่น จะเห็นได้ว่ามันมีลักษณะเหมือนกันกับการกระจายของกระแสและแรงดันบนสายส่งปลายเปิด ขนาด 1/4 ของความยาวคลื่น โดยที่จุดป้อนจะมีแรงดันต่ำแต่กระแสสูง โดยแรงดันและกระแสจะกลับขั้วกันทุกๆ ครึ่งรอบ ดังรูปที่ 1.6



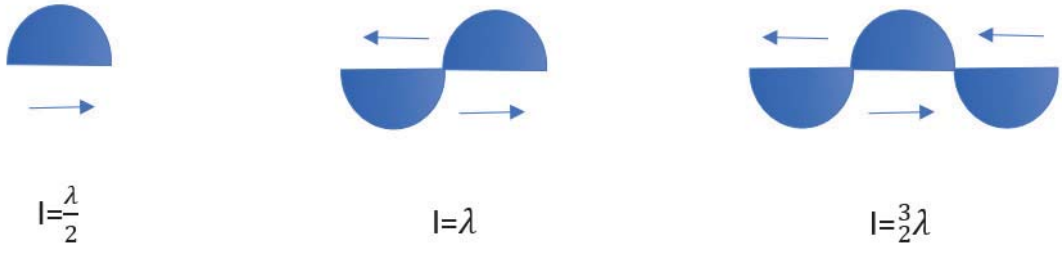
รูปที่ 1.5 การกระจายของแรงดันและกระแสในทางอุดมคติ



รูปที่ 1.6 การเหนี่ยวนำระหว่างสายอากาศทั้งสอง

1.3.3 สายอากาศแบบเรโซแนนซ์

เนื่องจากวงจรสมมูลของสายอากาศประกอบไปด้วยวงจร RLC ดังที่กล่าวมาเบื้องต้นแล้ว โดยทั่วไปแล้วสายอากาศจะใช้หลักการเรโซแนนซ์ในการทำงานเช่นเดียวกันกับสายส่งเรโซแนนซ์ ดังนั้นสายอากาศจะมีลักษณะเหมือนสายส่งวงจรเปิดด้านปลายที่มีความยาวพอดีกับระยะเรโซแนนซ์ ซึ่งระยะเรโซแนนซ์ที่พอดีจะเกิดทุกความยาวเท่ากับ 1/4 ของความยาวคลื่น ดังนั้นสายอากาศเรโซแนนซ์จะมีความยาวรวมเป็นผลทวีคูณของ1/2 ของความยาวคลื่นดังรูปที่ 1.7 โดยรูปแบบการแพร่กระจายของสายอากาศเรโซแนนซ์ชนิดไดโพลที่ค่าความยาวต่างๆ สามารถดูได้ดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.7 การกระจายของกระแสบนสายอากาศเรโซแนนซ์ที่ค่าความยาวต่างๆ

วิศวกรรมสายอากาศ

ANTENNA ENGINEERING

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่ง มีหน้าที่เปลี่ยนปริมาณทางไฟฟ้าในรูปของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือในทางกลับกัน มันสามารถรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสามารถเปลี่ยนไปในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับดังกล่าวสามารถถูกใช้เป็นคลื่นพาห์ นำพาสัญญาณข้อมูลออกไปสู่อากาศ ทำให้ระบบการสื่อสารไร้สายใดๆ ต้องมีสายอากาศเป็นส่วนประกอบด้วยเสมอ เนื่องจากการสื่อสารในปัจจุบันถูกพัฒนาไปอย่างก้าวกระโดด ทำให้สายอากาศรูปแบบใหม่ๆ ต้องถูกออกแบบและนำไปใช้โดยใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมสายอากาศ เช่น ปัจจุบันเทคโนโลยี 5G ได้รับความนิยมสูงมากทั่วโลก ทำให้สายอากาศในย่านความถี่ 3.5 กิกะเฮิรตซ์ หรือย่าน 28 กิกะเฮิรตซ์ ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย

หนังสือเล่มนี้จึงถูกออกแบบให้มีเนื้อหาตรงตามระเบียบคณะกรรมการสภาวิศวกร เหมาะสำหรับนิสิตนักศึกษา วิศวกร และผู้สนใจ อีกทั้งยังเพิ่มเติมเนื้อหาทางด้านหลักการทดสอบสายอากาศและการประยุกต์ใช้สายอากาศในระบบ 5G เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงเนื้อหาดังกล่าวได้อย่างครอบคลุมตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำคือ การออกแบบ การวิเคราะห์ การทดสอบและการนำไปประยุกต์ใช้งานผ่านประสบการณ์ของผู้เขียนเอง และการรวบรวมเนื้อหาต่างๆ จากหนังสือตำราทั้งในประเทศและต่างประเทศ เอกสารและมาตรฐานการวัดสายอากาศต่างๆ เป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้สนใจศึกษาวิชานี้สามารถใช้หนังสือเล่มนี้เพียงเล่มเดียวในการศึกษาและออกแบบสายอากาศได้ด้วยตนเอง

ISBN 978-616-08-3947-6

300 บาท

คู่มือเรียน-อุดมศึกษา/วิศวกรรม-เทคโนโลยีและการสื่อสาร

www.se-ed.com

sbc.fans