สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ทฤษฎีระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย	4
2.3 ทฤษฎีระบบเครือข่ายเมชไร้สาย	9
2.4 สายอากาศแถวลำดับ	16
2.5 ระบบสายอากาศเก่ง	25
2.6 เทคนิคการหันลำคลื่น	34
2.7 วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์	38
2.8 กล่าวสรุป	40
บทที่ 3 การจำลองแบบของสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับเครือข่ายไร้สายแบบเมช โดยใช้โปรโตคอล Synchronous Collision Resolution	42
3.1 กล่าวนำ	42
3.2 สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น	42
3.3 ทฤษฎีคิว	44
3.4 ปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณ	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การจำลองแบบเพื่อดูผลกระทบของสัญญาณแทรกสอด	46
3.6 ผลการจำลองแบบ	48
3.7 กล่าวสรุป	49
บทที่ 4 การออกแบบระบบสายอากาศสวิตช์การกำหนดทิศทางของจุดศูนย์	50
4.1 กล่าวนำ	50
4.2 สายอากาศแถวลำดับ	51
4.3 การออกแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ	54
4.4 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์	71
4.5 กล่าวสรุป	89
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล	90
5.1 กล่าวนำ	90
5.2 การทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์	90
5.3 การทดสอบระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นอย่างง่ายที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์	117
5.4 กล่าวสรุป	128
บทที่ 6 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	129
6.1 สรุปเนื้อหางานวิจัย	129
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	130
6.3 แนวทางในการพัฒนาในอนาคต	130
บรรณานุกรม	131
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่	134
ประวัติผู้วิจัย	136

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว 5

รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง 6

รูปที่ 2.3 เครื่องหมายวายฟาย 8

รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายแบบเมช 10

รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมชไร้สาย 11

รูปที่ 2.6 ลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งาน 12

รูปที่ 2.7 โครงสร้างเครือข่ายเมชแบบไฮบริด 13

รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเครือข่ายเมชไร้สายโดยใช้ระบบของสายอากาศที่แตกต่างกัน

(ก)สายอากาศแบบรอบทิศทาง (ข) สายอากาศแบบชี้ทิศทาง 15

รูปที่ 2.9 ระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ 15

รูปที่ 2.10 การวางตัวของสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน N×1 ต้น 17

รูปที่ 2.11 การวางตัวของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 19

รูปที่ 2.12 เฟสที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละตัวสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ

2×2 เทียบกับทิศทางการมาถึงของสัญญาณ 20

รูปที่ 2.13 ระบบสายอากาศเก่ง 21

รูปที่ 2.14 ระบบสายอากาศเก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ 22

รูปที่ 2.15 โครงสร้างและองค์ประกอบของสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น 31

รูปที่ 2.16 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น 33

รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริก 35

รูปที่ 2.18 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบที่มีตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อทำการปรับเฟส

หรือแอมพลิจูดของสัญญาณ 36

รูปที่ 2.19 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 37

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้ว 37

รูปที่ 3.1 สายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นแบบ 2×2 43

รูปที่ 3.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น 2×2 43

รูปที่ 3.3 ระบบคิว 44

รูปที่ 3.3 รูปแบบการส่งสัญญาณจากโนดต่างๆ ในระบบ 44

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเข้าถึงของกลุ่มข้อมูลในระบบเครือข่ายเมชไร้สาย 45

รูป 3.5 ตัวอย่างการชนกันของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกัน 46

รูปที่ 3.6 สถานการณ์ทั้งสามของเครือข่ายเมชไร้สายที่ใช้ในการจำลองแบบเมื่อ
(ก) ทุกโนดติดตั้งสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานรอบทิศทาง
(ข) โนดตัวกลางติดตั้งสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นเพียงตัวเดียว
(ค) ทุกโนดติดตั้งสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น 47

รูปที่ 3.7 ค่าเฉลี่ย สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด เทียบกับค่าความหนาแน่นทราฟฟิก
(ก) กรณีที่ค่าอัตราการมาถึงของข้อมูลเฉลี่ยเท่ากับ 0.5
(ข) กรณีที่ค่าอัตราการบริการเฉลี่ยเท่ากับ 0.5 48

รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนด
ทิศทางของจุดศูนย์ 50

รูปที่ 4.2 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2×2 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 52

รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2
มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ 52

รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2
มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$ 53

รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นฐานของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° 54

รูปที่ 4.6 ขนาดของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° 58

รูปที่ 4.7 ขนาดของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° 58

รูปที่ 4.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° 59

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° 59
รูปที่ 4.10 มุมเฟสของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° 60
รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นฐานของวงจรไขว้สัญญาณ 61
รูปที่ 4.12 ขนาดของวงจรไขว้สัญญาณ 63
รูปที่ 4.13 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ 64
รูปที่ 4.14 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ 64
รูปที่ 4.15 มุมเฟสของวงจรไขว้สัญญาณ 65
รูปที่ 4.16 ขนาดของวงจรเลื่อนเฟส 66
รูปที่ 4.17 ลักษณะการเดินทางของสัญญาณในขณะที่ยังไม่มีวงจรเลื่อนเฟส 66
รูปที่ 4.18 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเลื่อนเฟส 67
รูปที่ 4.19 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อของวงจรเลื่อนเฟส 67
รูปที่ 4.20 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 68
รูปที่ 4.21 อุปกรณ์ต้นแบบของของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้วที่สร้างขึ้นสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2×2 68
รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้ของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้ว 71
รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315° 72
รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315° 73
รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315° ที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225° 73
รูปที่ 4.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทาง 74

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.27 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315° 77
รูปที่ 4.28 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315° 77
รูปที่ 4.29 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315° 78
รูปที่ 4.30 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135°และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315° 79
รูปที่ 4.31 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315° 80
รูปที่ 4.32 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315° 80
รูปที่ 4.33 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315° 81
รูปที่ 4.34 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135°และ 315° 82
รูปที่ 4.35 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315° 82
รูปที่ 4.36 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 225° 84
รูปที่ 4.37 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 225° 84
รูปที่ 4.38 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 225° 85

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.39 แบบรูปการแผ่พลังงานโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315° 86

รูปที่ 4.40 แบบรูปการแผ่พลังงานโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315° 87

รูปที่ 4.41 แบบรูปการแผ่พลังงานโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315° 87

รูปที่ 4.42 แบบรูปการแผ่พลังงานโดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225° 88

รูปที่ 5.1 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° 91

รูปที่ 5.2 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° 91

รูปที่ 5.3 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° 92

รูปที่ 5.4 แอมพลิจูดของวงจร k_1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° 92

รูปที่ 5.5 มุมเฟสของวงจร k1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° 93

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.6 แอมพลิจูดของวงจร k2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° 93
รูปที่ 5.7 มุมเฟสของวงจร k2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° 94
รูปที่ 5.8 แอมพลิจูดของวงจร k3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° 94
รูปที่ 5.9 มุมเฟสของวงจร k_3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° 95
รูปที่ 5.10 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์และป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315° 96
รูปที่ 5.11 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° 97
รูปที่ 5.12 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° 98
รูปที่ 5.13 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° 98
รูปที่ 5.14 แอมพลิจูดของวงจร k_1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° 99
รูปที่ 5.15 มุมเฟสของวงจร k_1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° 99
รูปที่ 5.16 แอมพลิจูดของวงจร k2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° 100
รูปที่ 5.17 มุมเฟสของวงจร k2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° 100
รูปที่ 5.18 แอมพลิจูดของวงจร k3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° 101

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.19 มุมเฟสของวงจร k3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ ที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° 101
รูปที่ 5.20 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการวัด ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ และป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการ เข้าในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315° 103
รูปที่ 5.21 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง ที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° 104
รูปที่ 5.22 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง ที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° 104
รูปที่ 5.23 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ ที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° 105
รูปที่ 5.24 แอมพลิจูดของวงจร k1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง ที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° 105
รูปที่ 5.25 มุมเฟสของวงจร k_1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ ที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° 106
รูปที่ 5.26 แอมพลิจูดของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง ที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° 106
รูปที่ 5.27 มุมเฟสของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ ที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° 107
รูปที่ 5.28 แอมพลิจูดของวงจร k_3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง ที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° 107
รูปที่ 5.29 มุมเฟสของวงจร k3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ ที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° 108
รูปที่ 5.30 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ และป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ ต้องการเข้าในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315° 109

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.31 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° 110
รูปที่ 5.32 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° 111
รูปที่ 5.33 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° 111
รูปที่ 5.34 แอมพลิจูดของวงจร k1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° 112
รูปที่ 5.35 มุมเฟสของวงจร k1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° 112
รูปที่ 5.36 แอมพลิจูดของวงจร k2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° 113
รูปที่ 5.37 มุมเฟสของวงจร k2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° 113
รูปที่ 5.38 แอมพลิจูดของวงจร k3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° 114
รูปที่ 5.39 มุมเฟสของวงจร k3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° 114
รูปที่ 5.40 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์และป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225° 116
รูปที่ 5.41 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเมชไร้สายที่ใช้ในการทำการทดสอบจริง 117
รูปที่ 5.42 อุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งตรงกลางในเครือข่ายเมชไร้สายที่ใช้ในการทดสอบผลในงานวิจัยฉบับนี้ 118
รูปที่ 5.43 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง 118

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.44 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่ 135° 225° และ 315° 120

รูปที่ 5.45 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่ 45° 225° และ 315° 120

รูปที่ 5.46 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่ 45° 135° และ 315° 121

รูปที่ 5.47 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่ 45° 135° และ 225° 121

รูปที่ 5.48 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° 122

รูปที่ 5.49 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° 122

รูปที่ 5.50 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° 123

รูปที่ 5.51 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° 123

รูปที่ 5.52 เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการดาวน์โหลดข้อมูล โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ 124

รูปที่ 5.53 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการวัดค่าวิสัยสามารถ เมื่อใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและใช้ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นในงานวิจัยนี้ 125

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.54 รูปแบบของการทดสอบขณะที่จุดเข้าถึงสัญญาณมีการเปลี่ยนตำแหน่ง 125
รูปที่ 5.55 ความแรงของสัญญาณที่รับได้เทียบกับมุมที่เปลี่ยนไปของจุดเข้าถึงสัญญาณ โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นของงานวิจัย 126
รูปที่ 5.56 เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการดาวน์โหลดไฟล์ในขณะที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดเข้าถึงสัญญาณ โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นของงานวิจัย 126
รูปที่ 5.57 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการวัดค่าวิสัยสามารถ ในขณะที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดเข้าถึงสัญญาณ โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นของงานวิจัย 127

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริก 34

ตารางที่ 2.2 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้ว 38

ตารางที่ 2.3 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2 2 ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$ ของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้ว 38

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้ว 70

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่วัดได้ของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2×2 70

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการจำลองผล 75

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการจำลองผลที่ถูกแปลงค่าให้เป็นแอมพลิจูดและมุมเฟส 75

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบ 85

ตารางที่ 5.1 ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° 95

ตารางที่ 5.2 ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° 102

ตารางที่ 5.3 ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° 109

ตารางที่ 5.4 ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° 115