



รายงานการวิจัย

การพัฒนาสายอากาศเก่งสำหรับตัวจัดเส้นทางแบบเมชในเครือข่ายเมชไร้สาย

Development of Smart Antenna for Mesh Router in WMNs

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาสายอากาศเก่งสำหรับตัวจัดเส้นทางแบบเมชในเครือข่ายเมชไร้สาย

Development of Smart Antenna for Mesh Router in WMNs

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

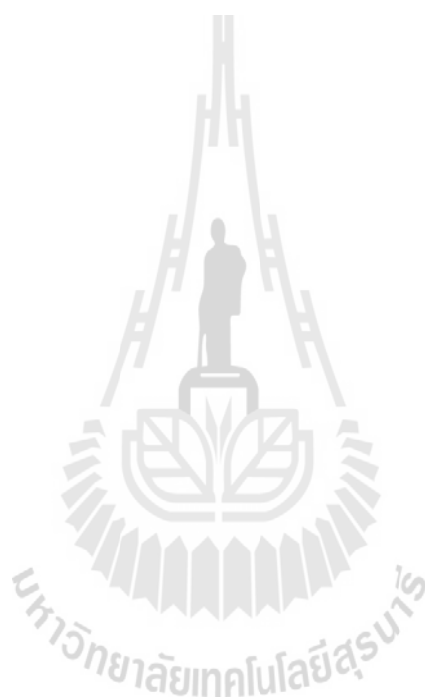
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2554

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับ
โครงการวิจัยนี้



ผู้วิจัย
ตุลาคม 2554

บทคัดย่อ

เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายเป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สายภายในพื้นที่จำกัด เช่น ในอาคารหรือที่พำนักอาศัย การเชื่อมต่อสื่อสารกันระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่ายจะต้องผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณ ซึ่งจุดเข้าถึงสัญญาณแต่ละจุดจะติดต่อสื่อสารกัน โดยใช้สายเคเบิล เพราะเหตุนี้จึงทำให้เกิดความสิ้นเปลืองและเกิดความยากลำบากต่อการใช้งานในบางพื้นที่ ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดที่จะนำเอาคลื่นวิทยุมาใช้แทนการใช้สายเคเบิล ระบบดังกล่าวถูกเรียกว่า เครือข่ายเมชไร้สายอย่างไรก็ตามก็ยังเกิดความล่าช้าในการเปลี่ยนจากระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ใช้ในปัจจุบันให้เป็นระบบเครือข่ายเมชไร้สาย สาเหตุเนื่องมาจากต้องพัฒนามาตรฐาน IEEE 802.11 ที่ใช้กับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในปัจจุบันให้สามารถรองรับการทำงานสำหรับระบบเครือข่ายเมชไร้สาย อีกปัญหาหนึ่งที่ทำให้ระบบเกิดความเสียหายได้แก่การเกิดการแทรกสอดของช่องสัญญาณร่วม ซึ่งเกิดจากการที่สายอากาศที่ติดอยู่กับอุปกรณ์จัดเส้นทางมีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ส่งผลให้ได้คุณภาพของสัญญาณที่ไม่ดี ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอรูปแบบและวิธีการที่ง่ายในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์สำหรับสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้สำหรับเครือข่ายเมชไร้สาย สายอากาศที่ใช้มีลักษณะเป็นแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 ในส่วนของกากรอรูปลำคลื่น และอุปกรณ์ที่ใช้การกำหนดทิศทางของจุดศูนย์จะใช้การกีดขวางแบบแผงวงจรพิมพ์ ซึ่งทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ และมีความซับซ้อนน้อยนอกจากนี้ระบบของเราสามารถก่อรูปลำคลื่นไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทางที่สนใจได้ 4 ทิศทางที่ต้องการในเวลาเดียวกัน และยิ่งไปกว่านั้นในแต่ละทิศทางของการก่อรูปลำคลื่นไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทางที่สนใจ เรายังสามารถหันจุดศูนย์ไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทางได้อีก 3 ทิศทางที่ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้ในเวลาเดียวกันอีกด้วย

Abstract

Wireless Local Area Networks (WLANs) are the link of two or more computers or wireless devices, which enable the wireless communication between those devices in a limited area such as in the building or the habitation. The connection or communication between users and network is accomplished through an access point in which access points communicate to each other using cables. This causes an expense and somehow introduces difficulty in accessibility for some areas. Therefore, the idea of exploiting radio signal instead of cables has been recently proposed, so called Wireless Mesh Networks (WMNs). Currently, there is a delay for development of IEEE802.11 standard to be compatible with WMNs resulting suspension of its implementation. However, one important problem of WMNs is co-channel interference from neighbor routers. One reason of this impairment is that the antennas at routers radiate omni-directionally. Therefore, this research proposes a low profile switched beam antennas capable of null steering for WMNs. The antenna array is employed at the router arranged in 2×2 -lattice. The beamforming network and null locator can be fabricated on printed-circuit board. This makes the system low of cost and complexity. Moreover, the proposed beamformer can simultaneously produce 4 beam patterns. In addition, null steering network included in the beamformer is able to produce 3 nulls in 3 given directions simultaneously.

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 ทฤษฎีระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย	9
2.4 สายอากาศแถวลำดับ	16
2.5 ระบบสายอากาศเก่ง	25
2.6 เทคนิคการหั่นลำคลื่น	34
2.7 วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์	38
2.8 กล่าวสรุป	40
บทที่ 3 การจำลองแบบของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นสำหรับเครือข่ายไร้สายแบบเมฆ โดยใช้โปรโตคอล Synchronous Collision Resolution	42
3.1 กล่าวนำ	42
3.2 สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น	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 การออกแบบระบบสายอากาศสวิตซ์การกำหนดทิศทางของจุดศูนย์	50
4.1 กล่าวนำ	50
4.2 สายอากาศแถวลำดับ	51
4.3 การออกแบบ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ	54
4.4 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์	71
4.5 กล่าวสรุป	89
บทที่ 5 การทดสอบและวิเคราะห์ผล	90
5.1 กล่าวนำ	90
5.2 การทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์	90
5.3 การทดสอบระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นอย่างง่ายที่มีความสามารถ ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์	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 ระบบสายอากาศแบบสวิทช์ลำคลื่นที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้	15
รูปที่ 2.10 การวางตัวของสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ดัน	17
รูปที่ 2.11 การวางตัวของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ	19
รูปที่ 2.12 เฟสที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละตัวสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ	
2×2 เทียบกับทิศทางการมาถึงของสัญญาณ	20
รูปที่ 2.13 ระบบสายอากาศแก่ง	21
รูปที่ 2.14 ระบบสายอากาศแก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ	22
รูปที่ 2.15 โครงสร้างและองค์ประกอบของสายอากาศแก่งแบบสวิทช์ลำคลื่น	31
รูปที่ 2.16 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น	33
รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่เมตริก	35
รูปที่ 2.18 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบที่มีตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อทำการปรับเฟส	
หรือแอมพลิจูดของสัญญาณ	36
รูปที่ 2.19 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2	37

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของบัคเตอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้ว	37
รูปที่ 3.1 สายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นแบบ 2×2	43
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น 2×2	43
รูปที่ 3.3 ระบบคิว	44
รูปที่ 3.3 รูปแบบการส่งสัญญาณจากโหนดต่างๆ ในระบบ	44
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเข้าถึงของกลุ่มข้อมูลในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย	45
รูป 3.5 ตัวอย่างการชนกันของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกัน	46
รูปที่ 3.6 สถานการณ์ทั้งสามของเครือข่ายเมฆไร้สายที่ใช้ในการจำลองแบบเมื่อ	
(ก) ทุกโหนดติดตั้งสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานรอบทิศทาง	
(ข) โหนดตัวกลางติดตั้งสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นเพียงตัวเดียว	
(ค) ทุกโหนดติดตั้งสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น	47
รูปที่ 3.7 ค่าเฉลี่ย สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด เทียบกับค่าความหนาแน่นทรานซิปิก	
(ก) กรณีที่ค่าอัตราความมาถึงของข้อมูลเฉลี่ยเท่ากับ 0.5	
(ข) กรณีที่ค่าอัตราบริการเฉลี่ยเท่ากับ 0.5	48
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์	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 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเดี่ยวใน แต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 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 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเดี่ยวใน แต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ	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 อุปกรณ์ต้นแบบของของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้วที่สร้างขึ้นสำหรับสายอากาศ แถวลำดับเชิงระนาบ 2×2	68
รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้ของบัตเลอร์เมตริกที่ถูก ปรับปรุงแล้ว	71
รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามา ในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315°	72
รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการ เข้ามาในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315°	73
รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามา ในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315° ที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225°	73
รูปที่ 4.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้า มาในทิศทาง	74

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.27 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315°	77
รูปที่ 4.28 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของ ลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315°	77
รูปที่ 4.29 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของ ลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315°	78
รูปที่ 4.30 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และ สัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315°	79
รูปที่ 4.31 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลัก ที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315°	80
รูปที่ 4.32 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลัก ที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315°	80
รูปที่ 4.33 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315°	81
รูปที่ 4.34 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของ ลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315°	82
รูปที่ 4.35 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของ ลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315°	82
รูปที่ 4.36 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 225°	84
รูปที่ 4.37 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของ ลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 225°	84
รูปที่ 4.38 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของ ลำคลื่นหลักที่ 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 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°	91
รูปที่ 5.2 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°	91
รูปที่ 5.3 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°	92
รูปที่ 5.4 แอมพลิจูดของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°	92
รูปที่ 5.5 มุมเฟสของวงจร $k1$ ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°	93

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.6 แอมพลิจูดของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°	93
รูปที่ 5.7 มุมเฟสของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°	94
รูปที่ 5.8 แอมพลิจูดของวงจร k_3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°	94
รูปที่ 5.9 มุมเฟสของวงจร k_3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°	95
รูปที่ 5.10 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์และป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315°	96
รูปที่ 5.11 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°	97
รูปที่ 5.12 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°	98
รูปที่ 5.13 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°	98
รูปที่ 5.14 แอมพลิจูดของวงจร k_1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°	99
รูปที่ 5.15 มุมเฟสของวงจร k_1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°	99
รูปที่ 5.16 แอมพลิจูดของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°	100
รูปที่ 5.17 มุมเฟสของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°	100
รูปที่ 5.18 แอมพลิจูดของวงจร k_3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°	101

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.19 มุมเฟสของวงจร k_3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ 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 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง ที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°	104
รูปที่ 5.22 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง ที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°	104
รูปที่ 5.23 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ ที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°	105
รูปที่ 5.24 แอมพลิจูดของวงจร k_1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง ที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°	105
รูปที่ 5.25 มุมเฟสของวงจร k_1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ ที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°	106
รูปที่ 5.26 แอมพลิจูดของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง ที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°	106
รูปที่ 5.27 มุมเฟสของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ ที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°	107
รูปที่ 5.28 แอมพลิจูดของวงจร k_3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทาง ที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°	107
รูปที่ 5.29 มุมเฟสของวงจร k_3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ 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 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°	110
รูปที่ 5.32 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°	111
รูปที่ 5.33 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°	111
รูปที่ 5.34 แอมพลิจูดของวงจร k1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°	112
รูปที่ 5.35 มุมเฟสของวงจร k1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°	112
รูปที่ 5.36 แอมพลิจูดของวงจร k2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°	113
รูปที่ 5.37 มุมเฟสของวงจร k2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°	113
รูปที่ 5.38 แอมพลิจูดของวงจร k3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°	114
รูปที่ 5.39 มุมเฟสของวงจร k3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 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 โดยใช้สายอากาศสวิตซ์ ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของ สัญญาณแทรกสอดที่ 135° 225° และ 315°	120
รูปที่ 5.45 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิตซ์ ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของ สัญญาณแทรกสอดที่ 45° 225° และ 315°	120
รูปที่ 5.46 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิตซ์ ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของ สัญญาณแทรกสอดที่ 45° 135° และ 315°	121
รูปที่ 5.47 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิตซ์ ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของ สัญญาณแทรกสอดที่ 45° 135° และ 225°	121
รูปที่ 5.48 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบ ทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศ สวิตซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45°	122
รูปที่ 5.49 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบ ทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศ สวิตซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135°	122
รูปที่ 5.50 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบ ทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศ สวิตซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225°	123
รูปที่ 5.51 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบ ทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศ สวิตซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315°	123
รูปที่ 5.52 เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการดาวน์โหลดข้อมูล โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและ สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์	124
รูปที่ 5.53 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการวัดค่าวิสัยสามารถ เมื่อใช้สายอากาศ แบบรอบทิศทางและใช้ระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นในงานวิจัยนี้	125

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

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



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริก	34
ตารางที่ 2.2 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้ว	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

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เทคโนโลยีที่เรียกว่าเครือข่ายเมฆไร้สาย (Wireless Mesh Networks : WMNs) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถกำหนดการเชื่อมโยงเครือข่ายในแต่ละสถานีแบบไร้สาย ทั้งนี้รวมไปถึงการติดต่อระหว่างจุดเข้าถึงเครือข่ายและสถานีปลายทางในเครือข่ายนั้นๆ ซึ่งในเครือข่ายแบบนี้จะเรียกจุดเข้าถึงเครือข่ายว่า ตัวจัดเส้นทางแบบเมฆ (mesh router) เครือข่ายเมฆไร้สายนี้เป็นเทคโนโลยีที่จะนำมาใช้แทนเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks : WLANs) เนื่องจากการขยายพื้นที่ให้บริการของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในระบบเครือข่ายหนึ่งๆ ไม่สามารถขยายได้กว้างเท่าที่ต้องการ สาเหตุมาจากค่าใช้จ่ายที่สูงและการสูญเสียเนื่องจากสายเคเบิลที่เชื่อมต่อระหว่างจุดเข้าถึงเครือข่ายและอุปกรณ์ต่อเชื่อมเข้าเครือข่าย ดังนั้นเทคโนโลยีใหม่นี้ที่ไม่ต้องอาศัยสายเคเบิลเชื่อมต่อที่จุดเข้าถึงเครือข่าย ทำให้ไม่มีข้อจำกัดถึงขนาดของพื้นที่ในการให้บริการ แต่อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณไร้สายถึงกันย่อมทำให้เกิดปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างตัวจัดเส้นทางแบบเมฆข้างเคียง ดังนั้นวิธีการที่จะทำให้คุณภาพสัญญาณในการติดต่อสื่อสารกันของตัวจัดเส้นทางแบบเมฆดีขึ้นจึงยังคงเป็นหัวข้อที่กำลังได้รับความสนใจอยู่ในขณะนี้ โครงการวิจัยนี้จึงให้ความสนใจที่จะศึกษาปัญหาในการเพิ่มคุณภาพสัญญาณในเครือข่ายเมฆไร้สายด้วยเทคโนโลยีของสายอากาศแก่ง

ปัญหาในการเพิ่มคุณภาพของสัญญาณในเครือข่ายเมฆไร้สายสำหรับงานวิจัยฉบับนี้ถูกมองไปในทิศทางเดียวคือ การใช้เทคนิคของสายอากาศแก่ง ซึ่งในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายนั้นมีลักษณะที่ชัดเจนคือ ตำแหน่งของตัวจัดเส้นทางแบบเมฆมีการกระจายตัวอยู่รอบๆ อย่างสม่ำเสมอ จากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า สายอากาศแก่งที่ถูกนำเสนอให้กับเครือข่ายเมฆไร้สายในปัจจุบันมีความซับซ้อนและราคาแพง เนื่องจากต้องการตัวประมวลผลสัญญาณที่มีสมรรถนะสูงเพื่อปรับตัวให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอด แต่ในความเป็นจริงแล้วตำแหน่งของตัวจัดเส้นทางแบบเมฆมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ระบบที่มี

ความสามารถปรับตัวแต่อย่างใด ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงเสนอการพัฒนาสายอากาศแบบอากาศสวิทช์
 ล้ำคลื่นสำหรับตัวจัดเส้นทางแบบเมฆในเครือข่ายเมฆไร้สายที่ไม่ซับซ้อน ส่งผลให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาสายอากาศแบบสวิทช์ล้ำคลื่นสำหรับตัวจัดเส้นทางแบบเมฆในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
2. เพื่อสร้างองค์ความรู้สำหรับการสร้างสายอากาศที่เหมาะสมควรกับสถานการณ์จริงและสามารถ
 ประยุกต์ใช้กับระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

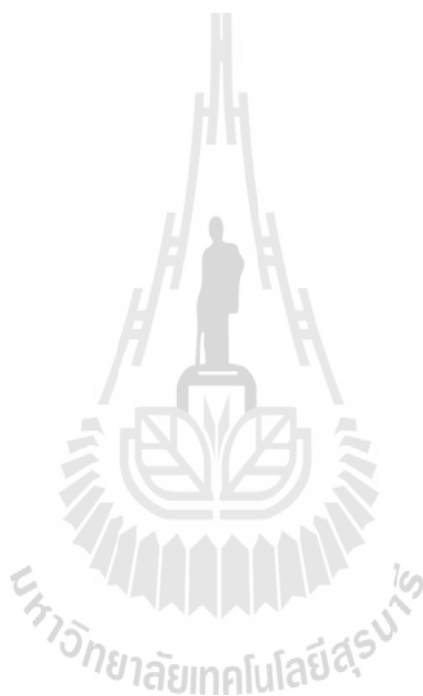
ศึกษาผลกระทบของการใช้สายอากาศแบบในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายด้วยวิธีจำลองแบบใน
 คอมพิวเตอร์และพัฒนาวิธีการที่ทำให้ได้สายอากาศที่มีความซับซ้อนน้อยเหมาะสำหรับการสร้างและใช้
 งานของตัวจัดเส้นทางแบบเมฆ สร้างและทดสอบสายอากาศที่พัฒนาขึ้นเพื่อยืนยันแนวคิดของ
 โครงการวิจัย

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาหลักการของสายอากาศแบบสวิทช์ล้ำคลื่น
2. จำลองแบบระบบสายอากาศในคอมพิวเตอร์ ด้วย โปรแกรมแมทแล็บ
3. พัฒนากระบวนการประมวลผลของสายอากาศแบบสวิทช์ล้ำคลื่นให้ซับซ้อนน้อยลง
4. ศึกษาการทำงานของระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
5. ทดสอบผลการจำลองแบบเมื่อประยุกต์สายอากาศที่พัฒนาขึ้นเข้ากับเครือข่ายเมฆไร้สาย
6. ออกแบบและสร้างต้นแบบชุดสายอากาศที่ผ่านการทดสอบในคอมพิวเตอร์แล้ว
7. วัดและทดสอบสมรรถนะของชุดสายอากาศต้นแบบ
8. ปรับปรุงและพัฒนาสายอากาศเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ
9. เสนอบทความในงานประชุมวิชาการ
10. นำข้อเสนอแนะในงานประชุมวิชาการมาปรับปรุงงานวิจัย
11. สรุปผลสำเร็จของโครงการและทำรายงานโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ชุดสายอากาศเก๋งต้นแบบสำหรับเครือข่ายเมฆไร้สาย และการเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติอย่างน้อย 1 บทความ และเผยแพร่ผลงานในวารสารวิชาการอย่างน้อย 1 บทความ ซึ่งเป็นการนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้เผยแพร่แก่นักวิจัยที่ทำงานใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับงานวิจัยอื่นๆ ได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

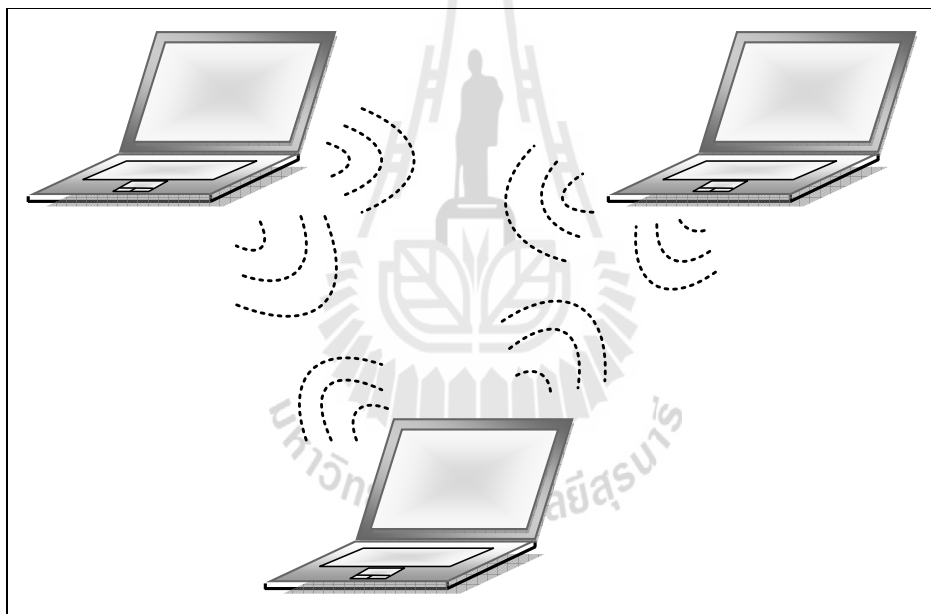
ในการออกแบบสายอากาศสวิตช์แบบลำคลื่นอย่างง่ายที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์สำหรับใช้กับเครือข่ายไร้สายนั้นประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ สายอากาศแถวลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ซึ่งทั้งหมดนี้จำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นบทนี้เป็นกล่าวถึงทฤษฎีของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ระบบเครือข่ายไร้สายซึ่งเป็นระบบที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับทั้งแบบเชิงเส้นและแบบเชิงระนาบ ซึ่งในส่วนของระบบสายอากาศแถวประกอบด้วยระบบสายอากาศแถวแบบสวิตช์ลำคลื่นและระบบสายอากาศแถวแบบปรับลำคลื่นรวมไปถึงเทคนิคการปรับลำคลื่น วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของงานวิจัยฉบับนี้และสุดท้ายเป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทนี้

2.2 ทฤษฎีระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks: WLANs) เป็นระบบที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง หรือกลุ่มของเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครือข่ายไร้สายเข้าด้วยกัน โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุในช่วงความถี่ 2.4 - 2.4897 GHz เป็นตัวกลางในการสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สายแทนการใช้สายเคเบิล ทำให้เกิดความสะดวกแก่ผู้ใช้งานเนื่องจากไม่ต้องมีการเดินสายส่งสัญญาณ และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายเรื่องสายได้อีกด้วย ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Crow, B.P., Kim, L.G., Sakai, P.T., and Widjaja, I. (1997)

2.2.1 รูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

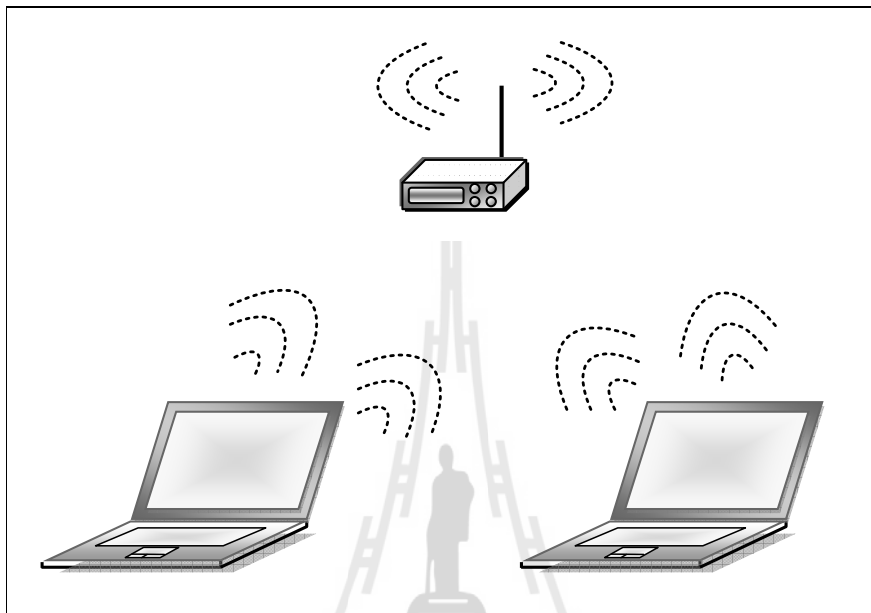
การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว (peer-to-peer หรือ ad hoc mode) เป็นการสื่อสารกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ไร้สายตั้งแต่ 2 เครื่องเป็นต้นไป ซึ่งทำการเชื่อมต่อกันโดยตรงไม่ต้องผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณ (access point) เครื่องคอมพิวเตอร์จะสื่อสารกัน โดยการแชร์ไฟล์ และติดต่อสื่อสารกันได้ภายในวงแลน แต่การเชื่อมต่อแบบนี้เครือข่ายไร้สายจะไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับเครือข่ายมีสายได้ นอกจากนี้จะติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณเพื่อให้จุดเข้าถึงสัญญาณทำการเชื่อมต่อและส่งข้อมูลไปยังเครือข่ายมีสายแทน รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว ซึ่งประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่ายที่ทำการติดต่อสื่อสารกัน โดยไม่ผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณ ข้อดีคือ ติดตั้งง่าย สะดวก และประหยัด แต่การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัวก็ยังมีข้อเสียในเรื่องของความปลอดภัยของข้อมูล เนื่องจากไม่มีการป้องกันในรูปแบบของบัญชีผู้ใช้ และรหัสผ่าน



รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว

การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง (infrastructure) เป็นการเชื่อมต่อสื่อสารกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยจุดเข้าถึงสัญญาณเป็นตัวกลางที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณของข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์เครือข่ายไร้สายไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เครือข่ายมีสาย ถ้ามีการเข้าใช้เครือข่ายไร้สายโดยมีลูกข่ายจำนวนมากก็จะส่งผลทำให้ความเร็วในการสื่อสารไร้สายช้าลง ซึ่งในปัจจุบันการเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้างได้รับความนิยมสูง และมีการพัฒนาเครือข่ายอย่างต่อเนื่องทั้งด้านความเร็วและความปลอดภัย รูป

ที่ 2.2 แสดงการเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง โดยการติดต่อสื่อสารของเครื่องคอมพิวเตอร์ทุกฝ่ายจะต้องผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณเป็นตัวกลางในการติดต่อสื่อสารระหว่างกัน ข้อดีคือ มีความปลอดภัยในการสื่อสารข้อมูล เนื่องจากมีระบบป้องกันในรูปแบบบัญชีผู้ใช้และการเข้ารหัส



รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อแบบกลุ่มโครงสร้าง

2.2.2 เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งสัญญาณไร้สาย

เทคโนโลยีที่ใช้ในการส่งสัญญาณไร้สาย แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1) แบบที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุซึ่งแบ่งเป็น

- Narrow Band Technology: เป็นการรับ-ส่งที่ความถี่ 902 MHz - 928 MHz 2.14 MHz - 2.484 MHz และ 5.725 MHz - 5.850 MHz ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูล ระหว่างต้นทางกับปลายทางเพียงหนึ่งคู่เท่านั้น

- Spread Spectrum Technology: เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้มาก ซึ่งใช้ความถี่ที่กว้างกว่า narrow band technology โดย spread spectrum คือ ช่วงความถี่ระหว่าง 902 MHz - 928 MHz และ 2.4 GHz - 2.484 GHz โดยการส่งประเภทนี้จะแบ่งได้เป็นแบบ Direct Sequence และ Frequency-Hopping

- Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM): เป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเร็วในการรับส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE802.11a และ IEEE802.11g

2) แบบที่ใช้สัญญาณอินฟราเรดในการติดต่อรับ-ส่งข้อมูล ลำแสงอินฟราเรด (Infrared: IR) เป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเราไม่สามารถมองเห็นได้เนื่องจากอยู่ในย่านความถี่ของแสงที่ต่ำกว่าแสงสีแดงที่เรามองเห็นได้ถูกนำมาใช้เพื่อการสื่อสารระยะใกล้ จุดเด่นคือ คลื่นเดินทางเป็นแนวตรงราคาถูก และง่ายต่อการใช้งาน แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุหรือสิ่งกีดขวางได้

2.2.3 มาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

มาตรฐานที่ใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้นได้ถูกกำหนดขึ้นโดยองค์กรมาตรฐานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หรือที่เรียกว่า (Institute of Electrical and Electronic Engineer: IEEE) ซึ่งได้กำหนดมาตรฐาน IEEE802.11a 802.11b 802.11g และ 802.11n ขึ้นตามลำดับ ซึ่งแต่ละมาตรฐานมีความเร็วและคลื่นความถี่ของสัญญาณที่แตกต่างกันในการสื่อสารข้อมูลดังนี้

มาตรฐาน IEEE802.11a เป็นมาตรฐานของระบบเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพสูง โดยจะทำงานในย่านความถี่ 5 GHz มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ 54 Mbps ที่ความเร็วนี้สามารถรับส่งข้อมูลได้ที่มีความละเอียดสูงได้เป็นอย่างดี อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสามารถปรับระดับให้ช้าลงได้ เนื่องจากคลื่นความถี่ 5 GHz นี้ยังไม่ได้ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายดังนั้นก็ทำให้ปัญหาของสัญญาณแทรกสอดนั้นมีน้อย ซึ่งจะไม่เหมือนกับคลื่นความถี่ที่ 2.4 GHz ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย จึงถูกรบกวนจากอุปกรณ์ไร้สายประเภทอื่นที่มีการใช้คลื่นความถี่เดียวกัน ในมาตรฐาน IEEE802.11a นั้นมีระยะทางในการเชื่อมต่อประมาณ 90 เมตร จากจุดเข้าถึงสัญญาณ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE802.11b แล้ว ระยะทางจะได้น้อยกว่า IEEE802.11b และคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่า ซึ่งทั้ง 2 มาตรฐานนี้ไม่สามารถทำงานร่วมกันได้ และในปัจจุบันนี้ประเทศไทยยังไม่อนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่ที่ 5 GHz จึงไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้งานกับมาตรฐาน IEEE802.11a จำหน่ายในประเทศไทย แต่ความเร็วที่ 54 Mbps สามารถใช้งานกับมาตรฐาน IEEE802.11b ซึ่งจะกล่าวถัดไปนี้

มาตรฐาน IEEE802.11b เป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมอย่างมากในประเทศไทย โดยจะทำงานที่ ย่านความถี่ 2.4 GHz มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ 11 Mbps ซึ่งปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้งานภายใต้มาตรฐานนี้ถูกผลิตออกมาเป็นจำนวนมาก และที่สำคัญอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องสามารถทำงานร่วมกันได้ โดยอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นจะต้องผ่านการตรวจสอบจากสถาบัน Wi-Fi Alliance เพื่อตรวจสอบมาตรฐานของอุปกรณ์และความเข้ากันได้ของแต่ละผู้ผลิต อุปกรณ์ที่ผ่านการตรวจสอบจากสถาบัน Wi-Fi Alliance แล้วจะมีเครื่องหมาย ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 ดิจที่อุปกรณ์เพื่อบอกถึงความสามารถของอุปกรณ์ไร้สาย เช่น คลื่น

ความถี่ ความเร็วและความปลอดภัยในปัจจุบันนี้นิยมนำอุปกรณ์ไร้สายที่มาตรฐาน 802.11b ได้นำไปใช้ในธุรกิจ สถาบันการศึกษาสถานที่สาธารณะ และกำลังแพร่หลายเข้าสู่ที่พักอาศัยมากขึ้น



รูปที่ 2.3 เครื่องหมาย Wi-Fi

มาตรฐาน IEEE802.11g เป็นมาตรฐานใหม่ที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้งานในย่านความถี่ 2.4 GHz มีความเร็วในการรับส่งข้อมูล 36 - 54 Mbps ซึ่งเป็นความเร็วที่สูงกว่ามาตรฐาน IEEE802.11b โดยมาตรฐาน IEEE802.11g นั้น สามารถปรับระดับความเร็วในการสื่อสารลงได้ตามสภาพแวดล้อมของการทำงานของเครือข่าย ซึ่งมาตรฐานนี้เป็นที่ยอมรับจากผู้ใช้เป็นจำนวนมากและกำลังจะเข้ามาแทนที่มาตรฐาน IEEE802.11b ในอนาคตอันใกล้

มาตรฐาน IEEE802.11n เป็นมาตรฐานใหม่ที่ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า ไมโม (Multiple Input Multiple Output: MIMO) โดยเทคโนโลยีนี้จะใช้สายอากาศเก่ง (smart antennas) เพื่อทำการรับส่งข้อมูลเร็วยิ่งขึ้น และยังทำให้ระบบเกิดความเสถียรมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มระยะทางการใช้งานระบบได้มากขึ้น ด้วยเหตุนี้มาตรฐาน IEEE802.11n จึงถูกมองว่าจะนำเข้ามาทดแทนมาตรฐาน IEEE802.11g เนื่องจากมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลมากกว่า IEEE802.11g ถึง 5 เท่า โดยมีความเร็วสูงสุดที่ 300 Mbps ซึ่งเร็วกว่าระบบเครือข่ายเดิมและมีระยะทางการรับส่งข้อมูลครอบคลุมขึ้นอีก 2-3 เท่า แต่ในปัจจุบันมาตรฐาน IEEE802.11n ยังไม่ได้ประกาศออกมาเป็นมาตรฐานที่สามารถใช้งานได้ เพราะยังอยู่ในขั้นตอนของการร่างเท่านั้น

ข้อดีของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

- 1) ความสะดวกในการใช้งาน คือ ผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายที่ใดก็ได้ โดยที่ดังกล่าว อาจจะเป็นที่ที่ไม่สามารถติดตั้งเครือข่ายไร้สาย
- 2) ความสะดวกในการติดตั้ง เนื่องจากเครือข่ายไร้สายไม่ต้องติดตั้งสายสัญญาณจึงทำให้เวลาในการติดตั้งเร็วขึ้นและไม่ต้องจัดการสายสัญญาณ
- 3) ความยืดหยุ่น คือ เทคโนโลยีไร้สายทำให้ระบบเครือข่ายไร้สายไปถึงยังที่ที่ไม่ได้ติดตั้งระบบเครือข่ายไร้สายได้
- 4) ประหยัดค่าใช้จ่าย ถึงแม้ว่าค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบเครือข่ายไร้สายจะมีราคาที่สูง แต่ในบางกรณีค่าติดตั้งสายสัญญาณอาจจะมีราคาสูงกว่าก็ได้

ข้อเสียของเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

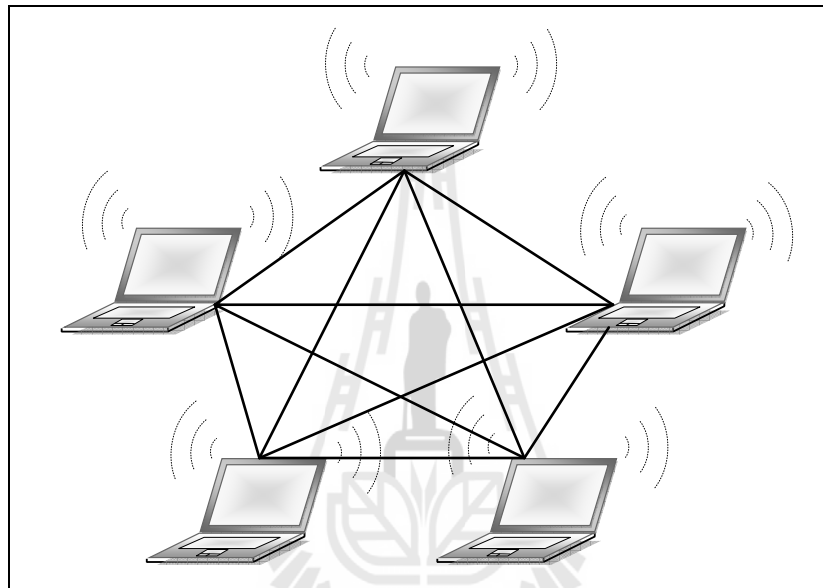
- 1) อัตราข้อผิดพลาดของข้อมูล เนื่องจากเครือข่ายไร้สายใช้คลื่นวิทยุในการสื่อสารจึงอาจทำให้เกิดการรบกวนจากคลื่นอื่น ๆ เกิดการลดทอนก่อนข้างสูง หรืออาจเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น
- 2) ความปลอดภัยของข้อมูลซึ่งเราไม่สามารถกำหนดทิศทางของข้อมูลและขอบเขตของคลื่นวิทยุได้ ซึ่งข้อมูลที่ส่งอาจเกิดความผิดพลาด
- 3) การรบกวนในเครือข่ายที่ใช้สายเฉพาะเครื่องที่ต่อกับระบบเท่านั้นจึงจะสามารถส่งข้อมูลระหว่างกันได้ แต่สำหรับเครือข่ายไร้สายแล้วเครื่องที่อยู่ต่างเครือข่ายกันสามารถส่งคลื่นสัญญาณถึงกันได้ ซึ่งบางทีอาจจะเป็นการรบกวนการส่งข้อมูลของเครือข่ายอื่นก็ได้ นอกจากนี้ยังมีคลื่นจากแหล่งอื่นที่รบกวนการส่งข้อมูลได้ เช่น โทรศัพท์ไร้สาย เตาไมโครเวฟและวิทยุสื่อสาร เป็นต้น

2.3 ทฤษฎีระบบเครือข่ายเมชไร้สาย

ระบบเครือข่ายเมชไร้สาย (Wireless Mesh Networks: WMNs) คือเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายที่ทำให้จุดเข้าถึงสัญญาณสามารถสื่อสารกันได้ เพื่อส่งผ่านข้อมูลกันได้โดยตรงแบบไร้สายไม่ต้องผ่านสายเคเบิล (cable) ซึ่งใช้คลื่นวิทยุ (radio wave) ในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สายแทน โดยมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายแบบเมช (mesh topology) รูปที่ 2.4 แสดงการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สายโดยที่อุปกรณ์ไร้สายทุกเครื่องมีการเชื่อมต่อถึงกันหมดซึ่งวิธีการนี้จะสามารถสำรองเส้นทางข้อมูลได้เป็นอย่างดี ระบบเครือข่ายเมชไร้สายประกอบด้วย 2 ส่วน: เครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทาง (mesh routers) และเครือข่ายเมชของผู้ใช้สัญญาณ (mesh clients)

ในเครือข่ายเมชไร้สายนั้น จะมีการเพิ่มฟังก์ชันในการหาเส้นทางให้กับเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทาง จึงทำให้การสื่อสารไร้สายของอุปกรณ์จัดเส้นทางได้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการด้วยกำลังส่ง

สัญญาณที่ต่ำ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทางนี้มักจะถูกสร้างขึ้นมาให้มีรูปแบบคล้ายกัน เช่น อุปกรณ์จัดเส้นทาง (router) หรือ จุดเข้าถึงสัญญาณ เป็นต้น ในส่วนของเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานนั้นจะมีการติดต่อกับเครือข่ายเพียงที่ละหนึ่งช่องทางเท่านั้น จึงทำให้อุปกรณ์และซอฟต์แวร์ของเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานนั้นง่าย และอุปกรณ์ที่ใช้ในเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานนั้นก็มีความหลากหลายกว่าอุปกรณ์ของเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทาง เช่น คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก (Personal Digital Assistant: PDA) RFID reader โทรศัพท์ไร้สาย เป็นต้น



รูปที่ 2.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายแบบเมฆ

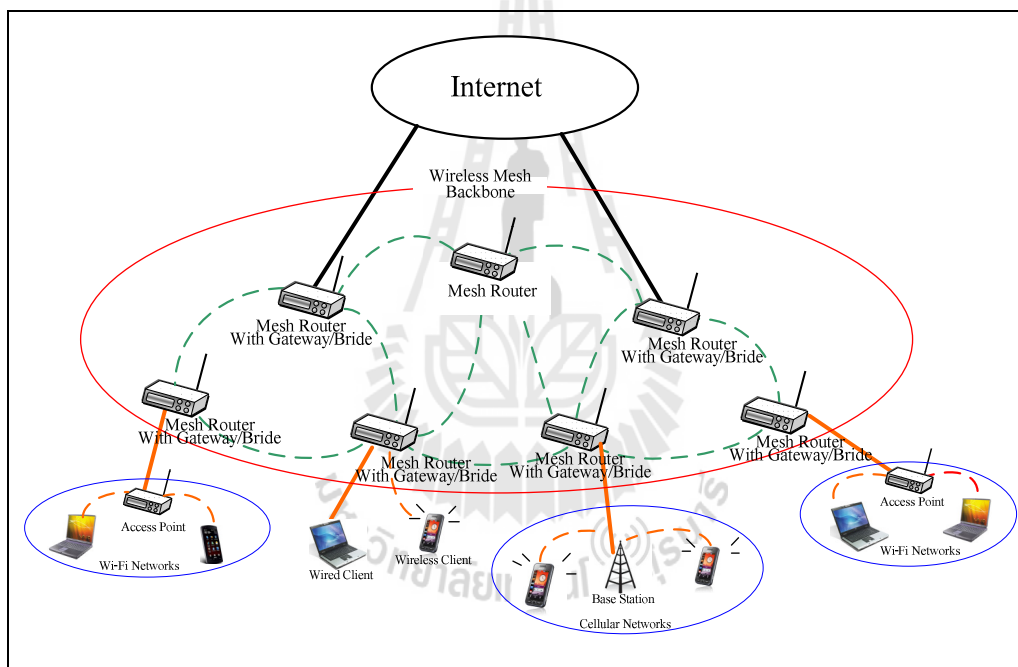
2.3.1 โครงสร้างของเครือข่ายเมฆไร้สาย

จากการที่ได้ศึกษางานวิจัยของ Akyildiz, I.F., and Xudong, W. (2005) ได้มีการนำเสนอโครงสร้างของเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยแบ่งได้ 3 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

2.3.1.1 โครงสร้างแบบโครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมฆไร้สาย

โดยมีรูปแบบโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 เมื่อเส้นทึบและเส้นประแสดงการเชื่อมต่อแบบใช้สายและการเชื่อมต่อแบบไร้สายตามลำดับ โครงสร้างแบบนี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทางเพื่อไว้ให้สำหรับลูกข่ายเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายและใช้บริการอินเทอร์เน็ตได้ ส่วนใหญ่จะภายใต้

มาตรฐาน IEEE802.11 ซึ่งอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ในเครือข่ายเมชนี้จะสามารถทำการเชื่อมต่อและรักษาเสถียรภาพของระบบได้ด้วยตัวมันเองและเครือข่ายของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นสามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตด้วยวิธีที่เรียกว่า Infrastructure meshing ก็จะมีเครือข่ายหลักให้ลูกข่ายแบบเก่าและเครือข่ายเมชไร้สายสามารถใช้งานร่วมกันได้กับเครือข่ายไร้สายที่มีอยู่โดยผ่านฟังก์ชันการทำงานของเกตเวย์หรือบริดจ (Gateway/Bridge) ในเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางเอง ซึ่งลูกข่ายแบบเก่านั้นจะสามารถเชื่อมต่อสื่อสารกับเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางด้วยระบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet) เช่นเมื่อเรามีการติดตั้งเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นไว้บนหลังคาของบ้านในละแวกใกล้เคียงกัน ซึ่งจะใช้เป็นจุดเชื่อมต่อสำหรับผู้ใช้งานภายในบ้านและผู้ที่ใช้งานอยู่ตามถนน ซึ่งการติดต่อสื่อสารกันระหว่างเมชนั้นจะใช้เทคนิคการสื่อสารระยะไกลรวมกับสายอากาศแบบมีทิศทาง

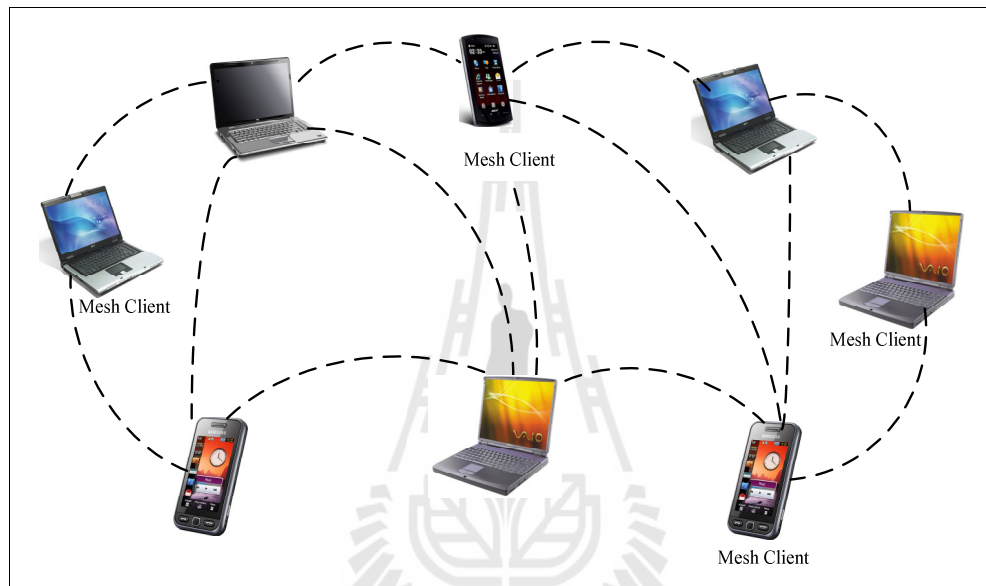


รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมชไร้สาย

2.3.1.2 โครงสร้างของเครือข่ายผู้ใช้งานเครือข่ายเมชไร้สาย (Client WMNs)

เครือข่ายเมชของผู้ใช้งานนั้นจะใช้การเชื่อมต่อกันแบบกลุ่มส่วนตัว ในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานในโครงสร้างชนิดนี้ โหนดของผู้ใช้งานจะทำหน้าที่จัดเส้นทางและจัดการระบบที่ดีที่สุดให้กับกลุ่มผู้ใช้งาน ดังนั้นเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นจึงไม่มีความจำเป็นสำหรับเครือข่ายแบบ

นี้ รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งาน ซึ่งข้อมูลหรือข่าวสารที่จะส่งไปยังโนดปลายทางนั้นก็จะมีการส่งผ่านจากโนดหนึ่งไปยังอีกโนดหนึ่งซึ่งจะทำการส่งกันไปเรื่อย ๆ จนถึงปลายทางที่เราต้องการ โดยปรกติแล้วเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานนั้นจะใช้เพียงคลื่นวิทยุในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์เท่านั้นนอกจากนี้ ความต้องการของผู้ใช้งานระบบมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเมฆไร้สาย ดังนั้นในเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานนั้นจะต้องมีการเพิ่มฟังก์ชันการจัดเส้นทางและต้องสามารถจัดการระบบได้ด้วยตัวของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานเอง



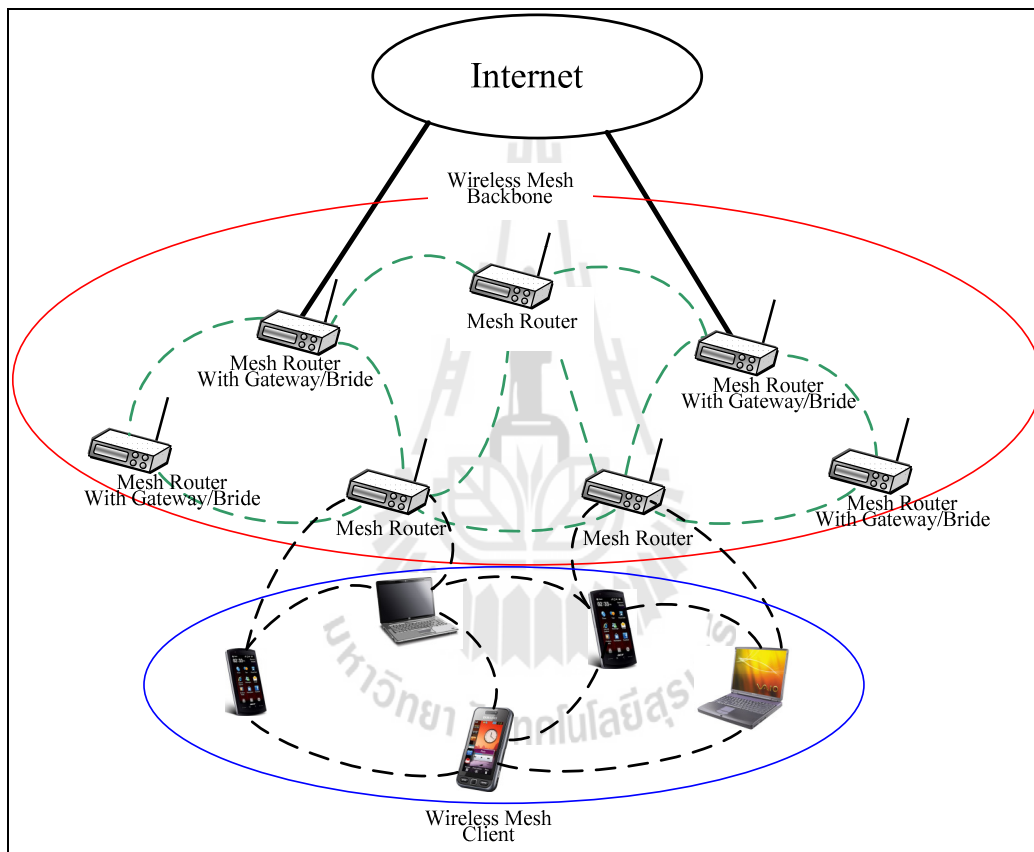
รูปที่ 2.6 ลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งาน

2.3.1.3 โครงสร้างเครือข่ายเมฆไร้สายแบบไฮบริด (Hybrid WMNs)

โครงสร้างแบบไฮบริดนี้จะเป็นการรวมกันของโครงสร้างพื้นฐานและโครงสร้างของเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 โดยที่เครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานระบบนั้นสามารถติดต่อสื่อสารกับเครือข่ายได้โดยผ่านเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทางในการเชื่อมต่อกันระหว่างเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานกับเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นเราจะใช้สัญญาณวิทยุ วิทยุแมกซ์ สัญญาณโทรศัพท์ และเครือข่ายเซ็นเซอร์ เป็นต้น ดังนั้นอุปกรณ์จัดเส้นทางเหล่านี้จะสามารถให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อเครือข่ายดีขึ้นและครอบคลุมพื้นที่การให้บริการของเครือข่ายเมฆไร้สายได้

2.3.2 โพรโทคอลที่ใช้ควบคุมการเข้าใช้งานสื่อกลาง (MAC PROTOCOL)

จากงานวิจัยของ Stine, J.A. (2006) ได้มีการนำเสนอโปรโตคอลที่สามารถใช้งานกับสายอากาศเก่ง เพื่อนำมาใช้ร่วมกับเครือข่ายเมชไร้สายได้อย่างเหมาะสม ซึ่งโปรโตคอลที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยมีชื่อว่า Synchronous Collision Resolution: SCR ซึ่งโปรโตคอล SCR นี้จะมีการควบคุมการส่งข้อมูลที่ส่งก่อนหลังตามลำดับ แล้วถึงจะทำการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของอุปกรณ์จัดเส้นทางที่ต้องการตามลำดับที่ SCR กำหนดไว้ โดยมีหลักการในการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างเครือข่ายเมชแบบไฮบริด

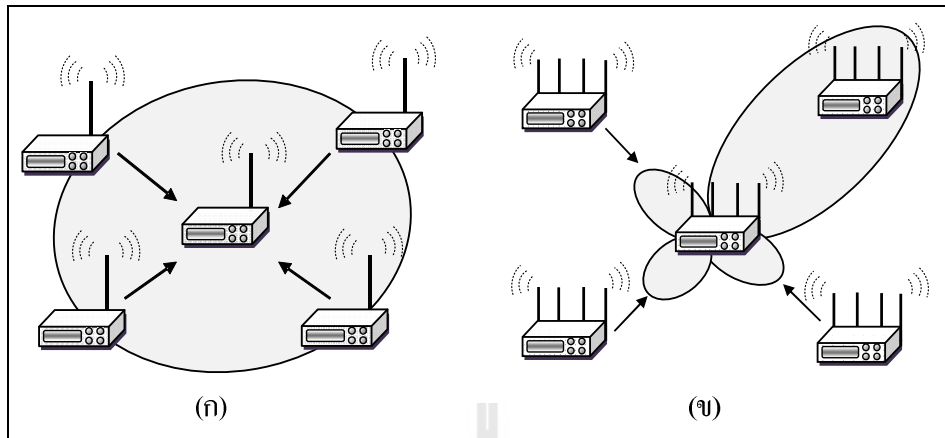
มีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นสล็อต (slotted) ในการส่งข้อมูลนั้นทุกโนดจะพยายามส่งข้อมูลเข้าถึงทุก ๆ ช่องสล็อต โดยที่แต่ละ โนดจะทำการส่งสัญญาณเพื่อเป็นการจองการเข้าใช้เครือข่ายการส่งข้อมูลทั้งหมดจะเกิดขึ้นพร้อมการส่งสัญญาณเพื่อจองการเข้าใช้เครือข่ายแล้ว ซึ่งนั่นหมายความว่าระบบจะทำงานโดยการจองช่องสัญญาณเพื่อทำการรอคิวในการติดต่อสื่อสารเครือข่ายหรือทำการส่งข้อมูลนั่นเอง

ข้อดีของเครือข่ายเมฆไร้สาย

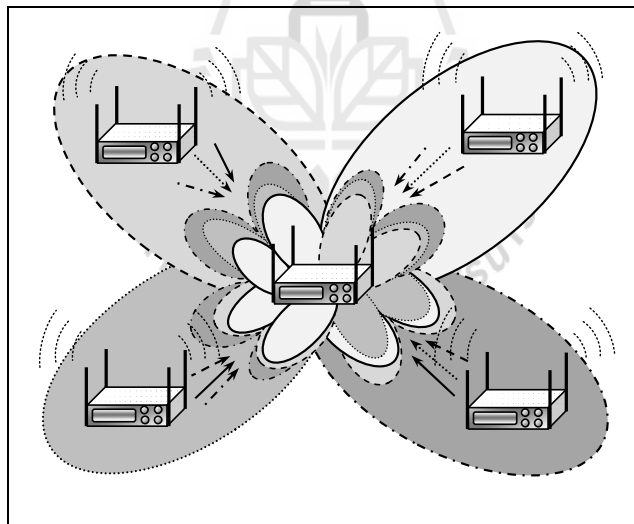
ประหยัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบเนื่องจากไม่ต้องใช้สายในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณ สะดวกต่อการติดตั้งระบบเนื่องจากไม่มีการใช้สายในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณ ทำให้พื้นที่ที่ยากต่อการติดตั้งเครือข่ายไร้สายแบบที่ต้องใช้สายในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณสามารถใช้งานเครือข่ายได้ด้วยการติดตั้งเครือข่ายเมฆไร้สาย

ข้อเสียของเครือข่ายเมฆไร้สาย

เนื่องจากเครือข่ายเมฆไร้สายใช้คลื่นวิทยุในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณ จึงทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดจากอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ใกล้เคียงกันดังที่แสดงในงานวิจัยของ Daehyung, J., Jeong-keun, L., Sung, J.L., Taekyoung, K., Wonho, K., and Yanghee, C. (2009); Rabbi, M.F., Rahman, M.T., Salihin, G.M.A., and Uddin, M.A. (2006) จากข้อเสียที่เกิดขึ้นในเครือข่ายเมฆไร้สายที่กล่าวมานั้น ทำให้งานวิจัยฉบับนี้ได้มุ่งความสนใจไปที่เครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทาง เนื่องจากตำแหน่งของเครือข่ายเมฆของผู้ใช้สัญญาณนั้น ได้ติดตั้งอยู่กับที่ซึ่งเหมาะกับการใช้งานในงานวิจัยฉบับนี้ไปใช้กับเครือข่ายเมฆไร้สาย หลักการในการก่อรูปลำคลื่น (beam forming) ของเครือข่ายเมฆไร้สายนั้น เริ่มจากการใช้สายอากาศที่มีรูปแบบการแผ่กระจายพลังงานแบบรอบทิศทาง (omni-directional) แสดงดังรูปที่ 2.8 (ก) ซึ่งจะเห็นว่า มีสัญญาณแทรกสอดจากอุปกรณ์จัดเส้นทางตัวอื่นมารบกวนกับอุปกรณ์จัดเส้นทางที่เราสนใจ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเข้าใช้ระบบต่ำลง ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยของ Babich, F., Comisso, M., and Mania, L. (2007); Chang, S.F., Chu, C.Y., Lin, K.H., and Li, W.R. (2004); Winters, J.H. (2006) ได้นำเสนอการนำเอาสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นและสายอากาศแบบมีทิศทาง มาใช้แก้ปัญหาการเกิดสัญญาณแทรกสอดจากอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ใกล้เคียงกัน รูปที่ 2.8 (ข) แสดงระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นติดตั้งไว้ที่อุปกรณ์จัดเส้นทาง เพื่อทำให้เกิดอัตราขยายที่สูงที่สุดในทิศทางที่เราต้องการ นอกจากนี้ระบบยังสามารถประหยัดพลังงานได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณแทรกสอดก็ยังคงเกิดขึ้นในระบบและยังมีระดับพู่ซ่างที่สูงอยู่ ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มจำนวนของสายอากาศ แต่ผลที่ตามมาก็คือ ระบบจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงทำให้เกิดความสิ้นเปลือง ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นอย่างง่ายที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์และยังเป็นระบบที่ใช้สายอากาศจำนวนน้อยทำให้ระบบมีขนาดเล็กและมีต้นทุนต่ำ รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของระบบในงานวิจัยฉบับนี้ โดยระบบนี้สามารถก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทางที่เราสนใจได้ 4 ทิศทางในเวลาเดียวกัน ซึ่งในแต่ละทิศทางของลำคลื่นหลักนั้นก็จะสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้อีกด้วย



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเครือข่ายไร้สายโดยใช้ระบบของสายอากาศที่ต่างกัน
 (ก) สายอากาศแบบรอบทิศทาง (ข) สายอากาศแบบชี้ทิศทาง



รูปที่ 2.9 ระบบสายอากาศแบบสวิทช์ลำคลื่นที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

2.4 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับ (antenna array) เป็นการนำสายอากาศมาเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละตัวมีเท่ากันหรือไม่ก็ได้ ซึ่งสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น จะเรียกว่า องค์ประกอบ (element) ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้น ทำให้โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลาย ๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดียว จะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ สายอากาศแถวลำดับจึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่จำเป็นมากต่อระบบสายอากาศเก่งที่ทำให้สามารถหันลำคลื่นหลัก (main lobes) ไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ และสามารถหันพู่ข้าง หรือจุดศูนย์ ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น โดยทั่วไปการวางตัวของสายอากาศแถวลำดับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น คือ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นและสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังต่อไปนี้

2.4.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบพื้นฐานและมีโครงสร้างที่ง่าย ซึ่งมีการจัดวางตัวกันเป็นแบบเส้นตรง สายอากาศแถวลำดับจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างสายอากาศ d ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยปกติแล้วระยะห่างของสายอากาศที่ใช้จะมีการวางตัวห่างกันเป็นระยะความยาวครึ่งความยาวคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นดังนี้

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.1)$$

รูปที่ 2.10 แสดงถึงสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน N ต้น หรือ $N \times 1$ ต้น โดยที่ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้น และมีแอมพลิจูดเท่ากัน รูปแบบดังกล่าวถูกเรียกว่า แถวลำดับสม่ำเสมอ (uniform array) ซึ่งจะมีองค์ประกอบแถวลำดับที่เหมือนกัน มีการป้อนกระแสให้กับทุก ๆ องค์ประกอบเท่ากัน และจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกันไปอย่างเท่า ๆ กันโดยจะมีองค์ประกอบตัวแรกเป็นจุดอ้างอิงในการหาตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor: AF) ดังสมการที่ (2.2)

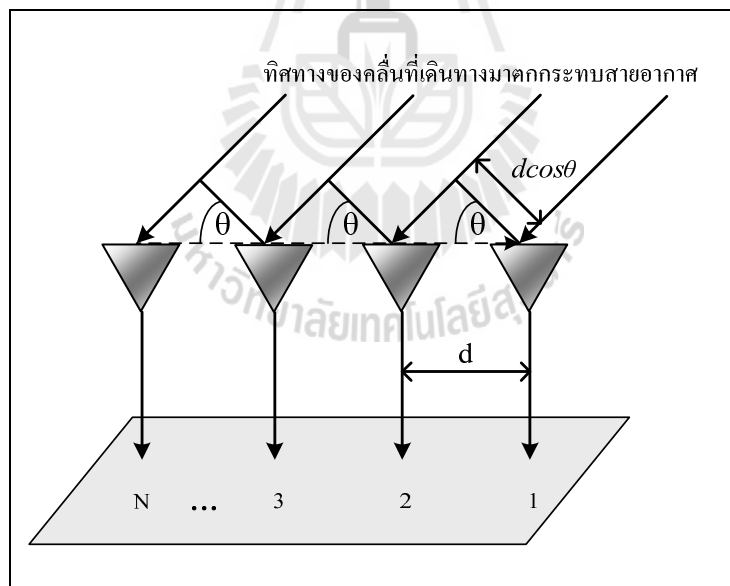
$$AF = 1 + e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.2)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta)} \quad (2.3)$$

ซึ่งสามารถเขียนอีกรูปหนึ่งได้ดังสมการที่ (2.4)

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\psi = kd \cos \theta + \beta$ โดยที่ k หมายถึงเลขคลื่น (wave number) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$ และ θ คือ ทิศทางของคลื่นที่เดินทางมาดกระทบสายอากาศแต่ละต้น และ β คือ ค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น ในกรณีที่ เป็นแถวลำดับไม่สม่ำเสมอ นั้น ก็ยังสามารถใช้สมการหาตัวประกอบแถวลำดับที่กล่าวมาข้างต้นได้เช่นกัน



รูปที่ 2.10 การวางตัวของสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น

2.4.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ คือสายอากาศที่มีการจัดเรียงตัวกันเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งมีแนวคิดมาจากสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น การจัดเรียงตัวของสายอากาศแบบนี้จะสามารถควบคุมทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ได้นอกจากนี้ระบบยังมีระดับพู่ซ้างที่ต่ำอีกด้วย ดังนั้นสายอากาศที่มีการเรียงตัวแบบเชิงระนาบนี้จึงเป็นสายอากาศที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างมาก เช่น การนำไปใช้งานเรดาร์ (radar) การชี้ทิศทางระยะไกล (remote sensing) รวมไปถึงการสื่อสารไร้สายอื่น ๆ เช่น ระบบสายอากาศแก่ง ซึ่งจะถูกรออธิบายในส่วนถัดไป

รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการวางตัวของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก x - y โดยที่สายอากาศ M ต้นจะวางอยู่ในทิศทางของแกน x ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายอากาศ คือ d_x และสายอากาศ N ต้น จะวางตัวอยู่ในทิศทางของแกน y ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศ คือ d_y ดังนั้นเราจะได้ขนาดของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยม $M \times N$ ต้น และมี ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณทั้งระบบ คือ w_{mn} ที่สายอากาศต้น (m,n) ที่จากที่เราได้กล่าวมาข้างต้นว่าสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบนั้น ได้มีพื้นฐานและแนวคิดมาจากสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ดังนั้นในสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบเราสามารถมองว่า ที่สายอากาศ M ต้น ในแต่ละต้นจะมีสายอากาศ N ที่มีการเรียงตัวแบบแถวลำดับเชิงเส้นเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย หรือในทางเดียวกันสายอากาศ N ต้น ในแต่ละต้นจะมีสายอากาศ M ที่มีการเรียงตัวแบบแถวลำดับเชิงเส้นเป็นองค์ประกอบเช่นกัน ดังนั้นเราสามารถหาตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศ $M \times N$ ได้ดังสมการที่ (2.5) โดยอ้างอิงจากหนังสือของ Frank, B.G.,-Ph.D. (2005)

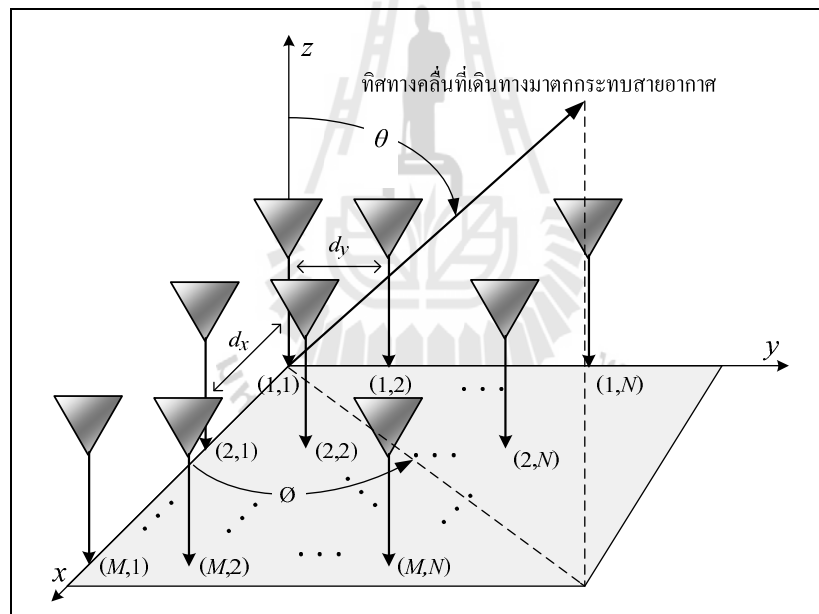
$$\begin{aligned}
 AF &= AF_x \cdot AF_y \\
 &= \sum_{m=1}^M a_m e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N b_n e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)} \\
 &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} e^{j[(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x) + (n-1)(kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)]} \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

เมื่อ $w_{mn} = a_m \cdot b_n$ โดยที่ a_m และ b_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนัก β_x และ β_y คือ ค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ แกน y ตามลำดับ ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

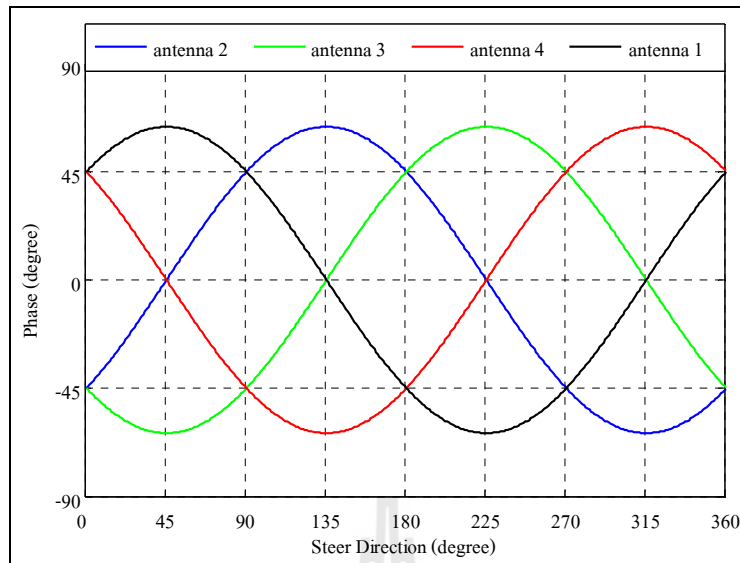
$$\beta_x = -kd_x \sin \theta_0 \cos \phi_0 \quad (2.6)$$

$$\beta_y = -kd_y \sin \theta_0 \cos \phi_0 \quad (2.7)$$

จากรูปที่ 2.11 เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่มุม θ หรือ มุมในแนวระนาบ (azimuth plane) สายอากาศแต่ละต้นนั้นจะสามารถรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณได้เหมือนกันทุกต้น แต่จะแตกต่างกันที่เวลาของสายอากาศแต่ละต้นเมื่อได้รับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ เราพลอตกราฟของเฟสที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละต้นเมื่อสัญญาณเข้ามาจากทิศทางตั้งแต่ 0° ถึง 360° เมื่อสายอากาศวางเรียงกันเป็นแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับ $\lambda/4$ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 การวางตัวของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ

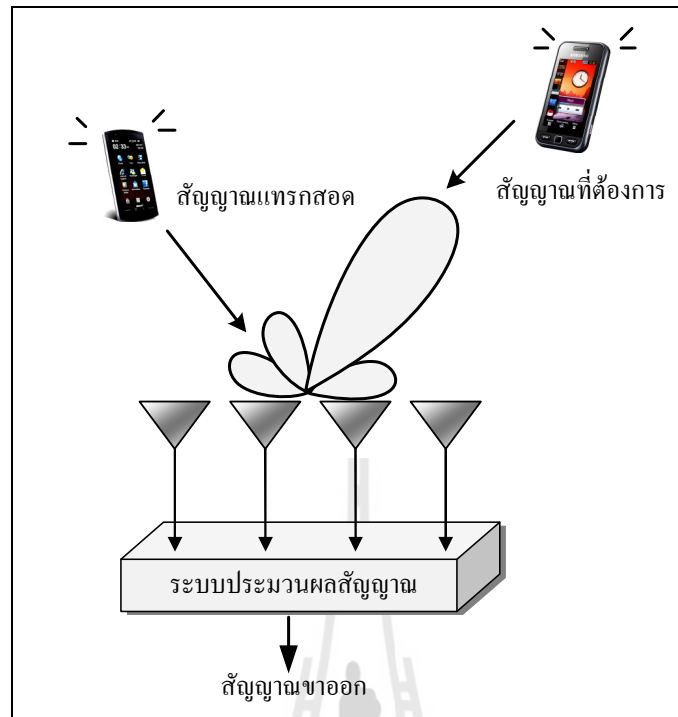


รูปที่ 2.12 เฟสที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละตัวสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2×2 เทียบกับทิศทางการมาถึงของสัญญาณ

2.5 ระบบสายอากาศเก่ง

สายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ได้รับความสนใจในช่วงปี 2473 เป็นต้นมาเนื่องจากความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพในระบบสื่อสารไร้สาย สายอากาศเก่งประกอบด้วยกลุ่มของสายอากาศหลาย ๆ ต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ กันร่วมกับการประมวลผลสัญญาณทั้งทางเวลาและตำแหน่ง ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสื่อสารไร้สายดีขึ้น สายอากาศถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการสื่อสารไร้สายเพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของช่องสัญญาณซึ่งมีอยู่จำกัด ในขณะที่ผู้ใช้มีมากขึ้น สายอากาศเก่งช่วยปรับปรุงระบบโดยการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณและมีความสามารถในการหันลำคลื่นหลักไปในทิศทางที่ต้องการ ในขณะที่เดียวกันก็จะสามารถหันจุดศูนย์หรือพ่วงไปในทิศทางที่เราไม่ต้องการ หรือทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้เช่นกัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการก่อรูปลำคลื่น (beamforming)

รูปที่ 2.13 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศเก่งซึ่งจะประกอบด้วยสองส่วนหลัก ๆ คือ สายอากาศแถวลำดับ และระบบประมวลผลสัญญาณ ซึ่งระบบประมวลผลจะทำหน้าที่ในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Direction of Arrival: DOA) และคำนวณค่าการถ่วงน้ำหนักเพื่อก่อรูปลำคลื่นตามที่ได้แสดงในหนังสือของLiberti, J.J.C., and Rappaport, T.S. (1999)



รูปที่ 2.13 ระบบสายอากาศเก่ง

ในส่วนของการหั่นลำคลื่น ระบบสายอากาศเก่งสามารถหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการและจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการปรับเฟส หรือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่มายังสายอากาศแถวลำดับแต่ละต้น เพื่อหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ และหั่นจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งการปรับเฟสหรือแอมพลิจูดนั้นเรียกว่า การถ่วงน้ำหนัก สายอากาศแต่ละต้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันออกไปตามมุมเฟสของสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศต้นนั้น ๆ โดยหลักการเบื้องต้นของการหั่นลำคลื่นสามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 จากรูป D คือ ความต่างเฟสของสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ W คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้น y คือ สัญญาณขาออกของสายอากาศ θ_d และ θ_i คือ มุมที่มาตกกระทบที่สายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับ จากรูปสัญญาณขาออกสามารถเขียนได้ดังนี้

$$y_{out} = y_1 + y_2 \quad (2.8)$$

และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นมีค่าดังนี้

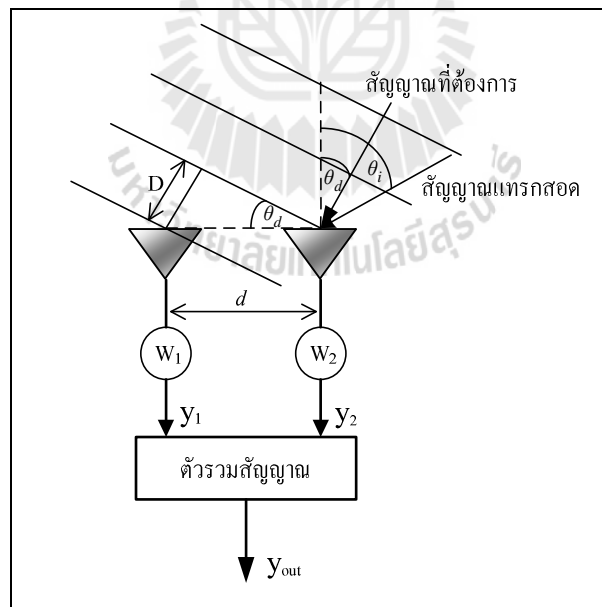
$$y_{2d} = A_d \quad (2.9)$$

$$y_{2i} = A_i \quad (2.10)$$

$$y_{1d} = A_d e^{j\theta_d} \quad (2.11)$$

$$y_{1i} = A_i e^{j\theta_i} \quad (2.12)$$

เมื่อ y_{1d} y_{2d} y_{1i} และ y_{2i} คือ สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 สัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 ตามลำดับ โดยเมื่อผ่าน ตัวถ่วงน้ำหนักแล้วจะได้



รูปที่ 2.14 ระบบสายอากาศแก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ

$$y_2 = y_{2d} + y_{2i} = w_2(A_d + A_i) \quad (2.13)$$

$$y_1 = y_{1d} + y_{1i} = w_1(A_d e^{j\theta_d} + A_i e^{j\theta_i}) \quad (2.14)$$

แทนค่าสมการที่ (2.13) และ (2.14) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้

$$y_{out} = A_i(w_2 + w_1 e^{j\theta_i}) + A_d(w_2 + w_1 e^{j\theta_d}) \quad (2.15)$$

เราต้องการให้พจน์ของ A_i ในสมการที่ (2.15) มีค่าเป็นศูนย์นั่นคือส่วนของสัญญาณแทรกสอดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดออกไป และทำให้พจน์ของ A_d สมการที่ (2.15) ซึ่งเป็นส่วนของสัญญาณที่ต้องการมีค่าสูงสุด ดังนั้น

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_i} = 0 \quad (2.16)$$

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.16) และ (2.17) จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศทั้งสองต้นดังนี้

$$w_1 = \frac{1}{e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i}} \quad (2.18)$$

$$w_1 = \frac{-e^{j\theta_i}}{e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i}} \quad (2.19)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (2.18) และ (2.19) ลงในสมการที่ (2.15) จะได้สัญญาณขาออกเท่ากับ

$$y_{out} = A_d \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.20) สัญญาณขาออกมีค่าเท่ากับสัญญาณที่ต้องการ แสดงว่าระบบไม่มีสัญญาณแทรกสอดอีกต่อไป ดังนั้นจึงทำให้ระบบสามารถให้สัญญาณที่ดีที่สุดที่มาจากทิศทางที่ต้องการได้

ข้อดีของระบบสายอากาศแก่ง

เพิ่มพื้นที่ให้บริการ เนื่องจากมีอัตราขยายที่สูงจากการใช้สายอากาศแฉวลำดับ ระบบสายอากาศแก่งสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ ดังนั้นจึงทำให้ปัญหาจากสัญญาณแทรกสอดลดน้อยลง มีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดีขึ้น ประหยัดพลังงาน เนื่องจากสายอากาศแก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของผู้ที่ต้องการใช้งานได้และไม่ต้องทำการส่งในทิศทางของผู้ที่ไม่ต้องการใช้งาน จึงทำให้ไม่สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

ข้อเสียของระบบสายอากาศแก่ง

ระบบสายอากาศแก่งมีราคาต้นทุนในการผลิตสูง สำหรับการใช้งานที่ความถี่ต่ำ สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ยากต่อการติดตั้งสายอากาศแฉวลำดับ ระบบสายอากาศแก่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สายอากาศแก่งแบบสวิตซ์ (switched-beam antennas) และสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น (adaptive array antennas) ซึ่งจะมีรายละเอียดจากหนังสือของ Ahmed, E.Z. (2005) โดยสังเขปดังนี้

2.5.1 สายอากาศแก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น

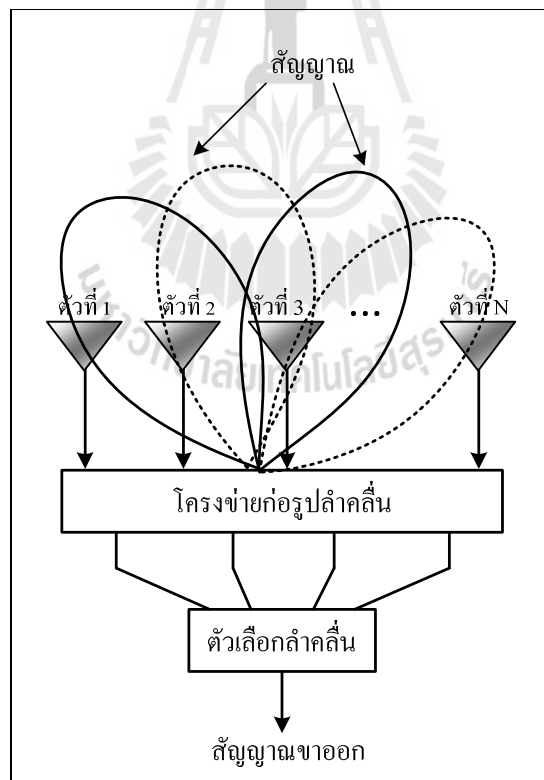
สายอากาศแก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นนั้น เป็นสายอากาศที่มีการเลือกลำคลื่นที่ดีที่สุดไปยังสัญญาณที่ต้องการได้ โดยใช้เพียงเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ถูกกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักไว้แล้ว โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตซ์ซึ่งประกอบไปด้วยสายอากาศแฉวดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) โดยมีหลักการทำงานดังนี้ สวิตซ์ลำคลื่นเพื่อตรวจหาทิศทางความแรงของสัญญาณ ตัวเลือกลำคลื่นจะทำการเลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นในทิศทางที่มีความแรงของสัญญาณแรงที่สุด จากนั้นจะใช้ลำคลื่นที่ตัวเลือกลำคลื่นได้ทำการเลือกไว้ เมื่อผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่จะทำการปรับเปลี่ยนลำคลื่นใหม่

ข้อดีของระบบสายอากาศแ่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น

ระบบมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบสายอากาศแ่งแบบปรับลำคลื่น ประหยัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายเนื่องจากระบบมีความซับซ้อนน้อยในกรณีที่ระบบใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก ระบบสายอากาศแ่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบสายอากาศแ่งแบบปรับลำคลื่น ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Peng, M., and Wang, W. (2005); Sarkar, D.K., Seungwon, C., and Shim, D. (1999)

ข้อเสียของระบบสายอากาศแ่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น

มีอัตราการขยายของสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างลำคลื่น ไม่สามารถลดสัญญาณแทรกสอดที่อยู่ใกล้กับสัญญาณที่ต้องการได้ ในการเลือกสัญญาณมีโอกาสผิดพลาด อาจเกิดจากสัญญาณที่เข้ามาไม่ชัดเจน



รูปที่ 2.15 โครงสร้างและองค์ประกอบของสายอากาศแ่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น

รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สายอากาศแต่ละต้นจะส่งสัญญาณไปยังโครงข่ายก่อนรูปลาคลื่นเพื่อทำการถ่วงน้ำหนักเนื่องจากสัญญาณที่มาตกกระทบยังสายอากาศแต่ละต้นมีมุมเฟสที่ต่างกันออกไป และสร้างลาคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่แรงที่สุด โดยอาศัยตัวเลือกลาคลื่นทำหน้าที่เลือกลาคลื่นไปยังสัญญาณที่เราต้องการ จึงทำให้สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดได้จากทิศทางของสัญญาณที่เราไม่ต้องการได้ ส่งผลให้ได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการสร้างโครงข่ายก่อนรูปลาคลื่นคือ Butler matrix ซึ่งจะมีการอธิบายในหัวข้อที่ 2.6

2.5.2 สายอากาศเก่งแบบปรับลาคลื่น

สายอากาศประเภทนี้มีความสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของลาคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ตลอดเวลา โดยมีหลักการทำงานของสายอากาศประเภทนี้คือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีการถ่วงน้ำหนัก โดยอัลกอริทึมแบบปรับตัว (adaptive algorithm) ทำหน้าที่คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณแล้วส่งค่ากลับไปให้ตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อคูณเข้ากับสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.16 โดยระบบจะทำงานแบบวนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้

สำหรับอัลกอริทึมแบบปรับตัวมีหลายประเภท อย่างเช่นอัลกอริทึมปรับตัวแบบไบด์ (blind adaptive algorithm) และมอดูลัสคงที่กำลังสองที่น้อยที่สุด (least squares constant modulus) ตามที่แสดงในงานวิจัยของ Agee, B. (1989); Frost, L. (1972)

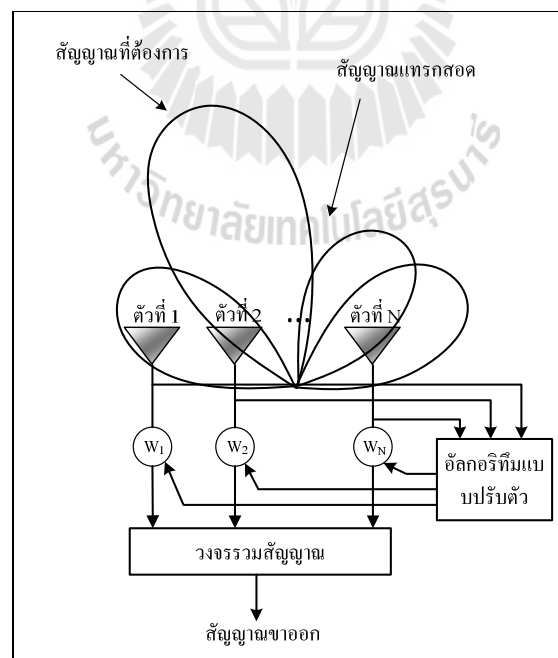
ข้อดีของสายอากาศเก่งแบบปรับลาคลื่น

มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Noise Ratio: SNR) ที่ดี สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบได้ดีกว่าระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลาคลื่น

ข้อเสียระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น

มีความซับซ้อนสูงกว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น ต้องการสัญญาณที่แน่นอนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการหันลำคลื่นหลักไปยังสัญญาณที่ต้องการ ต้องการหน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูง มีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากระบบมีความซับซ้อนมาก

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นได้อธิบายถึงหลักการทำงานและข้อดีข้อเสียของระบบสายอากาศแก่งทั้งแบบสวิตช์ลำคลื่นและแบบปรับตัวไปแล้ว พบว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นมีความซับซ้อนในการสร้างลำคลื่นและหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแบบปรับตัว นอกจากนี้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นยังไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูงก็สามารถสร้างและหันลำคลื่นได้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสร้าง และติดตั้งสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับตัว แต่สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นก็ยังมีข้อเสียอยู่ ในเรื่องของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นสายอากาศแบบสวิตช์ ลำคลื่นจึงเป็นสายอากาศที่น่าสนใจที่จะกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้น โดยจะนำเสนอเทคนิคการหันลำคลื่นของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นในหัวข้อที่ 2.6 และวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ในหัวข้อที่ 2.7 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 2.16 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น

2.6 เทคนิคการหันลำคลื่น

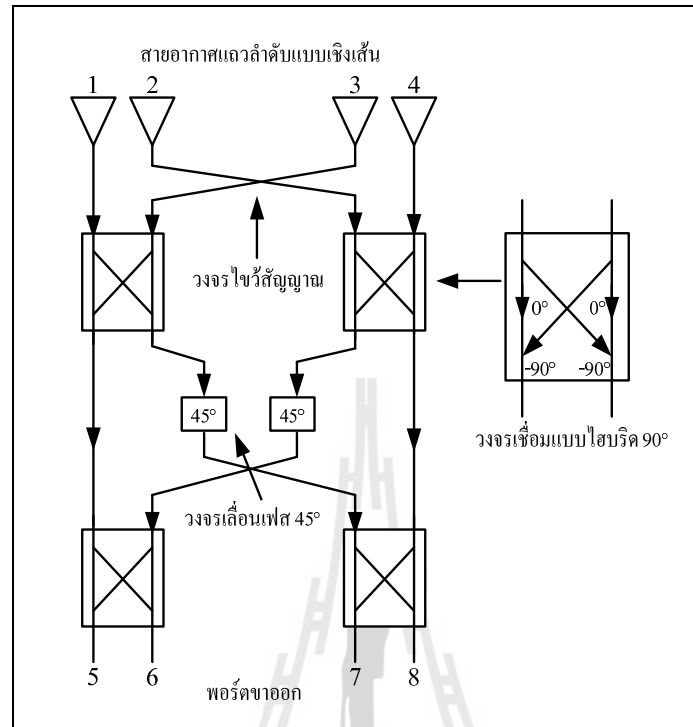
จากที่กล่าวมาข้างต้นถึงข้อดีของระบบสายอากาศเก่งที่สามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ โดยการหันลำคลื่นของระบบสายอากาศเก่งนั้นทำได้หลายเทคนิค เช่น การเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณ การลัดวงจรหรือเปิดวงจร แต่วิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในระบบสายอากาศเก่งก็คือ วิธีแบบบัตเลอร์เมตริก ซึ่งในงานวิจัยนี้นำเทคนิคของบัตเลอร์เมตริก เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายและมีต้นทุนการผลิตต่ำ ซึ่งอาศัยการกัลดายวงจรบนแผงวงจรพิมพ์เท่านั้น ดังนั้นจึงเหมาะกับการนำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นของงานวิจัยนี้

2.6.1 บัตเลอร์เมตริก

รูปที่ 2.17 แสดงถึงส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริก (Butler matrix) ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศ 4 ต้น วางเรียงกันเป็นแถวลำดับแบบเชิงเส้น วงจรไขว้สัญญาณ (cross over) วงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° (90° hybrid coupler) และวงจรเลื่อนเฟส 45° ตามที่แสดงในงานวิจัยของ Moody, H. (1994) โดยหลักการทำงานของบัตเลอร์เมตริก คือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบที่สายอากาศสัญญาณจะถูกส่งไปที่ตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° และตัวไขว้สัญญาณ จากนั้นสัญญาณอาจผ่านตัวเลื่อนเฟส 45° แล้วจึงถูกส่งผ่านตัวไขว้สัญญาณและตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สร้างลำคลื่นที่มีลำคลื่นหลักหันไปที่ 138.6° 104.5° 75.5° และ 135° แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริก

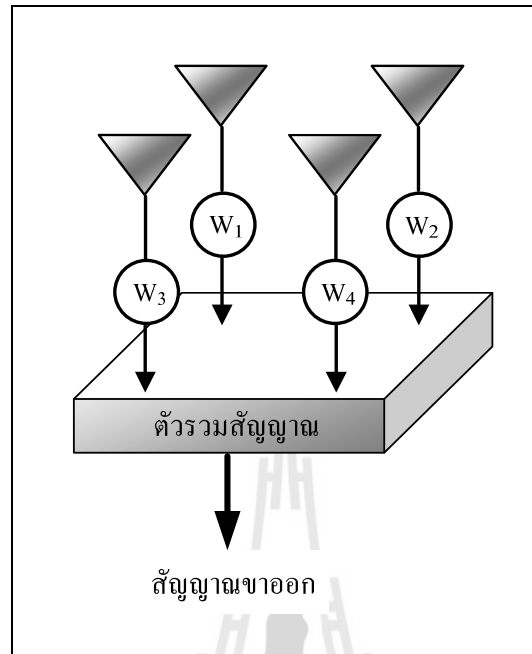
พอร์ต ขาออก	สายอากาศ				ทิศทางของ ลำคลื่นหลัก	ความต่าง เฟส
	1	2	3	4		
5	0°	-45°	-90°	-135°	104.5°	-45°
6	-90°	45°	-180°	-45°	41.4°	135°
7	-45°	-180°	45°	-90°	138.6°	-135°
8	-135°	-90°	-45°	0°	75.5°	45°



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริก

2.6.2 บัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง

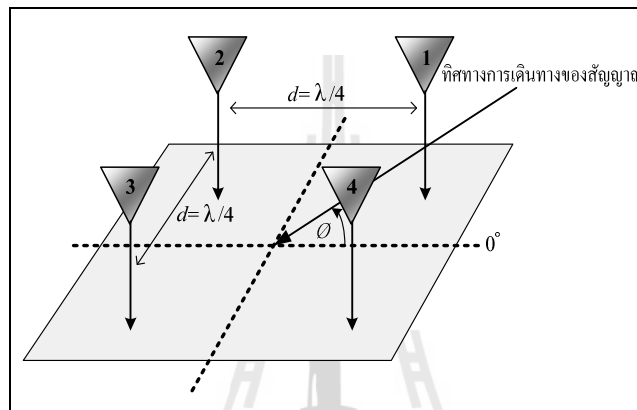
จากที่กล่าวมาข้างต้นบัตเลอร์เมตริกเป็นเทคนิคการหั่นลำคลื่นที่ใช้กับสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นเท่านั้น แต่งานวิจัยฉบับนี้ใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ ดังนั้นเราจึงต้องทำการแก้ไขบัตเลอร์เมตริกเพื่อให้ใช้งานได้กับสายอากาศเชิงระนาบ โดยอาศัยการดัดแปลงเพื่อเลียนแบบโครงสร้างของบัตเลอร์เมตริกเดิม ดังที่แสดงในงานวิจัยของ Uthansakul, M., and Uthansakul, P. (2009) รูปที่ 2.18 แสดงระบบที่ใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2×2 โดยมีตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อทำการปรับลำคลื่นคดไว้ที่สายอากาศแต่ละตัว คือ W_1 , W_2 , W_3 และ W_4 เมื่อมีสัญญาณเข้ามาตกกระทบที่สายอากาศแต่ละต้นในทิศทางใดก็ตาม ตัวถ่วงน้ำหนักจะทำหน้าที่ในการปรับมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละต้นเพื่อให้ได้สัญญาณขาออกที่สูงที่สุดในทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา



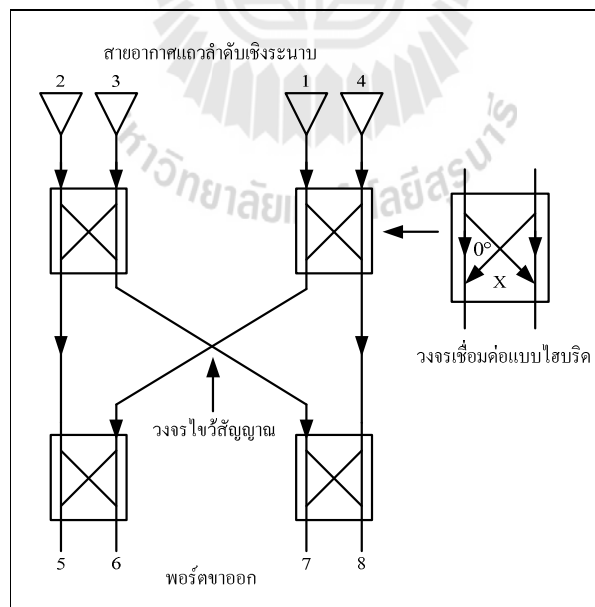
รูปที่ 2.18 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบที่มีตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อทำการปรับเฟสหรือแอมพลิจูดของสัญญาณ

รูปที่ 2.19 แสดงการวางตัวของสายอากาศที่ให้ในระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นอย่างง่าย เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบบนสายอากาศแต่ละต้นที่มุม ϕ ใด จะมีมุมเฟสของสัญญาณที่แตกต่างกันออกไป ดังที่แสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าที่มุม 45° 135° 225° และ 315° เฟสที่มาตกกระทบบนของสายอากาศแต่ละต้นจะมีความต่างเฟสประมาณ 64° เมื่อเรานำมาเปรียบเทียบกัน และเขียนแบบจากบัตเลอร์เมตริก จะได้โครงสร้างบัตเลอร์เมตริกใหม่ ดังรูปที่ 2.20 แสดงส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริกใหม่ โดยเราจะเรียกว่าบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง ซึ่งจะประกอบไปด้วย วงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด (hybrid coupler) และ วงจรไขว้สัญญาณเท่านั้น ดังนั้นเราสามารถเขียนตารางการเลื่อนเฟสหรือค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักที่อ้างอิงค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริก ในตารางที่ 2.1 และเราสามารถเขียนค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงได้ เช่นเมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบบนที่สายอากาศต้นที่ 1 ผ่านไปยังพอร์ตที่ 5 สัญญาณจะไหลผ่านวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริดเพียงหนึ่งตัวทำให้มีการเลื่อนมุมเฟสเท่ากับ X° ในทางเดียวกัน เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบบนที่สายอากาศต้นที่ 2 ผ่านไปยังพอร์ตที่ 5 สัญญาณจะไหลผ่านมาโดยไม่มี การเลื่อนมุมเฟสเลย ดังนั้นจึงมีมุมเฟสเท่ากับ 0° โดยที่ค่าการเลื่อนมุมเฟสทั้งหมดได้แสดงดังตารางที่ 2.2 เมื่อเราแทน

ค่า $X = 64^\circ$ ที่ได้จากการตัดกราฟมุมเฟสของสายอากาศในรูปที่ 2.12 ในขณะที่เราต้องการทิศทางของลำคลื่นหลักไปยัง 45° 135° 225° และ 315° สายอากาศแต่ละตัวจะมีการเลื่อนมุมเฟสไป 64° ดังนั้นจึงแทนค่ามุมเฟสลงในตารางที่ 2.2 จะได้ค่าเลื่อนเฟสของสายอากาศแต่ละต้นแสดงดังตารางที่ 2.3 จากค่าการเลื่อนมุมเฟสพบว่าเราต้องใช้วงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° (hybrid coupler 64°) เพื่อให้ได้ทิศทางของลำคลื่นหลักไปยัง 45° 135° 225° และ 315° ตามที่เราต้องการ



รูปที่ 2.19 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2



รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของบัตเลอร์เมทริกซ์ที่ถูกปรับปรุง

ตารางที่ 2.2 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแต่ละต้นของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง

พอร์ตขาออก	สายอากาศ			
	2	3	1	4
5	0	X	X	2X
6	X	2X	0	X
7	X	0	2X	X
8	2X	X	X	0

หมายเหตุ: X คือ มุมเฟสใด ๆ มีหน่วยเป็นองศา

ตารางที่ 2.3 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$ ของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง

พอร์ตขาออก	สายอากาศ				ทิศทางของลำคลื่นหลัก
	2	3	1	4	
5	0°	64°	64°	128°	135°
6	64°	128°	0°	64°	45°
7	64°	0°	128°	64°	225°
8	128°	64°	64°	0°	315°

2.7 วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Adam, M.A.R.M., and Elkamchouchi, H.M. (2000); Haupt, R.L., Shore, R.A., and Steyskal, H. (1986); Khan, N.M., and Qamar, R.A. (2009); Panique, M., and Yikun, H. (2007) ซึ่งพบว่าระบบการกำหนดทิศทางจุดศูนย์ที่แสดงไว้นั้นเป็นระบบที่มีความซับซ้อน กล่าวคือจำเป็นต้องอาศัยระบบประมวลสัญญาณที่มีสมรรถนะสูงอีกด้วยจึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กับเครือข่ายเมฆไร้สาย ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ (null locating method) ด้วยวิธีการที่ง่าย ซึ่งต้องการเพียงค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้คูณกับสัญญาณขาออกจากโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเท่านั้น ซึ่งวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์จะทำการหาค่าได้ดังต่อไปนี้ โดยเราสมมติให้ทิศทางของสัญญาณที่เข้ามาจากมุมในแนวระนาบ ซึ่งสัญญาณที่มาตกกระทบที่สายอากาศ

แต่ละต้นนั้นจะมีทั้งสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณที่ไม่ต้องการและมีเฟสของสัญญาณที่ไม่เท่ากัน จึงต้องมีการถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่สายอากาศแต่ละต้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่ตำแหน่ง (m,n) ของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะประกอบไปด้วยสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณที่ไม่ต้องการ ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$w_d(m,n) = e^{j\left[(m-1)\left(\frac{\pi}{2}\cos\phi_d\right) + (n-1)\left(\frac{\pi}{2}\sin\phi_d\right)\right]} \quad (2.21)$$

$$w_{i,q}(m,n) = e^{j\left[(m-1)\left(\frac{\pi}{2}\cos\phi_{i,q}\right) + (n-1)\left(\frac{\pi}{2}\sin\phi_{i,q}\right)\right]} \quad (2.22)$$

เมื่อ ϕ_d และ $\phi_{i,q}$ คือ ทิศทางที่เข้ามาของสัญญาณที่ต้องการ และทิศทางที่เข้ามาของสัญญาณที่ไม่ต้องการ ตามลำดับ q^{th} คือ สัญญาณแทรกสอด โดยที่สัญญาณขาออกของสัญญาณที่ต้องการคือ y_d และ สัญญาณขาออกของสัญญาณแทรกสอดคือ y_i ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ (2.23) และ (2.24)

$$y_d = \mathbf{w}_d \mathbf{s}_{total} \quad (2.23)$$

$$y_{i,q} = \mathbf{w}_{i,q} \mathbf{s}_{total} \quad (2.24)$$

เมื่อ \mathbf{s}_{total} ถูกกำหนดให้เป็นเวกเตอร์ของสัญญาณที่ประกอบไปด้วยสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณที่ไม่ต้องการ จากสมการที่ (2.23) และ (2.24) ผลรวมของสัญญาณขาออกคือ

$$\begin{aligned} y_{total} &= y_d + \sum_{q=1}^Q k_q y_{i,q} \\ &= \mathbf{s}_d (\mathbf{w}_d + k_1 \mathbf{w}_{i,1} + \dots + k_Q \mathbf{w}_{i,Q}) + \sum_{q=1}^Q s_{i,q} (\mathbf{w}_d + k_1 \mathbf{w}_{i,1} + \dots + k_Q \mathbf{w}_{i,Q}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

เมื่อ k_q ในที่นี้ถูกกำหนดให้เป็น ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ซึ่งจะสามารถคำนวณจากสมการที่ (2.26) โดยที่จะต้องทำให้สมการในเทอมที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนของสัญญาณแทรกสอดในสมการที่ (2.25) หายไปจะได้ดังสมการที่ (2.26)

$$\sum_{q=1}^Q s_{i,q} \cdot (w_d + k_1 w_{i,1} + \dots + k_Q w_{i,Q}) = 0 \quad (2.26)$$

หลังจากที่คำนวณสมการที่ (2.26) แล้ว ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.27)

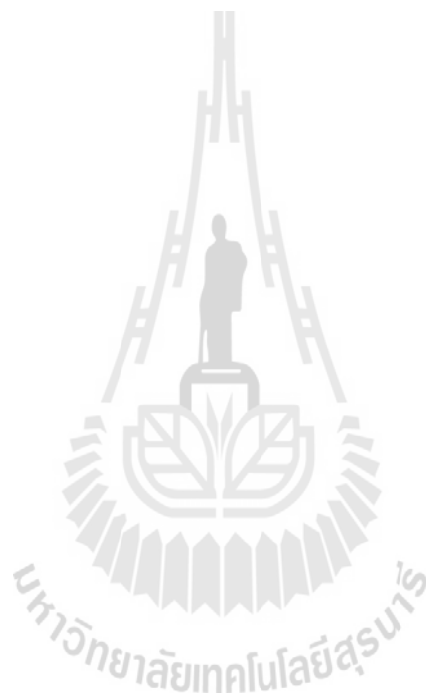
$$\begin{bmatrix} k_1 \\ \vdots \\ k_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{i,1} s_{i,1} & \dots & w_{i,Q} s_{i,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{i,1} s_{i,Q} & \dots & w_{i,Q} s_{i,Q} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -w_d s_{i,1} \\ \vdots \\ -w_d s_{i,Q} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.27) แสดงให้เห็นว่าวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในงานวิจัยฉบับนี้มีความง่าย เพียงการนำค่า k_q ที่ได้คูณกับสัญญาณขาออกก็จะสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ ในทางปฏิบัติเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ k_q เมื่อเรารู้ทิศทางของสัญญาณที่ต้องการและทิศทางของสัญญาณแทรกสอด จากนั้นเราสามารถใช่วิธีการจากสมการที่ (2.21) - (2.27) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ ในกรณีของเครือข่ายเมชไร้สายนั้น ทิศทางของสัญญาณที่มาจากระบบของอุปกรณ์จัดเส้นทางจะมีทิศทางที่แน่นอน เนื่องจากเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางได้ถูกติดตั้งอยู่กับที่อย่างไรก็ตามทิศทางของสัญญาณในระบบไร้สายอื่น ๆ ก็สามารถใช่วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้ได้เช่นกัน

2.8 กล่าวสรุป

ตามเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้นยังมีข้อเสียในเรื่องของความไม่สะดวกในการใช้งานติดตั้งระบบและยังสิ้นเปลืองอีกด้วย ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีใหม่มาทดแทนเพื่อเพิ่มความสะดวกและประหยัดมากขึ้น คือเทคโนโลยีเครือข่ายเมชไร้สาย ซึ่งเทคโนโลยีนี้ก็ยังเกิดปัญหาในเรื่องของสัญญาณแทรกสอดที่มารบกวนระบบอยู่ เนื่องจากสายอากาศที่ใช้มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นมาใช้ เนื่องจากสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น

เป็นระบบที่ง่าย และต้นทุนต่ำประกอบกับการลดปัญหาของสัญญาณแทรกสอดลงด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ง่ายไม่ซับซ้อน เพื่อนำไปใช้งานกับเครือข่ายเมชไร้สาย



บทที่ 3

การจำลองแบบของสายอากาศสวิตช์ลาค์ลินสำหรับเครือข่ายไร้สายแบบเมช

โดยใช้โปรโตคอล Synchronous Collision Resolution

3.1 กล่าวนำ

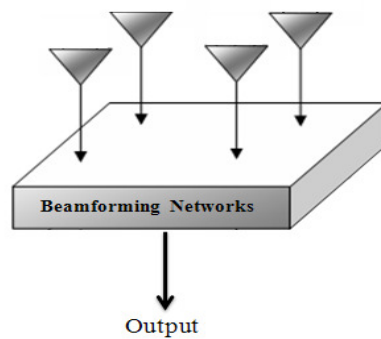
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลาค์ลินเมื่อทำงานในเครือข่ายไร้สายแบบเมช ในการจำลองแบบสายอากาศเก่งจะถูกติดตั้งที่ตัวจัดเส้นทาง ซึ่งจะแบ่งเป็นสองกรณีได้แก่ ติดตั้งไว้ที่ตัวจัดเส้นทางตรงทาง และติดตั้งไว้ที่ทุกตัวจัดเส้นทาง สมรรถนะที่สนใจในบทนี้ได้แก่ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดที่ความหนาแน่นของทราฟฟิก ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบระหว่างการใช้สายอากาศสวิตช์ลาค์ลินสองแบบที่ได้กล่าวไปในข้างต้นกับระบบที่ใช้สายอากาศที่มีการแผ่พลังงานรอบทิศทาง โปรโตคอลที่มีชื่อว่า Synchronous Collision Resolution (SCR) ซึ่งถูกเผยแพร่โดย Stine, J. A. (2006) และ Hu, H., Zhang, Y. and Luo, J. (2007) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่ถูกรับรองขึ้นมาใหม่ เพื่อให้มีความยืดหยุ่นในการออกแบบระบบ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้กับสายอากาศสวิตช์ลาค์ลินได้ ในการจำลองแบบในบทนี้ได้มีการกำหนดคุณลักษณะของโปรโตคอลดังนี้

1. ช่องสัญญาณมีการแบ่งเป็นร่อง (slot)
2. ทุกๆ โหนดจะสามารถใช้ได้ทุกร่องเมื่อต้องการส่งข้อมูล
3. โหนดที่ต้องการจะส่งข้อมูลจะมีการส่งสัญญาณเพื่อขอใช้ร่อง
4. ทุกๆ กลุ่มข้อมูล (packet) ในหนึ่งร่องใดๆ ถูกส่งพร้อมกัน

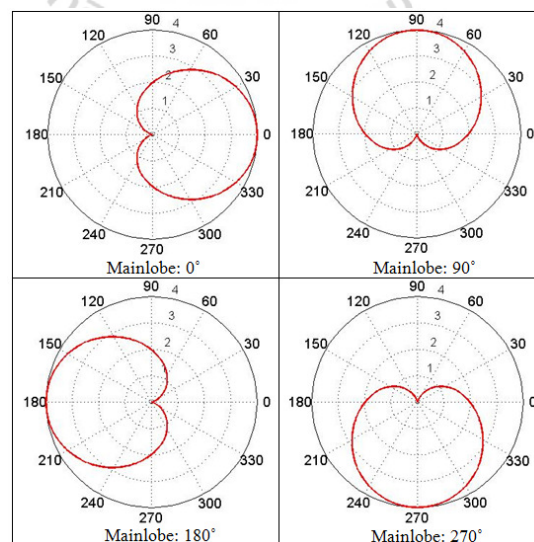
3.2 สายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลาค์ลิน

โดยทั่วไปแล้วระบบสายอากาศเก่งประกอบด้วย สายอากาศแถวลำดับและหน่วยประมวลสัญญาณ ซึ่งสายอากาศแถวลำดับจะทำหน้าประมวลสัญญาณบนโดเมนตำแหน่ง ส่วนหน่วยประมวลผลสัญญาณจะทำหน้าที่ในการประมวลผลสัญญาณบนโดเมนเวลา การประมวลผล

สัญญาณในทั้งสองส่วนที่กล่าวมานั้นจะช่วยลดผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกันลงได้ ส่งผลให้สามารถปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณที่รับเข้ามาในระบบ ทำให้เราสามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบสื่อสารไร้สายได้ ในการจำลองแบบในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น เนื่องจากไม่มีความซับซ้อน ส่งผลให้มีต้นทุนที่ไม่สูง แต่ยังคงให้ประสิทธิภาพอยู่ในระดับที่ดีสำหรับการใช้งานในระบบเครือข่ายเมชไร้สาย การวางตัวของสายอากาศจะมีลักษณะเป็นแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 2×2 ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับ และโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ทำหน้าประมวลสัญญาณเชิงเวลา รูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้มาจากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยฉบับนี้ เมื่อกำหนดให้ระบบสามารถหันลำคลื่นไปยังทิศทาง 0° 90° 180° และ 270° ในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 3.1 สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นแบบ 2×2

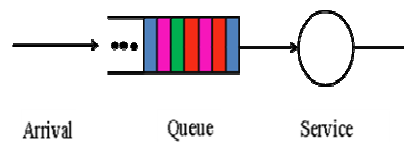


รูปที่ 3.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น 2×2

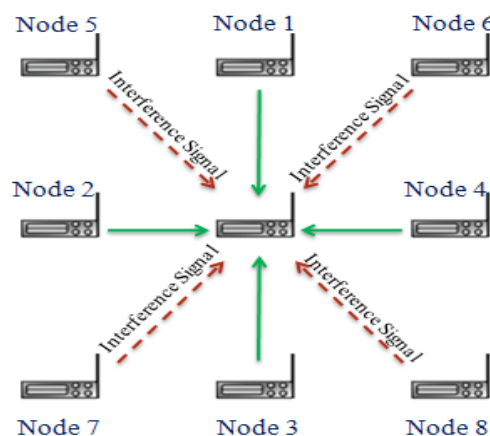
3.3 ทฤษฎีคิว

ทฤษฎีคิว (queuing theory) เป็นทฤษฎีที่ใช้กำหนดพฤติกรรมของกลุ่มข้อมูล (packet) ในระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีคิวอย่างง่ายที่อ้างถึง M/M/1/∞ คิว จากงานวิจัยของ Garcia, A. L. (1994) โดยที่มีการกำหนดการมาถึงของกลุ่มข้อมูลให้มีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบปัวซอง และเวลาการให้บริการ (service time) ให้มีการกระจายตัวแบบเลขชี้กำลัง (exponential) ด้วยเซอร์เวอร์เดี่ยวและ infinite waiting space โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ปัญหาด้วยการกำหนดให้เป็นเซอร์เวอร์เดียวนั้นทำได้ง่ายกว่าการกำหนดให้เป็นระบบคิวแบบเซอร์เวอร์หลายตัว ยิ่งไปกว่านั้นผลของขอบเขตจะได้มาจากการกำหนดให้ระบบมีการเข้าคิวของเซอร์เวอร์ตัวเดียวหลายๆ ตัวขนานกัน เมื่อผู้ใช้บริการที่ต้องการส่งข้อมูลสามารถเข้าคิวได้แบบเชิงสุ่ม

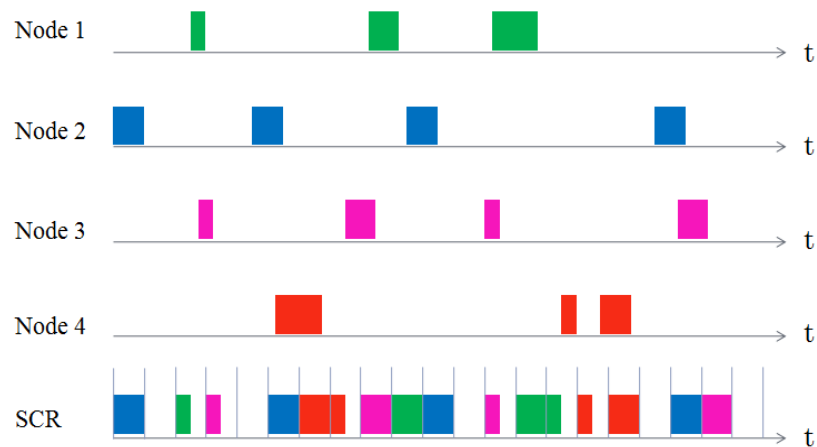
ระบบการเข้าคิว (queuing systems) คือรูปแบบที่เหมาะสมที่ใช้อ้างอิงในการทำงานวิจัยและพัฒนาสำหรับระบบสื่อสารทั่วไป หลักการพื้นฐานของระบบคิวแสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับระบบคิวแบบ M/M/1 จะมีความหนาแน่นของกราฟฟิกดังนี้ $\rho = \lambda\mu$ เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของกราฟฟิก λ คืออัตราการมาถึงเฉลี่ยของข้อมูล และ μ คืออัตราการบริการเฉลี่ย เมื่อ โหนดตัวรับคือ โหนดตัวกลางที่แสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับกลุ่มข้อมูลที่มาถึงการกระจายตัวจะถูกกำหนดให้เป็นแบบ Poi



รูปที่ 3.3 ระบบคิว



รูปที่ 3.3 รูปแบบการส่งสัญญาณจากโหนดต่างๆ ในระบบ

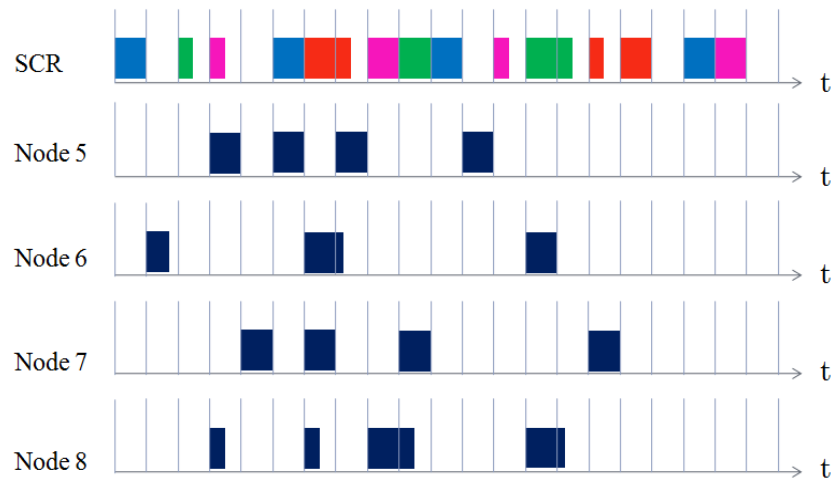


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเข้าถึงของกลุ่มข้อมูลในระบบเครือข่ายเมชไร้สาย

รูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นตัวอย่างของกลุ่มข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นจากโหนดรอบข้างในรูปที่ 3.3 ทั้ง 4 โหนดและผลลัพท์ของการส่งกลุ่มข้อมูลที่เกิดขึ้น เมื่อใช้โปรโตคอลแบบ SCR ในการจัดคิวที่ตัวรับซึ่งเป็นโหนดตัวกลางที่เห็นในรูปที่ 3.3

3.4 ปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณ

ถึงแม้ว่าโปรโตคอล SCR จะถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของกลุ่มข้อมูล แต่ก็ยังคงเกิดการชนกันของกลุ่มข้อมูลอยู่ สาเหตุเนื่องมาจากสัญญาณแทรกสอดที่ส่งมาจากโหนดข้างเคียง รูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นตัวอย่างการชนกันของกลุ่มข้อมูลอื่นเนื่องมาจากสัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกัน ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อโหนดหนึ่งส่งข้อมูลถึงโหนดข้างเคียงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกส่งออกมารอบทิศทางทำให้เกิดการแทรกสอดขึ้นที่โหนดอื่นด้วยเช่นกัน จากรูปที่ 3.5 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าการเกิดการชนกันของข้อมูลทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากไม่สามารถใช้ช่องสัญญาณได้เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นระบบเครือข่ายเมชไร้สายจึงจำเป็นต้องมีระบบที่จะเข้ามาช่วยแก้ปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณจากช่องสัญญาณเดียวกัน ซึ่งได้แก่ระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นนั่นเอง



รูป 3.5 ตัวอย่างการชนกันของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกัน

3.5 การจำลองแบบเพื่อดูผลกระทบของสัญญาณแทรกสอด

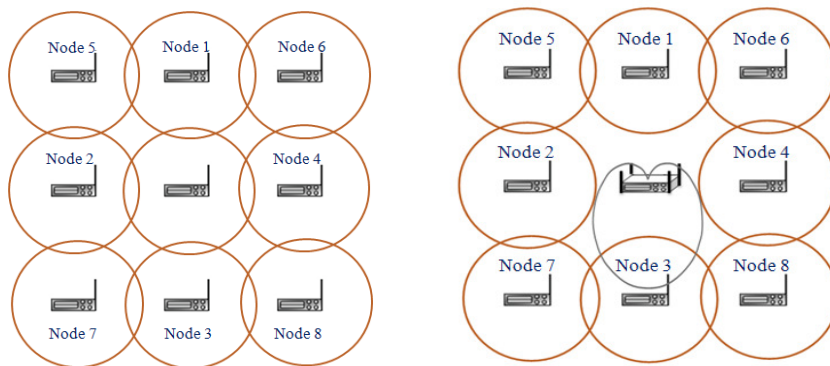
การจำลองแบบจะกระทำในคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบถึงผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย ในการจำลองแบบครั้งนี้ ระยะห่างระหว่างโหนดแต่ละโหนดในแนวตั้งและแนวนอนมีค่าเท่ากัน พารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกถึงสมรรถนะของระบบได้แก่ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal-to-Interference Ratio: SIR) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณแทรกสอดที่มีช่องสัญญาณเดียวกัน ค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด สามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต้นทางและปลายทางได้เป็นอย่างดี

ในการจำลองแบบครั้งนี้จะกำหนดสถานการณ์ที่เกิดขึ้นอยู่ 3 สถานการณ์ดังนี้ สถานการณ์ที่ 1: ทุกโหนดมีการแผ่พลังงานในลักษณะรอบทิศทางดังที่แสดงในรูปที่ 3.6 (ก) ซึ่งในสถานการณ์นี้ จะไม่มีการใช้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นติดตั้งไว้ที่ตัวจัดเส้นทาง สถานการณ์ที่ 2: สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นจะถูกติดตั้งไว้ที่โหนดตัวกลางเท่านั้น ซึ่งเปรียบได้ว่าโหนดตัวกลางเป็น gateway ส่วนโหนดรอบข้างที่เหลือจะใช้สายอากาศที่มีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 (ข) สถานการณ์ที่ 3: สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นถูกติดตั้งไว้ที่โหนดทุกตัวในระบบ จากนั้นการทดลอง 3 การทดลองจะถูกกำหนดขึ้นเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายดังนี้

-การทดลองที่ 1: กำหนดให้อัตราการมาถึงเฉลี่ยของข้อมูล (λ) มีค่าเท่ากับ 0.5 และค่าความหนาแน่นทราฟฟิก (ρ) เท่ากับ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 0.9

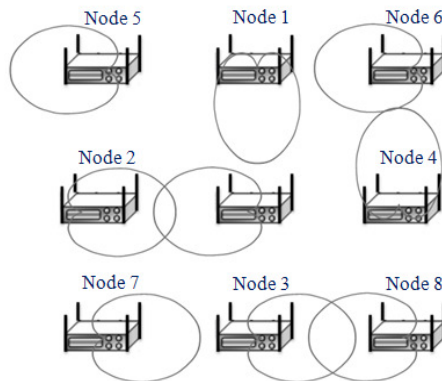
-การทดลองที่ 2: กำหนดให้ค่าอัตราการบริการเฉลี่ย (μ) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.5 และค่าความหนาแน่นทราฟฟิก (ρ) เท่ากับ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 0.9

-การทดลองที่ 3: กำหนดให้อัตราการมาถึงเฉลี่ยของข้อมูล (λ) มีค่าเท่ากับ 0.5 และค่าความหนาแน่นทราฟฟิก (ρ) เท่ากับ 0.5 เพื่อแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความน่าจะเป็นของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด



(ก)

(ข)



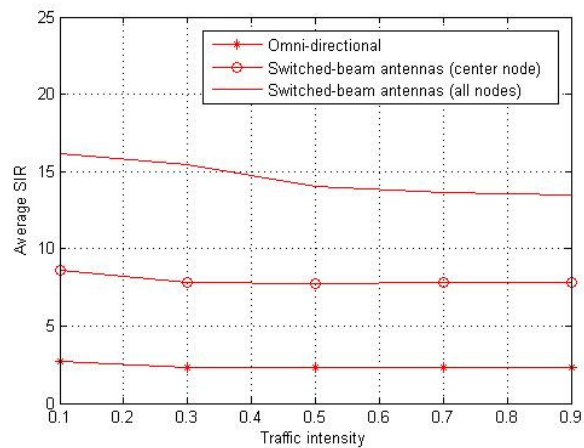
(ค)

รูปที่ 3.6 สถานการณ์ทั้งสามของเครือข่ายเมฆไร้สายที่ใช้ในการจำลองแบบเมื่อ

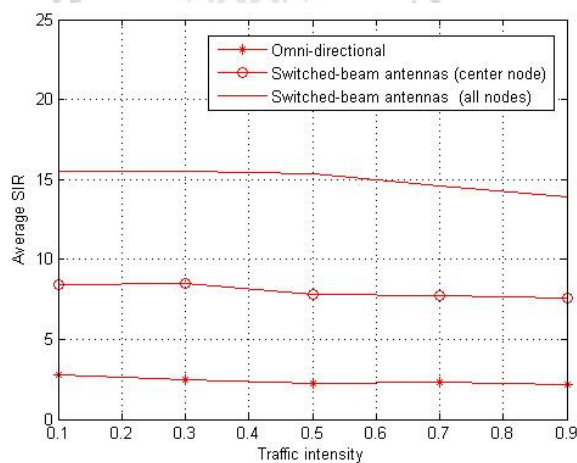
- (ก) ทุกโหนดติดตั้งสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานรอบทิศทาง
- (ข) โหนดตัวกลางติดตั้งสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นเพียงตัวเดียว
- (ค) ทุกโหนดติดตั้งสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น

3.6 ผลการจำลองแบบ

ผลที่ได้จากการจำลองแบบเพื่อดูค่าความหนาแน่น (ρ) เทียบกับกับค่า สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ของทั้งสามสถานการณ์แสดงอยู่ในรูปที่ 3.7 เมื่อผลที่แสดงในรูปที่ 3.7(ก) และรูป 3.7(ข) คือผลที่ได้จากการทดลองที่ 1 และ 2 ดังที่กำหนดไว้ในข้างต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีที่ติดตั้งสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่โนดตัวกลางและทุกโนดจะทำให้สมรรถนะของระบบสูงกว่าในกรณีที่โนดทุกตัวใช้สายอากาศที่การแผ่พลังงานรอบทิศทางประมาณ 12 dB ส่วนค่า สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ของระบบในกรณีที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่โนดทุกตัวสูงกว่าในกรณีที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่โนดตัวกลางอย่างเดียวอยู่ 6 dB



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 ค่าเฉลี่ย สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด เทียบกับค่าความหนาแน่นทราฟฟิก

(ก) กรณีที่ค่าอัตราการมาถึงของข้อมูลเฉลี่ยเท่ากับ 0.5

(ข) กรณีที่ค่าอัตราการบริการเฉลี่ยเท่ากับ 0.5



รูปที่ 3.8 แสดงการกระจายตัวของความน่าจะเป็นของค่า สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ของระบบใน 3 สถานการณ์ที่กำหนดในเบื้องต้น จากรูปพบว่ากรณีที่ใช้สายอากาศแบบสวิตซ์ลำ คลื่นทำให้ความน่าจะเป็นของค่า สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ที่จะเกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าอีก 2 สถานการณ์: ใช้สายอากาศรอบทิศทาง และสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่โนดตัวกลางเพียงอย่างเดียว ส่วนเมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบในกรณีที่ติดตั้งสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่โนด ตัวกลางและการใช้สายอากาศรอบทิศทางที่ทุกโนด พบว่าในกรณีที่ใช้สายอากาศแบบสวิตซ์ลำ คลื่นจะให้สมรรถนะที่สูงกว่า กล่าวคือให้ความน่าจะเป็นของค่าสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ที่ สูงกว่า

จากผลทั้งหมดที่ได้จากการจำลองแบบทั้ง 2 สถานการณ์พบว่า เราสามารถยืนยันสมรรถนะ ของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่มีสูงกว่าการใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางในระบบเครือข่าย เมชไร้สาย เนื่องจากสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นมีความสามารถในการลดสัญญาณแทรกสอดจาก ช่องสัญญาณเดียวกันด้วยการหันลำคลื่นรบกวนหรือจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด จึง ส่งผลให้ค่า สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด เฉลี่ยของระบบสูงขึ้น และในกรณีที่ติดตั้งสายอากาศ แบบสวิตซ์ลำคลื่นไว้ที่โนดทุกตัวจะทำให้ได้สมรรถนะสูงที่สุด

3.7 กล่าวสรุป

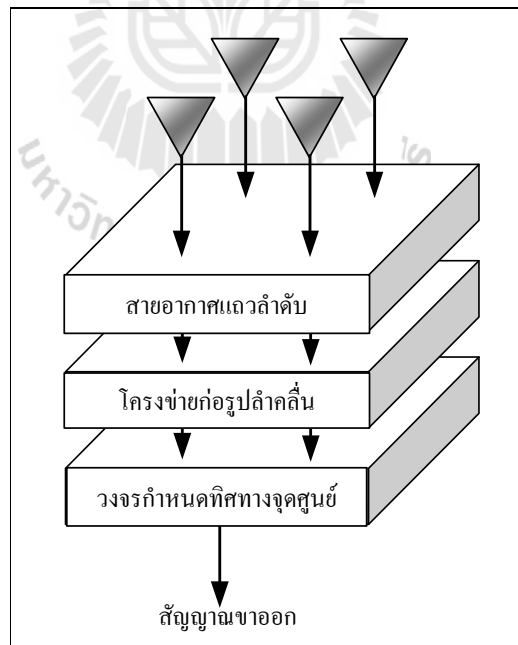
ในบทนี้ได้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่สามารถลด ผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกันในระบบเครือข่ายเมชไร้สาย ซึ่ง โปรโตคอล SCR ถูกเลือกมาใช้เนื่องจากเหมาะสมกับเครือข่ายเมชไร้สายที่ใช้สายอากาศแบบ สวิตซ์ลำคลื่น จากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์พบว่ากรณีที่มีการติดตั้งสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น ที่โนดทุกตัวทำให้ระบบมีค่า สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด สูงที่สุด หรือแม้กระทั่งติดตั้ง สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่โนดตัวกลางเพียงอย่างเดียวก็ยังคงให้ค่า สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ที่ สูงกว่าเครือข่ายเมชไร้สายที่ใช้สายอากาศรอบทิศทางที่ทุกตัวจัดเส้นทาง

บทที่ 4

การออกแบบระบบสายอากาศสวิตซ์การกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบระบบสายอากาศสวิตซ์อย่างง่ายที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เพื่อนำไปใช้งานกับเครือข่ายเมชไร้สายที่มีความถี่ 2.45 GHz รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของระบบของงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยม โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และวงจรที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ในการออกแบบวงจรดังกล่าวเราจะใช้โปรแกรม Microwave office และโปรแกรม CST Microwave Studio จำลองผลเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างอุปกรณ์จริงต่อไป



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

4.2 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศที่ใช้ในระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นนั้นจะเป็นสายอากาศประเภทแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมขนาด 2×2 นั่นคือ ในระบบจะใช้สายอากาศจำนวน 4 ต้น เนื่องจากเราจำเป็นต้องเลือกใช้สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นได้รอบทิศทางในมุมแนวระนาบ เราจึงเลือกใช้สายอากาศชนิดโมโนโพล (monopole antenna) ที่สามารถรองรับความถี่ได้ที่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่เรานำไปใช้งาน รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการวางตัวของสายอากาศที่ใช้ในระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นมีการวางตัวเป็นสี่เหลี่ยม ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายอากาศ $d = \lambda/4$ เนื่องจากเราได้จำลองแบบด้วยโปรแกรมแมทแลบเพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ พบว่าสายอากาศชุดนี้สามารถก่อรูปลำคลื่นหลักตามที่เรต้องการได้แต่ยังมีระดับของพูข้างหรือจุดศูนย์ที่สูงถึง -2.587 dB แสดงดังรูปที่ 3.3 และเมื่อเราเปลี่ยนระยะห่างระหว่างของสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$ นั้นมีแบบรูปการแผ่พลังงานดังรูปที่ 4.4 จากรูปจะเห็นว่าชุดสายอากาศที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$ สามารถก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการและมีระดับพูข้างเท่ากับ -14.1 dB ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าชุดสายอากาศที่ใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ ถึง 11.513 dB ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$ และนำไปใช้ได้เมื่อต้องการทิศทางของลำคลื่นหลักมากกว่า 4 ทิศทาง ซึ่งสามารถคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นได้จากสมการที่ (4.2)

$$v = f\lambda \quad (4.1)$$

ความยาวคลื่น

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9}$$

$$\therefore \lambda = 12.24 \text{ เซนติเมตร}$$

โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศในสมการ (3.2)

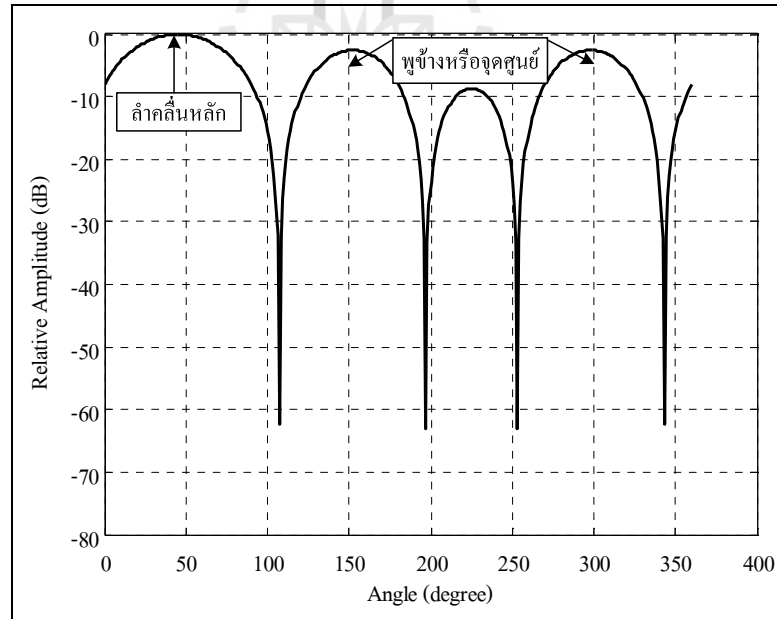
$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{12.24}{4} \quad (4.2)$$

ดังนั้น

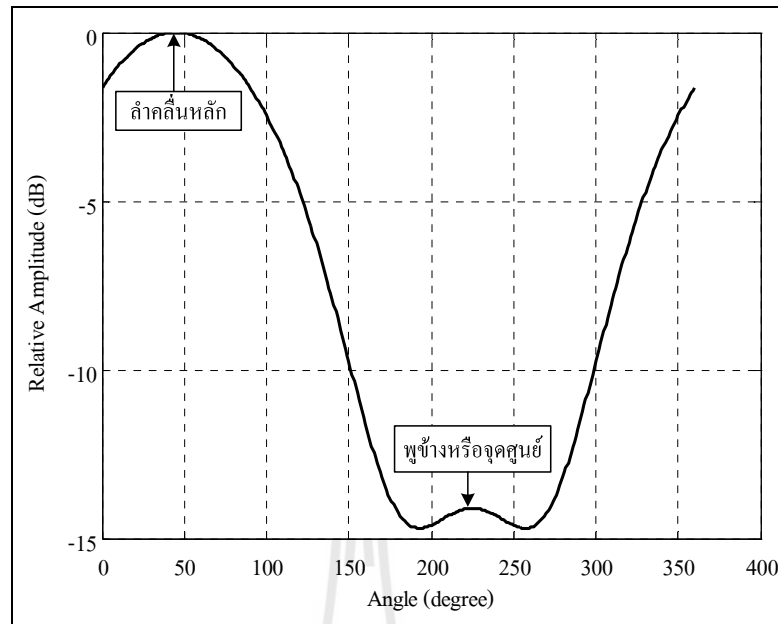
$$d = 3.06 \text{ เซนติเมตร}$$



รูปที่ 4.2 สายอากาศแฉกลำดับเชิงระนาบ 2×2 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉกลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$



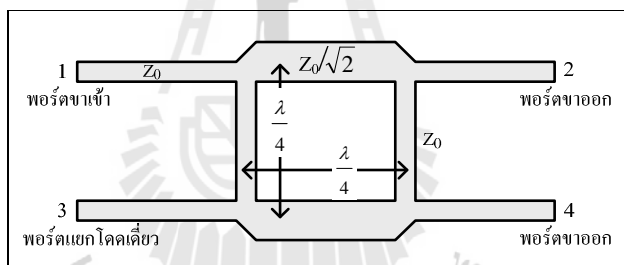
รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$

จากรูปที่ 2.12 เราจะสังเกตเห็นว่า ที่ตำแหน่ง 0° เส้นกราฟการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 1 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 4 อยู่ที่ตำแหน่ง $+45$ ส่วนการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 2 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 3 อยู่ที่ตำแหน่ง -45 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 1 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 4 จะมีการเลื่อนมุมเฟสมากกว่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 2 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 3 อยู่ซึ่งหมายความว่า เมื่อมีแหล่งกำเนิดสัญญาณเข้ามาที่ตำแหน่งมุม θ ใด ๆ สายอากาศคันที่ 1 และสายอากาศคันที่ 4 ก็จะได้รับสัญญาณก่อน เมื่อเราสังเกตต่อไป เช่นที่มุม 45° จะเห็นว่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 1 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 4 นั้น การเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 1 จะมีการเลื่อนมุมเฟสมากกว่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 4 อยู่ แสดงว่าสายอากาศคันที่ 1 จะได้รับสัญญาณก่อนสายอากาศคันที่ 4 ซึ่งก็จะเช่นเดียวกันกับการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 2 และการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 3 ที่มุมเดียวกัน การเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 2 จะมีการเลื่อนมุมเฟสมากกว่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศคันที่ 3 อยู่ แสดงว่าสายอากาศคันที่ 2 จะได้รับสัญญาณก่อนสายอากาศคันที่ 3 ดังนั้นเราจึงนำเอาข้อมูลเหล่านี้เป็นแนวทางเพื่อนำไปใช้ออกแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (บัคเคิลเมตริกที่ปรับปรุงแล้ว) ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

4.3 การออกแบบโครงข่ายท่อรูปลาคี่นสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ

เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมขนาด 2×2 และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$ ดังนั้น โครงข่ายท่อรูปลาคี่นต้องทำการแก้ไขใหม่เพื่อให้ใช้ได้กับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมนี้ ซึ่งการออกแบบนั้นเราจะอาศัยการตัดแปลงมาจากบัตเลอร์เมตริก ที่ใช้กับสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น 4×1 ในการออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° นั้น เราต้องอาศัยหลักการของการออกแบบมาจากวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° ก่อน หลังจากนั้นเราจึงต้องอาศัยการจำลองผลจากโปรแกรม Microwave office เพื่อช่วยในการปรับเปลี่ยนมุมเฟสของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริดให้ได้มุมเฟสตามที่เราต้องการ นอกจากนี้เรายังต้องทำการออกแบบวงจรไขว้สัญญาณ (crossover) และวงจรเลื่อนเฟส (phase shifter) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงแล้วอีกด้วย

4.3.1 การออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64°



รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นฐานของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90°

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในการออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° นั้น ต้องอาศัยหลักการจากการออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° โดยอ้างอิงจากหนังสือของ David, M.P. (1998) คือ อุปกรณ์เชื่อมต่อเกี่ยวกับทิศทางทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ถูกส่งเข้ามายังพอร์ตขาเข้าและส่งออกไปยังพอร์ตขาออกอย่างเท่ากัน โดยพอร์ตขาออกทั้ง 2 จะมีความต่างเฟส 90° พอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตขาเข้าจะเป็นพอร์ตแยกสัญญาณ เช่น เมื่อสัญญาณถูกส่งเข้ามายังพอร์ต 1 สัญญาณจะถูกส่งออกที่พอร์ต 2 และพอร์ต 4 อย่างละเท่า ๆ กัน โดยสัญญาณที่พอร์ตทั้ง 2 มีความต่างเฟส 90° พอร์ต 3 เป็นพอร์ตแยกโคเดเดี่ยว (isolation port) ซึ่งเป็นพอร์ตที่ไม่ควรมีสัญญาณออกเลย ไฮบริดชนิดนี้มักจะสร้างมาจากไมโครสตริป หรือสตริป ดังแสดงในรูปที่ 4.5 คือ ลักษณะพื้นฐานของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° สังเกตเห็นว่าวงจรเชื่อมชนิดนี้จะสมมาตรกัน

แต่ละพอร์ตสามารถใช้เป็นพอร์ตขาเข้าได้ และพอร์ตขาออกจะเป็นพอร์ตที่อยู่ตรงกันข้ามกับพอร์ตที่เป็นพอร์ตขาเข้าเสมอ ส่วนพอร์ตแยกยังคงเป็นพอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตขาเข้าเช่นกัน ในการออกแบบเราจะใช้การคำนวณพื้นฐานมาจากการคำนวณของไมโครสตริปโดยใช้ไมโครสตริป 50Ω ซึ่งทำการออกแบบบนแผงวงจรพิมพ์แบบ FR4 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_r เท่ากับ 4.8 และมีความหนาของแผ่นไดอิเล็กตริก d เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ที่ความถี่ 2.45 GHz ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

การคำนวณหาความกว้างของไมโครสตริป W เราใช้สมการที่ (4.3)

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A-2}} & ; \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B-1 - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & ; \frac{W}{d} > 2 \end{cases} \quad (4.3)$$

เมื่อ 1) $Z_0 = 50\Omega$ จาก

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)} \quad (4.4)$$

แทนค่าจะได้

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{4.8 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)} = 1.582$$

นำค่า A ที่ได้แทนลงในสมการที่ (4.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{W}{d} &= \frac{8e^A}{e^{2A-2}} \\ &= \frac{8e^{1.582}}{e^{2(1.582)-2}} \end{aligned}$$

$$\frac{W}{d} = 1.796 \quad ; \frac{W}{d} < 2 \quad \text{จะเห็นว่าเป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น}$$

$$W = d(1.796) = (1.6)(1.796) = 2.87 \text{ มิลลิเมตร}$$

จาก
$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12(d/W)}} \right) \quad (4.5)$$

เมื่อแทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \varepsilon_e &= \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12(1)}{2.87}}} \right) \\ &= 2.9 + \frac{1.9}{\sqrt{1 + 6.68}} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_e = 3.584$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง

จาก
$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}(f)} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.584}(2.45 \times 10^9)} \quad (4.6)$$

$$\therefore \lambda = 64.68 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นที่ $90^\circ; \frac{\lambda}{4} = \frac{64.68}{4} = 16.17 \text{ มิลลิเมตร}$

เมื่อ 2) $\frac{Z_0}{\sqrt{2}} = \frac{50}{\sqrt{2}} = 35.35\Omega$ จาก

แทนค่าจะได้
$$B = \frac{377\pi}{2Z_0(\sqrt{\varepsilon_r})} = \frac{377\pi}{2(35.35)(4.8)} = 7.64 \quad (4.7)$$

จาก
$$\frac{W}{d} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right\} \right] \quad ; \frac{W}{d} > 2$$

นำค่า B ที่ได้แทนลงในสมการที่ (4.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{W}{d} &= \frac{2}{\pi} \left[7.64 - 1 - \ln(2(7.64) - 1) + \frac{4.8 - 1}{2(4.8)} \left\{ \ln(7.64 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.8} \right\} \right] \\ &= \frac{2}{\pi} [6.64 - 2.658 + 0.395(1.893 + 0.262)] \\ &= \frac{2}{\pi} (3.982 + 0.851)\end{aligned}$$

$$\frac{W}{d} = 3.076 \quad ; \quad \frac{W}{d} > 2 \quad \text{จะเห็นว่าเป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น}$$

$$W = d(3.076) = (1.6)(3.076) = 4.921 \text{ มม.}$$

จากสมการที่ (4.5) แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned}\epsilon_e &= \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12(1)}{3.076}}} \right) \\ &= 2.9 + \frac{1.9}{\sqrt{1 + 3.9}}\end{aligned}$$

$$\epsilon_e = 3.756$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_e \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง

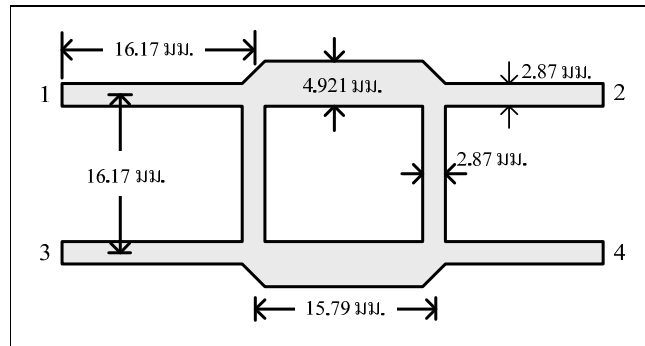
จากสมการที่ (4.6) แทนค่าจะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.765(2.45 \times 10^9)}} = 63.18 \text{ มิลลิเมตร}$$

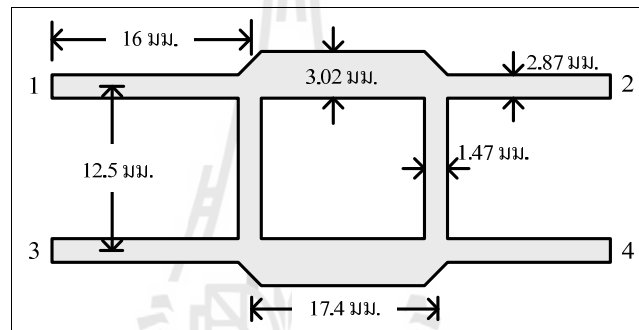
$$\text{ดังนั้นที่ } 90^\circ ; \quad \frac{\lambda}{4} = \frac{63.18}{4} = 15.79 \text{ มิลลิเมตร}$$

เรานำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้แทนในรูปที่ 4.3 และสามารถเขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 4.6

- ที่เส้นที่ Z_0 มีค่าดังนี้
 - ความกว้าง = 2.87 มิลลิเมตร
 - ความยาว = 16.17 มิลลิเมตร
- ที่เส้นที่ $\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$ มีค่าดังนี้
 - ความกว้าง = 4.921 มิลลิเมตร
 - ความยาว = 15.79 มิลลิเมตร

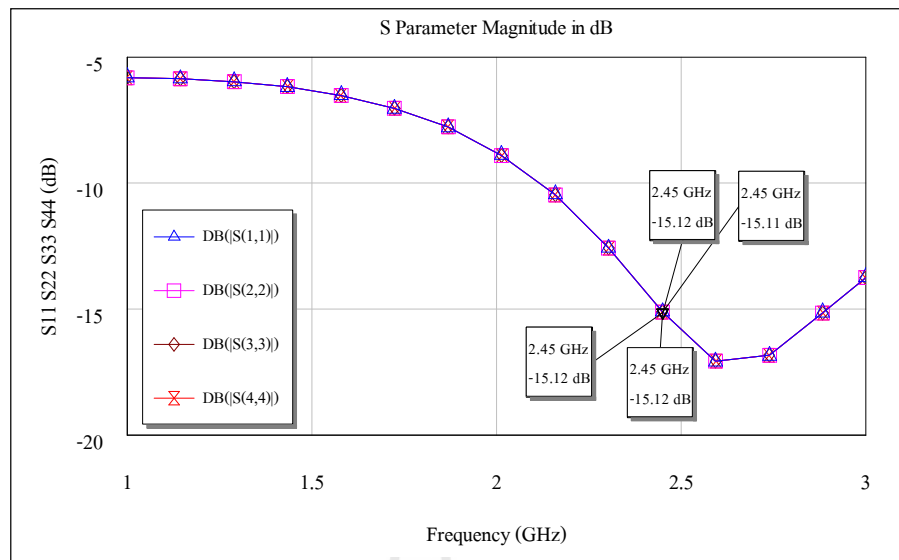


รูปที่ 4.6 ขนาดของวงจรถูกเชื่อมต่อบนแบบไฮบริด 90°

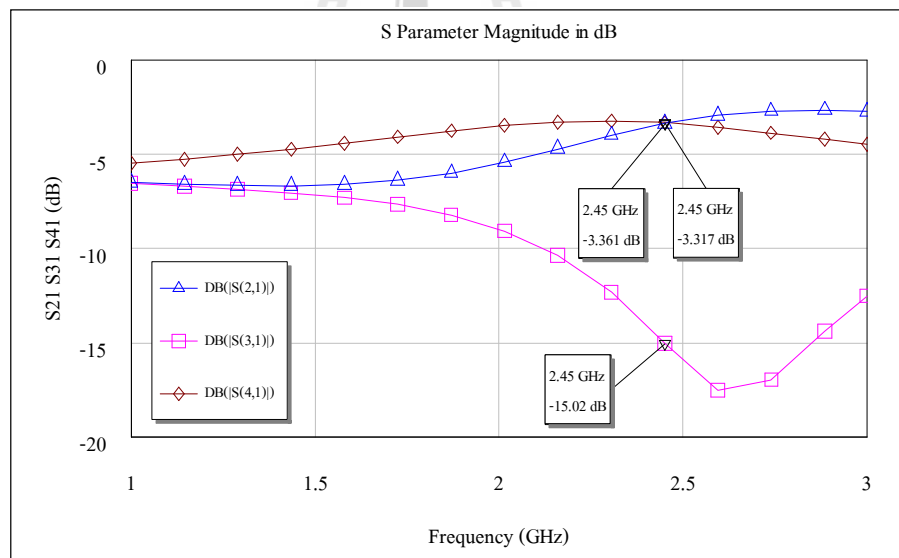


รูปที่ 4.7 ขนาดของวงจรถูกเชื่อมต่อบนแบบไฮบริด 64°

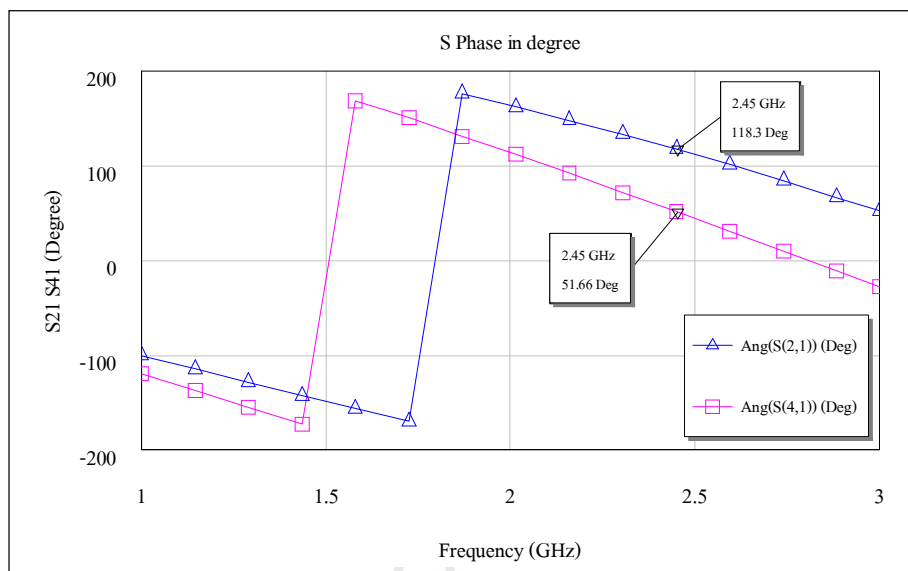
จากค่าพารามิเตอร์ที่ได้เป็นเพียงค่าพารามิเตอร์ของวงจรถูกเชื่อมต่อบนแบบไฮบริด 90° จึงยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ ดังนั้นเราจึงต้องทำการตัดแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองผล ซึ่งในการจำลองผลนั้นนอกจากจะให้ได้มุมเฟสที่ต้องการแล้วยังต้องคำนึงถึงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยว และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อให้มีค่าเหมาะสมอีกด้วย จากการจำลองผลนั้นมุมเฟสที่ได้ อาจจะมีค่าไม่ตรง 64° มากนัก แต่ทิศทางของลำคลื่นหลักทั้ง 4 ทิศทาง ก็ยังมีค่าใกล้เคียง 45° 135° 225° และ 315° ซึ่งพารามิเตอร์ที่จำลองผลได้นั้นแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64°



รูปที่ 4.9 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคียวในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64°

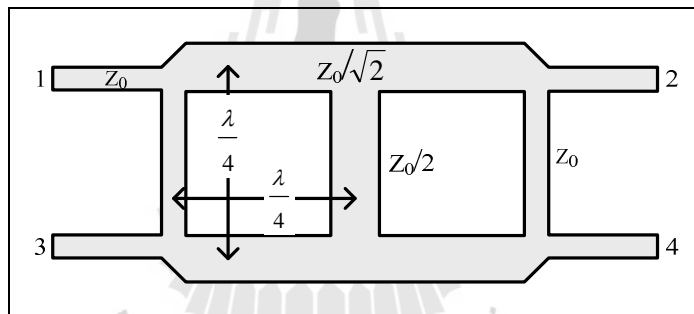


รูปที่ 4.10 มุมเฟสของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64°

รูปที่ 4.8-4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม Microwave office ในรูปที่ 4.8 คือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับกลับในพอร์ตที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับของวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° จากค่าที่ได้พบว่าอุปกรณ์ของเรานั้น มีค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณอยู่ในค่าที่รับได้ คือมีค่าต่ำกว่า -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตช์ที่ดีดังแสดงใน Barrick, D., and Benmoussa, Z. (2006) จาก $VSWR = (1 + \Gamma)/(1 - \Gamma)$ เมื่อแทนค่า $VSWR = 2$ จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ Γ เท่ากับ 0.33 และนำมาแทนค่าเพื่อหาค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ R_L จาก $R_L = -20 \log|\Gamma|$ แทนค่า $\Gamma = 0.33$ ได้ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -10 dB นั้นหมายความว่าอุปกรณ์ที่เราออกแบบนั้นจะต้องมีค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -10 dB จึงจะทำให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งอยู่ในค่าที่สามารถรับได้จากการที่ได้ออกแบบวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 64° พบว่าอุปกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบนี้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ดี และยังสามารถส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 และพอร์ต 4 อย่างละเท่า ๆ กันและมีสัญญาณออกมาจากพอร์ต 3 น้อยดังแสดงในรูปที่ 4.9 นอกจากนี้รูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่าเฟสที่ออกมาจากพอร์ต 2 และพอร์ต 4 มีค่าเท่ากับ 118.3° 51.66° ซึ่งทั้งสองพอร์ตนี้จะมีค่าความต่างเฟสเท่ากับ 66.64° จากผลการจำลองทั้งหมดพบว่าผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่เราได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นเราจะสามารถนำไปสร้างเพื่อนำไปใช้งานจริงได้

4.3.2 การออกแบบวงจรไขว้สัญญาณ

วงจรไขว้สัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกสัญญาณ โดยหน้าที่หลักของไมโครสตริปแบบไขว้สัญญาณ คือจะทำหน้าที่ในการไขว้สัญญาณที่ถูกส่งเข้ามา ซึ่งอ้างอิงมาจาก Denidni, T.A., and Libar, T.E. (2003) ดังรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะพื้นฐานของวงจรไขว้สัญญาณ เมื่อมีสัญญาณเข้าที่พอร์ต 1 วงจรไขว้สัญญาณจะบังคับให้สัญญาณไปออกที่พอร์ต 4 มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ส่วนที่พอร์ต 2 และพอร์ต 3 เป็นพอร์ตแยกโคดเดี่ยว คือพอร์ตที่ไม่ควรมีสัญญาณออกหรือให้สัญญาณออกน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และในทำนองเดียวกัน เมื่อมีสัญญาณเข้าที่พอร์ต 3 วงจรไขว้สัญญาณจะบังคับให้สัญญาณไปออกที่พอร์ต 2 มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ส่วนที่พอร์ต 1 และพอร์ต 4 เป็นพอร์ตที่ไม่ควรมีสัญญาณออก หรือให้สัญญาณออกน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้



รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นฐานของวงจรไขว้สัญญาณ

ในการออกแบบและคำนวณนั้น เรายังจะใช้พื้นฐานมาจากการคำนวณของไมโครสตริป 50Ω ดังที่ได้แสดงในหัวข้อ 4.3.1

$$\text{เมื่อ } 1) \frac{Z_0}{2} = \frac{50}{2} = 25\Omega \text{ จาก}$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0(\sqrt{\epsilon_r})} \quad (4.8)$$

แทนค่าจะได้

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0(\sqrt{\epsilon_r})} = \frac{377\pi}{2(25)(4.8)} = 10.81$$

$$\text{จาก } \frac{W}{d} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right\} \right] \quad ; \frac{W}{d} > 2$$

นำค่า B ที่ได้แทนลงในสมการที่ (4.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{W}{d} &= \frac{2}{\pi} \left[10.81 - 1 - \ln(2(10.81) - 1) + \frac{4.8 - 1}{2(4.8)} \left\{ \ln(10.81 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.8} \right\} \right] \\ &= \frac{2}{\pi} [9.81 - 3.026 + 0.395(2.283 + 0.262)] \\ &= \frac{2}{\pi} (6.784 + 1.005) \end{aligned}$$

$$\frac{W}{d} = 4.958 \quad ; \frac{W}{d} > 2 \quad \text{จะเห็นว่าเป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น}$$

$$W = d(4.958) = (1.6)(4.958) = 7.933 \text{ มิลลิเมตร}$$

จากสมการที่ (4.5) แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \varepsilon_e &= \frac{4.8 + 1}{2} + \frac{4.8 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12(1)}{4.958}}} \right) \\ &= 2.9 + \frac{1.9}{\sqrt{1 + 2.42}} \\ \varepsilon_e &= 3.926 \end{aligned}$$

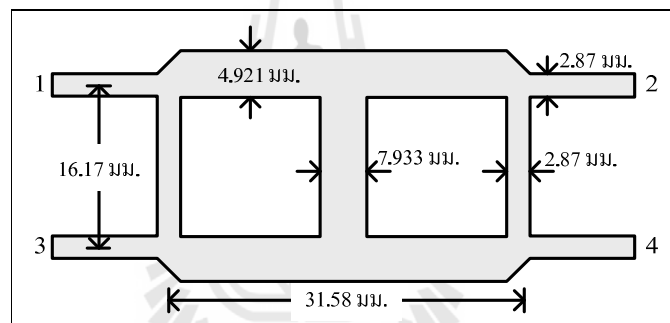
เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริงจากสมการที่ (4.6) แทนค่าจะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.926(2.45 \times 10^9)}} = 61.79 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{\lambda}{4} = \frac{61.79}{4} = 15.44 \text{ มิลลิเมตร}$$

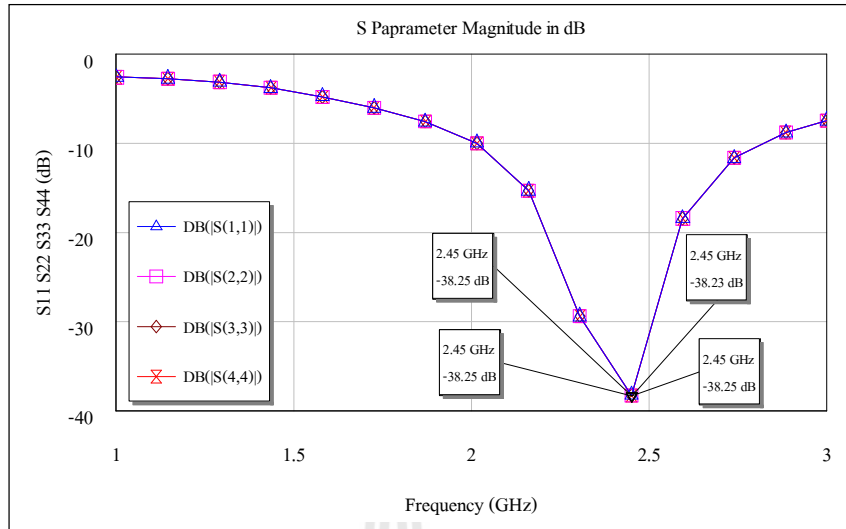
เรานำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้แทนในรูปที่ 3.11 และสามารถเขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 4.12

- ที่เส้นที่ Z_0 มีค่าดังนี้
 - ความกว้าง = 2.87 มิลลิเมตร
 - ความยาว = 16.17 มิลลิเมตร
- ที่เส้นที่ $\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$ มีค่าดังนี้
 - ความกว้าง = 4.921 มิลลิเมตร
 - ความยาว = 15.79 มิลลิเมตร
- ที่เส้นที่ $\frac{Z_0}{2}$ มีค่าดังนี้
 - ความกว้าง = 7.933 มิลลิเมตร
 - ความยาว = 15.44 มิลลิเมตร

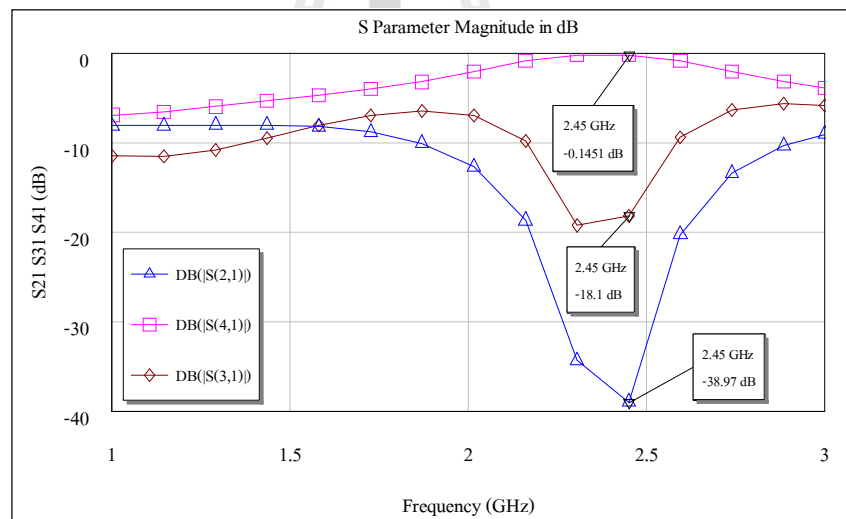


รูปที่ 4.12 ขนาดของวงจรไขว้สัญญาณ

รูปที่ 4.12 แสดงขนาดของวงจรไขว้สัญญาณที่คำนวณได้และนำไปจำลองผลด้วยโปรแกรม Microwave office ได้จำลองผลดังรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณนั้นมีการสะท้อนกลับน้อยหรือไม่มีสัญญาณออกเลย แสดงว่าวงจรไขว้สัญญาณนี้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไขว้ไปยังพอร์ต 4 ได้มาก โดยที่สัญญาณจะไม่มี การส่งผ่านไปยังพอร์ต 2 และพอร์ต 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 นอกจากนี้มุมเฟสของสัญญาณเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ต 1 ผ่านไปออกที่พอร์ต 4 นั้น มีมุมเฟสเท่ากับมุมเฟสของสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ต 3 ผ่านไปออกที่พอร์ต 2 แสดงดังรูปที่ 4.15 จากผลที่ได้พบว่าไปตามทฤษฎีและสามารถนำไปใช้สร้างจริงได้

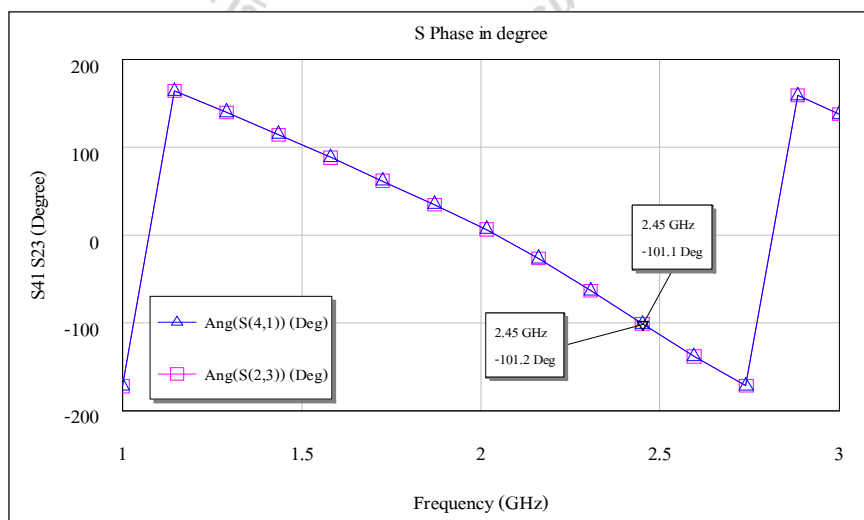


รูปที่ 4.13 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ

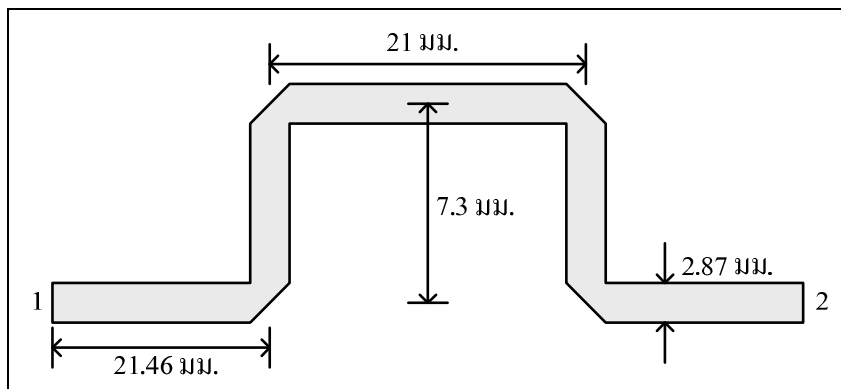


รูปที่ 4.14 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ

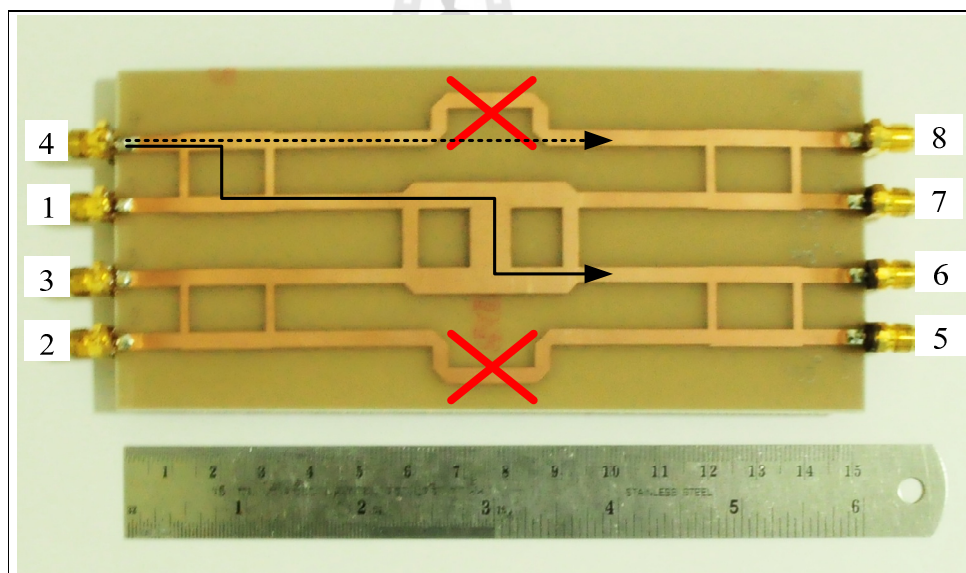
เมื่อค่าที่ได้จากคำนวณเป็นที่น่าพึงพอใจแล้วนั้น เราจึงได้ทำการรวมวงจรระหว่างวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 64° และวงจรไขว้สัญญาณเข้าด้วยกัน โดยจะมีวงจรเลื่อนเฟสเพิ่มเข้ามา ซึ่งมีลักษณะและขนาดของวงจรเลื่อนเฟส ดังรูปที่ 4.16 ที่ได้จากการจำลองผลใน โปรแกรม Microwave office เนื่องจากเราจำเป็นที่จะต้องเพิ่มระยะทางเพื่อให้สัญญาณไหลจากวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 64° อีกข้างไปยังวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 64° ของข้างที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับวงจรไขว้สัญญาณ เพื่อที่จะทำให้มีระยะการไหลของสัญญาณ (หรือการเลื่อนมุมเฟสของสัญญาณ) ให้มีค่าเท่ากับระยะทางการไหลของสัญญาณจากวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 64° อีกข้างไปยังวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 64° ของข้างที่ผ่านวงจรไขว้สัญญาณในลักษณะไขว้เส้นทาง โดยจะมีการนำวงจรเลื่อนเฟสใส่ไว้ทั้ง 2 ข้าง ดังเช่นในรูปที่ 4.17 แสดงลักษณะการเดินทางของสัญญาณเมื่อมีสัญญาณเข้าที่พอร์ต 4 สัญญาณที่เดินทางไปตามเส้นประนั้นคือสัญญาณจะไม่มีผ่านวงจรไขว้สัญญาณ ในขณะที่เดียวกันก็จะมีสัญญาณที่เดินทางผ่านวงจรไขว้สัญญาณไปตามเส้นทึบซึ่งสัญญาณนี้ จะมีการเดินทางที่ช้ากว่าหรือเฟสล่าช้ากว่าสัญญาณที่ไม่ผ่านวงจรไขว้สัญญาณ ดังนั้นเราจึงต้องมีการเพิ่มระยะทางของสัญญาณที่เดินทางตามเส้นประหรือที่ไม่ผ่านวงจรไขว้สัญญาณนั้นมีมุมเฟสในการเดินทางเท่ากับกับสัญญาณที่เดินทางผ่านวงจรไขว้สัญญาณ โดยการชดเชยมุมเฟสของสัญญาณให้มีความเท่ากับมุมเฟสของที่ออกมาจากวงจรไขว้สัญญาณ จากที่เราได้ทำการออกแบบวงจรไขว้สัญญาณมาแล้วนั้นพบว่า มุมเฟสของสัญญาณที่ถูกไขว้สัญญาณนั้นมีความเท่ากับ -101.1° ดังนั้นเราจึงต้องทำการออกแบบให้วงจรเลื่อนเฟสนั้นมีความมุมเฟสเท่ากับ -101.1° เช่นกัน เพื่อเป็นการชดเชยเฟสให้กับสัญญาณที่ไม่ผ่านวงจรไขว้สัญญาณ



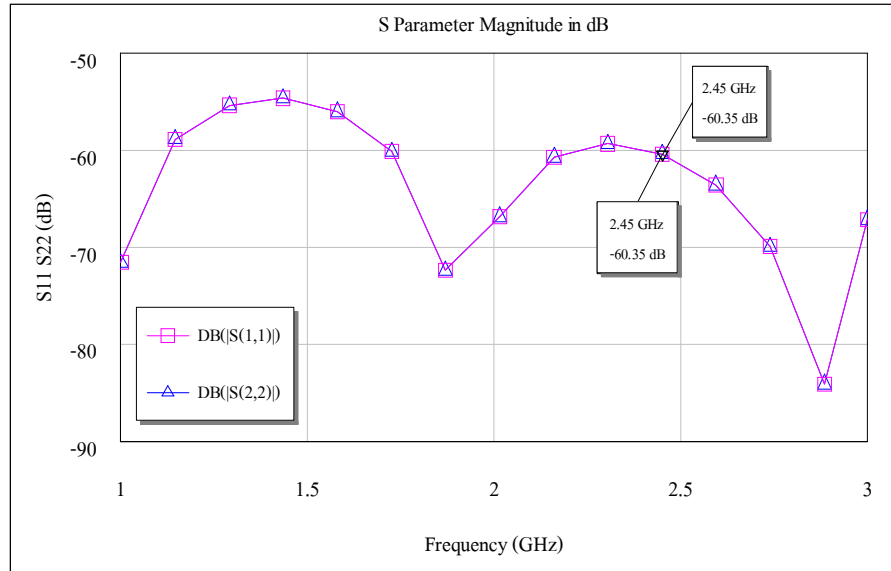
รูปที่ 4.15 มุมเฟสของวงจรไขว้สัญญาณ



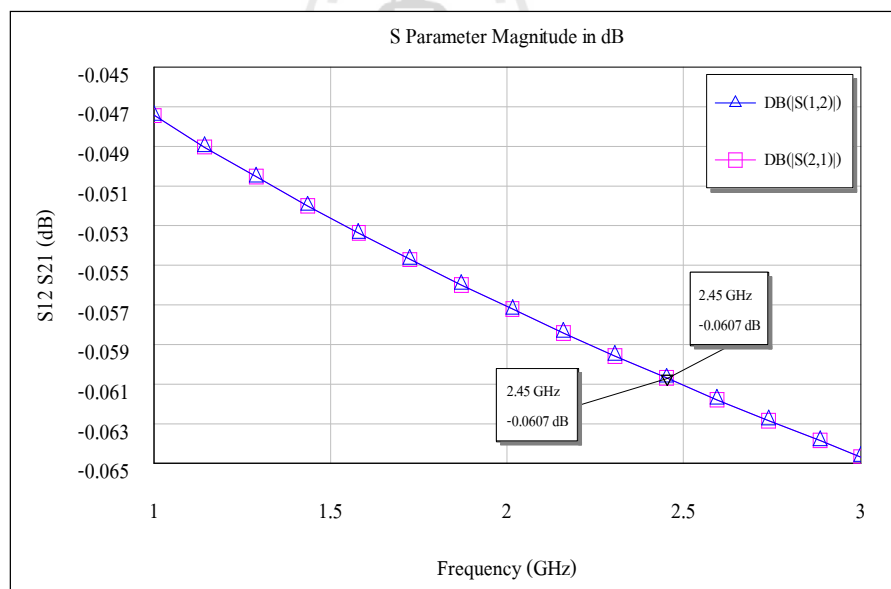
รูปที่ 4.16 ขนาดของวงจรเลื่อนเฟส



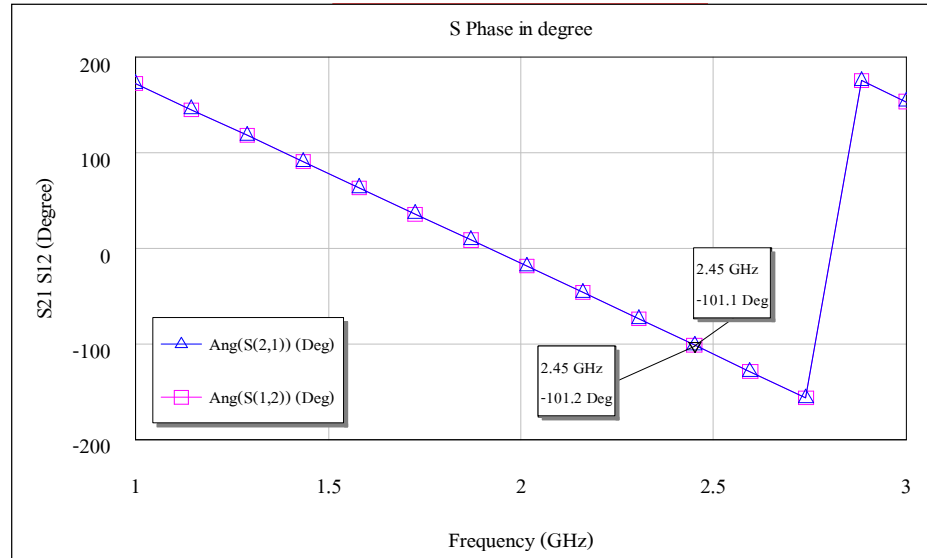
รูปที่ 4.17 ลักษณะการเดินทางของสัญญาณในขณะที่ยังไม่มีการเลื่อนเฟส



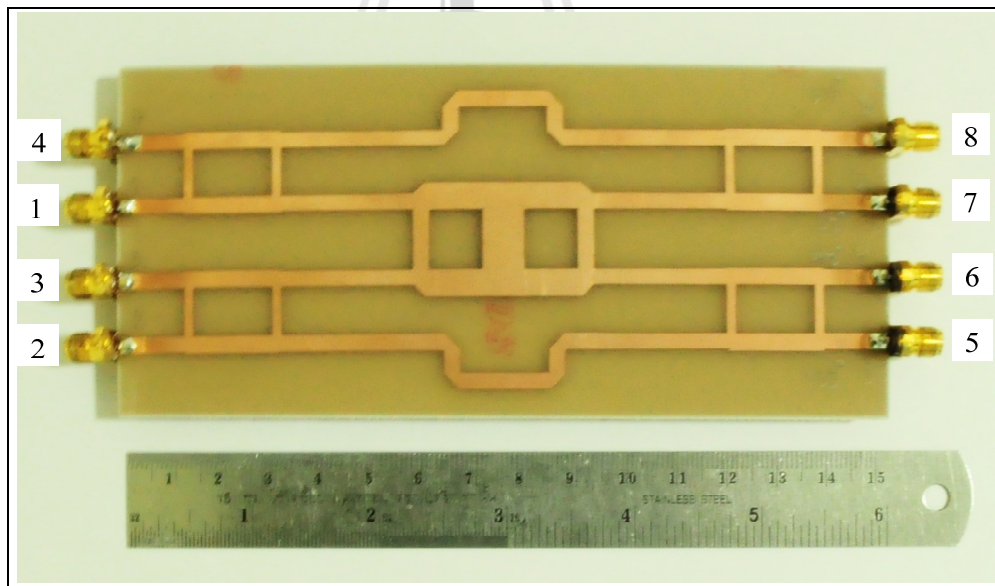
รูปที่ 4.18 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเลื่อนเฟส



รูปที่ 4.19 ความสูญเสียจากการเชื่อมต่อของวงจรเลื่อนเฟส



รูปที่ 4.20 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส



รูปที่ 4.21 อุปกรณ์ต้นแบบของบัตเลอรีเมตริกที่ถูกปรับปรุงที่สร้างขึ้นสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2x2

ในการออกแบบวงจรเลื่อนเฟสที่ได้ผลดังรูปที่ 4.18 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกลับในพอร์ต 1 และพอร์ต 2 นั้นสามารถส่งผ่านสัญญาณได้เนื่องจากค่าที่ได้มีน้อยกว่า -10 dB และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ได้ดี และมีมุมเฟสเท่ากับ -101.1° ตามที่เราต้องการซึ่งแสดงในรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ตามลำดับ จากนั้นเราจึงทำการรวมวงจรทั้งหมดที่ได้ ออกแบบมาเข้าด้วยกันเป็นบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.21

จากบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงที่เราสร้างขึ้นนั้น เราจะนำไปทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย ซึ่งทำการวัดค่าพารามิเตอร์ดังนี้ เริ่มจากการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกมาจากพอร์ตที่ป้อนสัญญาณเข้าไบนั่นเอง ซึ่งควรต่ำกว่า -10 dB นั้นแสดงว่าอุปกรณ์ที่เราสร้างขึ้นสามารถส่งผ่านสัญญาณได้ดี ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยว คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออก จากอีกพอร์ตหนึ่งซึ่งอยู่ข้างเดียวกันกับพอร์ตที่ป้อนสัญญาณเข้าไป ซึ่งควรที่จะมีค่าที่ต่ำมาก หรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตขาเข้าไปยังพอร์ตขาออกของสัญญาณ ซึ่งควรจะมีค่าที่น้อย หรือควรมีค่าที่มากกว่า -10 dB และวัดค่ามุมเฟสของสัญญาณ

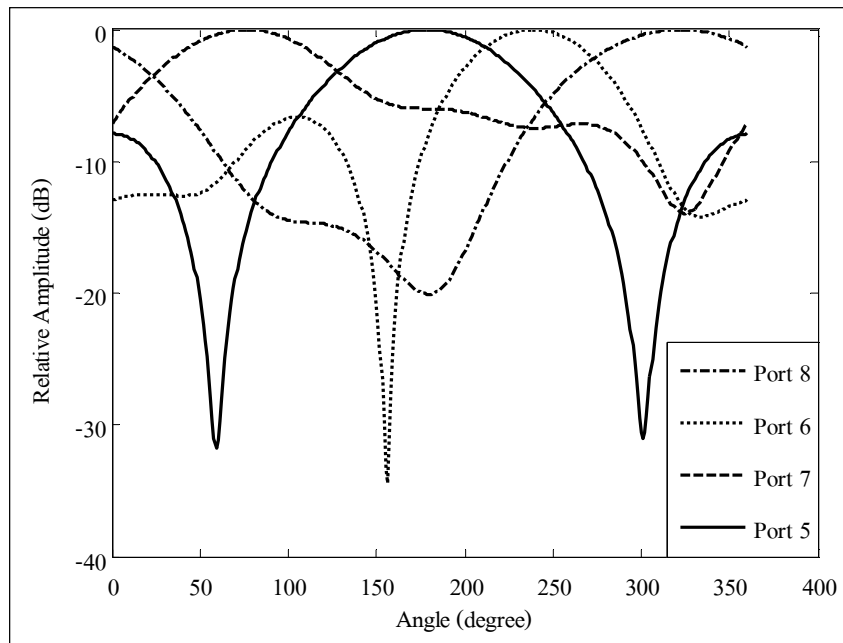
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดจริงของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง ซึ่งจะประกอบไปด้วย ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยว และ ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ จากค่าที่ได้พบว่ามีค่าพารามิเตอร์ในบางตัวนั้นไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่เรากล่าวมาข้างต้น นั้นอาจเกิดจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์จริง แต่เมื่อเรานำมาทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกได้ดังตารางที่ 4.2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้น จากค่าที่ได้มีมีความผิดพลาดไปจากตารางที่ 2.2 เล็กน้อยซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากขั้นในการสร้างอุปกรณ์ แต่เมื่อนำค่าที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานของบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุง ที่เราสร้างขึ้นผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22 จากรูปจะเห็นว่าทิศทางของลำคลื่นหลักได้ 4 ทิศทางที่เราต้องการนั้นมีค่าใกล้เคียงตามที่แสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งเป็นค่าทางทฤษฎี หากต้องการลำคลื่นหลักมากกว่า 4 ทิศทางนั้น เราต้องทำการออกแบบบัตเลอร์เมตริกที่ถูกปรับปรุงใหม่ทั้งหมดโดยใช้หลักการในการออกแบบที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการนำเสนอการจำลองแบบและการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงของแบตเตอรี่เมตริกที่ถูกปรับปรุง

ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ			
พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)	พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)
S11	-10.06	S55	-14.67
S22	-15.30	S66	-10.48
S33	-9.582	S77	-10.02
S44	-14.28	S88	-14.35
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเคเดี้ยว			
พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)	พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)
S21	-6.57	S65	-6.479
S31	-16.86	S75	-17.32
S41	-14.44	S85	-14.20
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ			
พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)	พารามิเตอร์	แอมพิจูด (dB)
S51	-14.36	S71	-10.22
S52	-14.49	S72	-14.13
S53	-8.30	S73	-22.50
S54	-8.90	S74	-8.42
S61	-23.56	S81	-8.23
S62	-8.32	S82	-8.81
S63	-10.21	S83	-14.41
S64	-14.44	S84	-14.32

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่วัดได้ของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2×2

พอร์ต ขาออก	สายอากาศ			
	2	3	1	4
5	-39.45	-84.31	-94.44	-152.25
6	-84.71	-137.84	7.58	-95.07
7	-94.42	3.14	-136.86	-85.17
8	-152.93	-96.23	-86.07	-42.10



รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้บัตเลอร์เมทริกที่ถูกปรับปรุง

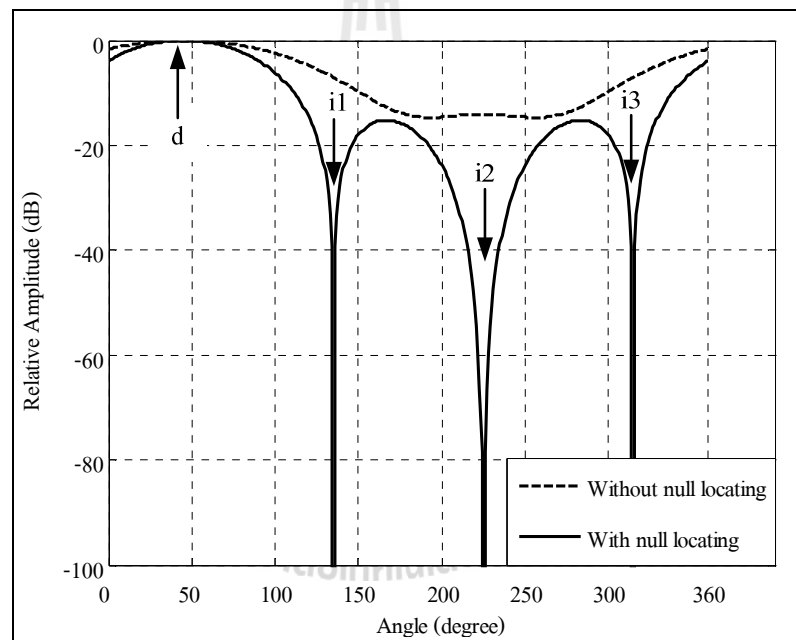
4.4 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์

ในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์นั้น เราจะต้องอาศัยการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ก่อน เพื่อดูว่าวิธีที่เราจะใช้ในการกำหนดจุดศูนย์นั้นมีประสิทธิภาพ และใช้งานร่วมกับสายอากาศแบบสวิตซ์ได้จริง หลังจากนั้นเราจึงทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จริงที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์และนำไปใช้งานกับเครือข่ายเมฆไร้สายได้

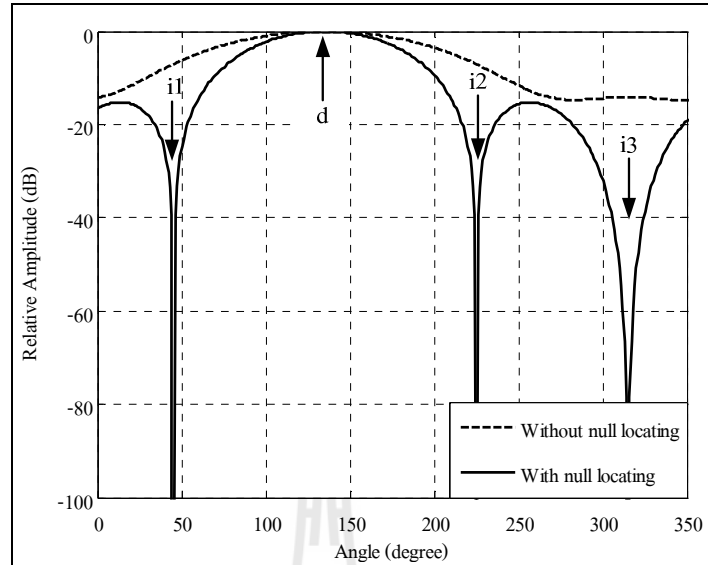
4.4.1 การจำลองผลด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

จากที่เราได้นำเสนอวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ไปแล้วในหัวข้อที่ 2.7 ในหัวข้อนี้เราจะนำเสนอการจำลองแบบและหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ โดยใช้สมการที่ (2.21) – (2.27) เพื่อดูประสิทธิภาพของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ โดยกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลัก 4 ทิศทาง คือ 45° 135° 225° และ 315° ในการจำลองแบบนั้น เราจะเริ่มจากการกำหนดทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 45° และกำหนดให้ทิศทางของสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° ผลที่ได้จากการจำลองคือ แบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งเราจะทำการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ไม่ใช้วิธีการกำหนดทิศทางจุดศูนย์และแบบรูปการแผ่พลังงานที่ใช้วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ โดยที่เส้นประ คือระบบ

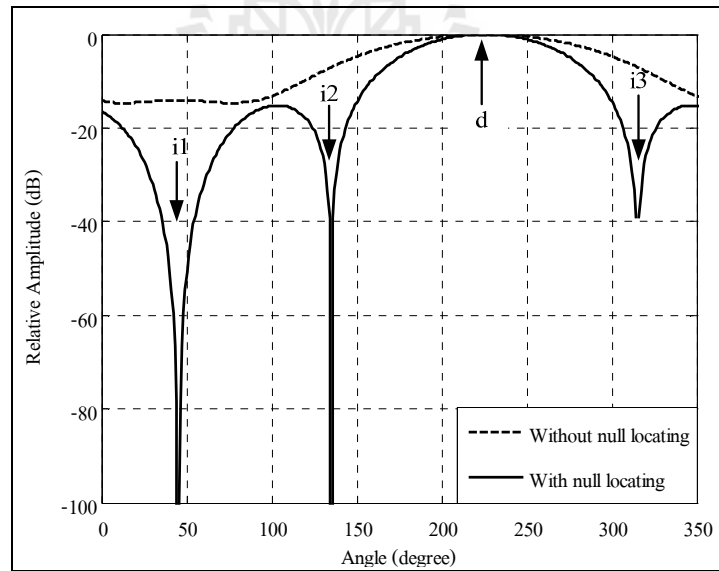
ที่ยังไม่มีการใช้วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ และเส้นทึบ คือระบบที่มีการใช้วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.23 คือแบบรูปการแผ่พลังงานในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามา d ที่ 45° และทิศทางของสัญญาณแทรกสอด i ที่มาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315° ตามลำดับ หลังจากนั้นเราจะทำการเปลี่ยนทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาเป็น 135° ทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315° แทน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.24 ในทำนองเดียวกันเราก็ทำการเปลี่ยนทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาเป็น 225° ทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315° และเปลี่ยนทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาเป็น 315° ทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225° จะได้แบบรูปการแผ่พลังงานดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ



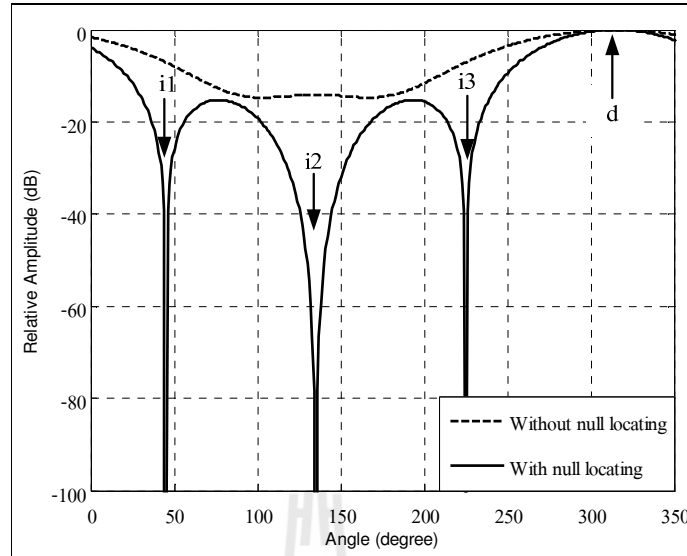
รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315°



รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315°



รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315°



รูปที่ 4.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบในงานวิจัยนี้ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225°

จากรูปที่ 4.23 - 4.26 จะเห็นว่าวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถกดจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดให้มีค่าต่ำกว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ไม่ได้ใช้วิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ จึงทำให้ระบบสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้จริง ดังนั้นขั้นตอนต่อไปจะเป็นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดจุดศูนย์เพื่อนำมาใช้งานร่วมกับระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น

4.4.2 การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์

จากหัวข้อที่ 4.4.1 เราได้ทำการพิสูจน์แล้วว่าวิธีการที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์นั้นสามารถนำมาใช้งานได้จริง ดังนั้นเราจึงได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้จากการจำลองผล เช่น เมื่อเราต้องการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° เราจะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์ k_1 , k_2 และ k_3 ที่แสดงในตารางที่ 4.3 คูณกับพอร์ตขาออกของสัญญาณที่เป็นทิศทางของสัญญาณแทรกสอดเราจึงจะสามารถกดจุดศูนย์ได้ จากค่าที่ได้ดังตารางพบว่าค่าที่ได้เป็นจำนวนเชิงซ้อนดังนั้นเราจึงต้องทำการแปลงค่าให้เป็นแอมพลิจูดและมุมเฟสได้ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งค่าที่ได้เราจะใช้แอมพลิจูดเป็นอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณ (attenuators) และใช้มุมเฟส

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการจำลองผล

ทิศทางของ ลำคลื่นหลัก	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดจุดศูนย์		
	k_1	k_2	k_3
45°	-0.1972 - 0.3978i	-0.1194 + 0.1569i	-0.1972 - 0.3978i
135°	-0.1972 + 0.3978i	-0.1972 - 0.3978i	0.1972 + 0.0000i
225°	-0.1194 - 0.1569i	-0.1972 + 0.3978i	-0.1972 + 0.3978i
315°	-0.1972 + 0.3978i	0.1972 - 0.0000i	-0.1972 - 0.3978i

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการจำลองผลที่ถูกแปลงค่าให้เป็นแอมพลิจูดและมุมเฟส

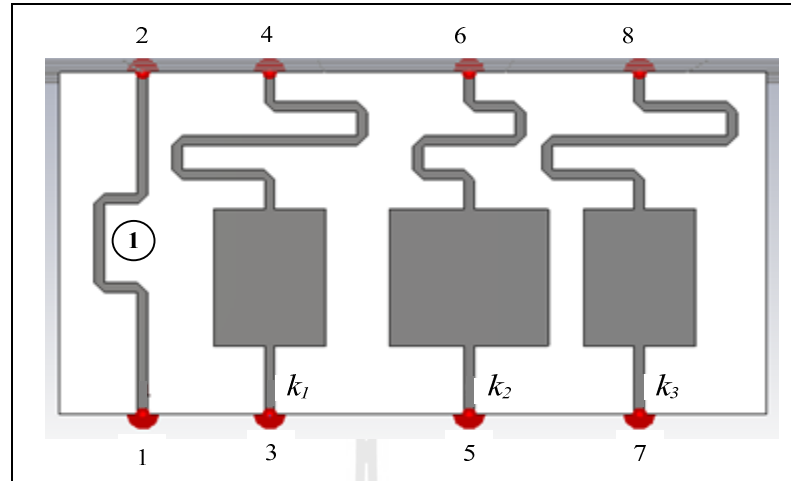
ทิศทาง ของ ลำคลื่น หลัก	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดจุดศูนย์					
	k_1		k_2		k_3	
	แอมพลิจูด	มุมเฟส	แอมพลิจูด	มุมเฟส	แอมพลิจูด	มุมเฟส
45°	-7.07 dB	-116.368°	-14.11 dB	127.27°	-7.07 dB	-116.368°
135°	-7.07 dB	116.368°	-7.07 dB	-116.368°	-14.11 dB	0°
225°	-14.11 dB	-127.27°	-7.07 dB	116.368°	-7.07 dB	116.368°
315°	-7.07 dB	116.368°	-14.11 dB	0°	-7.07 dB	-116.368°

เป็นอุปกรณ์เลื่อนเฟส (phaseshifters) โดยรูปแบบของอุปกรณ์นั้นเราจะใช้ไมโครสตริปแบบเส้นมา เป็นพื้นฐานในการออกแบบอุปกรณ์ทั้งหมด ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Bialkowski, M.E., and Uthansakul, M. (2006)

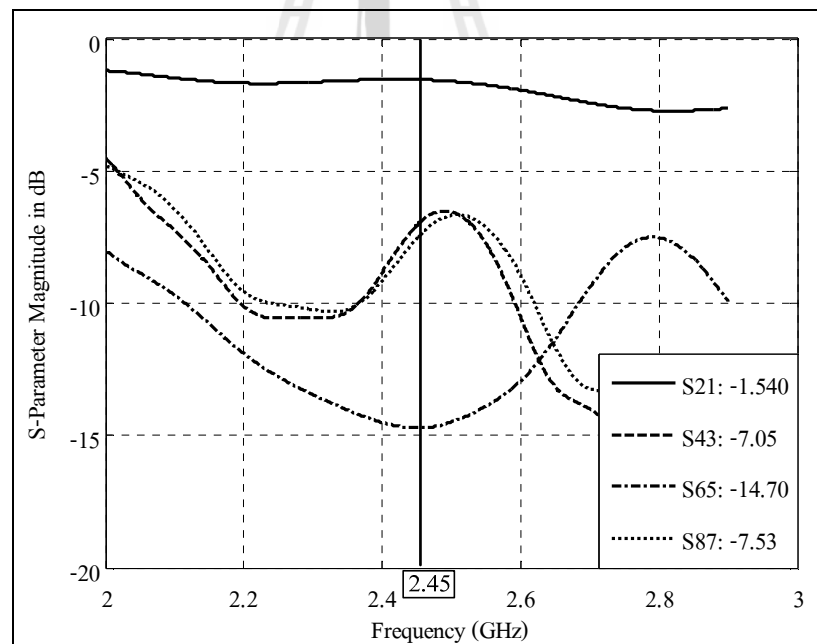
จากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ตารางที่ 3.4 เราจะนำมาทำการออกแบบอุปกรณ์ โดยอาศัยการ จำลองแบบใน โปรแกรม CST Microwave Studio ในการ ปรับแอมพลิจูดและมุมเฟส ของอุปกรณ์ให้ได้ตามที่เรต้องการ เราจึงทำการออกแบบอุปกรณ์กำหนดจุดศูนย์สำหรับการ หันลำคลื่นหลักไปทิศทางที่ 45° ได้ดังรูปที่ 3.27 คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดจุดศูนย์ ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315° จะเห็นว่าลายวงจรแต่ละอันมีขนาด และความยาวที่แตกต่างกันออกนั้นเป็นเพราะ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ในทิศทางที่แตกต่างกันเช่นกัน จากการปรับขนาดและความยาวของไมโครสตริปในรูปที่ 4.27 มีวงจรที่ 1 นั้นเราจะออกแบบไว้เพื่อต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการเข้ามา

ในที่นี้เราจะนำไปเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการในทิศทางที่ 45° โดยที่ค่า k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 135° k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° k_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° ตามลำดับ จากการออกแบบนั้นทำให้ได้ค่าแอมพลิจูด ดังรูปที่ 4.28 วงจรที่ 1 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ $-1.540 k_1$ มีแอมพลิจูดเท่ากับ -7.05 dB k_2 มีแอมพลิจูดเท่ากับ -14.70 dB และ k_3 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -7.53 dB จากผลที่ได้พบว่าค่าแอมพลิจูด มีความใกล้เคียงกันกับตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.29 แสดงมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ต ในวงจรที่ 1 นั้นมีค่ามุมเฟสเท่ากับ 15.63° ดังนั้นเราจึงต้องทำการชดเชยเฟสให้กับ k_1 เพื่อให้ได้ มุมเฟสต่างที่ -116.368° ดังนั้นมุมเฟสของ k_1 เท่ากับ -100.88° ($-100.88 - 15.63 = -116.51$) จากการ คำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ -116.51° หลังจากนั้นเราจะทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟส ที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.2010 - 0.4030i$ ในการออกแบบ k_2 นั้นจะทำ เช่นเดียวกันกับการออกแบบของ k_1 ซึ่งต้องมีการชดเชยเฟสที่เกิดขึ้นจากวงจรที่ 1 ดังนั้นมุมเฟส ของ k_2 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ 127.27° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_2 เท่ากับ 146.00° ($146.00 - 15.63 = 130.37$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 130.37° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1220 + 0.1368i$ สุดท้ายคือการออกแบบ k_3 ซึ่งเราจะอาศัยหลักการออกแบบมาจาก k_1 และ k_2 เช่นกัน มุมเฟสของ k_3 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ -116.368° จากการออกแบบจะได้มุมเฟส ของ k_3 เท่ากับ -92.79° ($-92.79 - 15.63 = -108.42$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ -108.42° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1740 - 0.3970i$ จากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่เราได้ทำการออกแบบนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการ กำหนดทิศทางของจุดศูนย์นี้มีค่าใกล้เคียงกับการจำลองในตารางที่ 4.3

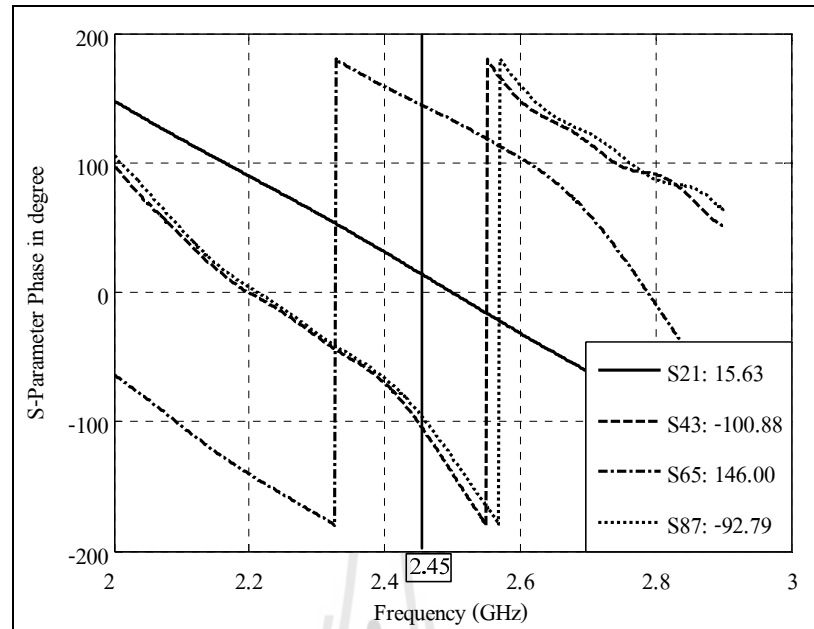
จากตารางที่ 4.4 จะแสดงให้เห็นว่าในทิศทางของการหันลำคลื่นหลักไปยัง 135° และ 315° นั้น สามารถใช้อุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ชุดเดียวกันได้ เพียงแค่ใช้การสลับ พอร์ตเท่านั้น ดังนั้นเราจึงทำการออกแบบอุปกรณ์ชุดนี้ได้ดังรูปที่ 4.30 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ กำหนดจุดศูนย์สำหรับการหันลำคลื่นหลักไปทิศทางที่ 135° และกำหนดจุดศูนย์ในทิศทางของ สัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315° ซึ่งในรูปจะมีวงจรที่ 1 เพิ่มเข้ามาเพื่อนำไปต่อ กับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการเข้ามา ในที่นี้เราจะนำไปเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ให้ ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการในทิศทางที่ 135° ค่า k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทาง ของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทาง 225° k_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และ สัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315°



รูปที่ 4.28 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315°

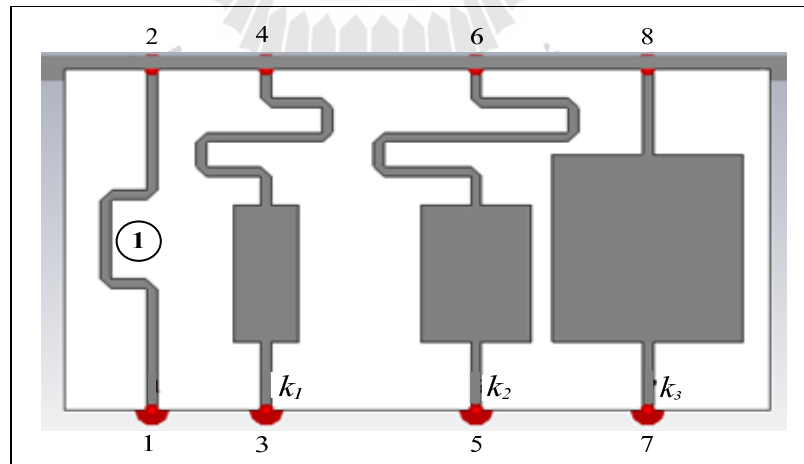


รูปที่ 4.29 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 135° 225° และ 315°

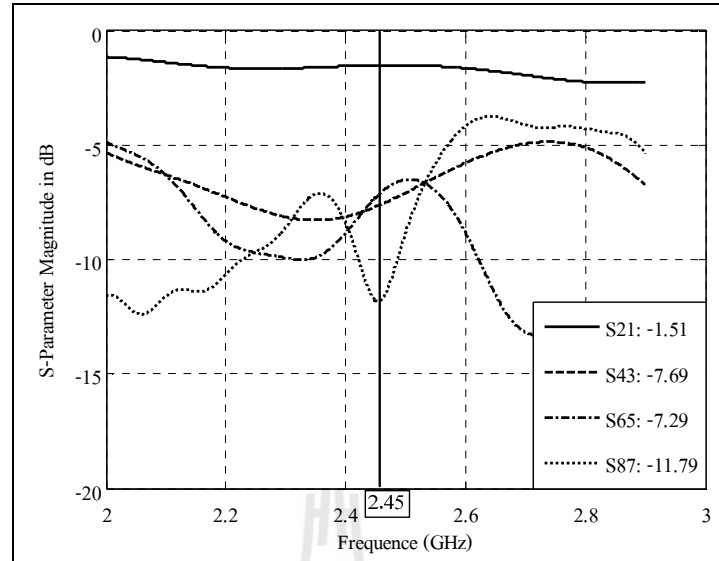
จากการออกแบบนั้นทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดดังรูปที่ 4.31 วงจรที่ 1 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ $-1.51 k_1$ มีแอมพลิจูดเท่ากับ -7.69 dB k_2 มีแอมพลิจูดเท่ากับ -7.29 dB และ k_3 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -11.79 dB จากผลที่ได้พบว่าค่าแอมพลิจูดมีความใกล้เคียงกับตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.32 แสดงมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ต ในวงจรที่ 1 นั้นมีค่ามุมเฟสเท่ากับ 23.24° ดังนั้นเราจึงต้องทำการชดเชยเฟสให้กับ k_1 เพื่อให้ได้มุมเฟสต่างที่ 116.368° ดังนั้นมุมเฟสของ k_1 เท่ากับ 141.01° ($141.01 - 23.24 = 117.77$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 117.77° หลังจากนั้นเราจะทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1754 + 0.3898i$ ในการออกแบบ k_2 นั้นจะทำเช่นเดียวกันกับการออกแบบของ k_1 ซึ่งต้องมีการชดเชยเฟสที่เกิดขึ้นจากวงจรที่ 1 ดังนั้นมุมเฟสของ k_2 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ -116.368° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_2 เท่ากับ -92.08° ($-92.08 - 23.24 = -115.32$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ -115.32° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.2110 - 0.3870i$ สุดท้ายคือการออกแบบ k_3 ซึ่งเราจะอาศัยหลักการออกแบบมาจาก k_1 และ k_2 เช่นกัน มุมเฟสของ k_3 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ 0°

จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_3 เท่ากับ 48.34° ($48.34 - 23.24 = 25.1$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 25.1° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $0.2234 + 0.0917i$ จากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่เราได้ทำการออกแบบนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ k_3 มีค่าที่ผิดพลาดไปจากตารางที่ 4.3 ค่อนข้างมากแต่ค่า k_1 และ k_2 ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับการจำลองในตารางที่ 4.3

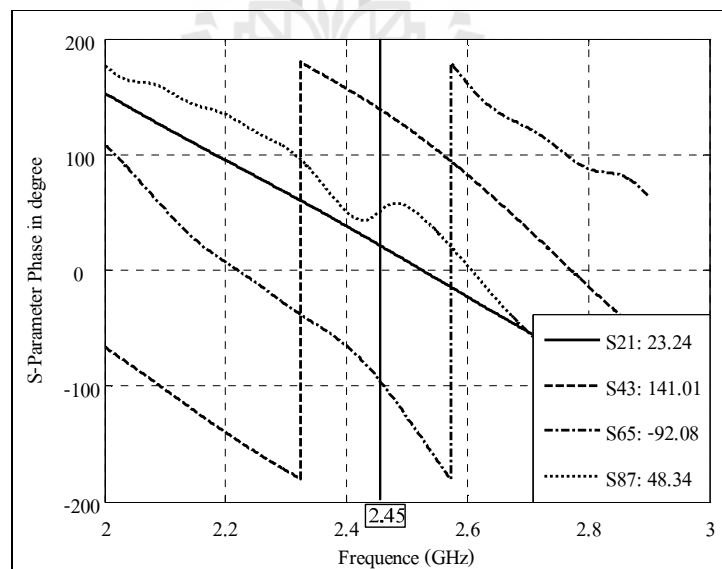
รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315° จากรูปจะมีวงจรที่ 1 เพิ่มเข้ามาเพื่อนำไปต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการเข้ามา ในที่นี้เราจะนำไปเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการในทิศทางที่ 225° ค่า k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° k_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° จากการออกแบบนั้นได้ผลของแอมพลิจูดดังรูปที่ 4.34 วงจรที่ 1 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -1.51 k_1 มีแอมพลิจูดเท่ากับ -9.42 dB k_2 มีแอมพลิจูดเท่ากับ -7.71 dB และ k_3 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -7.63 dB จากผลที่ได้พบว่าค่าแอมพลิจูดมีความใกล้เคียงกับตารางที่ 4.4 และรูปที่ 3.35 แสดงมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตในวงจรที่ 1 นั้นมีค่ามุมเฟสเท่ากับ 24.95° ดังนั้นเราจึงต้องทำการชดเชยเฟสให้กับ k_1 เพื่อให้ได้มุมเฟสต่างที่ -127.27° ดังนั้นมุมเฟสของ k_1 เท่ากับ -93.00° ($-93.00 - 24.95 = -117.95$)



รูปที่ 4.30 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 225° และ 315°

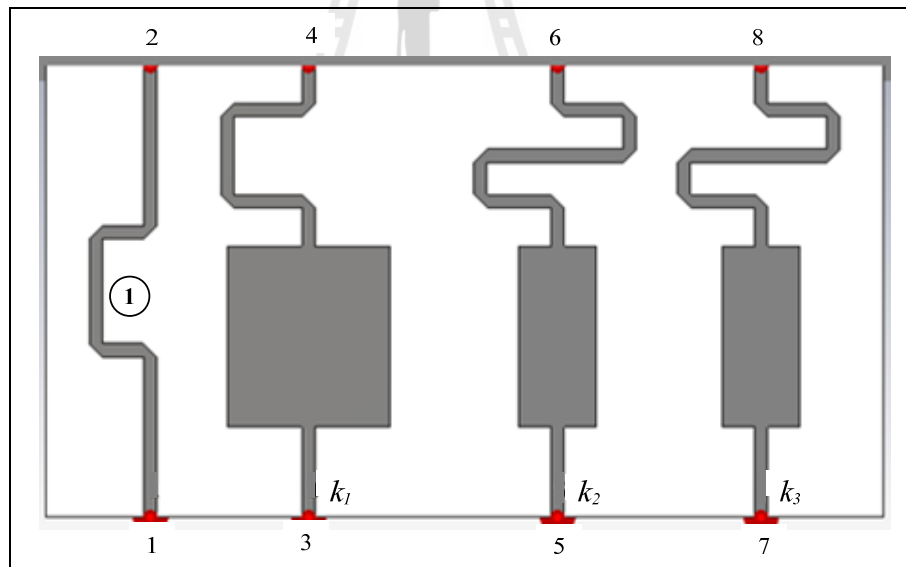


รูปที่ 4.31 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° , 225° และ 315°

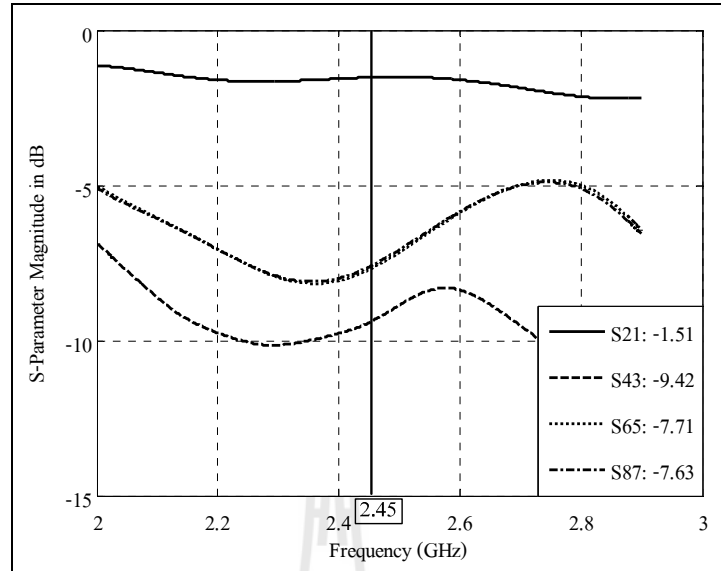


รูปที่ 4.32 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° , 225° และ 315°

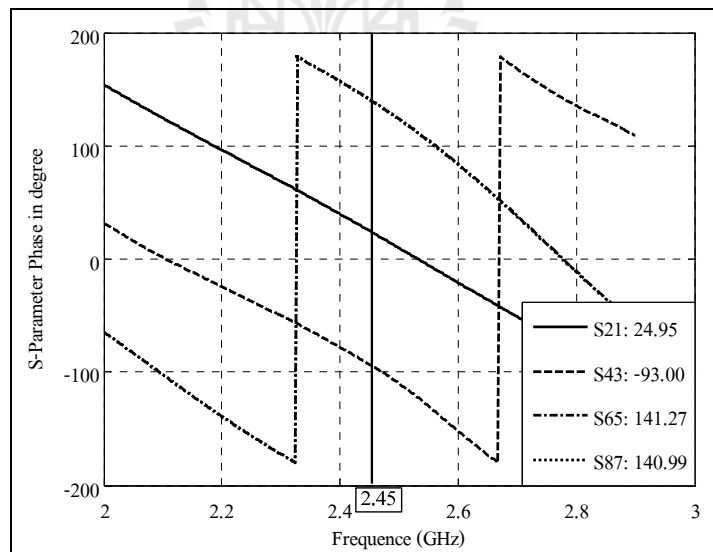
จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ -117.95° หลังจากนั้นเราจะทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1270-0.1490i$ ในการออกแบบ k_2 นั้นจะทำเช่นเดียวกันกับการออกแบบของ k_1 ซึ่งต้องมีการชดเชยเฟสที่เกิดขึ้นจากวงจรที่ 1 ดังนั้นมุมเฟสของ k_2 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ 116.368° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_2 เท่ากับ 141.27° ($141.27-24.95 = 116.32$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 116.32° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1961+0.3623i$ สุดท้ายคือการออกแบบ k_3 ซึ่งเราจะอาศัยหลักการออกแบบมาจาก k_1 และ k_2 เช่นกัน มุมเฟสของ k_3 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ 116.368° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_3 เท่ากับ 140.99° ($140.99-24.95 = 116.04$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 116.04° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1950+0.3662i$ จากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่เราได้ทำการออกแบบนั้นมี ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์นี้มีค่าใกล้เคียงกับการจำลองในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.33 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315°

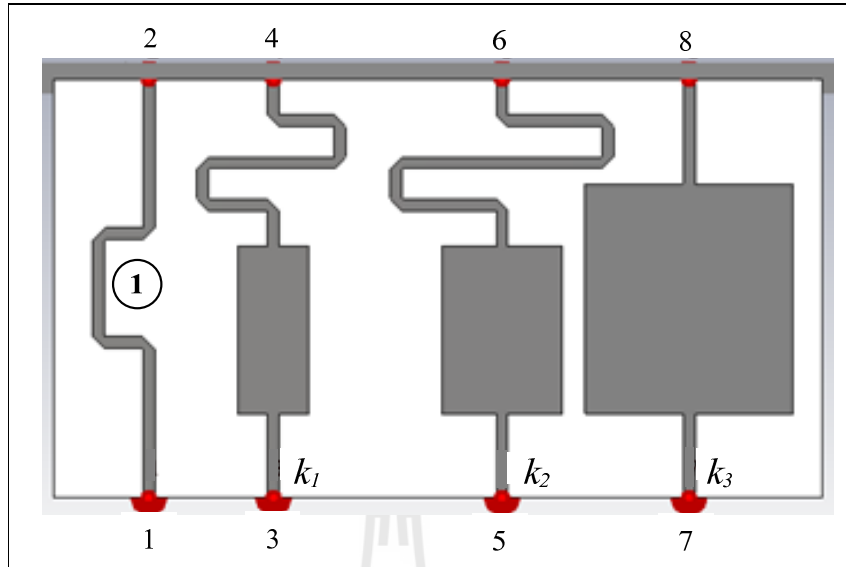


รูปที่ 4.34 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315°

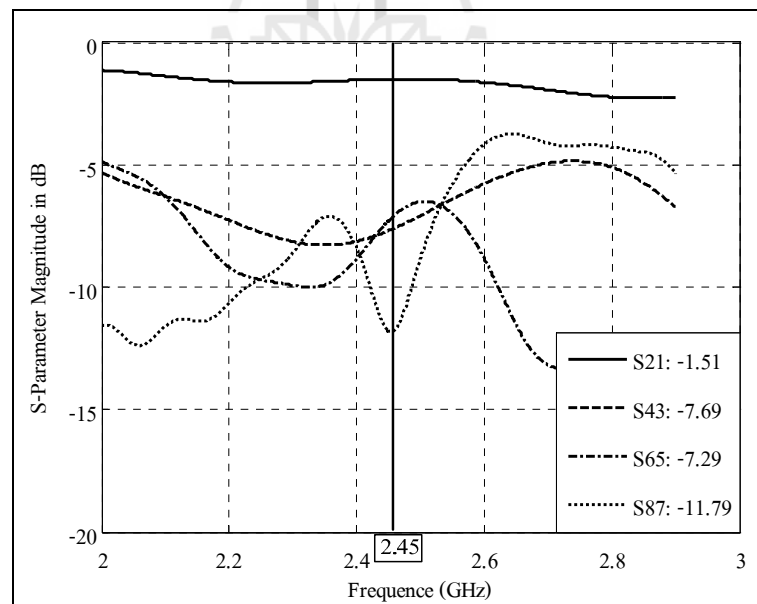


รูปที่ 4.35 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 315°

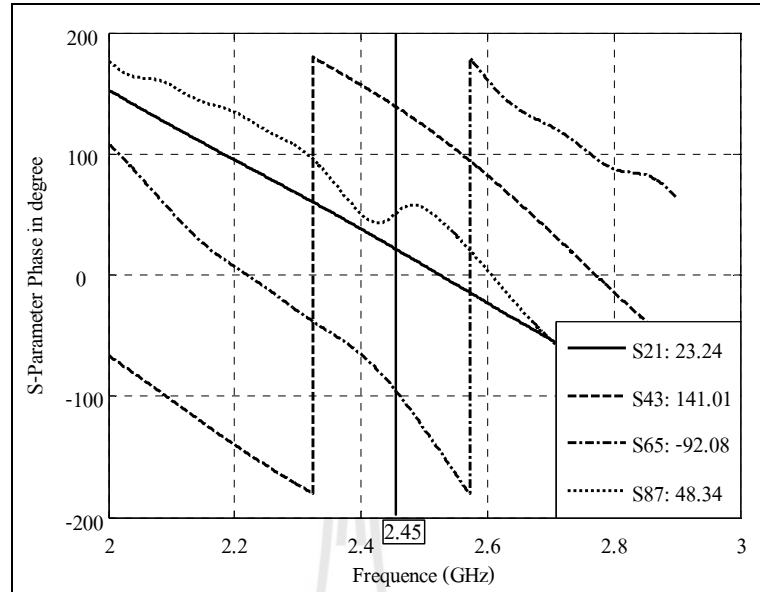
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ 315° นั้น สามารถใช้อุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ชุดเดียวกันได้ จากรูปที่ 3.36 ซึ่งในรูปจะมีวงจรถที่ 1 เพิ่มเข้ามาเพื่อนำไปต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการเข้ามา ในที่นี้เราจะนำไปเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ให้ทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการในทิศทางที่ 315° ค่า k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 135° k_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° จากการออกแบบนั้นทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดดังรูปที่ 3.37 วงจรถที่ 1 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -1.51 k_1 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -7.69 dB k_2 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -11.79 dB และ k_3 มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ -7.29 dB จากผลที่ได้พบว่าค่าแอมพลิจูดมีความใกล้เคียงกับตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.38 แสดงมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตในวงจรถที่ 1 นั้นมีค่ามุมเฟสเท่ากับ 23.24° ดังนั้นเราจึงต้องทำการชดเชยเฟสให้กับ k_1 เพื่อให้ได้มุมเฟสต่างที่ 116.368° ดังนั้นมุมเฟสของ k_1 เท่ากับ 141.01° ($141.01 - 23.24 = 117.77$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 117.77° หลังจากนั้นเราจะทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.1754 + 0.3898i$ ในการออกแบบ k_2 นั้นจะทำเช่นเดียวกันกับการออกแบบของ k_1 ซึ่งต้องมีการชดเชยเฟสที่เกิดขึ้นจากวงจรถที่ 1 ดังนั้นมุมเฟสของ k_2 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ 0° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_2 เท่ากับ 48.34° ($48.34 - 23.24 = 25.1$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ 25.1° และแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $0.2234 + 0.0917i$ สุดท้ายคือการออกแบบ k_3 ซึ่งเราจะอาศัยหลักการออกแบบมาจาก k_1 และ k_2 เช่นกัน มุมเฟสของ k_3 ต้องออกแบบเพื่อให้ได้มุมเฟสที่ -116.368° จากการออกแบบจะได้มุมเฟสของ k_3 เท่ากับ -92.08° ($-92.08 - 23.24 = -115.32$) จากการคำนวณพบว่าค่ามุมเฟสที่ได้เท่ากับ -115.32° และทำการแปลงแอมพลิจูดกับมุมเฟสที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้เท่ากับ $-0.2110 - 0.3870i$ จากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่เราได้ทำการออกแบบนั้นมี ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ k_2 มีค่าที่ผิดพลาดไปจากตารางที่ 4.3 ค่อนข้างมาก แต่ค่า k_1 และ k_3 ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับการจำลองในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.36 ลักษณะของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบที่ใช้กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 225°



รูปที่ 4.37 ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° 135° และ 225°



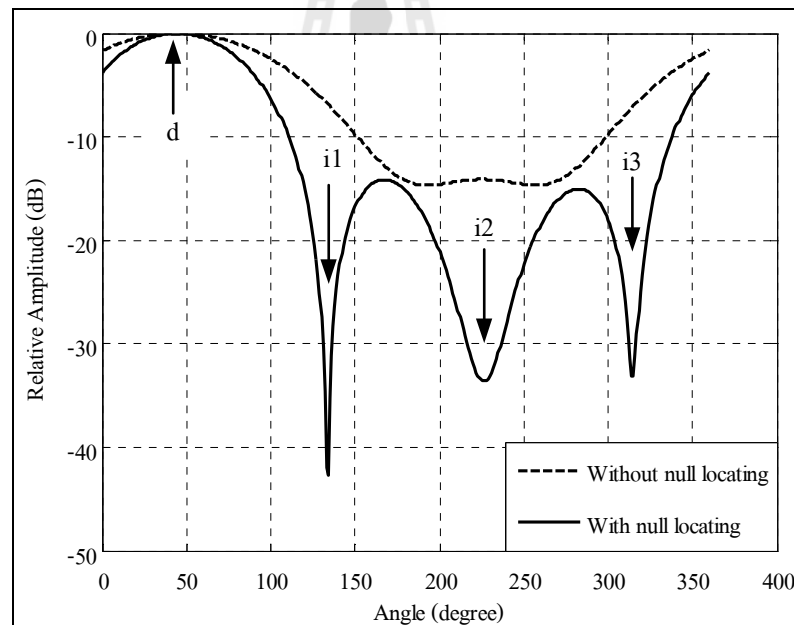
รูปที่ 4.38 กราฟมุมเฟสของสัญญาณในแต่ละพอร์ตของอุปกรณ์กำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดในทิศ 45° , 135° และ 225°

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบจากค่าที่ได้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการจำลองแบบในตารางที่ 4.3 และค่าที่ได้จากการออกแบบในตารางที่ 4.5 นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเราจึงนำผลที่ได้นำมาป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์เพื่อดูประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่เราได้ทำการออกแบบมาในข้างต้น

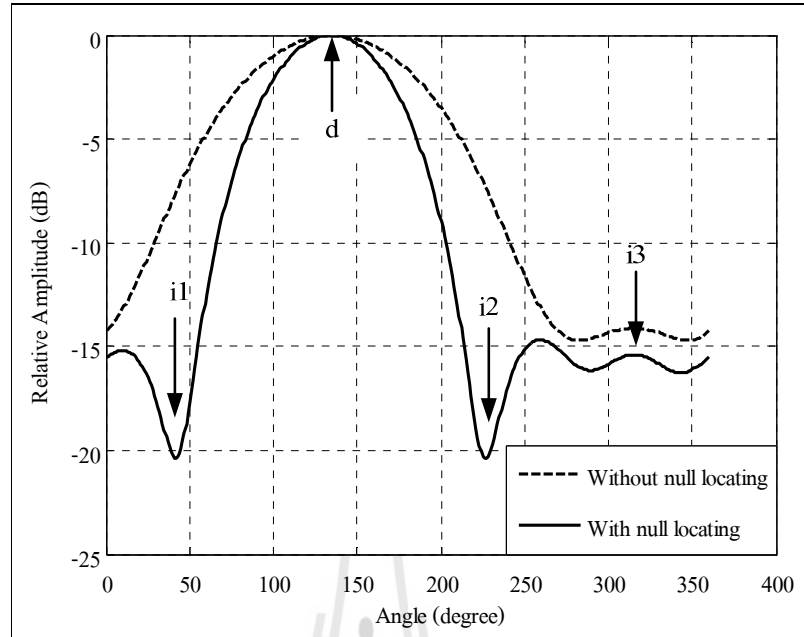
ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบ

ทิศทางของ ลำคลื่นหลัก	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดจุดศูนย์		
	k_1	k_2	k_3
45°	-0.2010-0.4030i	-0.1220+0.1368i	-0.1740-0.3970i
135°	-0.1754+0.3898i	-0.2110-0.3870i	0.2234+0.0917i
225°	-0.1270-0.1490i	-0.1961+0.3623i	-0.1950+0.3662i
315°	-0.1754+0.3898i	0.2234+0.0917i	-0.2110-0.3870i

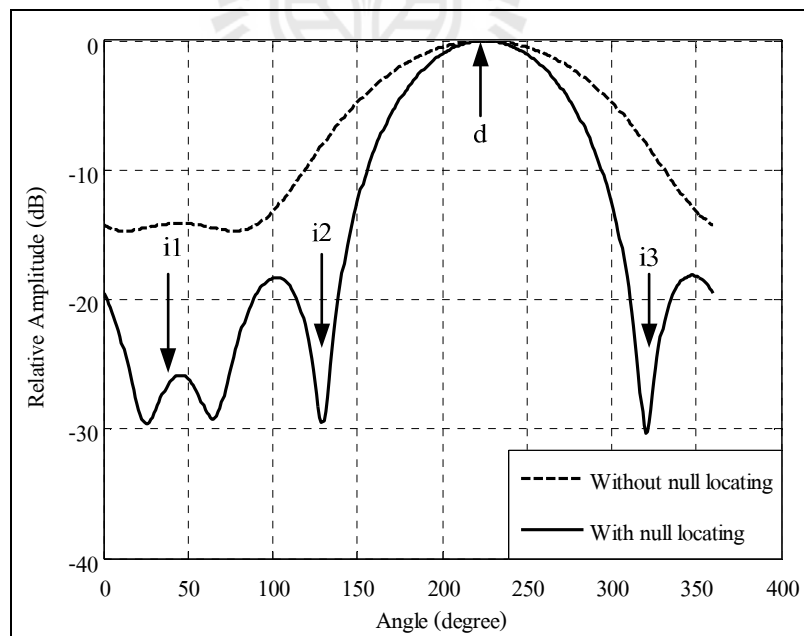
รูปที่ 4.39 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315° พบว่าอุปกรณ์ที่เราได้ออกแบบมานั้นสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้จริงเมื่อเราทำการเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นหลักมาในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315° ผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° และ 225° ได้ดี แต่ในทิศทางที่ 315° นั้นยังไม่สามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° นั้น มีค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณมีความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลองผลในตารางที่ 4.3 แสดงในรูปที่ 4.40 แต่ความจริงที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° นั้นก็ยังทำให้ระดับของพู่ข้างต่ำลงได้ ซึ่งนั่นหมายความว่าอุปกรณ์ของเรานั้นก็ยังสามารถลดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นได้



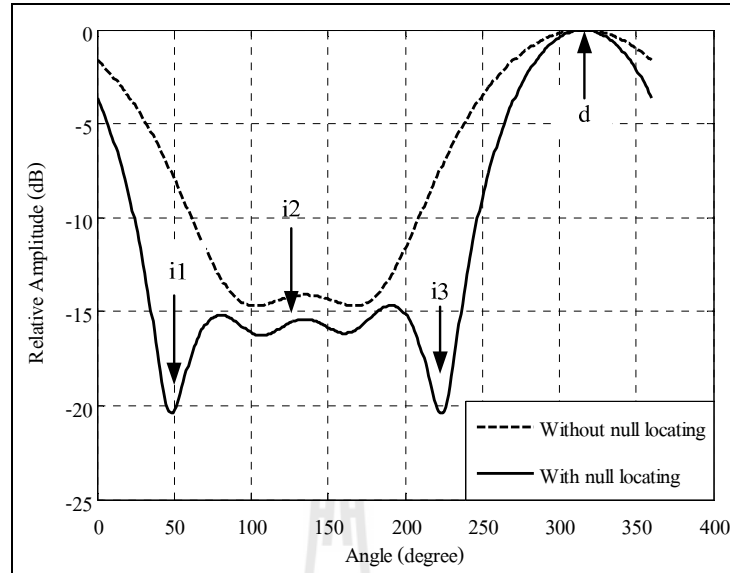
รูปที่ 4.39 แบบรูปการแผ่พลังงาน โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315°



รูปที่ 4.40 แบบรูปการแผ่พลังงาน โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315°



รูปที่ 4.41 แบบรูปการแผ่พลังงาน โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315°

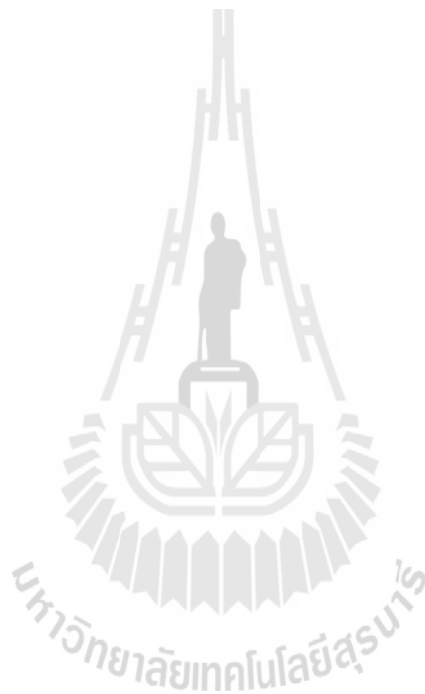


รูปที่ 4.42 แบบรูปการแผ่พลังงาน โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225°

รูปที่ 4.41 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่ได้จากการออกแบบป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315° ซึ่งวงจรที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° นั้นมีมุลคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่ผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่เราออกแบบมานั้นสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดเข้ามาได้จริง สุดท้ายเมื่อเราทำการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225° ผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° และ 315° ได้ดี แต่ในทิศทางที่ 225° นั้นยังไม่สามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° นั้น มีค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณมีความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลองผลในตารางที่ 4.3 แต่อุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° นั้นก็ยังทำให้ระดับของพู่ข้างต่ำลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.42 จากรูปที่ 4.39 - 4.42 ได้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่เราได้ออกแบบมาทั้งหมดนั้นมีประสิทธิภาพในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้จริง

4.5 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบแบตเตอรี่เมตริกซ์ที่ถูกปรับปรุง การจำลองผลด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ และการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นส่วนประกอบของระบบสายอากาศกึ่งแบบสวิตช์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ จากผลที่ได้พบว่าเราสามารถนำอุปกรณ์เหล่านี้ไปทำการสร้างและวัดผลจริงได้โดยที่เราจะนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 5

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

5.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลที่ได้ทดสอบอุปกรณ์ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่เราสร้างจริง ซึ่งเราได้ขนาดและรูปร่างของอุปกรณ์มาจากการออกแบบและจำลองผลในบทที่ 4 ในส่วนสุดท้ายเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ ในพื้นที่ที่มีการจำลองขึ้น โดยนำผลที่ได้ขึ้นไปเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

5.2 การทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

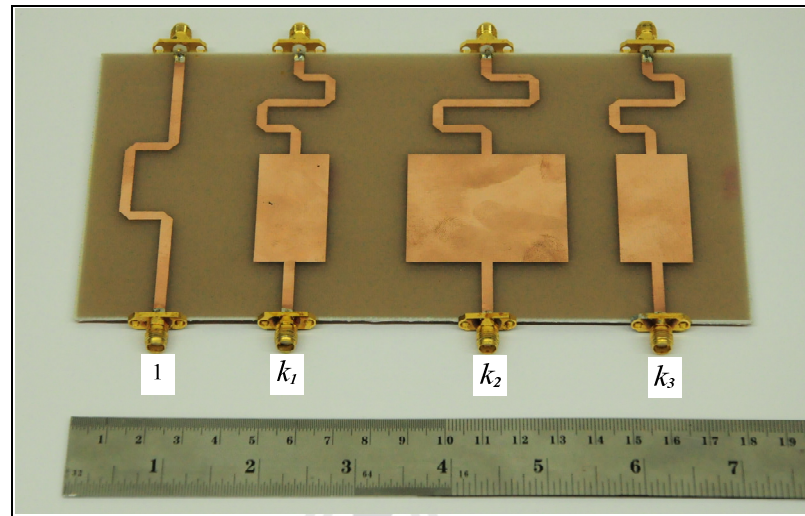
จากบทที่ 4 เราได้ทำการออกแบบและจำลองผลของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ไว้ทั้งหมด 4 ชุด จะเห็นว่าในแต่ละชุดนั้นมีแอมพลิจูดและมุมเฟสที่แตกต่างกันออกไปตามทิศทางของสัญญาณที่เราต้องการและทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามา หลังจากนั้น เรานำขนาดและรูปร่างที่ได้มาทำการสร้างอุปกรณ์จริงและทดสอบผลได้ดังนี้

5.2.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 45° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°

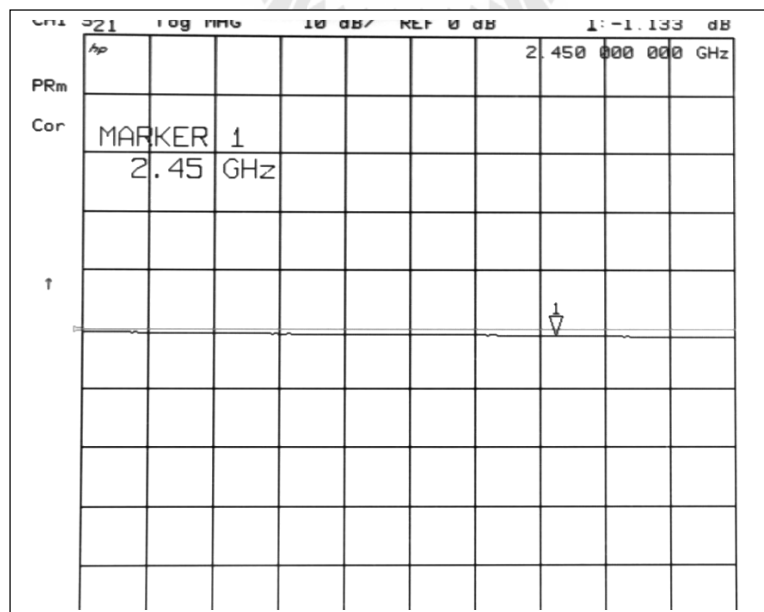
รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° ตามลำดับ โดยที่วงจรที่ 1 นั้นจะใช้ต่อกับพอร์ตขาออกของ modified Butler

matrix ที่ให้ทิศทางของลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 45° โดยที่วงจร k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 135° วงจร k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° วงจร k_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้

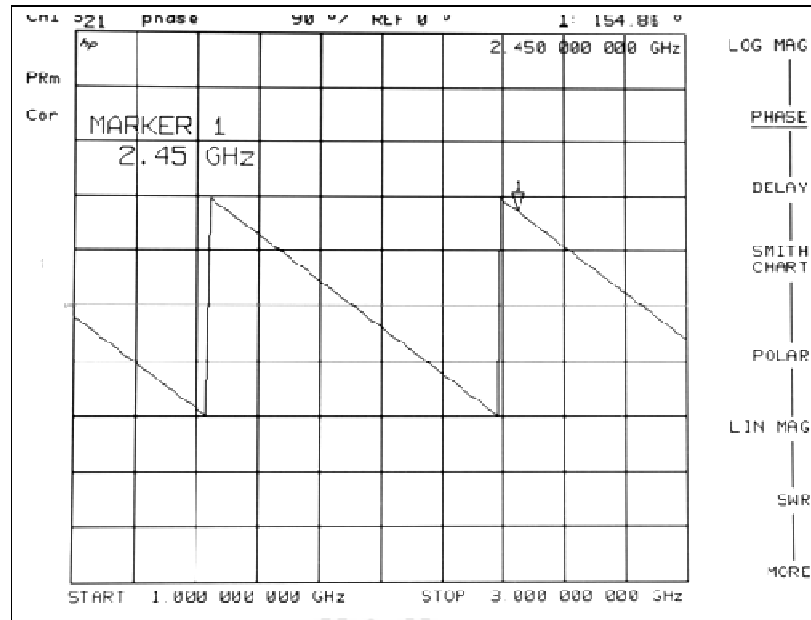
กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° ตามลำดับ จากนั้นนำอุปกรณ์ที่สร้างไปวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายเพื่อดูแอมพลิจูดและมุมเฟสของอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 5.2 - 5.9



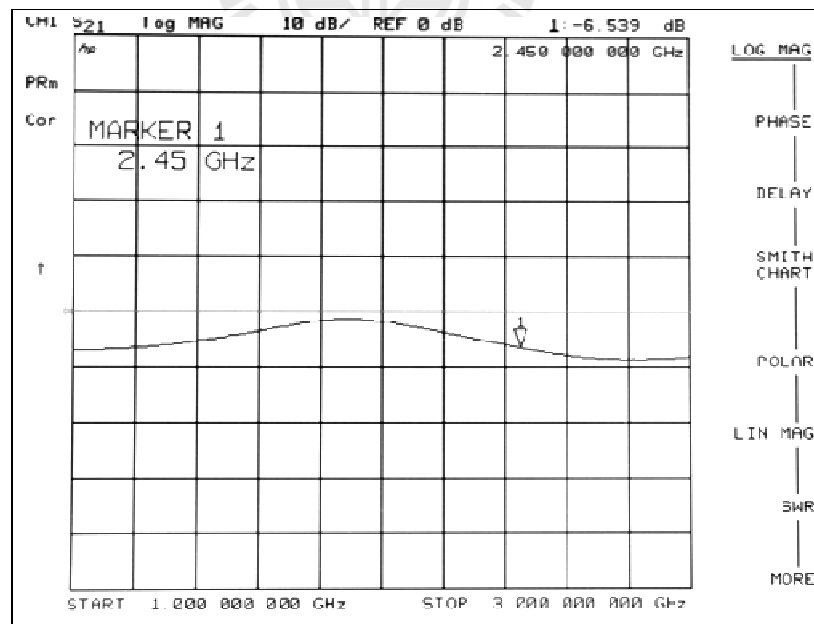
รูปที่ 5.1 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°



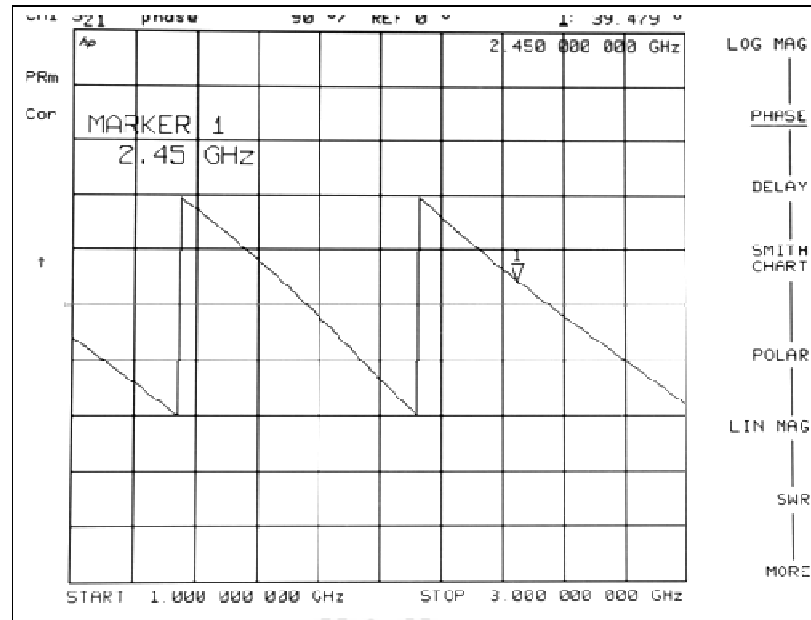
รูปที่ 5.2 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°



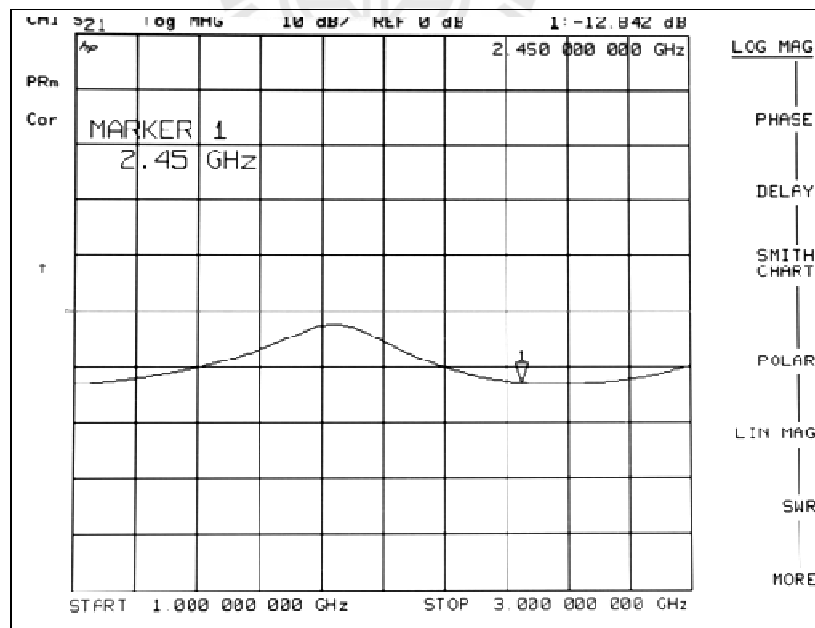
รูปที่ 5.3 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°



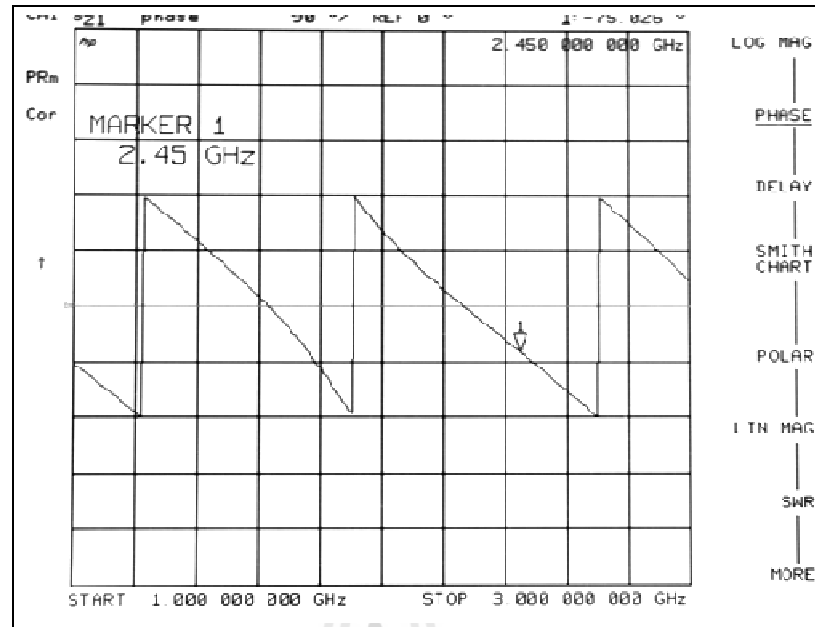
รูปที่ 5.4 แอมพลิจูดของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°



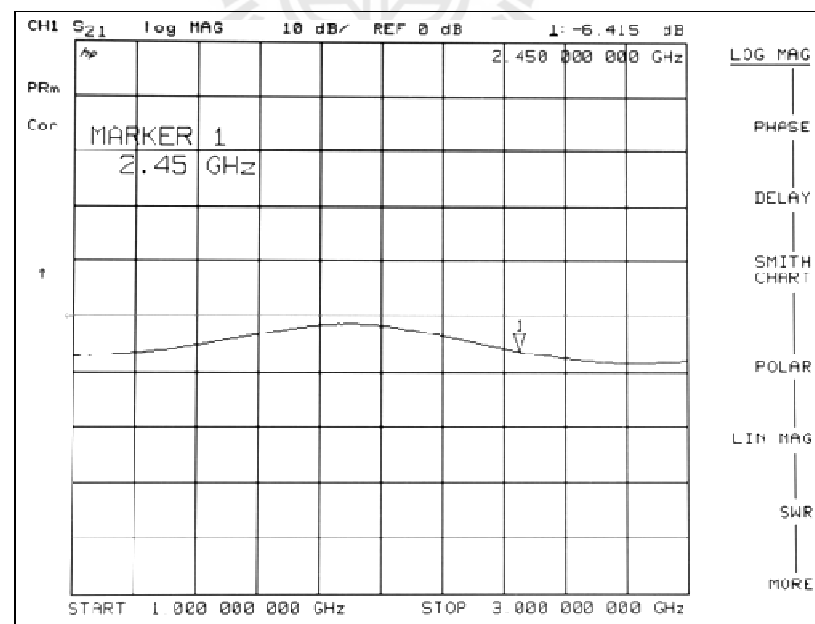
รูปที่ 5.5 มุมเฟสของวงจร k_1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°



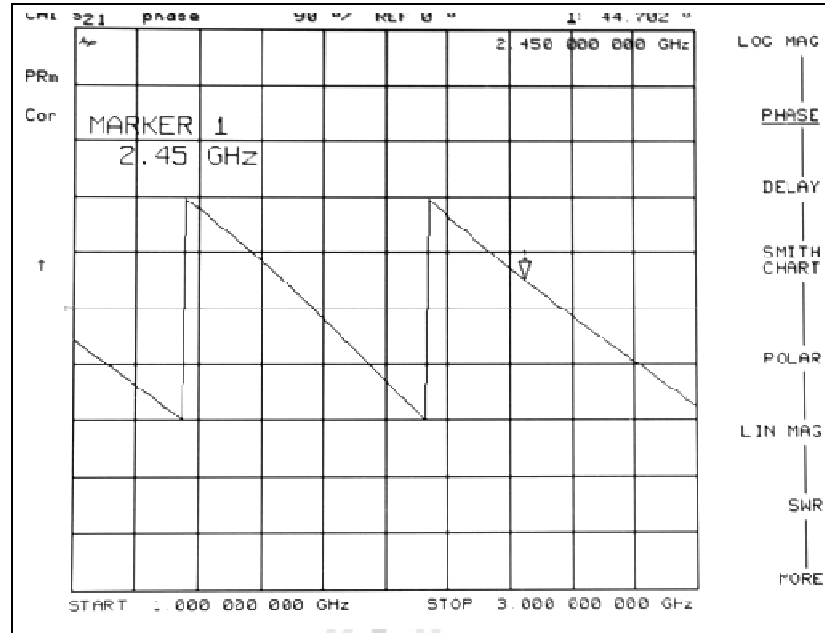
รูปที่ 5.6 แอมพลิจูดของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°



รูปที่ 5.7 มุมเฟสของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ ที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°



รูปที่ 5.8 แอมพลิจูดของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เรา ต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°



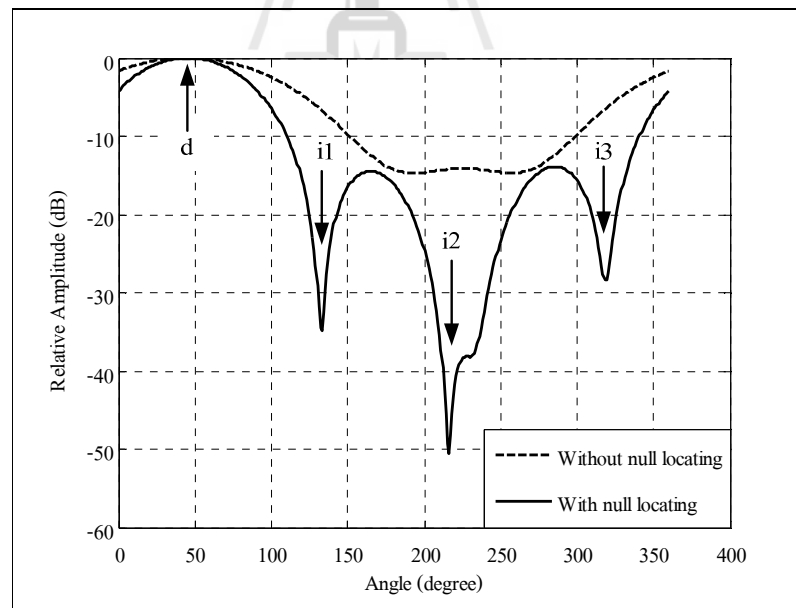
รูปที่ 5.9 มุมเฟสของวงจร k_3 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°

ตารางที่ 5.1 ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315°

อุปกรณ์	ค่าที่ได้จากการวัดอุปกรณ์		ค่าความต่างเฟส (องศา)	จำนวนเชิงซ้อน
	แอมพลิจูด (dB)	มุมเฟส (องศา)		
วงจรที่ 1	-1.133	154.860	0	0.8777+0.0000i
k_1	-6.593	39.479	-118.381	-0.2225-0.4118i
k_2	-12.842	-75.026	127.114	-0.1375+0.1817i
k_3	-6.415	44.702	-113.158	-0.1879-0.4393i

จากรูปที่ 5.2 – 5.9 คือกราฟแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ทั้งหมด โดยการถ่ายภาพเนื่องจากสายที่ใช้เชื่อมต่อกันระหว่างเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายไปยังคอมพิวเตอร์นั้นเกิดการชำรุดจึงทำให้ไม่สามารถดึงรูปภาพทั้งหมดออกมาจากเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายได้โดยตรง และสามารถสรุปค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ดังตารางที่ 5.1 คือ ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 45°

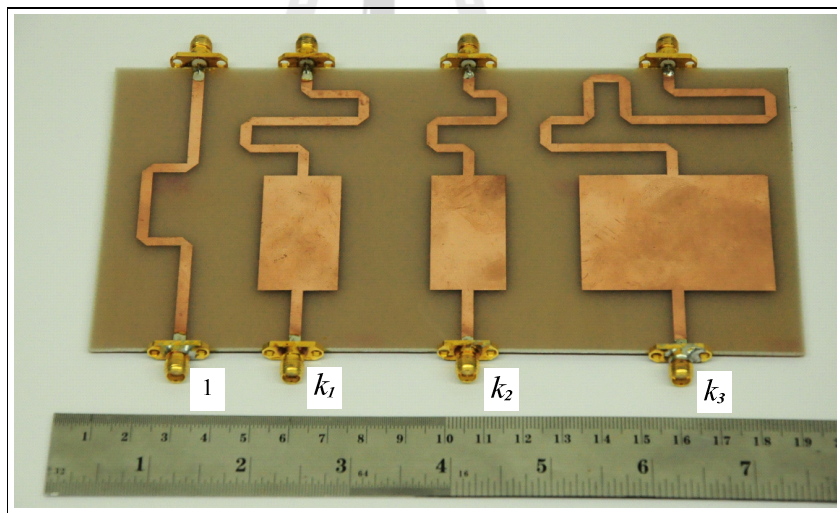
และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° ตามลำดับ จากค่าที่ได้ในตารางที่ 5.1 พบว่าค่าแอมพลิจูดที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เล็กน้อยและค่ามุมเฟสที่ได้จากการวัดนั้นมีค่าไม่ตรงกันกับค่าที่ได้จากการออกแบบ แต่เมื่อเรานำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าต่างเฟสที่ได้นั้นพบว่าค่าความต่างเฟสที่ได้ในแต่ละวงจร มีความใกล้เคียงกับค่าความต่างเฟสที่ได้จากการจำลองผลในตารางที่ 4.4 จากนั้นเราต้องทำการแปลงค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้ดังตารางที่ 5.1 เพื่อใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ป้อนกลับในการจำลองผล ด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานและประสิทธิภาพ ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 45° และมีสัญญาณ แทรกสอดเข้ามาทาง 135° 225° และ 315° จากผลที่ได้พบว่าชุดอุปกรณ์ที่เราได้ทำการสร้างนั้น สามารถนำมาใช้งานได้ เนื่องจากสามารถให้ลาคลื่นหลักไปยังสัญญาณที่ต้องการ d เข้ามาใน ทิศทางที่ 45° และสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ในทิศทางของมีสัญญาณแทรกสอด i เข้า มาทาง 135° 225° และ 315° แสดงดังรูปที่ 5.10



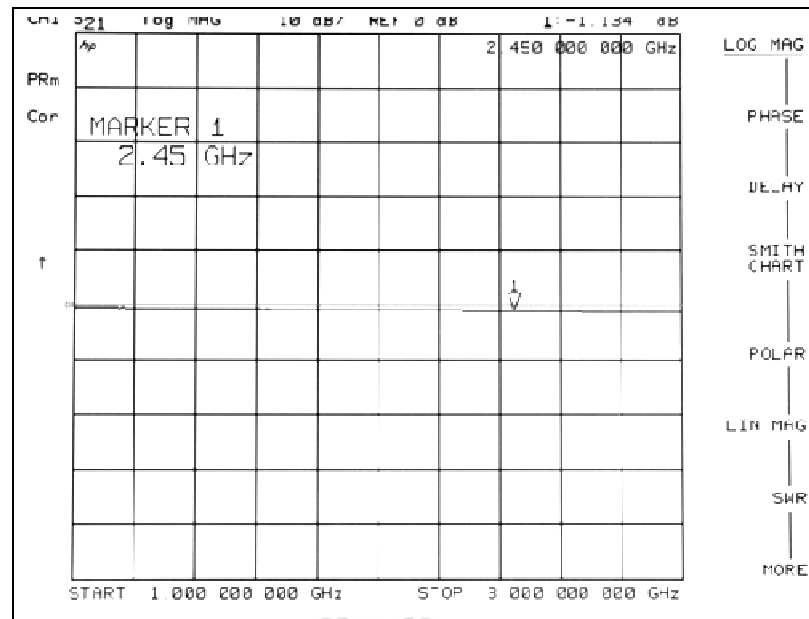
รูปที่ 5.10 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ และป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้า ในทิศทางที่ 45° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 135° 225° และ 315°

5.2.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 135° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°

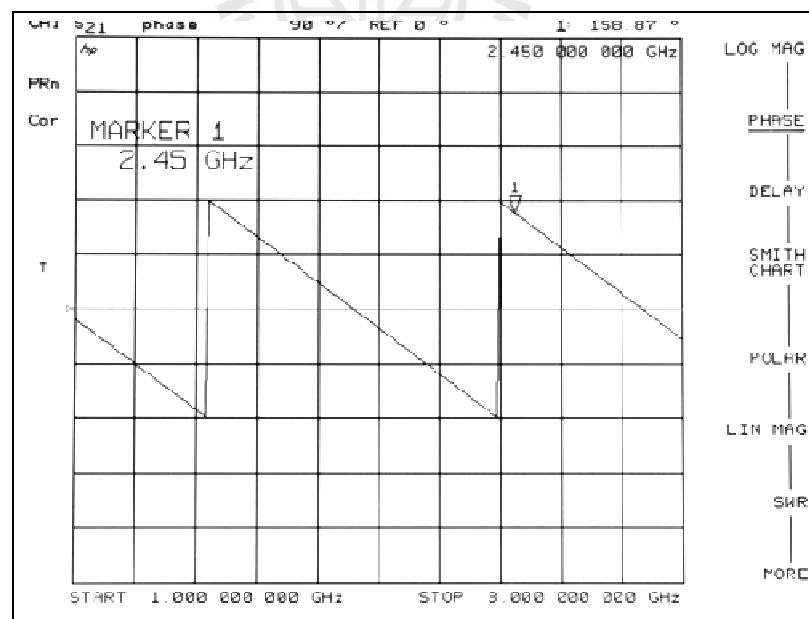
ในรูปที่ 5.11 คืออุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาจริงเพื่อใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 135° และมีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° จากรูปวงจรที่ 1 คือวงจรที่ใช้เชื่อมต่อกับพอร์ตขาออกของบัตรเลอ์เมตริกซ์ที่ถูกปรับปรุง ที่ให้ทิศทางของลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 135° โดยที่วงจร k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° วงจร k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° วงจร k_3 คือค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° ตามลำดับ จากนั้นนำอุปกรณ์ที่สร้างไปวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย เพื่อดูแอมพลิจูดและมุมเฟสของอุปกรณ์ได้ผลการวัดดังรูปที่ 5.12 - 5.19



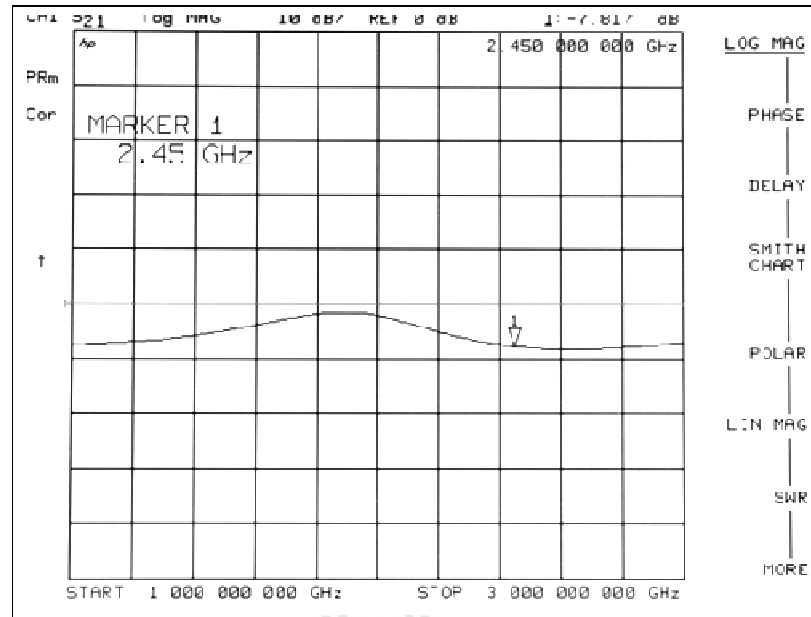
รูปที่ 5.11 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°



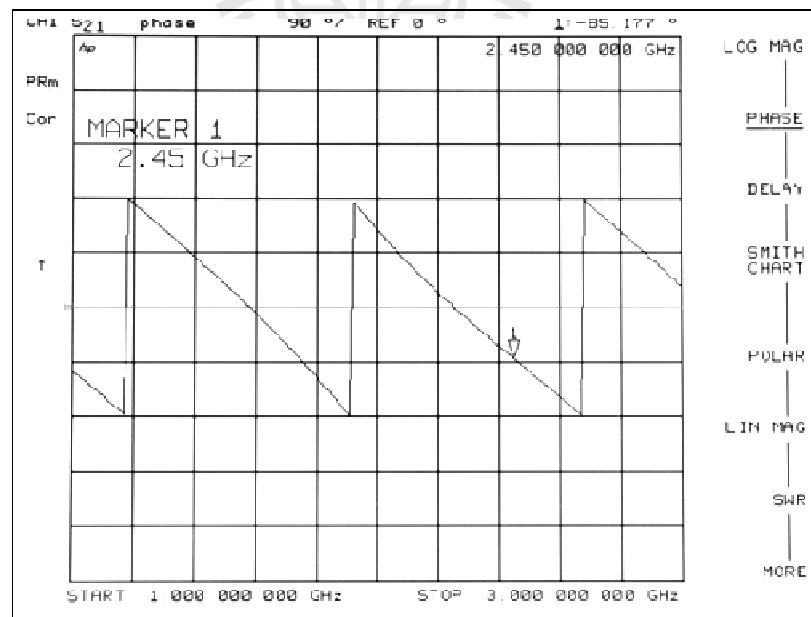
รูปที่ 5.12 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°



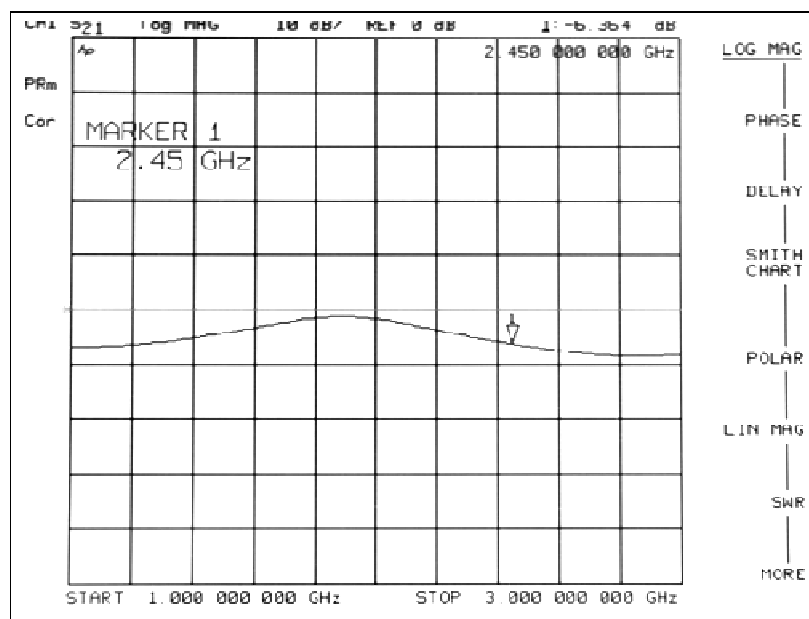
รูปที่ 5.13 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°



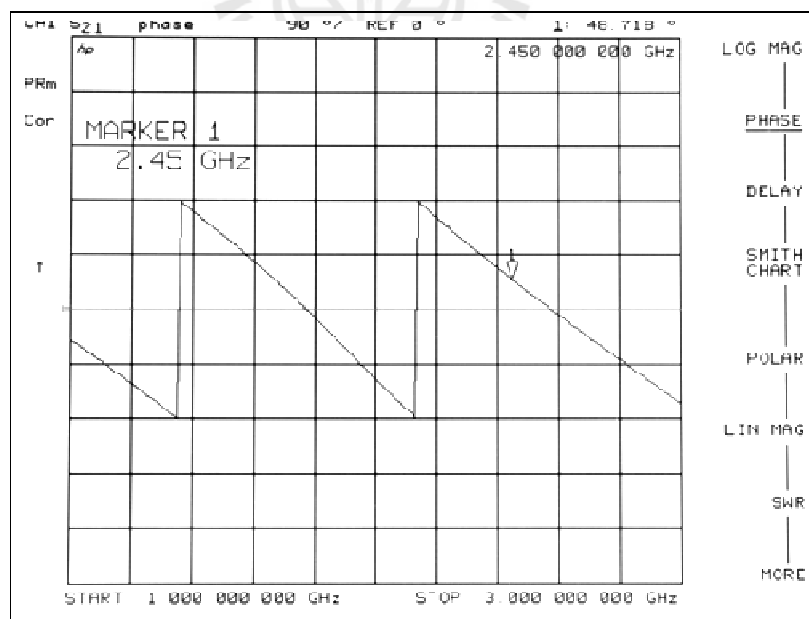
รูปที่ 5.14 แอมพลิจูดของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°



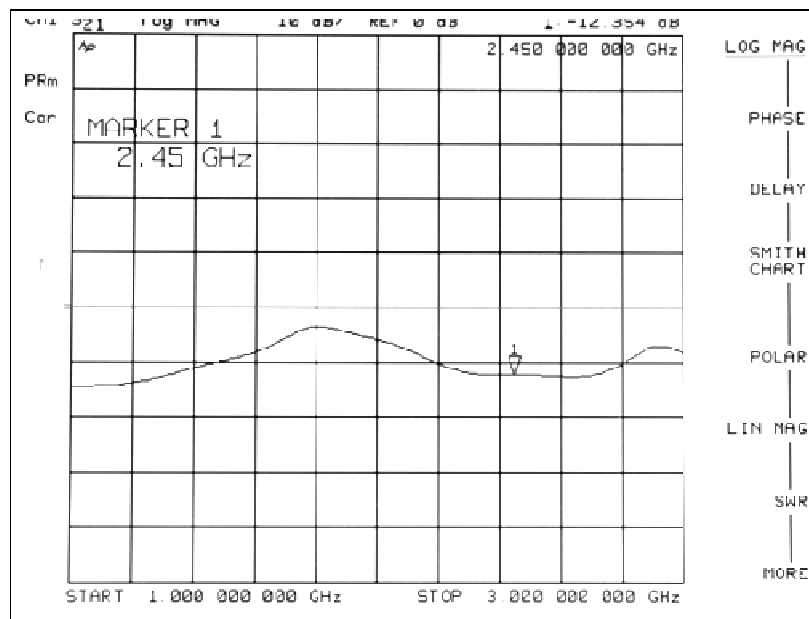
รูปที่ 5.15 มุมเฟสของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°



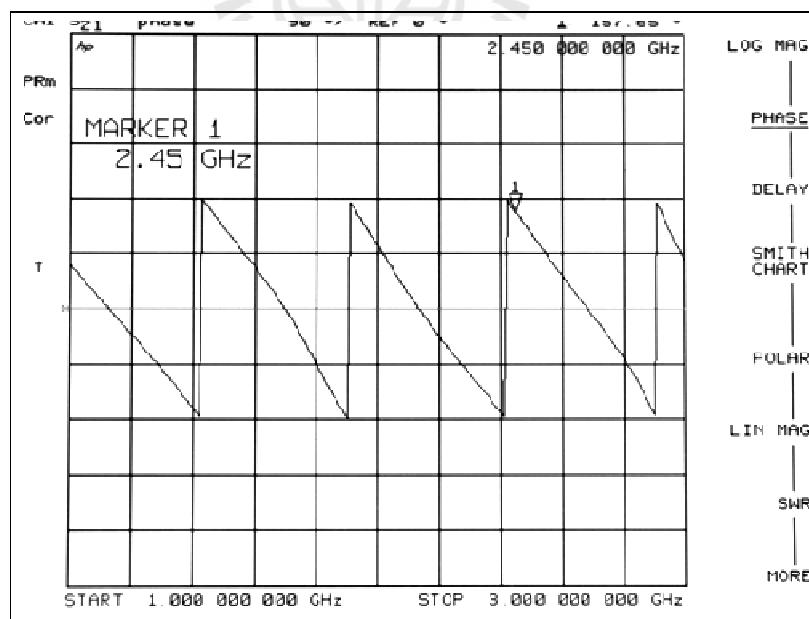
รูปที่ 5.16 แอมพลิจูดของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°



รูปที่ 5.17 มุมเฟสของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°



รูปที่ 5.18 แอมพลิจูดของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°

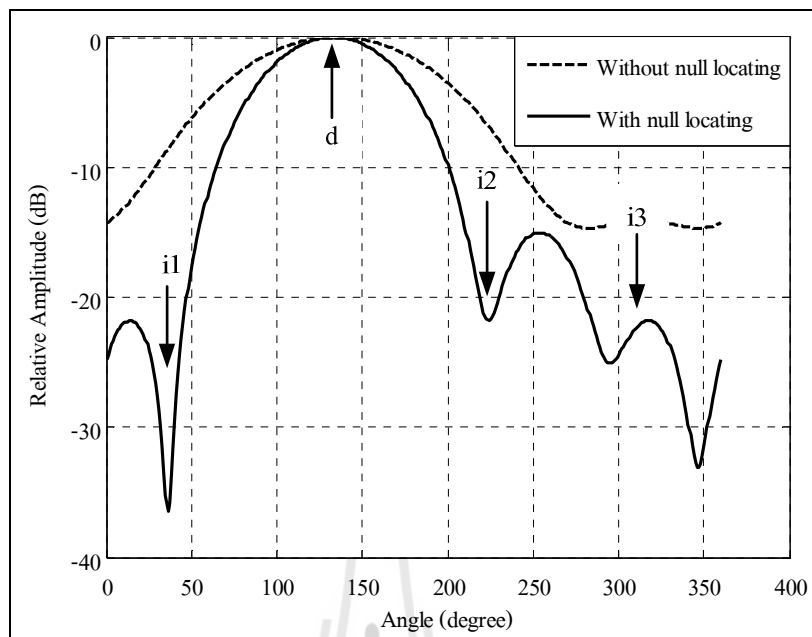


รูปที่ 5.19 มุมเฟสของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°

จากรูปที่ 5.12 – 5.19 คือกราฟแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ทั้งหมด โดยการถ่ายภาพเนื่องจากสายที่ใช้เชื่อมต่อกันระหว่างเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายไปยังคอมพิวเตอร์นั้นเกิดการชำรุดจึงทำให้ไม่สามารถดึงรูปภาพทั้งหมดออกมาจากเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายได้โดยตรง เราจึงได้สรุปค่าต่างๆที่วัดได้ดังตารางที่ 5.2 คือค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° ตามลำดับ จากค่าที่ได้ในตารางที่ 5.2 พบว่าค่าแอมพลิจูดที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เล็กน้อย และค่ามุมเฟสที่ได้จากการวัดนั้นมีค่าไม่ตรงกันกับค่าที่ได้จากการออกแบบ แต่เมื่อเรานำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าต่างเฟสที่ได้ นั้นพบว่าค่าความต่างเฟสที่ได้ในแต่ละวงจรมีความใกล้เคียงกับค่าความต่างเฟสที่ได้จากการจำลองผลในตารางที่ 4.4 จากนั้นเราต้องทำการแปลงค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้ดังตารางที่ 5.2 เพื่อใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ไปย้อนกลับในการจำลองผลด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานและประสิทธิภาพของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° จากผลที่ได้พบว่าชุดอุปกรณ์ที่เราได้ทำการสร้างนั้นสามารถนำมาใช้งานได้ เนื่องจากสามารถให้ลำคลื่นหลักไปยังสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 135° และสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ในทิศทางของมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315° แสดงดังรูปที่ 5.20

ตารางที่ 5.2 ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 135° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 225° และ 315°

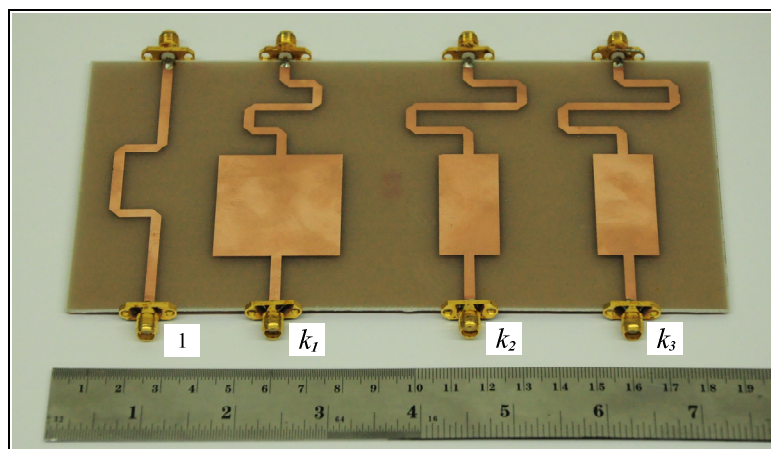
อุปกรณ์	ค่าที่ได้จากการวัดอุปกรณ์		ค่าความต่างเฟส (องศา)	จำนวนเชิงซ้อน
	แอมพลิจูด (dB)	มุมเฟส (องศา)		
วงจรถี 1	-1.134	158.87	0	0.8776+0.0000i
k_1	-7.817	-85.177	115.953	-0.1778+0.3655i
k_2	-6.364	48.718	-110.152	-0.1655-0.4511i
k_3	-12.354	157.65	-1.22	0.2410-0.0050i



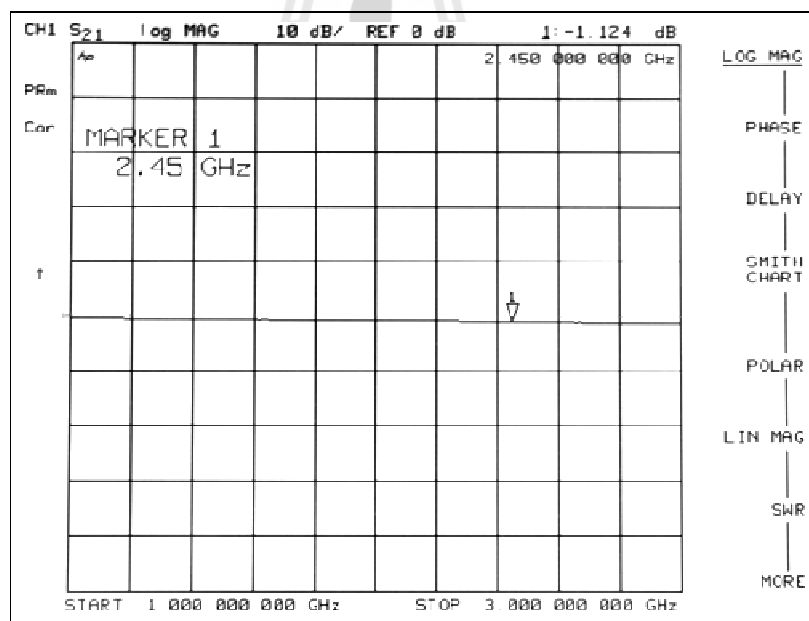
รูปที่ 5.20 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการวัด ค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ และป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 135° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 225° และ 315°

5.2.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 225° และ กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°

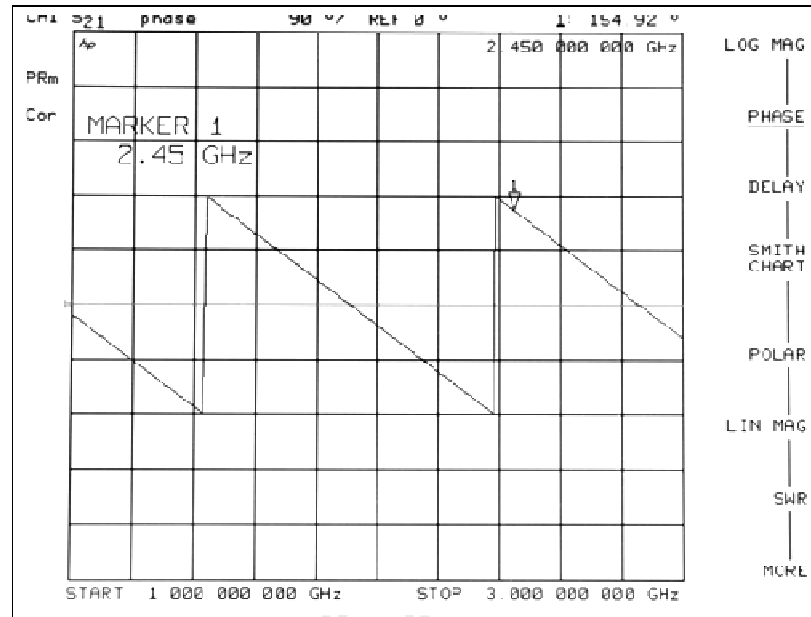
รูปที่ 5.21 คือลักษณะของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาจริงเพื่อใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 225° และมีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° จากรูปวงจรที่ 1 คือวงจรที่ใช้เชื่อมต่อกับพอร์ตขาออกของบัตรเลอว์เมตริกซ์ที่ถูกปรับปรุง ที่ให้ทิศทางของลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 225° โดยที่วงจร k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° วงจร k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 135° วงจร k_3 คือค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 315° ตามลำดับ จากนั้นนำอุปกรณ์ที่สร้างไปวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย เพื่อดูแอมพลิจูดและมุมเฟสของอุปกรณ์ได้ผลการวัดดังรูปที่ 5.21 – 5.29



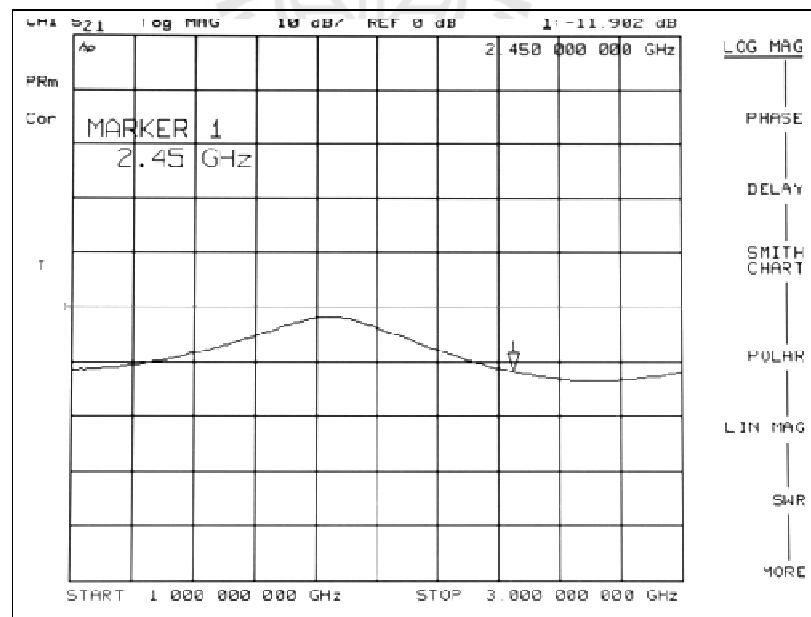
รูปที่ 5.21 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°



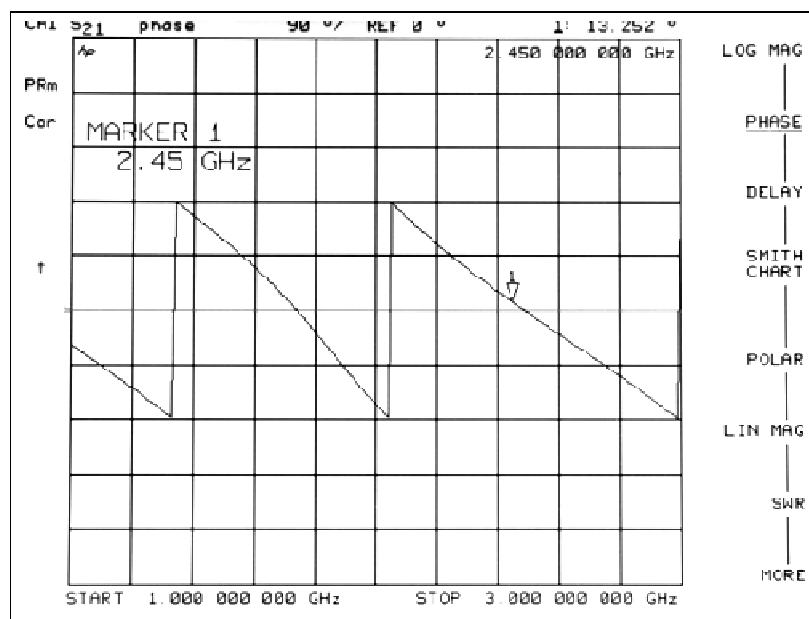
รูปที่ 5.22 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°



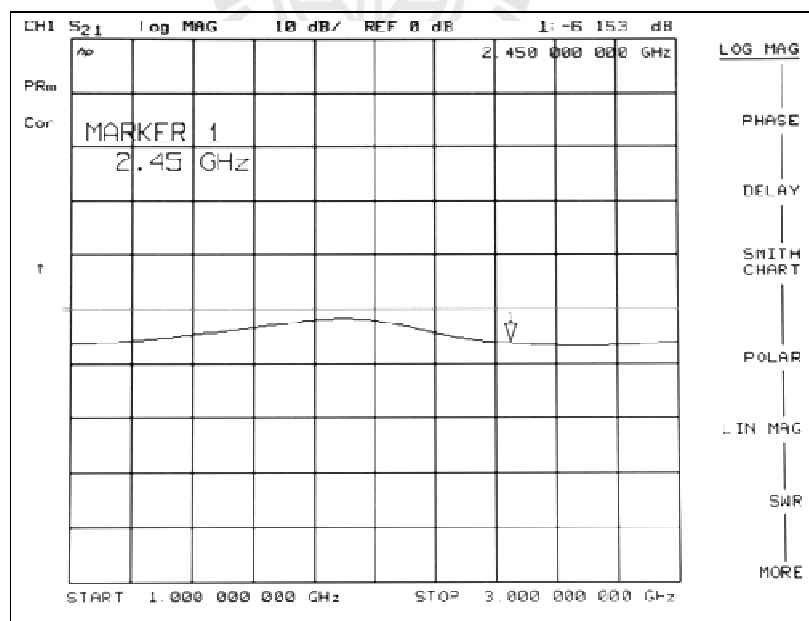
รูปที่ 5.23 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°



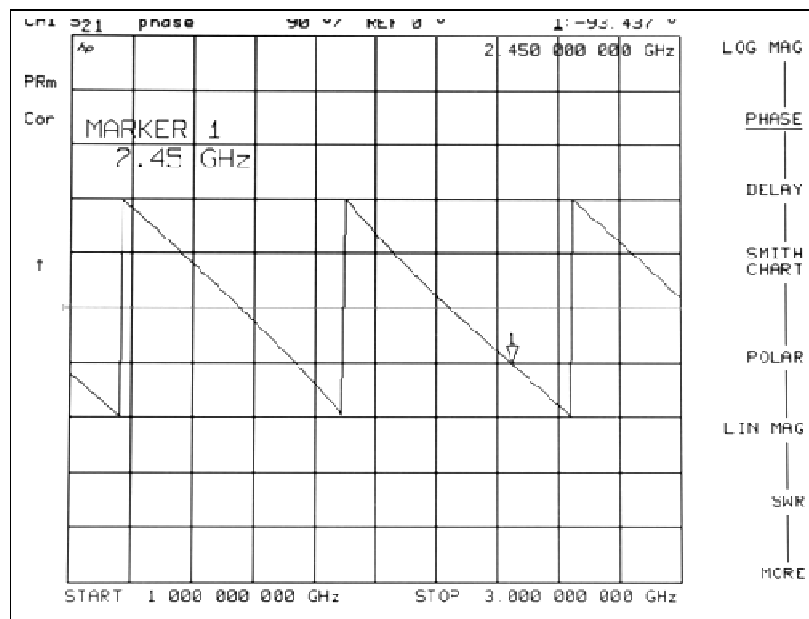
รูปที่ 5.24 แอมพลิจูดของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°



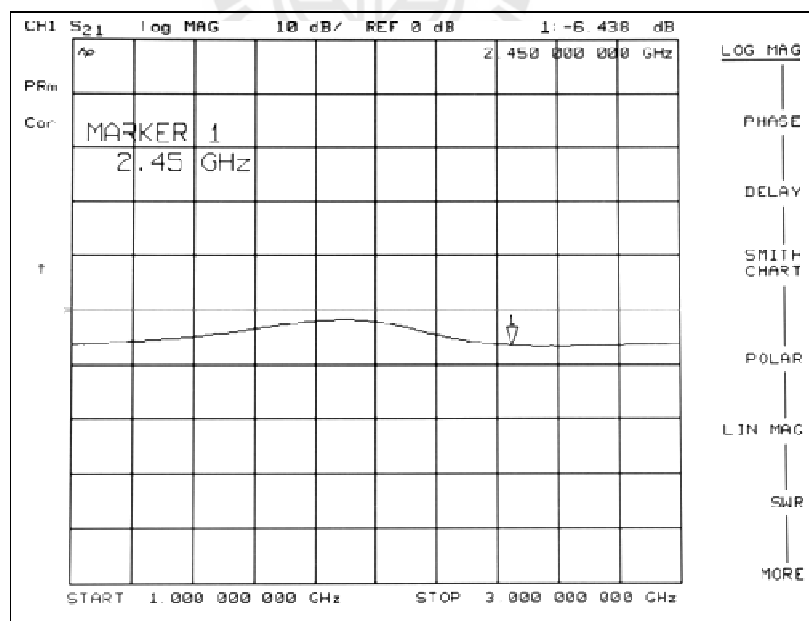
รูปที่ 5.25 มุมเฟสของวงจร k_1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°



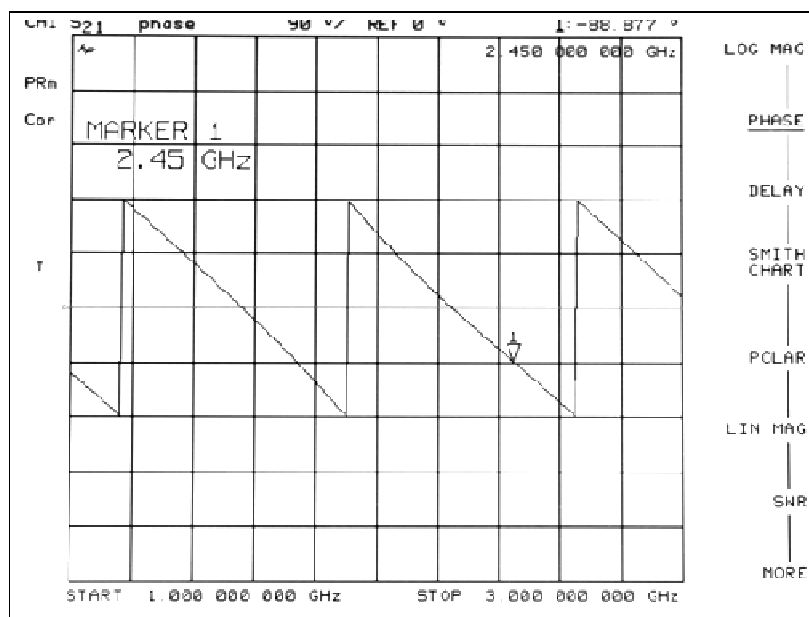
รูปที่ 5.26 แอมพลิจูดของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°



รูปที่ 5.27 มุมเฟสของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°



รูปที่ 5.28 แอมพลิจูดของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315°



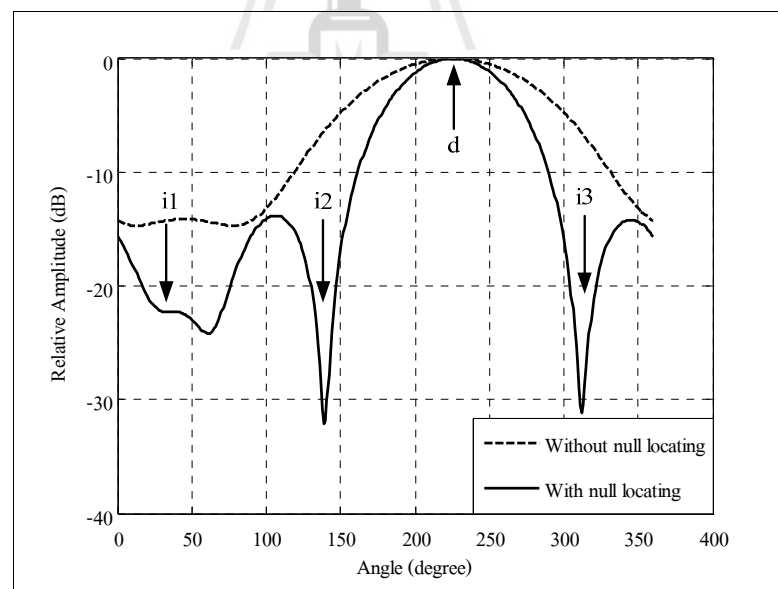
รูปที่ 5.29 มุมเฟสของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° , 135° และ 315°

จากรูปที่ 5.22 – 5.29 คือกราฟแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ทั้งหมด โดยการถ่ายภาพเนื่องจากสายที่ใช้เชื่อมต่อกันระหว่างเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายไปยังคอมพิวเตอร์นั้นเกิดการชำรุดจึงทำให้ไม่สามารถดึงรูปกราฟทั้งหมดออกมาจากเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายได้โดยตรง เราจึงได้สรุปค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ดังตารางที่ 5.3 คือค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 225° และสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° , 225° และ 315° ตามลำดับ จากค่าที่ได้ในตารางที่ 5.3 พบว่าค่าแอมพลิจูดที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เล็กน้อย และค่ามุมเฟสที่ได้จากการวัดนั้นมีค่าไม่ตรงกันกับค่าที่ได้จากการออกแบบ แต่เมื่อเรานำค่าที่ได้มาทำการคำนวณค่าต่างเฟสที่ได้ นั้นพบว่าค่าความต่างเฟสที่ได้ในแต่ละวงจรมีความใกล้เคียงกับค่าความต่างเฟสที่ได้จากการจำลองผลในตารางที่ 4.4 จากนั้นเราต้องทำการแปลงค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้ดังตารางที่ 5.3 เพื่อใช้เป็น ค่าสัมประสิทธิ์ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ป้อนกลับในการจำลองผลด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานและประสิทธิภาพของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 225° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° , 135° และ 315°

ดังรูปที่ 5.30 จะแสดงให้เห็นว่าชุดอุปกรณ์นี้สามารถให้ลำคลื่นหลักไปยังสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 225° และสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ในทิศทางของมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 315° นั้นหมายความว่าชุดอุปกรณ์ที่เราได้ทำการสร้างสามารถนำมาใช้งานได้

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

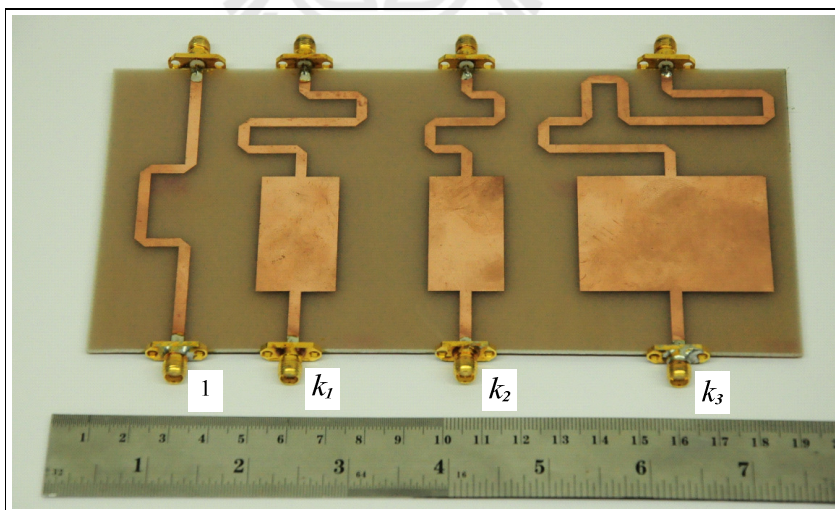
อุปกรณ์	ค่าที่ได้จากการวัดอุปกรณ์		ค่าความต่างเฟส (องศา)	จำนวนเชิงซ้อน
	แอมพลิจูด (dB)	มุมเฟส (องศา)		
วงจรที่ 1	-1.124	154.92	0	0.8786
k_1	-11.902	13.252	-141.668	-0.1992-0.1575i
k_2	-6.153	-93.437	111.643	-0.1816+0.4576i
k_3	-6.438	-88.877	116.203	-0.2103+0.4275i



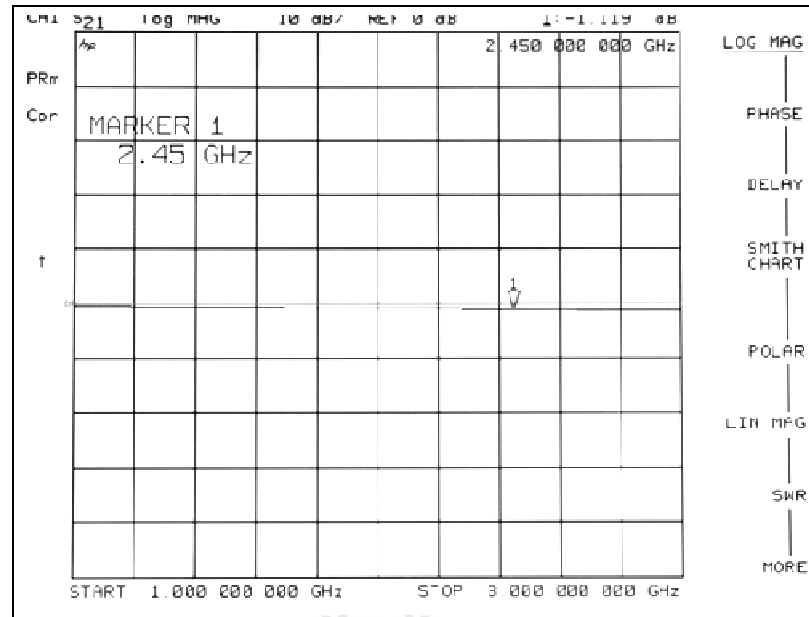
รูปที่ 5.30 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์และป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 225° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 315°

5.2.4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 315° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°

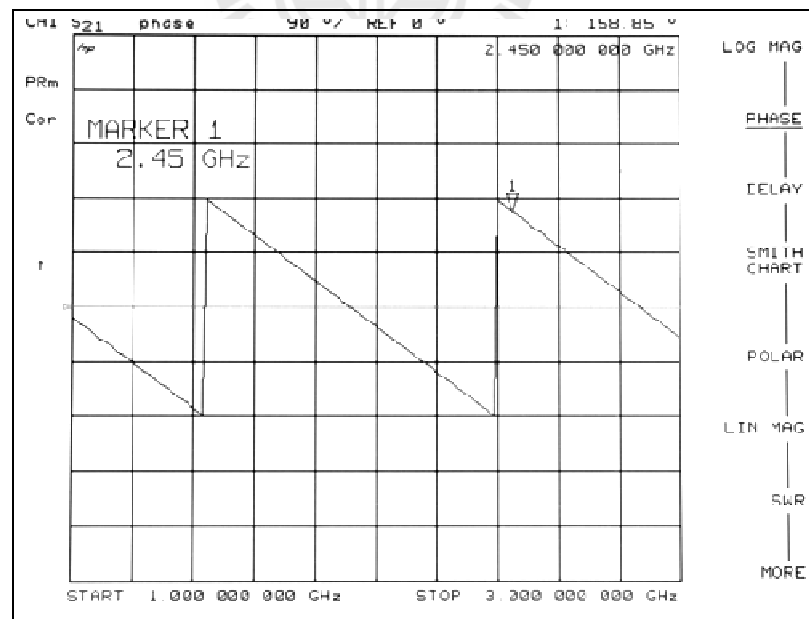
จากที่ได้กล่าวมาในบทที่ 4 ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ 315° นั้นสามารถใช้อุปกรณ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ชุดเดียวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ 135° โดยการสลับพอร์ตในการเชื่อมต่อ ดังรูปที่ 5.31 แสดงลักษณะของของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาจริงเพื่อใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 315° และมีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่มีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° จากรูปวงจรที่ 1 คือวงจรที่ใช้เชื่อมต่อกับพอร์ตขาออกของ modified Butler matrix ที่ให้ทิศทางของลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเข้ามาที่ 315° โดยที่วงจร k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 45° วงจร k_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 135° วงจร k_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่ 225° ตามลำดับ จากนั้นนำอุปกรณ์ที่สร้างไปวัดผลด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย เพื่อดูแอมพลิจูดและมุมเฟสของอุปกรณ์ได้ผลวัด ดังรูปที่ 5.32 - 5.39



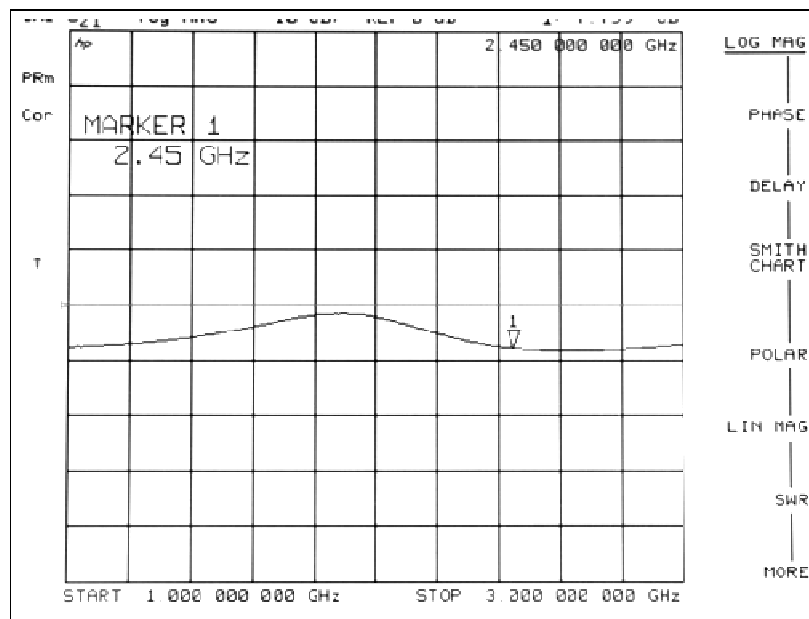
รูปที่ 5.31 ลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริงเพื่อนำไปใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°



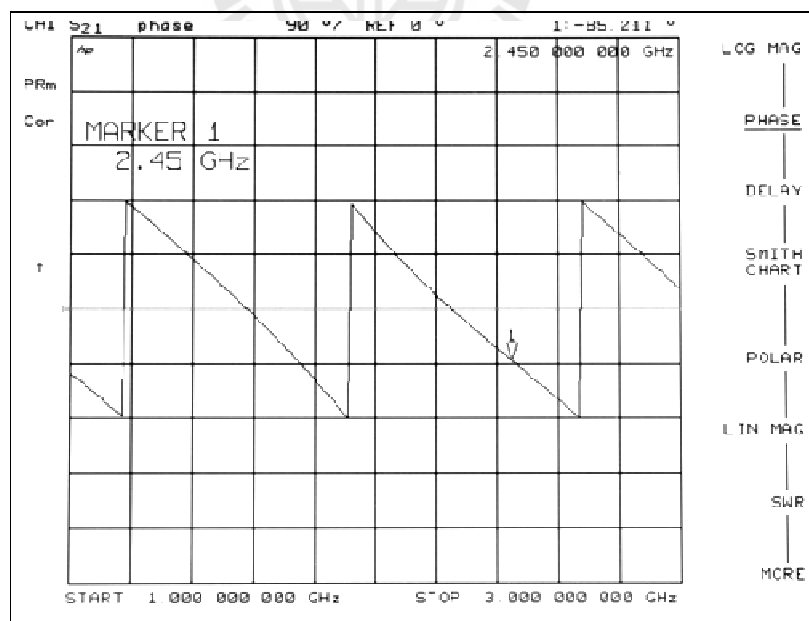
รูปที่ 5.32 แอมพลิจูดของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°



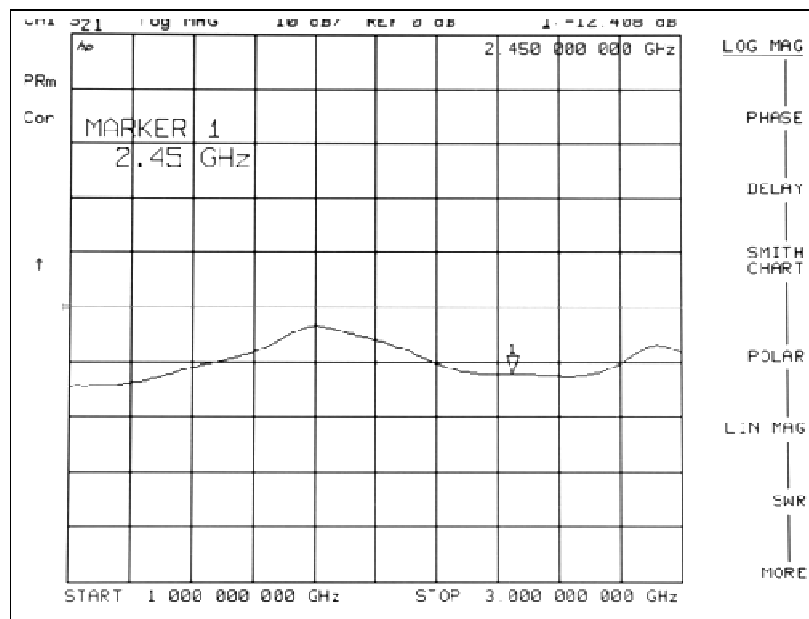
รูปที่ 5.33 มุมเฟสของวงจรที่ 1 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°



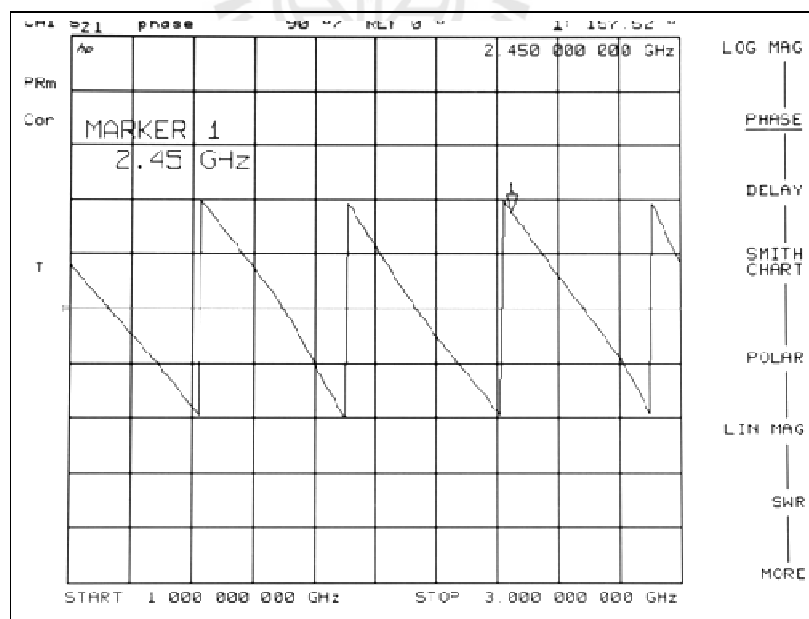
รูปที่ 5.34 แอมพลิจูดของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°



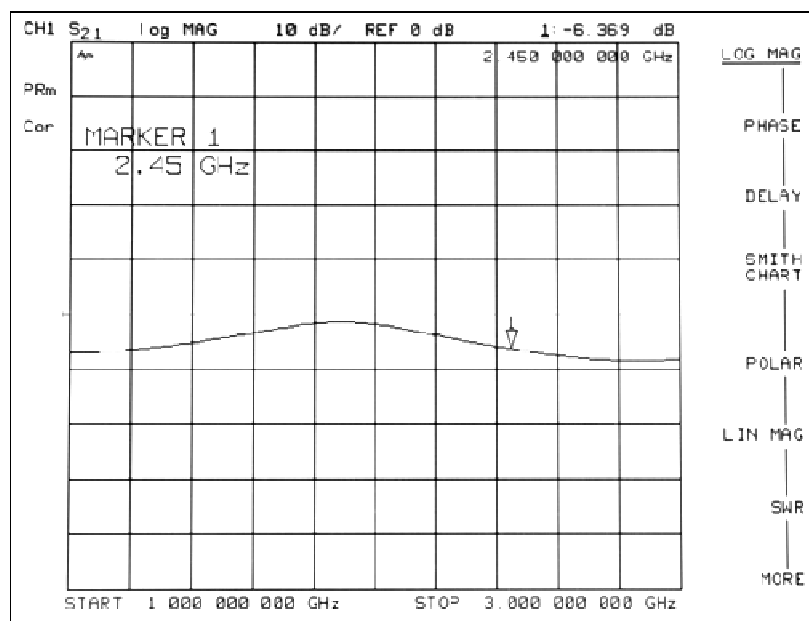
รูปที่ 5.35 มุมเฟสของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°



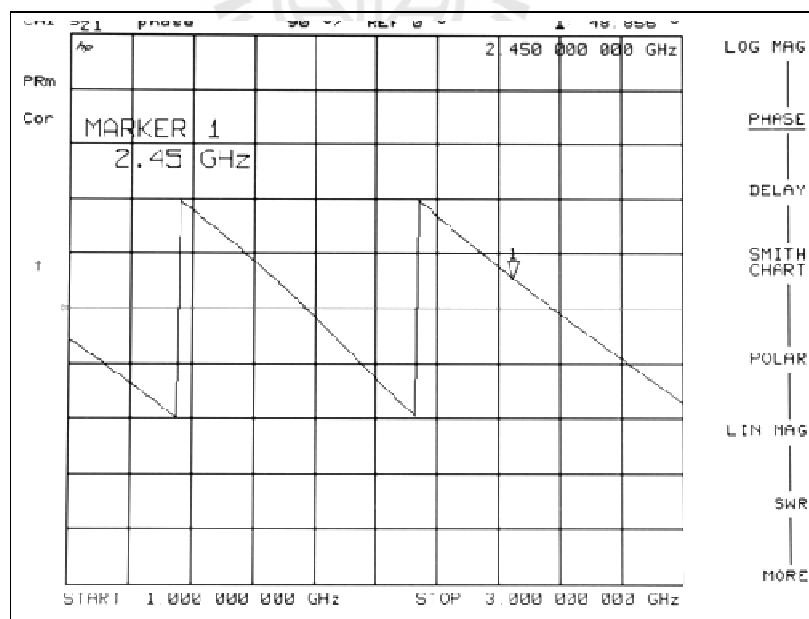
รูปที่ 5.36 แอมพลิจูดของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°



รูปที่ 5.37 มุมเฟสของวงจร k_2 ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°



รูปที่ 5.38 แอมพลิจูดของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°

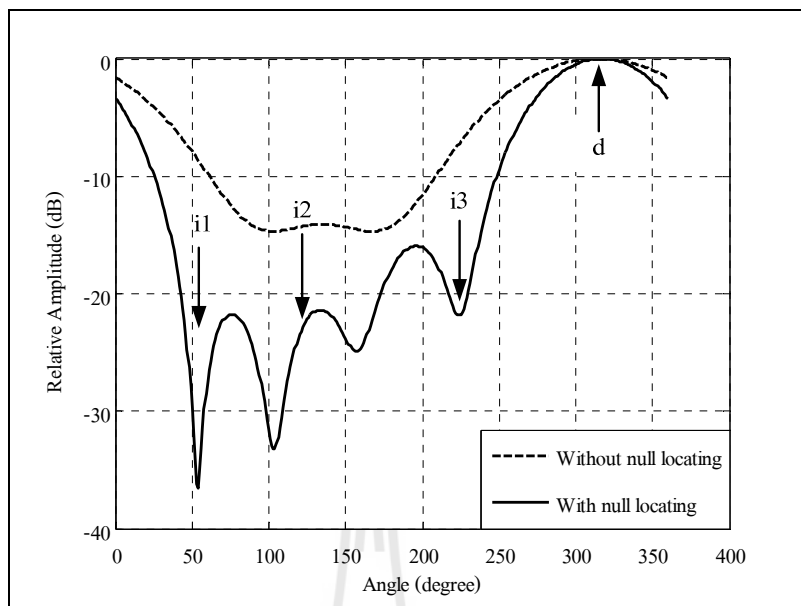


รูปที่ 5.39 มุมเฟสของวงจร k , ในชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°

จากรูปที่ 5.32 – 5.39 คือกราฟแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ทั้งหมด โดยการถ่ายภาพเนื่องจากสายที่ใช้เชื่อมต่อกันระหว่างเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายไปยังคอมพิวเตอร์นั้นเกิดการชำรุดจึงทำให้ไม่สามารถดึงรูปภาพทั้งหมดออกมาจากเครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายได้โดยตรง เราจึงได้สรุปค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ดังตารางที่ 5.4 คือ ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° ตามลำดับ จากค่าที่ได้ในตารางที่ 5.4 พบว่าค่าแอมพลิจูดที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนไปจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เล็กน้อย และค่ามุมเฟสที่ได้จากการวัดนั้นมีค่าไม่ตรงกันกับค่าที่ได้จากการออกแบบ แต่เมื่อเรานำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าต่างเฟสที่ได้พบค่าความต่างเฟสที่ได้ในแต่ละวงจรมีความใกล้เคียงกับค่าความต่างเฟสที่ได้จากการจำลองผลในตารางที่ 4.4 จากนั้นเราต้องทำการแปลงค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้ดังตารางที่ 5.4 เพื่อใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ไปย้อนกลับในการจำลองผลด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานและประสิทธิภาพของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° ดังรูปที่ 5.40 จะแสดงให้เห็นว่าชุดอุปกรณ์นี้สามารถให้ลำคลื่นหลักไปยังสัญญาณที่ต้องการเข้ามาในทิศทางที่ 315° และสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ในทิศทางของมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225° ถึงแม้ว่าทิศทางของการกำหนดจุดศูนย์นั้นไม่มีมุมที่คลาดเคลื่อนอยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่งอาจจะเกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการสร้างแต่ชุดอุปกรณ์ที่เราได้ทำการสร้างนั้นก็ยังสามารถนำมาใช้งานได้

ตารางที่ 5.4 ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการที่ 315° และมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามาทาง 45° 135° และ 225°

อุปกรณ์	ค่าที่ได้จากการวัดอุปกรณ์		ค่าความต่างเฟส (องศา)	จำนวนเชิงซ้อน
	แอมพลิจูด (dB)	มุมเฟส (องศา)		
วงจรที่ 1	-1.119	158.85	0	0.8791+0.0000i
k_1	-7.755	-85.211	115.939	-0.1790+0.3681i
k_2	-12.408	157.52	-1.33	0.2395-0.0050i
k_3	-6.639	48.856	-109.994	-0.1591-0.4375i

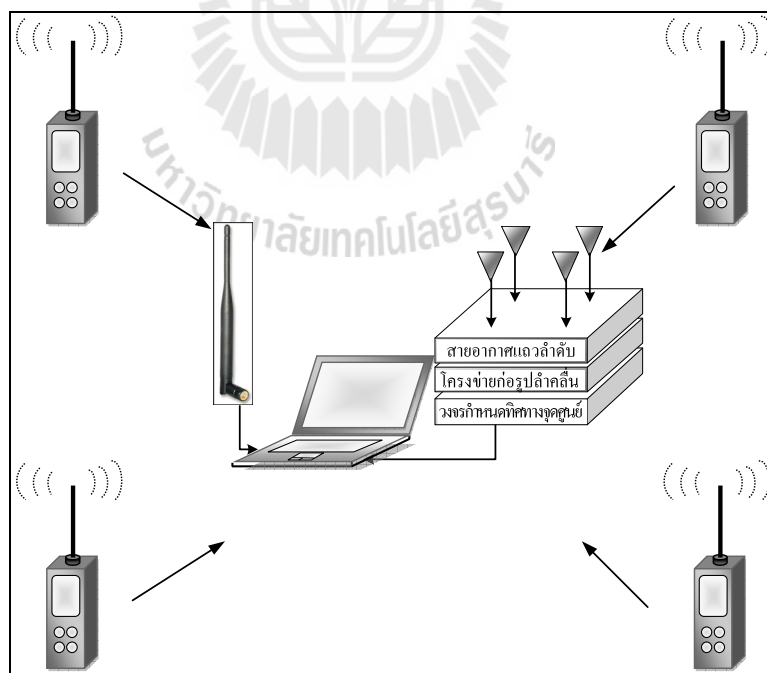


รูปที่ 5.40 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์และป้อนกลับในการจำลองแบบด้วยวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ เมื่อมีสัญญาณที่ต้องการเข้าในทิศทางที่ 315° และสัญญาณแทรกสอดมาจากทิศทางที่ 45° 135° และ 225°

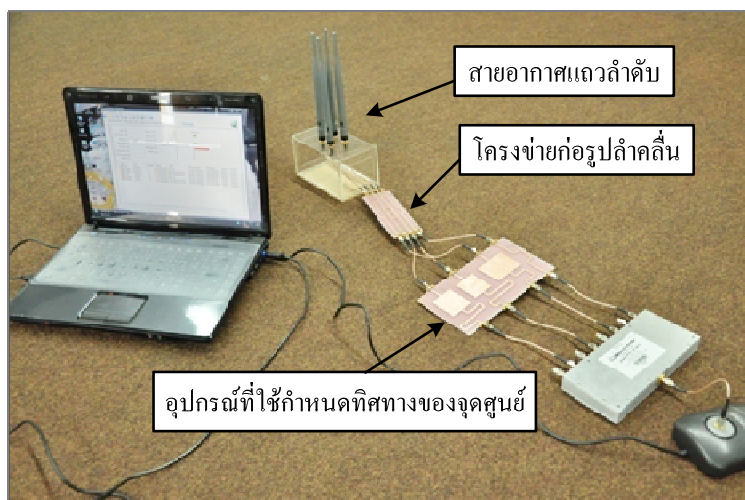
จากการวัดทดสอบอุปกรณ์จริงที่เราใช้กำหนดทิศทางของศูนย์ที่แสดงมาทั้งหมดนั้นพบว่าอุปกรณ์ทั้งหมดสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบได้ ถึงแม้ว่าจะมีในบางชุดอุปกรณ์มีแอมพลิจูดคลาดเคลื่อนไป 0.4 - 2.2 dB และมีมุมในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์คลาดเคลื่อนไป 0.15 - 14.39 องศา ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยนอกจากนี้ระบบยังสามารถหั่นลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการได้อีกด้วย ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการนำเสนอการทดสอบระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่สามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในพื้นที่ที่เราจำลองขึ้นมา เพื่อดูประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เทียบกับระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

5.3 การทดสอบระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นอย่างง่ายที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

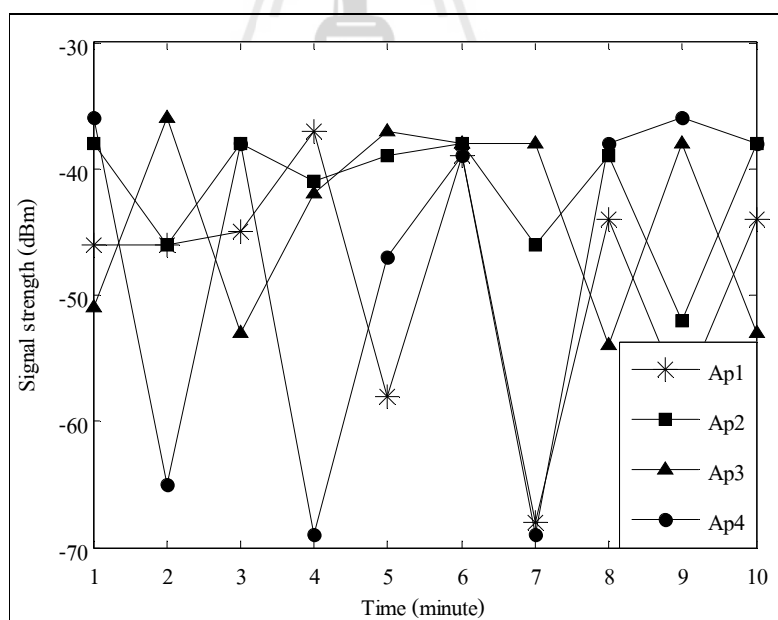
ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นมีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ที่เราได้ทำการสร้างขึ้นมานั้นเราจะนำมาทดสอบประสิทธิภาพของระบบ โดยเราจะทำการวัดความแรงของสัญญาณ (signal strength) เวลาที่ใช้ในการดาวน์โหลดข้อมูล (delay) และค่าวิสัยสามารถ (throughput) ซึ่งสามารถวัดได้จากเว็บไซต์ <http://www.markab.it/meter/> ซึ่งจะนำผลที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง ในการทดสอบผลนั้นเราจะทำการทดสอบโดยใช้โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเมฆไร้สายแสดงดังรูปที่ 5.41 จากรูปประกอบไปด้วยอุปกรณ์ทั้งหมด 5 ตัว ที่เป็นเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทางซึ่งมีการติดตั้งจุดเข้าถึงสัญญาณไว้ที่มุมทั้ง 4 มุม ของรูปที่ 5.41 ซึ่งจุดเข้าถึงสัญญาณแต่ละตัวนั้นถูกติดตั้งอยู่ห่างจากคอมพิวเตอร์ที่อยู่ตรงกลาง 2.33 เมตร และใช้กำลังในการส่งสัญญาณ 24 dBm โดยใช้คอมพิวเตอร์ที่อยู่ตรงกลางเป็นตัวที่ใช้ในการวัดทดสอบผล ในลำดับแรกเราจะใช้สายอากาศโมโนโพล ในการวัดผลก่อนแล้วจึงเปลี่ยนมาทำการวัดผลของระบบในงานวิจัยฉบับนี้ แสดงดังรูปที่ 5.42 สุดท้ายคือการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของทั้ง 2 ระบบนี้ ซึ่งจะนำเสนอในส่วนถัดไป



รูปที่ 5.41 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเมฆไร้สายที่ใช้ในการทำการทดสอบจริง



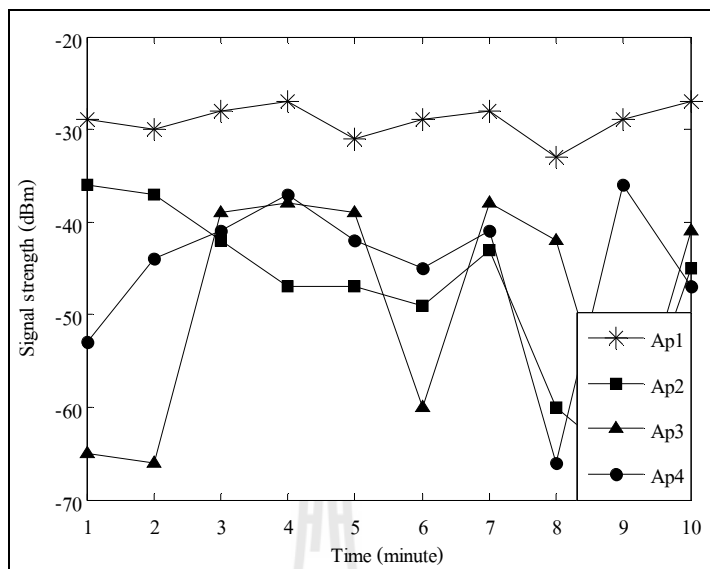
รูปที่ 5.42 อุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งตรงกลางในเครือข่ายเมฆไร้สายที่ใช้ในการทดสอบผลในงานวิจัยฉบับนี้



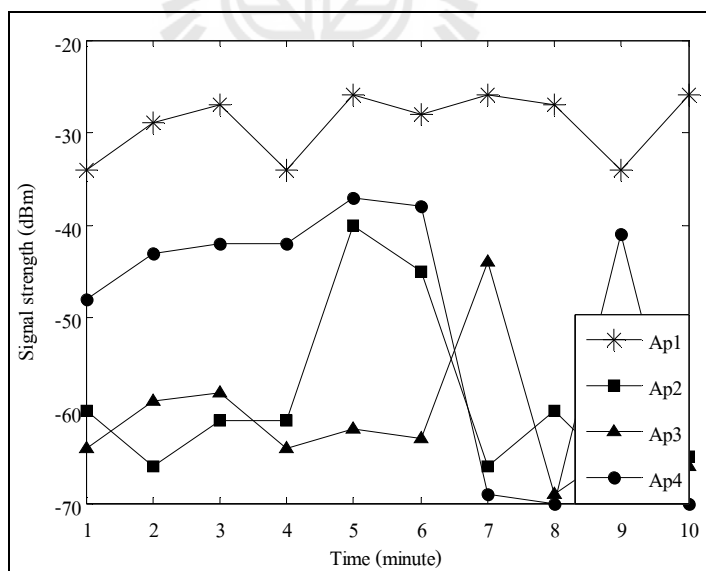
รูปที่ 5.43 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

ในการวัดความแรงของสัญญาณนั้น เราจะไม่มีการชดเชยพลังงานที่สูญเสียจากหัวต่อสายส่งสัญญาณและอุปกรณ์รวมสัญญาณ ดังนั้นจึงช่วยให้แน่ใจว่าระบบที่นำเสนอได้รับการทดสอบในทางปฏิบัติสำหรับการประยุกต์ใช้จริงและสามารถนำไปใช้งานในเครือข่ายเมฆไร้สายได้รูปที่ 5.43 แสดงกราฟความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว เทียบกับเวลาสำหรับระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางในการวัดทดสอบ ซึ่งในการวัดแต่ละครั้งนั้นเป็นระยะเวลา 1 นาทีที่ติดต่อกัน จากรูปที่ 5.43 จะเห็นว่าค่าความแรงของสัญญาณที่สายอากาศแบบรอบทิศทางรับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัวนั้นมีค่าที่แตกต่างกันไป จาก -36 ถึง -60 dBm และมีความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัวเกือบจะเท่า ๆ กัน ในทางกลับกันผลวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้จากการเปลี่ยนมาใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่นำเสนอในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5.44 – 5.47 จากผลที่ได้พบว่าค่าความแรงของสัญญาณนั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน ซึ่งจุดเข้าถึงสัญญาณในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการคือ Ap1 และทิศทางของจุดศูนย์ คือ Ap2 Ap3 และ Ap4 และจุดเข้าถึงสัญญาณในทิศทางสัญญาณที่ต้องการนั้น สามารถรับความแรงของสัญญาณได้มากกว่าจุดเข้าถึงสัญญาณที่เป็นทิศทางของจุดศูนย์ และเป็นที่น่าสนใจว่าความแรงของสัญญาณที่ต้องการที่รับได้ในทุกกรณีนั้นมีค่าความแรงของสัญญาณที่สูงกว่าความแรงของสัญญาณที่ดีที่สุดของระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง แสดงดังรูปที่ 5.48 – 5.51 จากผลที่ได้สามารถยืนยันได้ว่าการใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์นี้ สามารถเพิ่มความแรงของสัญญาณได้และในขณะเดียวกันก็สามารถลดความแรงของสัญญาณแทรกสอดได้เช่นกัน แต่ความแรงสัญญาณที่ได้นำเสนอทั้งหมดยังไม่สามารถยืนยันประสิทธิภาพของการทำงานของเครือข่ายเมฆไร้สายได้

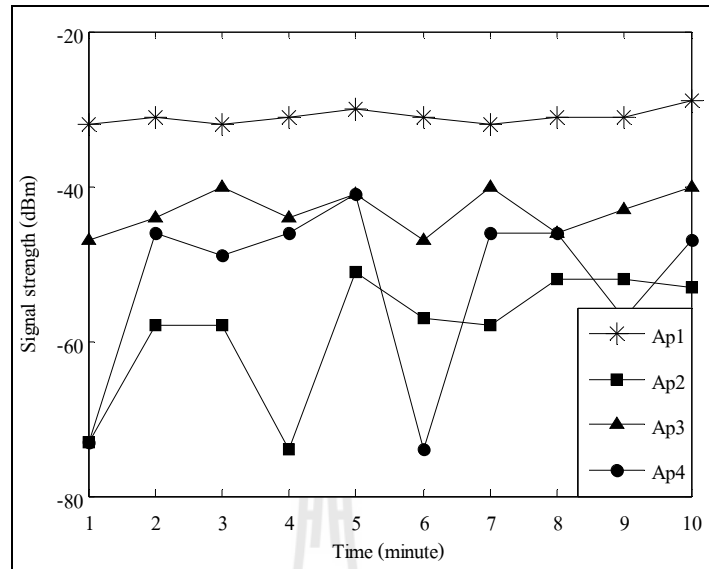
ดังนั้นเราจึงต้องทำการวัดทดสอบผลพารามิเตอร์อื่น ๆ เพื่อใช้ในการยืนยันประสิทธิภาพของการทำงานของระบบ โดยเราจะทำการวัดทดสอบเวลาที่ใช้ในการดาวน์โหลดข้อมูลและค่าวิสัยสามารถ รูปที่ 5.52 แสดงเวลาเฉลี่ยเทียบกับขนาดของไฟล์เมื่อทำการดาวน์โหลดจากรูปจะเห็นว่าสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นของงานวิจัยนี้ ช่วยให้ระบบทำการดาวน์โหลดไฟล์ขนาด 2 Mbps และ 6 Mbps ได้เร็วกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทาง เนื่องจากระบบสามารถรับความแรงของสัญญาณได้มากจึงทำให้ความน่าจะเป็นที่เกิดสัญญาณขาดหายมีน้อยไปด้วย นอกจากนี้สัญญาณที่มาจากจุดเข้าถึงสัญญาณที่เราต้องการยังมีสัญญาณที่เข้ามารบกวนน้อยเนื่องมาจากจุดเข้าถึงสัญญาณอื่น



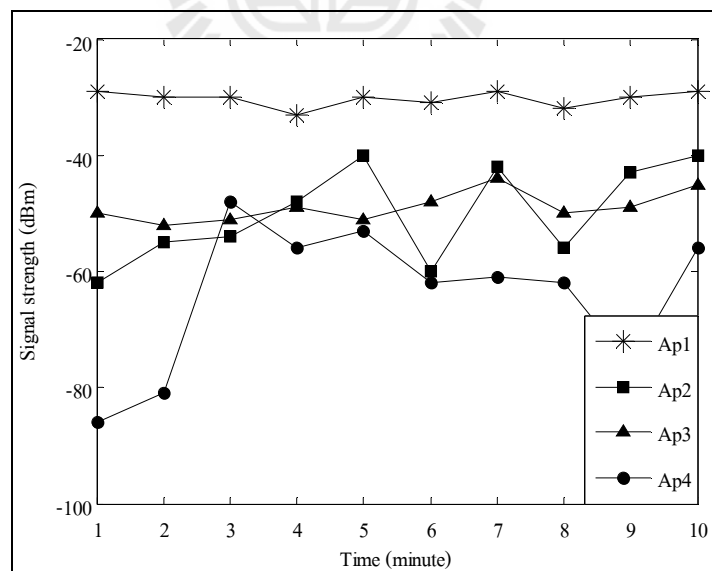
รูปที่ 5.44 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิดซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่ 135° 225° และ 315°



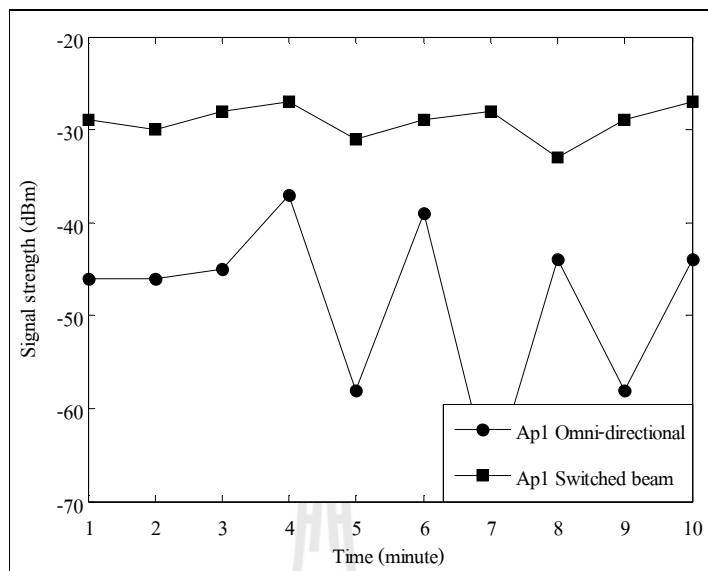
รูปที่ 5.45 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิดซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่ 45° 225° และ 315°



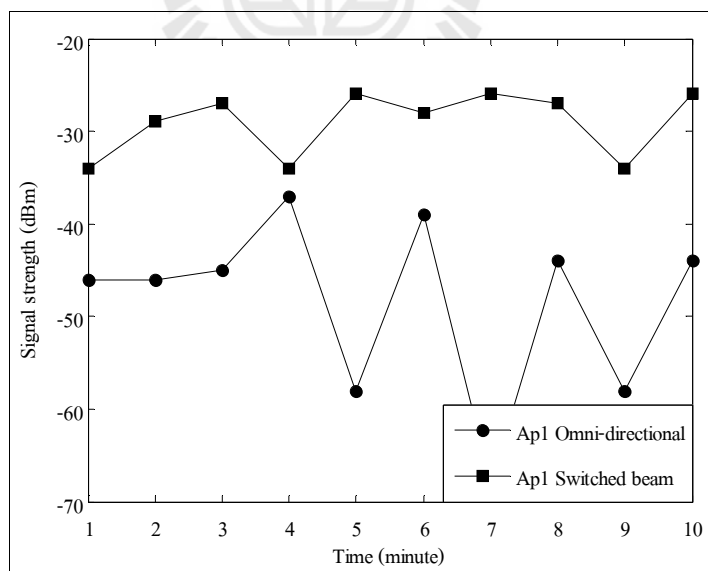
รูปที่ 5.46 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่ 45° 135° และ 315°



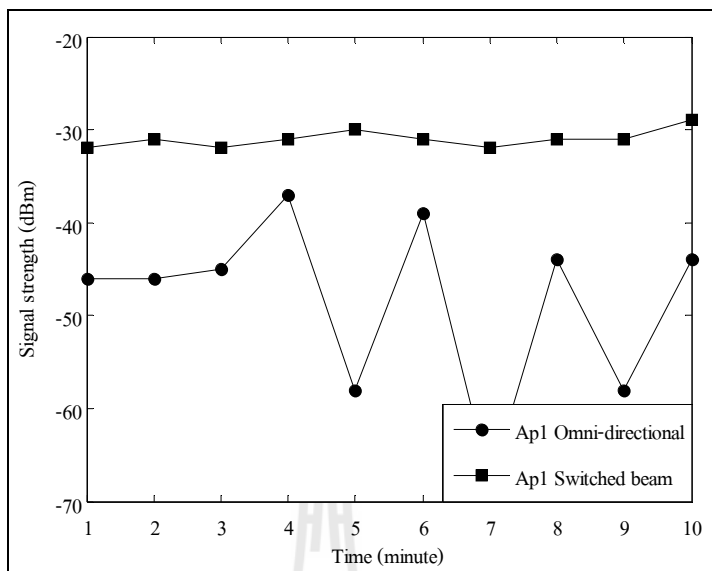
รูปที่ 5.47 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึงสัญญาณทั้ง 4 ตัว โดยใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315° และกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่ 45° 135° และ 225°



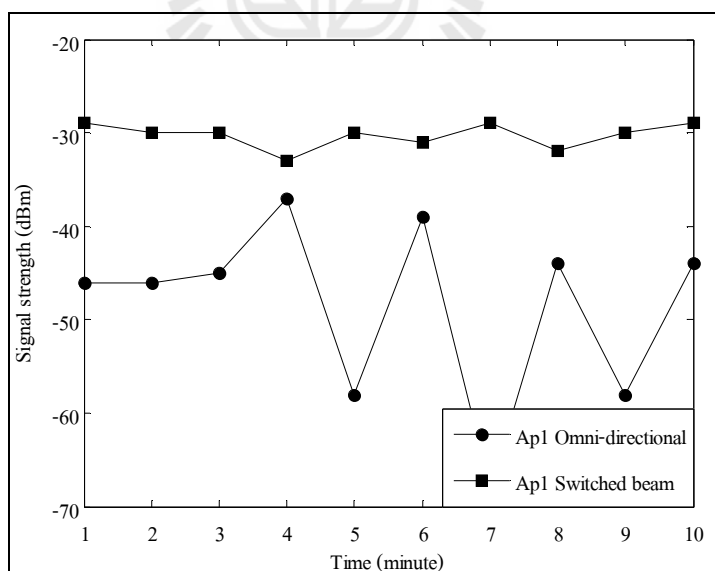
รูปที่ 5.48 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 45°



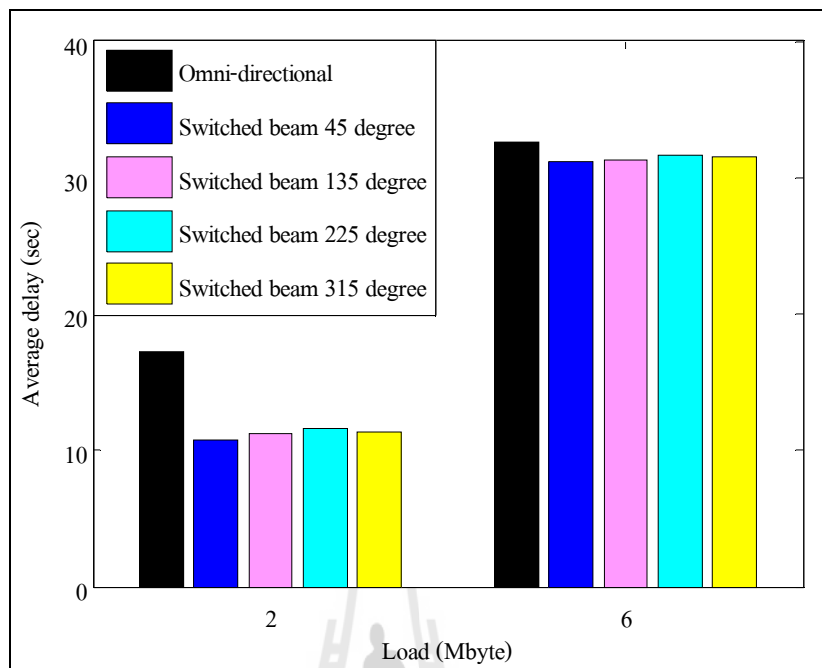
รูปที่ 5.49 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 135°



รูปที่ 5.50 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 225°

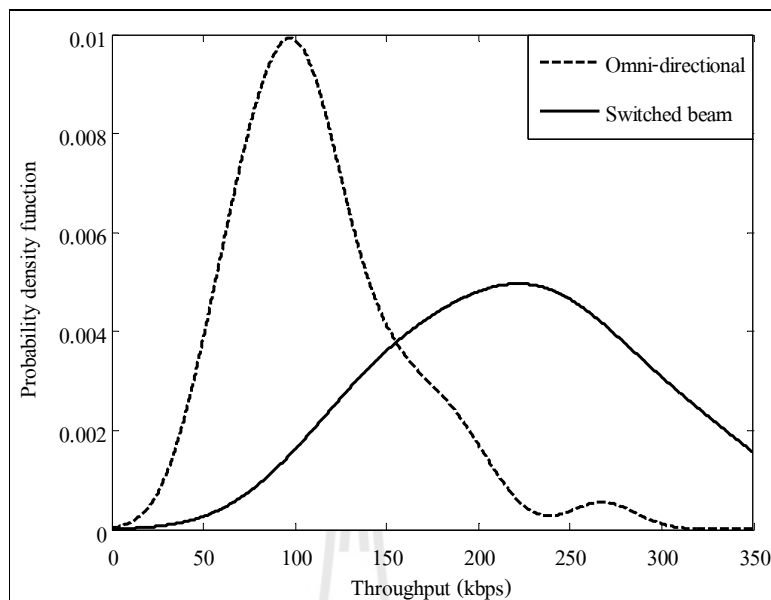


รูปที่ 5.51 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเทียบกับความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากจุดเข้าถึงสัญญาณ Ap1 ที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นในทิศทางของลำคลื่นหลักที่ 315°

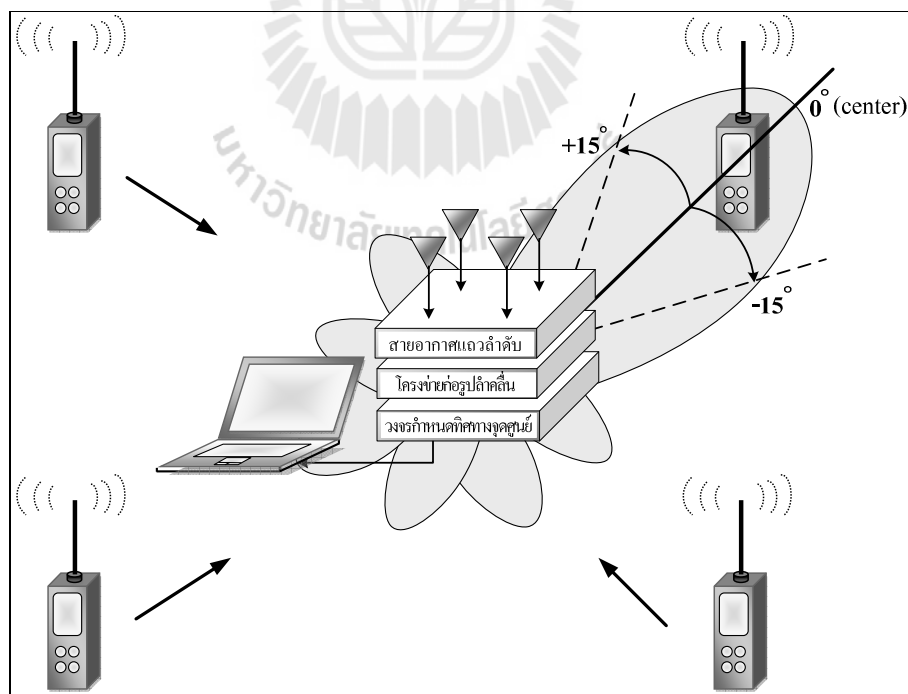


รูปที่ 5.52 เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการดาวน์โหลดข้อมูล โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์

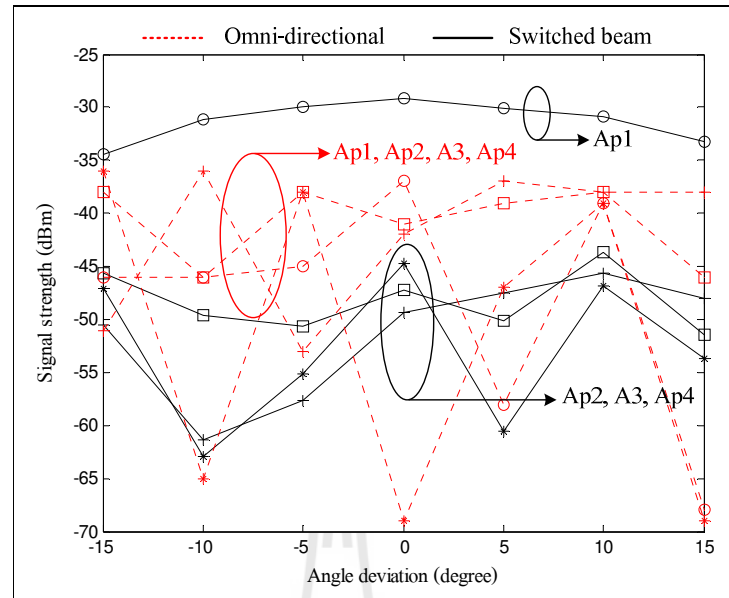
รูปที่ 5.53 แสดงฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการวัดค่าวิสัยสามารถของสายอากาศแบบรอบทิศทางและระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ของงานวิจัยนี้ โดยทำการวัดค่าวิสัยสามารถที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเป็นจำนวน 40 ครั้ง ครั้งละ 1 นาที ติดต่อกัน หลังจากนั้นจะทำการวัดค่าวิสัยสามารถของระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นของงานวิจัยนี้ โดยทำการวัดค่าจำนวน 10 ครั้ง ครั้งละ 1 นาที ติดต่อกัน ซึ่งเราวัดค่าวิสัยสามารถทั้ง 4 ทิศทางของการก่อรูปลำคลื่นหลักและนำค่าที่ได้ทั้งหมดไปพล็อตกราฟความน่าจะเป็นของการเข้าใช้งานระบบ จะเห็นว่าระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์นั้นมีค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นในการเข้าใช้งานระบบเท่ากับ 200 - 250 kbps ซึ่งดีกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทางถึง 150 kbps เนื่องจากสายอากาศแบบรอบทิศทางนั้นมีค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นในการเข้าใช้งานระบบเท่ากับ 80 - 100 kbps จากผลการทดสอบจริงได้ชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเครือข่ายเมฆไร้สายดีขึ้นเมื่อใช้งานระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นของงานวิจัยฉบับนี้ แต่ในทางปฏิบัติตำแหน่งของเครือข่ายเมฆของจุดเข้าถึงสัญญาณอาจจะไม่ได้ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งของลำคลื่นหลักเสมอไป ดังนั้นเราจึงต้องทำการวัดทดสอบผลโดยจะใช้โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเมฆไร้สายในขณะที่ตำแหน่งของจุดเข้าถึงสัญญาณเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 5.54



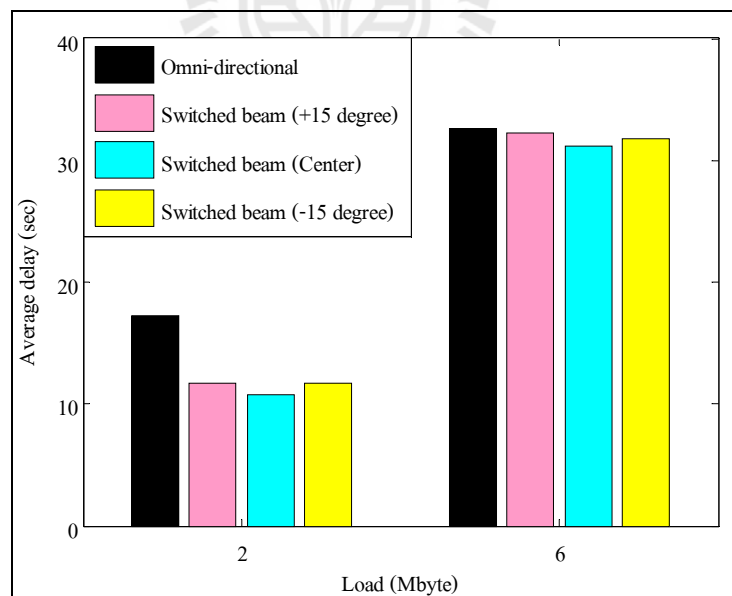
รูปที่ 5.53 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการวัดค่าวิสัยสามารถ เมื่อใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและใช้ระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นในงานวิจัยนี้



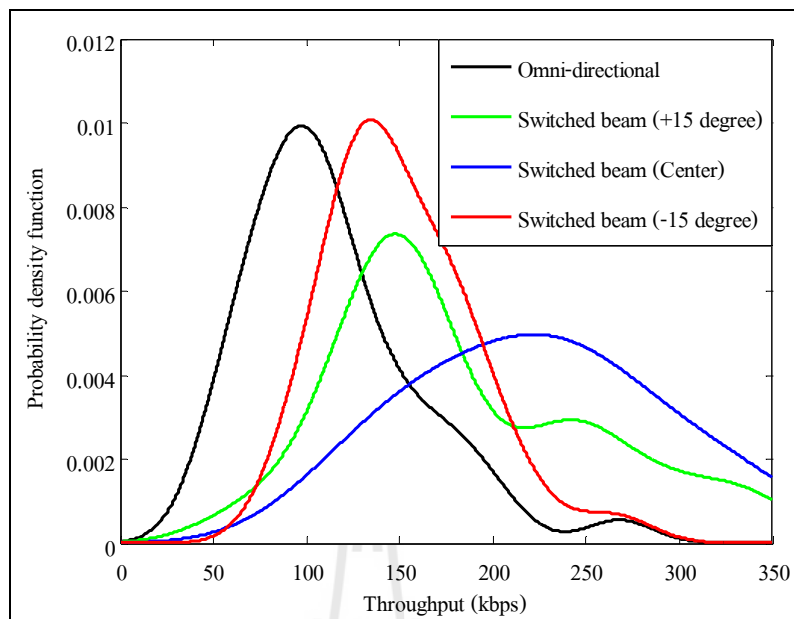
รูปที่ 5.54 รูปแบบของการทดสอบขณะที่จุดเข้าถึงสัญญาณมีการเปลี่ยนตำแหน่ง



รูปที่ 5.55 ความแรงของสัญญาณที่รับได้เทียบกับมุมที่เปลี่ยนไปของจุดเข้าถึงสัญญาณ โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นของงานวิจัย



รูปที่ 5.56 เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการดาวน์โหลดไฟล์ในขณะที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดเข้าถึงสัญญาณ โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นของงานวิจัย



รูปที่ 5.57 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการวัดค่าวิสัยสามารถ ในขณะที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดเข้าถึงสัญญาณ โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง และสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นของงานวิจัย

รูปที่ 5.55 แสดงความแรงของสัญญาณที่รับได้เทียบกับมุมที่มีการเปลี่ยนไปของจุดเข้าถึงสัญญาณเมื่อใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางและระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ จากรูปเราจะเห็นว่าในขณะที่มุมเปลี่ยนไป $+15^{\circ}$ และ -15° ระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นก็ยังคงให้ความแรงของสัญญาณที่จุดเข้าถึงสัญญาณที่รับได้มากกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทาง เพื่อยืนยันประสิทธิภาพเราจึงต้องทำการวัดทดสอบผลเวลาที่ใช้ในการดาวน์โหลดไฟล์ แสดงดังรูปที่ 5.56 คือ เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการดาวน์โหลดเทียบกับขนาดของไฟล์ จากรูปพบว่าระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นของงานวิจัยสามารถดาวน์โหลดไฟล์ได้เร็วกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทางสำหรับการดาวน์โหลดไฟล์ขนาด 2 Mbps และ 6 Mbps สุดท้ายคือการวัดทดสอบค่าวิสัยสามารถของระบบได้ผลดังรูปที่ 5.57 แสดงฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการวัดค่าวิสัยสามารถ จากผลที่ได้พบว่าสายอากาศแบบรอบทิศทางนั้นมีค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นในการเข้าใช้งานระบบ 80 - 100 kbps ซึ่งจะมีค่าที่ต่ำกว่าระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นของงานวิจัยนี้ในขณะที่มุมของจุดเข้าถึงสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไป $+15^{\circ}$ มีค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ระบบ 120 - 150 kbps เมื่อจุดเข้าถึงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงไป -15° นั้นมีค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ระบบที่ 140 - 160 kbps

และมีค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นในการเข้าใช้ระบบ 200 - 250 kbps เมื่อจุดเข้าถึงสัญญาณ อยู่ตรงตำแหน่งของลำคลื่นหลัก จากผลการทดสอบเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าระบบสายอากาศสวิตซ์ ลำคลื่นของงานวิจัย ยังสามารถทำงานได้ดีในขณะที่จุดเข้าถึงสัญญาณ ไม่ได้ติดตั้งอยู่ตรงตำแหน่ง ของลำคลื่นหลัก

5.4 กล่าวสรุป

จากการที่ได้นำเสนอผลการทดสอบจริงของชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกำหนดทิศทางของ จุดศูนย์ จากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์ทั้ง 4 ชุด สามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ได้ หลังจากนั้น จึงนำไปประกอบรวมกับสายอากาศแถวลำดับและ โครงข่ายก่อร์ูปลำคลื่นเพื่อนำไปทดสอบ ประสิทธิภาพของระบบด้วยการวัดความแรงของสัญญาณ เวลาเฉลี่ยในการดาวน์โหลดข้อมูล และค่าวิสัยสามารถ โดยนำไปเปรียบเทียบผลการทดสอบในระบบที่ใช้สายอากาศแบบ รอบทิศทาง ซึ่งผลที่ได้นั้นแสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นของงานวิจัยนี้ สามารถรับความแรงของสัญญาณได้ดีกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทางรวมไปถึงเวลาเฉลี่ย ในการดาวน์โหลดข้อมูลได้เร็วกว่า และยังมีค่าวิสัยสามารถที่ดีกว่าอีกด้วย เพื่อเป็นการยืนยัน ประสิทธิภาพของระบบในงานวิจัยนี้ เราจึงได้คำนึงถึงความเป็นจริงที่ตำแหน่งของจุดเข้าถึงสัญญาณ นั้นอาจจะถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับทิศทางของคลื่นหลัก เราจึงได้ทำการทดสอบผล พบว่าเมื่อจุดเข้าถึงสัญญาณมีการเปลี่ยนตำแหน่งไป $+15^{\circ}$ และ -15° ระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ ลำคลื่นของงานวิจัยนี้ก็ยังสามารถรับความแรงของสัญญาณได้ดีเวลาเฉลี่ยในการดาวน์โหลดไฟล์และ ค่าวิสัยสามารถที่ดีกว่าระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางซึ่งนั้นแสดงให้เห็นว่าระบบ ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานกับเครือข่ายเมฆไร้สายได้เป็นอย่างดี

บทที่ 6

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปเนื้อหางานวิจัย

เครือข่ายท้องถิ่นไร้สายมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากมีการติดตั้งระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายไว้เป็นส่วนหนึ่งของอาคาร การเชื่อมต่อสื่อสารกันระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่ายจะต้องผ่านจุดเข้าถึงสัญญาณซึ่งจุดเข้าถึงสัญญาณแต่ละจุดจะติดต่อสื่อสารกันโดยใช้สายเคเบิล จึงทำให้เกิดความสิ้นเปลืองและเกิดความยากลำบากต่อการใช้งาน ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดที่จะนำเอาคลื่นวิทยุมาใช้แทนการใช้สายเคเบิล ระบบดังกล่าวถูกเรียกว่า เครือข่ายเมฆไร้สาย ซึ่งเครือข่ายนี้จะใช้คลื่นวิทยุในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายที่มีการวางตัวแบบเมฆ เนื่องจากจุดเข้าถึงสัญญาณที่ใช้ในเครือข่ายเมฆไร้สายใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางจึงทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดจากจุดเข้าถึงสัญญาณที่อยู่ใกล้กัน จากปัญหานี้แก้ไขได้โดยใช้ระบบของสายอากาศแ่ง จึงได้มีงานวิจัยที่นำเสนอการนำเอาสายอากาศแบบมีทิศทางมาใช้แก้ปัญหาการเกิดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ นอกจากนี้ระบบสามารถเพิ่มอัตราขยายในการชี้ทิศทางในทิศของสัญญาณที่ต้องการได้อีกทั้งยังเป็นระบบที่ประหยัดพลังงานอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณแทรกสอดก็ยังคงเกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากระบบยังมีระดับพูซังที่สูง ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงสนใจวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์เพื่อที่จะนำมาใช้ร่วมกับสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นซึ่งในปัจจุบันได้มีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ แต่ก็ยังเป็นวิธีที่ยากและซับซ้อนจึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กับเครือข่ายเมฆไร้สาย ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอรูปแบบและวิธีการที่ง่ายในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์สำหรับสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้สำหรับเครือข่ายเมฆไร้สาย สายอากาศที่ใช้มีลักษณะเป็นแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 ในส่วนของการก่อรูปลำคลื่นและการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์จะใช้การกัลดายบนแผงวงจรพิมพ์ที่ได้ทำการจำลองผลจากโปรแกรม CST Microwave Studio และนำไปสร้างเพื่อและทดสอบประสิทธิภาพพบว่าระบบสามารถให้ลำคลื่นหลักในทิศทางของสัญญาณที่ต้องการได้และยังสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาได้ นอกจากนี้เรายังนำระบบของ

งานวิจัยไปทดสอบผลในสถานการณ์ที่เราจำลองแบบของเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยทำการวัดความแรงของสัญญาณ เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการดาวน์โหลดข้อมูลและค่าวิสัยสามารถเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบรอบทิศทางผลที่ได้พบว่าระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถรับความแรงของสัญญาณ ได้ดีกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งทำให้การดาวน์โหลดข้อมูลได้เร็วกว่าและยังมีค่าวิสัยสามารถที่ดีกว่าอีกด้วย ดังนั้นสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่มีความสามารถในการกำหนดจุดศูนย์ที่นำเสนอนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้งานในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย

เนื่องจากงานวิจัยเรื่องนี้ยังเป็นเพียงกรณีศึกษาเบื้องต้น ดังนั้นเราจึงได้ทำการออกแบบระบบของงานวิจัยในกรณีที่ยากก่อน นั่นคือการออกแบบด้วยการให้ระบบสามารถหันลำคลื่นหลักได้ 4 ทิศทางและสามารถกำหนดจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาได้อีก 3 ทิศทาง ซึ่งกระบวนการของการออกแบบระบบทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้ว ในบทที่ 3 และบทที่ 4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หากต้องการทิศทางของลำคลื่นหลักมากกว่า 4 ทิศทางนี้หรือการเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นหลักที่ต่างไปจากทิศทางที่ถูกกำหนดขึ้นในงานวิจัยจะทำได้โดยการออกแบบใหม่ทั้งระบบ

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันยังไม่มีเครือข่ายเมฆไร้สายในการใช้งานจริง ซึ่งในการวัดทดสอบประสิทธิภาพของระบบของงานวิจัยผลที่ได้ในบทที่ 4 นั้น จึงต้องทำการจำลองสถานการณ์ระบบของเครือข่ายเมฆไร้สายขึ้นเอง ในอนาคตเมื่อมีเครือข่ายเมฆไร้สายใช้แล้วเราจึงนำระบบของงานวิจัยนี้ไปวัดทดสอบผลเพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบของเราใช้งานในเครือข่ายเมฆไร้สายได้จริง

6.3 แนวทางในการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้ยังเป็นระบบที่สามารถก่อรูปลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ และสามารถกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการใช้สายในการเชื่อมต่อและเปลี่ยนชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางของจุดศูนย์ด้วยมืออยู่ ซึ่งในอนาคตอาจจะใช้เป็นระบบสวิตซ์ที่สั่งการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการเปลี่ยนชุดอุปกรณ์กำหนดทิศทางของจุดศูนย์ในทิศทางที่แตกต่างกันออกไป

บรรณานุกรม

- Adam, M.A.R.M., and Elkamchouchi, H.M. (2000). **A New Constrained Fast Null Steering Algorithm**. Antennas and Propagation Society International Symposium IEEE, Vol. 2, pp. 926-929.
- Agee, B. (1989). **Blind Separation and Capture of Communications Signals Using a Multitarget Constant Modulus Beamformer**. 1989 IEEE Military Communications Conf., Boston, MA, Oct. 1989.
- Ahmed, E.Z. (2005) **Smart Antenna Engineering**, ARTECH HOUSE, INC.
- Akyildiz, I.F., and Xudong, W. (2005). **A Survey on Wireless Mesh Networks**. Communications Magazine, IEEE, Vol. 43, pp. S23 - S30.
- Babich, F., Comisso, M., and Mania, L. (2007). **Multi-Antenna Techniques for Wireless Mesh Networks in an Outdoor Environment**. Communications ICC '07 IEEE International Conference, pp. 4961-4966.
- Barrick, D., and Benmoussa, Z. (2006). **The Effects of VSWR on Transmitted Power**
http://www.codar.com/images/news/newsletter_images_0806/Effects%20of%20VSWR
- Bialkowski, M.E., and Uthansakul, M. (2006). **Fully Spatial Wide-Band Beamforming Using a Rectangular Array of Planar Monopoles**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 54, No. 2, pp. 527-533.
- Chang, S.F., Chu, C.Y., Lin, K.H., and Li, W.R. (2004). **Switched-Beam Antenna Based on Modified Butler Matrix with Low Sidelobe Level**. Electronics Letters, Vol. 40, pp. 290-292.
- Crow, B.P., Kim, L.G., Sakai, P.T., and Widjaja, I. (1997). **IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks**. Communications Magazine. IEEE, Vol. 35, pp. 116-126.
- Daehyung, J., Jeongkeun, L., Sung, J.L., Taekyoung, K., Wonh, K., and Yanghee, C. (2009). **Understanding interference and carrier sensing in wireless mesh networks**. Communications Magazine IEEE, Vol. 47, No. 7, pp 102 –

109.

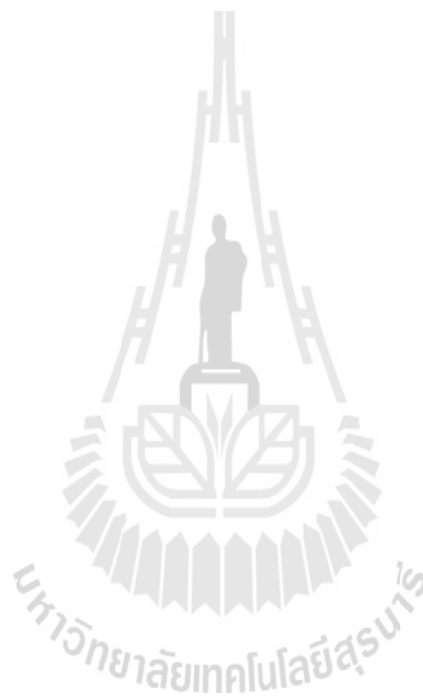
David, M.P. (1998). **Microwave Engineering 2nd edition**, John Wiley & Sons, Inc. 1998.



- Denidni, T.A., and Libar, T.E. (2003). **Wide Band Four - Port Butler Matrix for Switched Multibeam Antenna Arrays**. IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication Proceedings, Vol. 3, pp. 2461 – 2464.
- Frank, B.G., Ph.D. (2005). **Smart Antennas for Wireless Communication With MATLAB**. Fairfax, Virginia, 2005.
- Frost, L. (1972). **An Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing**. Proc. Of the IEEE, Vol. 60, No. 8, Aug. 1972.
- Haupt, R.L., Shore, R.A., and Steyskal, H. (1986). **Methods for Null Control and Their Effects on the Radiation Pattern**. IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 34, pp. 404-409.
- Khan, N.M., and Qamar, R.A. (2009). **Null steering, a comparative analysis**. Multitopic Conference, 2009. INMIC 2009. IEEE 13th International, pp. 1-5.
- Liber, J.J.C., and Rappaport, T.S. (1999). **Smart Antenna for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications**. Printice Hall PTR, NJ, 1999.
- Moody, H. (1964). **The systematic design of the Butler matrix**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 12, pp. 786-788.
- Panique, M., and Yikun, H. (2007). **Performance analysis of a null steering algorithm**. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE, pp. 4212 – 4215.
- Peng, M., and Wang, W. (2005). **Comparison of Capacity between Adaptive Tracking and Switched Beam Smart Antenna Techniques in TDD- CDMA Systems**. Microwave Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2005. (MAPE 2005). IEEE International Symposium on Vol. 1, pp. 135-139.
- Rabbi, M.F., Rahman, M.T., Salehin, G.M.A., and Uddin, M.A. (2006). **An Efficient Wireless Mesh Network: A New Architecture**. Communication Technology, 2006. ICCT '06 , pp. 1-5.
- Sarkar, D.K., Seungwon, C., and Shim, D. (1999). **A Coparison of Tracking - Beam Arrays and Swiching - Beam Arrays Operating in a CDMA Mobile Communication Channel**. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, Mag., Vol. 41, pp. 10 – 56.
- Stine, J.A., (2006). **Exploiting smart antennas in wireless mesh networks using contention access**. IEEE Wireless Communications, Vol. 13, pp. 38-49.

Uthansakul, M., and Uthansakul, P. (2009). **Low Profile DOA Finder at 2.4 GHz**. Microwave and Optical Technology Letter, to be published on January, Vol. 51, pp. 252-256.

Winters, J.H., (2006). **Smart antenna techniques and their application to wireless ad hoc networks**. Wireless Communications, IEEE, Vol. 13, No. 4, pp.77 – 83.



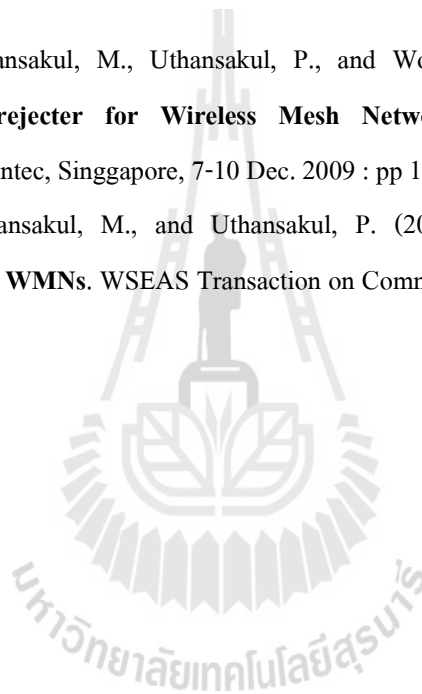
ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



**บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ
และวารสารระดับนานาชาติ**

1. Pradittara, S., Uthansakul, M., Uthansakul, P., and Wongsan, R. (2009) **Null Steering Network for Low Profile 2×2 Switched Beam Antennas**. The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation, Bangkok, Thailand, 20-23 Oct. 2009 : pp 644-647.
2. Pradittara, S., Uthansakul, M., Uthansakul, P., and Wongsan, R. (2009) **Low profile interference rejecter for Wireless Mesh Networks**. Asia Pacific Microwave Conference, Suntec, Singapore, 7-10 Dec. 2009 : pp 1802 – 1805.
3. Pradittara, S., Uthansakul, M., and Uthansakul, P. (2010) **Implementation of Beam Formation for WMNs**. WSEAS Transaction on Communication, vol. 9, Dec. 2010 : pp. 793-802.



ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเมื่อปี พ.ศ. 2540 และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2542 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland ประเทศออสเตรเลีย และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2549 จากนั้นได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ Narrowband/Wideband Smart Antenna, Phased Array Processing, DOA Estimation Method, Null Steering Scheme จนถึงปัจจุบันตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 24 บทความ และบทความในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 40 บทความ และในปี 2551 ได้เป็นผู้เขียน Book Chapter ในหนังสือ Handbook on Advancements in Smart Antenna Technologies for Wireless Networks, IGI GLOBAL, USA ในบทเรื่อง Wideband Smart Antenna avoiding Tapped-Delay Lines and Filters

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ได้รับรางวัลที่สองของ Young Scientist Contest Award จากงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 16th International Conference Microwaves, Radar and Wireless Communications ปี พ.ศ. 2549 ณ ประเทศโปแลนด์ และได้รับรางวัล Highly Recommended prize in the Student Presentation Competition จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ 9th Australian Symposium on Antenna ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย