



รายงานการวิจัย

จำนวนลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศเก่งในระบบแอลทีอี

Optimum Number of Beams for Smart Antennas in

Long Term Evolution (LTE) Systems

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

จำนวนลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศเก่งในระบบแอลทีอี

Optimum Number of Beams for Smart Antennas in

Long Term Evolution (LTE) Systems

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุงทาสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2558

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับ
โครงการวิจัยนี้

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2558

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ได้พัฒนาอย่างรวดเร็วจนก้าวมาถึงยุคที่สี่ ซึ่งเป็นการพัฒนาการสื่อสารข้อมูลด้วยความเร็วสูงและยังคงประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในระดับที่น่าพอใจไม่ว่าจะอยู่ในใกล้สถานีฐานหรือบริเวณขอบเขต อย่างไรก็ตามปัญหาที่ยังคงมีอยู่ตั้งแต่ยุคที่สองจนถึงยุคที่สามคือ ปัญหาเรื่องสัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกันหรือสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ (Inter-Cell Interference : ICI) เทคโนโลยีแอลทีอี (Long Term Evolution : LTE) เป็นเป้าหมายหนึ่งที่จะเข้ามามีบทบาทในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ โดยแอลทีอีนั้นมีเทคนิคหนึ่งเพื่อบรรเทาปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ ได้แก่ การนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ (Fractional Frequency Reuse : FFR) ซึ่งเป็นวิธีการแบ่งทรัพยากรความถี่ออกเป็นส่วนๆและนำทรัพยากรความถี่เหล่านั้นมาใช้ซ้ำ ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ ก็เป็นเทคนิคหนึ่งที่พัฒนามาจากเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ ซึ่งมีการกำหนดกำลังงานในการส่งจากสถานีฐานไปยังผู้ใช้งานให้มีระดับแตกต่างกัน แม้ว่าระบบแอลทีอีจะมีเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ เพื่อลดปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ แต่ก็ยังไม่มีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่สูงสุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาและเสนอแนวคิดในการออกแบบระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นเพื่อใช้งานในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ร่วมกับเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในแบบต่างๆ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการส่งและรับที่ดีขึ้น ซึ่งได้วิเคราะห์หาจำนวนสายอากาศและจำนวนลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับระบบเซลล์ลู่ และได้ออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นขึ้นมาใหม่ จากนั้นจึงนำไปสร้างและวัดทดสอบเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริง

Abstract

Nowadays, the mobile wireless communication technology has been rapidly developed and reached to the Fourth Generation (4G) of mobile wireless communications. The 4G has been developed for high-speed and efficient data transmission covering the area of cell center and cell edge. However, the problem of Inter-Cell Interference (ICI) remains since the 2G to 3G. Therefore, Long Term Evolution (LTE) technology is envisaged to play vital role in 4G mobile communications. In LTE systems, Fractional frequency reuse (FFR) technique has been proposed to tackle the problem of ICI. This technique offers a separation of frequency spectrum resource into sectors and reuses such frequency spectrum resource in different areas. This method also provides maximum utilization of frequency spectrum resource. A Soft FFR technique has been developed from a conventional FFR technique. This technique allocates different signal power in different areas in order to reduce interference signal within cell edge. However, the FFR technique cannot completely mitigate the ICI problem. Therefore, this research studies and proposes a new design of switched beam antennas in cooperation with FFR technique to efficiently reduce the effect of ICI, thus the system quality can be improved. In this research, the optimum numbers of antenna elements and beams for cellular systems are analyzed. Also, the new beamforming network is designed. The prototype is constructed and also tested to evaluate its real performance.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญตาราง.....	๗
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กล่าวนำ.....	7
2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่	7
2.3 เทคโนโลยีแอลทีอี	10
2.4 สายอากาศแถวลำดับ	12
2.5 ระบบสายอากาศเก่ง	18
2.6 เทคนิคการหั่นลำคลื่น.....	24
2.7 ความจุช่องสัญญาณ.....	28
2.8 กล่าวสรุป	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์	
3.1 กล่าวนำ.....	31
3.2 การจำลองเปรียบเทียบเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำใน รูปแบบต่างๆ	31
3.3 การจำลองแบบเปรียบเทียบเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ ในรูปแบบต่างๆ เมื่อใช้งานร่วมกับเทคนิคการก่อรูปลำคลื่น	34
3.4 การจำลองแบบเพื่อหาค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอด	37
3.5 การจำลองแบบเพื่อหาค่าความจุช่องสัญญาณ	39
3.6 การจำลองแบบเพื่อหาจำนวนลำคลื่นและจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม....	41
3.7 กล่าวสรุป.....	44
บทที่ 4 การออกแบบระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นแบบ 5×3	
4.1 กล่าวนำ.....	45
4.2 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น.....	46
4.3 การออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3	50
4.4 กล่าวสรุป.....	82
บทที่ 5 ผลการทดสอบระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นแบบ 5×3	
5.1 กล่าวนำ.....	85
5.2 การทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นแบบ 5×3	85
5.3 กล่าวสรุป.....	89
บทที่ 6 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปเนื้อหางานวิจัย	91
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	92

6.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต92

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์.....	8
2.2	การแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์.....	10
2.3	เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ.....	11
2.4	เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์.....	12
2.5	สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น.....	14
2.6	สายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 2×2	17
2.7	ระบบสายอากาศเก่ง.....	19
2.8	ระบบสายอากาศเก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ.....	21
2.9	โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น.....	23
2.10	โครงสร้างของสายอากาศเก่งแบบปรับตัว.....	25
2.11	องค์ประกอบของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัทเลอร์เมทริกซ์.....	26
2.12	เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3	27
2.13	ความต่างเฟสของแต่ละต้นของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น.....	28
2.14	โครงสร้างของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น 5×3	29
3.1	แบบจำลองการเกิดการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์.....	32
3.2	รูปแบบเครือข่ายแบบรังผึ้ง.....	32
3.3	แบบจำลองการใช้งานความถี่ซ้ำในรูปแบบต่างๆ.....	33
3.4	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณ รบกวนเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ.....	35
3.5	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณ รบกวนเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นร่วมเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ ในรูปแบบต่างๆ.....	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวนในกรณีที่มีการก่อรูปลำคลื่นและไม่มีมีการก่อรูปลำคลื่น.....38
3.7	ค่าฟังก์ชันความถี่สะสมเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวน ของกรณีใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นและไม่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น.....40
3.8	กราฟแสดงผลการจำลองการหาจำนวนลำคลื่นที่เหมาะสมในแต่ละเซกเตอร์.....43
3.9	กราฟแสดงผลการจำลองเพื่อหาจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม.....44
4.1	ส่วนประกอบของระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นสำหรับใช้งานในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่.....45
4.2	สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....46
4.3	การคำนวณสายอากาศไมโครสตริป.....48
4.4	สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น 5×1.....51
4.5	วงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90°.....52
4.6	ขนาดของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90°.....55
4.7	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90°.....56
4.8	ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90°.....57
4.9	มุมเฟสของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90°.....58
4.10	ขนาดของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105°58
4.11	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105°.....59
4.12	ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105°.....59
4.13	มุมเฟสของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105°.....60
4.14	ค่าพารามิเตอร์ของตัวไขว้สัญญาณ.....61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ.....61
4.16	ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเคียว ในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ.....63
4.17	มุมเฟสของวงจรไขว้สัญญาณ.....63
4.18	บล็อกไดอะแกรมของวงจรแยกสัญญาณ.....64
4.19	บล็อกไดอะแกรมของวงจรรวมสัญญาณ.....64
4.20	วงจรรวมสัญญาณและแยกสัญญาณแบบ Wilkinson64
4.21	ขนาดของวงจรรวมสัญญาณและแยกสัญญาณแบบ Wilkinson.....68
4.22	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ต ของวงจรรวมสัญญาณและแยกสัญญาณ.....69
4.23	ค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 และ 3.....69
4.24	มุมเฟสของวงจรรวมและแยกสัญญาณ.....70
4.25	วงจรเลื่อนเฟส 0°.....70
4.26	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ต และค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรเลื่อนเฟส 0°.....71
4.27	ค่ามุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 0°.....71
4.28	วงจรเลื่อนเฟส 25°.....72
4.29	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ต และค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรเลื่อนเฟส 25°.....72
4.30	ค่ามุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 25°.....73
4.31	วงจรเลื่อนเฟส 90°.....73
4.32	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ต และค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรเลื่อนเฟส 90°.....74
4.33	ค่ามุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 90°.....74
4.34	วงจรเลื่อนเฟส -20°.....75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ต และค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรถ่ายโอนเฟส -20°75
4.36	ค่ามุมเฟสของวงจรถ่ายโอนเฟส -20°76
4.37	วงจรถ่ายโอนเฟส -52.5°76
4.38	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ต และค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรถ่ายโอนเฟส -52.5°77
4.39	ค่ามุมเฟสของวงจรถ่ายโอนเฟส -52.5°77
4.40	วงจรถ่ายโอนเฟส -90°78
4.41	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ต และค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรถ่ายโอนเฟส -90°78
4.42	ค่ามุมเฟสของวงจรถ่ายโอนเฟส -90°79
4.43	วงจรถ่ายโอนเฟส -117.5°79
4.44	ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ต และค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรถ่ายโอนเฟส -117.5°80
4.45	ค่ามุมเฟสของวงจรถ่ายโอนเฟส -117.5°80
4.46	เครือข่ายก่อนรูปถ่ายคลื่นแบบ 5×381
4.47	ระบบต้นแบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นแบบ 5×384
5.1	แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ออกแบบได้จากทฤษฎี ทิศทางของลำคลื่น 27.26° 61.82° และ 96.37°86
5.2	แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ได้สร้างวัดจริง 24.82° เทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี 27.26°87
5.3	แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ได้สร้างวัดจริง 58.73° เทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี 61.82°87
5.4	แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ได้สร้างวัดจริง 94.58° เทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี 96.37°88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.5	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณ ในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ ร่วมกับ เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นจากทฤษฎี.....	88
5.6	กราฟแสดงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณ รบกวนเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ ร่วมกับ เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นจากการวัดจริง.....	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่ามุมเฟสที่ต่างกันเมื่อผ่านเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัพเลอว์เมทริกซ์.....27
2.2	ค่าการเลี้ยวมุมเฟสของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น ของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น 5×3.....28
3.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วน มาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ.....35
3.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบในกรณีที่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นร่วมเทคนิค การนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ.....36
3.3	ตารางแจกแจงอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณ แทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวน.....39
3.4	ค่าความจุของช่องสัญญาณ.....41
3.5	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาค่าจำนวนลำคลื่นที่เหมาะสมในระบบ.....42
3.6	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาจำนวนของสายอากาศที่เหมาะสม.....43
4.1	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3.....83
4.2	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่วัดได้ของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้ เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3.....84
5.1	ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบได้ค่าการเลี้ยวมุมเฟสและทิศทางของลำคลื่น.....86
5.2	ค่าความจุของช่องสัญญาณทั้ง 3 กรณี.....90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์ต้องการสื่อสารข้อมูลตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็น การโอนย้ายแฟ้มข้อมูล การสืบค้นข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต หรือการพูดคุยและส่งข้อความถึงกัน เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าผู้ใช้บริการระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่มีจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นจากอดีตจนถึงปัจจุบัน และยังคงเพิ่มอีกหลายเท่าตัวในอนาคตอันใกล้ ดังนั้นระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่จึงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เริ่มตั้งแต่ยุคแรก (First Generation: 1G) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในระบบอนาล็อกที่สามารถส่งข้อมูลได้เพียงเสียงพูดเท่านั้น จนมาถึงยุคที่สอง (Second Generation: 2G) ที่ถูกพัฒนาเป็นเทคโนโลยีระบบดิจิทัลทั้งหมดซึ่งทำให้คุณภาพของระบบสูงขึ้น ระบบในยุคนี้ได้แก่ ระบบจีเอสเอ็ม (Global System for Mobilization: GSM) โดยยุคนี้เป็นการใช้แถบความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามในยุคที่สองนี้ยังคงมีอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำ ซึ่งรองรับได้เพียงบริการด้านเสียงเท่านั้น จากนั้นจึงได้มีการนำเอาเทคนิคซีดีเอ็มเอ (Code Division Multiple Access: CDMA) เข้ามาใช้ในระบบ ทำให้สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้มากขึ้น และยังทำให้ระบบสามารถส่งข้อมูลที่มากกว่าเสียงพูดได้ เช่น ข้อความหรือรูปภาพ เป็นต้น ยุคดังกล่าวถึงเรียกว่ายุค 2.5G ต่อมาได้มีการพัฒนาเข้าสู่ยุคที่สาม (Third Generation : 3G) ที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงถึง 2 Mbps ทำให้ระบบมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลแอปพลิเคชันต่างๆ เช่นบริการทางอินเทอร์เน็ต มัลติมีเดีย วิดีโอ ภาพที่มีการเคลื่อนไหวที่สมจริง หรือการประชุมทางไกลผ่านหน้าจออุปกรณ์สื่อสาร เป็นต้น อย่างไรก็ตามเพื่อตอบสนองความต้องการและสามารถรองรับปริมาณของผู้ใช้บริการในระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ในอนาคตอันใกล้ ระบบจึงต้องถูกพัฒนาเพื่อเข้าสู่ยุคถัดไปได้แก่ ยุคที่สี่ (Fourth Generation: 4G)

จากการศึกษาปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่า 3GPP (Third Generation Partnership Project) LTE (Long Term Evolution) หรือมาตรฐาน IEEE 802.16e ถูกมองว่าเป็นเป้าหมายหนึ่งในเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่จะเข้ามามีบทบาทในระบบสื่อสารเคลื่อนที่ในยุคที่สี่ นอกจากแอลทีอี จะมีเป้าหมายหลักในการเพิ่มอัตราการรับส่งข้อมูลให้สูงขึ้นแล้ว ยังสามารถลดค่าความหน่วงเวลาซึ่งทำให้ผู้ใช้บริการสามารถใช้บริการภาพเคลื่อนไหวที่สมจริง (real time) ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้ความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น พร้อมทั้งยังสามารถ

แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในยุคก่อนหน้า ซึ่งได้แก้ปัญหาที่เกิดจากการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์ (Inter-Cell Interference :ICI) ปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อผู้ใช้บริการเคลื่อนที่มายังบริเวณขอบเซลล์ทำให้สัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานในเซลล์ของตัวเองลดลง ในขณะที่สัญญาณแทรกสอดที่ช่องสัญญาณเดียวกันที่มาจากเซลล์อื่นมีความแรงมากขึ้น ปัญหานี้จะส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณต่ำลง ในระบบแอลทีอีมีเทคนิคการแก้ปัญหาการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ ICI randomization ICI cancellation และ ICI co-ordination or avoidance ในการแก้ปัญหาด้วยวิธี ICI co-ordination จะมีเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ (Fractional Frequency Reuse: FFR) การกระทำดังกล่าวจะช่วยให้ผู้ใช้บริการที่บริเวณขอบเซลล์ได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น ต่อมาได้มีการพัฒนาให้ระบบมีคุณภาพสูงขึ้นอีกด้วยการใช้เทคนิคที่เรียกว่าเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ ซึ่งจะมีกำหนดระดับกำลังงานของสัญญาณที่ถูกส่งออกจากสถานีฐานแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่เพิ่มเติมจากเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ กล่าวคือที่บริเวณกลางเซลล์ สถานีฐานจะส่งสัญญาณด้วยกำลังที่น้อยกว่าบริเวณขอบเซลล์ ส่งผลให้การแทรกสอดของสัญญาณที่มีช่องสัญญาณเดียวกันจากเซลล์ข้างเคียงลดลง

จากการศึกษาปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่า ระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) เป็นระบบที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สาย เนื่องจากระบบสายอากาศเก่งมีความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ ในขณะที่สามารถหันพู่ข้างหรือจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การก่อรูปลำคลื่น (beamforming) สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น (switched beam antennas) เป็นสายอากาศประเภทหนึ่งที่ได้รับความนิยมของระบบสายอากาศเก่ง เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่มีความซับซ้อนและมีต้นทุนการผลิตต่ำ จากการศึกษาปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่า ได้มีงานวิจัยของ Guangyi Liu, Jianhua Zhang ,et al (2009) ที่นำเสนอแนวคิดของระบบสายอากาศเก่งที่มีความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลเมื่อผู้ใช้บริการอยู่ที่บริเวณขอบเซลล์ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ M. Lott (2006) ได้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์จากการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศเก่งในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ ส่วนในงานวิจัยของ C.F. du Toit, O.P. Gupta, W.J. Brown, D. He, J. Patel, P.F. Acsadi, C. Sui, M. Peyghaleh (2003) ได้สร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์โดยใช้สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่มีสายอากาศจำนวน 4 ต้น และติดตั้งไว้ที่สถานีฐานในสภาพแวดล้อมที่มีการใช้ความถี่ซ้ำเท่ากับ 1 3 4 และ 7 โดยผลจากงานวิจัยนอกจะแสดงให้เห็นว่า สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นสามารถลดค่าอัตราความผิดพลาดบิตและความน่าจะเป็นการติดขัดลงได้ ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Signal-to-Interference plus Noise: SINR) ให้กับระบบได้อีกด้วย ในงานวิจัยของ U. Rehfuess, K.Ivanov (2000) ได้จำลองผลโดยนำสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่นที่มีจำนวน

สายอากาศ 4 ต้นมาติดตั้งที่สถานีฐาน โดยผลจากงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่า ระบบสายอากาศเก่งสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนสัญญาณข้อมูลต่อสัญญาณแทรกสอด และอัตราบิดได้ และในงานวิจัยของ Thomas Baumgartner and Ernst Bonek (2006) ผู้วิจัยได้แสดงการจำลองแบบโดยกำหนดจำนวนลำคลื่นของสายอากาศเก่งที่เหมาะสมสำหรับครอบคลุมพื้นที่เซลในระบบยูเอ็มทีเอส (Universal Mobile Telecommunications System : UMTS) เพื่อให้พื้นที่นั้นใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลจากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้ศึกษามานี้ทำให้สรุปได้ว่า แนวคิดในการใช้ระบบสายอากาศเก่งที่ก่อรูปลำคลื่นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานในระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ได้ แต่ก็ยังไม่มียานวิจัยใดที่นำเสนอระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นสำหรับใช้ในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอแนวคิดที่ศึกษาและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายไร้สายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ โดยใช้เทคโนโลยีแอลทีอี ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดที่เกิดจากปัญหาสัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกัน หรือที่เรียกว่าสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซล ซึ่งปัญหานี้ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณขอบเซล กล่าวคือเมื่อผู้ใช้บริการเคลื่อนที่ไปยังบริเวณขอบเซลจะได้รับพลังงานของสัญญาณที่มาจากสถานีฐานของตนที่มีระดับต่ำ ในขณะที่สัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานข้างเคียงมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวน (Signal to Interference plus Noise Ratio : SINR) มีค่าต่ำมาก ดังนั้นระบบแอลทีอีจึงมีเทคนิคหนึ่งเพื่อบรรเทาปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลได้แก่ เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ ซึ่งเป็นวิธีการแบ่งทรัพยากรความถี่ออกเป็นส่วนและนำทรัพยากรความถี่เหล่านั้นมาใช้ซ้ำในพื้นที่ที่แตกต่างกัน รวมไปถึงเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนามาจากเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ โดยมีการกำหนดกำลังงานของสัญญาณที่ส่งจากสถานีฐานไปยังผู้ใช้บริการในระดับที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีฐานและผู้ใช้บริการ กล่าวคือหากผู้ใช้บริการอยู่ที่บริเวณขอบเซล สถานีฐานจะส่งสัญญาณที่มีกำลังสูงไปยังผู้ใช้บริการ และในทางกลับกัน เมื่อผู้ใช้บริการอยู่ที่บริเวณกลางเซล สถานีฐานจะส่งสัญญาณที่มีกำลังงานที่ต่ำกว่า ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ช่วยลดปัญหาของสัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานข้างเคียงได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าในระบบแอลทีอีจะมีเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ที่ช่วยลดปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลแต่ก็ยังไม่มียานวิจัยสูงสุด ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแอลทีอีที่ใช้ร่วมกับเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบต่างๆ โดยมีแนวคิดในการนำเทคโนโลยีสายอากาศเก่งมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งประเภทของสายอากาศเก่งที่เลือกใช้คือสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นด้วยเหตุผลที่ว่า สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นมีความซับซ้อนน้อยทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ อีกทั้งประสิทธิภาพของระบบ

สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นอยู่ในระดับที่น่าพอใจและได้รับความนิยมนเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยในงานวิจัยนี้จะออกแบบและสร้างสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่สามารถนำไปติดตั้งที่สถานีฐานเพื่อรองรับการใช้งานในเครือข่ายไร้สายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ เพื่อให้มีประสิทธิภาพของระบบแอลทีอีที่ตีมากขึ้นในรูปของค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวน และค่าความจุของช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอองค์ความรู้ใหม่ 2 องค์ความรู้ได้แก่

1. แนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ โดยการลดปัญหาการแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกัน
2. แนวคิดในการออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 ระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ได้

1.3.2 สามารถออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่

1.4 ข้อยกเว้นเบื้องต้น

1.4.1 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองแบบระบบที่ใช้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น

1.4.2 ทดสอบวัดผลระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 จำลองผลระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองระบบ

1.5.2 ออกแบบและสร้างระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่

1.5.3 ทดสอบวัดผลระบบต้นแบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นและวิเคราะห์ผล

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

1. สํารวจปรัทัศนัวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบสายอากาศแก่ง เครื่องข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่และเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ
3. สร้างแบบจำลองระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลําคลื่นที่ใช้งานในระบบเครื่องข่ายเคลื่อนที่
4. ออกแบบระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลําคลื่นที่สามารถใช้กับเครื่องข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ได้
5. สร้างระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลําคลื่น
6. ทดสอบระบบต้นแบบและวิเคราะห์ผล

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

1. การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบสายอากาศแบบรอบทิศทางเทียบกับระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตซ์ลําคลื่นร่วมกับเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ โดยเขียนโปรแกรมจำลองแบบด้วยโปรแกรมแมทแลบ
3. สร้างระบบต้นแบบของสายอากาศแบบสวิตซ์ลําคลื่นที่เหมาะสม สำหรับเครื่องข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. เครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย (network analyzer)
3. โปรแกรมแมทแลบ
4. โปรแกรม CST Microwave Studio

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรมแมทแลบ
2. เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบระบบต้นแบบ

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลที่ได้จากการทดสอบระบบต้นแบบร่วมกับการจำลองผลในคอมพิวเตอร์แล้วนำไปวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยในรูปแบบของกราฟ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้ระบบต้นแบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้งานในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่

1.7.2 สามารถแก้ปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพในระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ได้

บทที่ 2

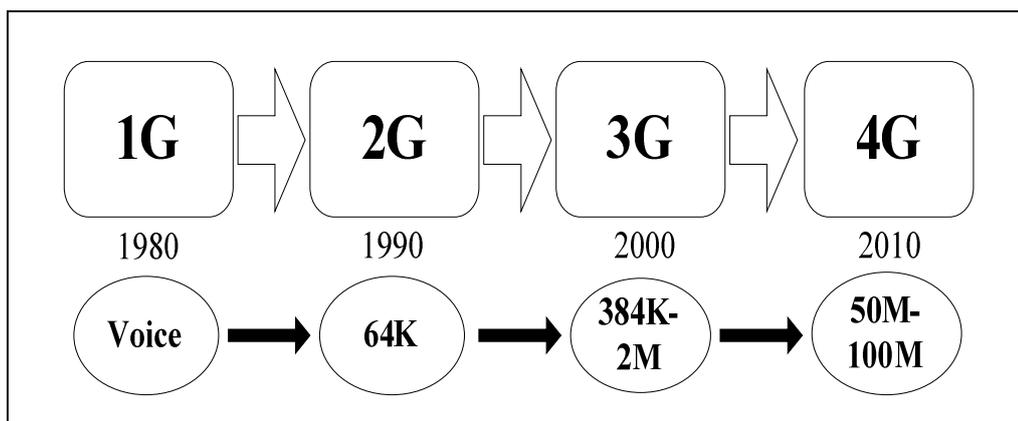
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานงานวิจัยชิ้นนี้ซึ่งแบ่งเป็นทั้งหมดแปดส่วน ส่วนแรกคือการกล่าวนำเข้าสู่เนื้อหา ส่วนที่สองจะเป็นเรื่องของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ โดยจะกล่าวถึงความเป็นมาของระบบตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ต่อมาในส่วนที่สามจะเป็นส่วนของเทคโนโลยีแอลทีอี (Long Term Evolution : LTE) โดยกล่าวถึงข้อมูลของเทคโนโลยีแอลทีอีที่จะเข้ามามีบทบาทในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ ในส่วนที่สี่จะกล่าวถึงสายอากาศแถวลำดับที่ใช้ในระบบสายอากาศแก่ง โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับทั้งแบบเชิงเส้นและแบบเชิงระนาบ ในส่วนที่ห้าจะกล่าวถึงระบบสายอากาศแก่งซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นและแบบปรับตัว ในส่วนที่หกจะมีเนื้อหาต่อเนื่องกับเนื้อหาของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ต้องมีเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ส่วนที่เจ็ดจะกล่าวถึงความจุของช่องสัญญาณซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของระบบได้ และส่วนสุดท้ายในส่วนที่แปดจะเป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดในบทนี้

2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่

ระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ที่สามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆได้มากมาย ตั้งแต่ระบบที่มีความซับซ้อนน้อยจนถึงซับซ้อนมาก หรือตั้งแต่การใช้บริการแค่เสียงพูดไปจนถึงส่งเพลง ภาพนิ่ง หรือภาพเคลื่อนไหวได้ โดยในที่นี้จะกล่าวถึงระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์ ซึ่งระบบที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยถือว่าเป็นตัวแทนของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่เนื่องจากเป็นระบบที่มีอิทธิพลกับชีวิตประจำวันมากที่สุดในปัจจุบัน ถึงขนาดที่มีการจัดให้โทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นปัจจัยที่ห้าสำหรับชีวิตมนุษย์ เพราะความสะดวกที่ใช้งานได้ทุกที่และมีประสิทธิภาพในการติดต่อสื่อสารทำให้ระบบนี้ได้รับความนิยมมาก ในปี ค.ศ.1979 ได้มีการพัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นแบบเซลลูลาร์หรือที่เรียกว่า โทรศัพท์มือถือ มีการนำไปใช้งานครั้งแรกพร้อมกันที่โตเกียว ประเทศญี่ปุ่น และชิคาโก ประเทศสหรัฐอเมริกา หลังจากนั้นต่อมาโทรศัพท์มือถือก็แพร่หลายอย่างรวดเร็วแพร่กระจายเข้าสู่ทุกประเทศ โดยเฉพาะประเทศไทย มีจำนวนผู้ใช้งานที่ขยายตัวมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา สำหรับวิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์เซลลูลาร์นี้ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีการจัดประเภทเป็นยุคต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 2.1 วิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์

2.2.1 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่หนึ่ง (First Generation : 1G)

เป็นยุคแรกของการพัฒนาเครือข่ายแบบเซลลูลาร์ การรับส่งสัญญาณนั้นใช้วิธีการมอดูเลตสัญญาณอนาล็อกเข้าช่องสื่อสารโดยวิธีนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่จำนวนสัญญาณ เพราะว่ามีจำนวนช่องสัญญาณที่น้อย ทำให้ติดขัดในเรื่องของการขยายจำนวนหมายเลขได้ในอนาคต ดังนั้นต่อมาจึงได้มีการพัฒนาระบบดิจิทัลขึ้นโดยมีการเข้าช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลาเพื่อแก้ไขปัญหาการมีช่องสัญญาณที่จำกัด

2.2.2 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สอง (Second Generation : 2G)

เป็นยุคที่มีการพัฒนาต่อมาจากยุคแรกด้วยการเข้ารหัสสัญญาณเสียงและบีบอัดสัญญาณเสียงในรูปแบบดิจิทัลให้มีขนาดข้อมูลที่น้อยลงเหลือเพียง 9 กิโลบิตต่อวินาที (Kbit/Sec) ต่อช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นเหตุผลที่คุณภาพของสัญญาณเสียงในระบบโทรศัพท์มือถือคือลดลง แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้เพราะสัญญาณรับส่งเป็นแบบดิจิทัลจึงมีความเพี้ยนหรือสัญญาณแทรกสอดต่ำ ในยุคที่สอง เน้นการพัฒนาระบบในเรื่องการแบ่งเวลาในช่องสัญญาณ โดยใช้เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA) และเทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบเข้ารหัส (Code Division Multiple Access : CDMA) มากกว่าการใช้งาน โดยใช้เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access : FDMA)

เมื่อระบบโทรศัพท์มือถือในยุค 2G ใช้รหัสดิจิทัล การกำหนดเส้นทางและการหาเส้นทางเชื่อมกับสถานีฐานจึงทำได้ดี ระบบการโรมมิ่ง (roaming) คือการนำเอาโทรศัพท์มือถือไปใช้ในเครือข่ายอื่น เช่นในต่างประเทศจึงทำได้และก่อให้เกิดระบบโทรศัพท์มือถือแบบจีเอสเอ็ม (Global System for Mobilization : GSM) ต่อมาได้มีการพัฒนาจากระบบโทรศัพท์ยุคที่สองโดยเพิ่มเติมเทคนิคบางอย่างเท่านั้น เป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สองครึ่ง (Second and Half Generation :

2.5G) เป็นยุคที่ไม่เป็นที่ยอมรับอย่างเป็นทางการ ระบบในสถานีฐานส่วนใหญ่ยังคงสามารถใช้งาน ได้เหมือนเดิม 2.5G เป็นยุคที่มีการเน้นเรื่องของการรับส่งข้อมูลผ่านทางเครือข่าย โทรศัพท์เคลื่อนที่ เนื่องมาจากว่าระบบในยุค 2G นั้นไม่สามารถให้บริการในเรื่องการรับ-ส่งข้อมูล ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะว่าระบบไม่ได้ถูกออกแบบมาให้สนับสนุนในเรื่องดังกล่าวโดยเฉพาะ ดังนั้นเครือข่ายในยุค 2.5G จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการด้านการรับส่งข้อมูลของ ลูกค้า โดยมีการอัปเกรด (Upgrade) จากเครือข่ายยุค 2G เดิม ซึ่งเครือข่ายในยุค 2.5G นี้คือ เครือข่าย CDMA 2000 1X , เครือข่ายจีพีอาร์เอส (General Packet Radio Service : GPRS) ได้อัปเกรด เพิ่มเติมกลายเป็นเครือข่ายเอดจ์ (Enhanced Data rate for GSM Evolution : EDGE) ซึ่งเครือข่ายใน ยุคนี้จะใช้การรับส่งข้อมูลเป็นแพ็คเกจ (packet)

2.2.3 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สาม (Third Generation : 3G)

เครือข่ายในยุค 3G นี้จะเป็นเครือข่ายที่พัฒนามาจากเครือข่ายในยุค 2.5G ซึ่งเป็น เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการด้านการรับส่งข้อมูลที่ มากขึ้น ถึงแม้ว่าเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุค 2.5G จะสามารถให้บริการในเรื่องของการรับส่ง ข้อมูลแล้วนั้น แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความเร็วในการรับส่งข้อมูล ดังนั้นระบบ 3G จึงได้ถูก ออกแบบมาเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าในเรื่องการรับส่งข้อมูลที่หลากหลาย ขึ้นและรวดเร็วขึ้น ระบบ 3G ที่ได้พัฒนาขึ้นครั้งนี้เป็นแบบดิจิทัลแพ็คเกจ โดยเน้นการรองรับ ระบบมัลติมีเดียที่ให้ทุกคนเข้าถึงข้อมูลข่าวสารได้ทุกที่ ทุกเวลา เป้าหมายของความเร็วการเชื่อมต่อ เครือข่ายแบบ 3G อยู่ที่ 2 เมกะบิตต่อวินาที (Mbit/sec) ในอาคารหรือในบ้าน และหากอยู่ในรถยนต์ ที่เคลื่อนที่ อัตราการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 144 กิโลบิตต่อวินาที (Kbit/sec) การรับส่งข้อมูลของ โทรศัพท์มือถือจะรองรับการประยุกต์ใช้งานทุกรูปแบบ ตั้งแต่การโทรศัพท์แบบวิดีโอคอนเฟอเรนซ์ (Video Conference) การส่งโทรสารแบบ G4 (ส่งภาพสี แบบความละเอียดสูง) การเชื่อมต่อ ระบบเว็บ (Wireless Application Protocol : WAP)

ยูเอ็มทีเอส (Universal Mobile Telecommunications System : UMTS) เป็นเครือข่ายในยุค 3G ที่มีการพัฒนาการมาจากเครือข่าย GSM , GPRS และ EDGE ซึ่งหลายๆครั้งอาจเรียกได้ว่าเป็น เครือข่าย W-CDMA โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานด้านการรับส่งข้อมูลที่ มากขึ้น เครือข่าย UMTS นั้นจะมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงถึง 22 เมกะบิตต่อวินาที (Mbit/sec) ซึ่งมีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่มากกว่าเครือข่าย EDGE ที่ให้บริการในปัจจุบัน

2.2.4 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สี่ (Fourth Generation : 4G)

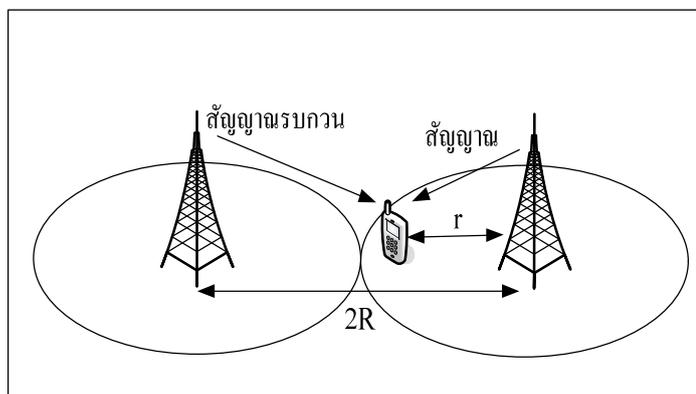
4G นี้เป็นชื่อเรียกอย่างไม่เป็นทางการ เพราะยังไม่มีการพัฒนาที่เด่นชัดและ แตกต่างจากระบบ 3G แต่อย่างไรก็ตามในบางกลุ่มได้ให้คำจำกัดความไว้ว่าระบบโทรศัพท์ยุคนี้

น่าจะรองรับการตอบสนองของภาพเคลื่อนไหวความจริงเสมือนแบบ 3 มิติหรือระบบวีดีโอที่สามารถโต้ตอบได้ทันที รวมถึงความสามารถของเครื่องโทรศัพท์ที่ฉลาดขึ้นและสามารถใช้จ่ายผ่านโทรศัพท์ที่ได้ ซึ่งก็ต้องมีประเด็นเรื่องความปลอดภัยเข้ามาเกี่ยวข้องอย่างมาก

ในยุคนี้ได้มีการวางกรอบแนวทางการพัฒนาไว้โดยใช้เทคโนโลยีเรื่องโมโม่ (Multiple Input Multiple Output : MIMO) และ โอเอฟดีเอ็ม (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM) สำหรับตัวเครื่องโทรศัพท์จะต้องมีการพัฒนาความฉลาดให้เหมือนมีเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก โดยต้องระบบปฏิบัติการในโทรศัพท์ด้วย

2.3 เทคโนโลยีแอลทีอี

เทคโนโลยีแอลทีอี (Long Term Evolution : LTE) เป็นส่วนหนึ่งในมาตรฐานสากล จากกลุ่ม Third Generation Partner Ship Project (3GPP) เป็นระบบที่พัฒนาต่อจากระบบ 3G เป้าหมายหลักของ LTE คือ มีอัตราการส่งข้อมูลสูง สามารถลด latency หรือค่าความหน่วงเวลาซึ่งทำให้ผู้ใช้บริการสามารถใช้บริการภาพเคลื่อนไหวที่สมจริง ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้ความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น พร้อมทั้งยังสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในยุคก่อนหน้า ซึ่งได้แก่ปัญหาที่เกิดจากการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์

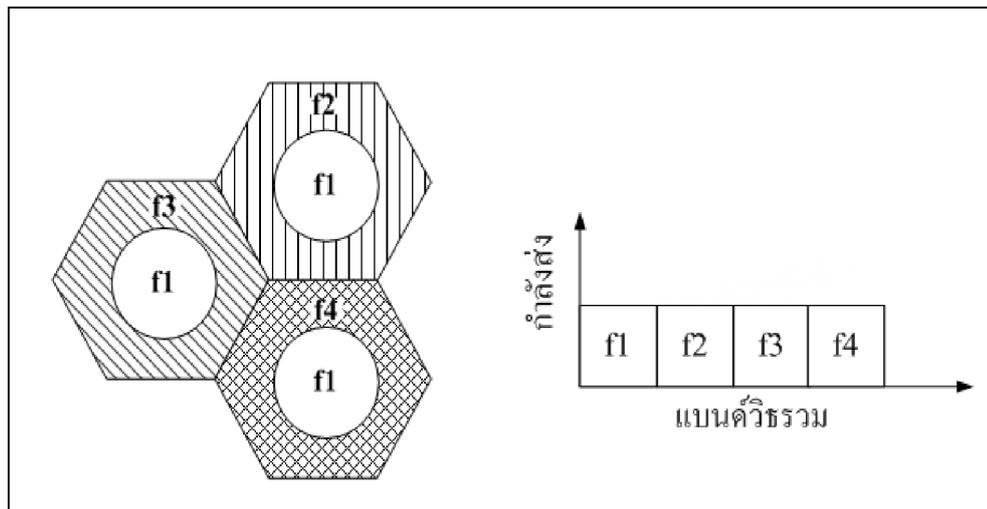
ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อผู้ใช้งานเคลื่อนที่มายังบริเวณขอบเซลล์จะทำให้สัญญาณที่ได้รับจากเซลล์ตัวเองลดลงและสัญญาณรบกวนจากเซลล์อื่นเพิ่มขึ้น โดยทำให้ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวม (Signal to Interference Ratio : SIR) มีค่าลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานลดลง

ในระบบแอลทีอี มีเทคนิคการแก้ปัญหานี้ โดยสามารถแยกได้เป็น 3 แบบ คือ ICI

randomization , ICI cancellation และ ICI co-ordination or avoidance โดยในที่นี้จะกล่าวถึง ICI co-ordination or avoidance ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการใช้ทรัพยากรความถี่ที่ใช้ในเซลล์แตกต่างกันเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในบริเวณขอบเขตของสถานีฐานให้ดีขึ้น โดยมีการพัฒนาเทคนิคการใช้ทรัพยากรความถี่เพื่อนำมาใช้งานเป็น 2 แบบ ดังนี้

2.3.1 เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ

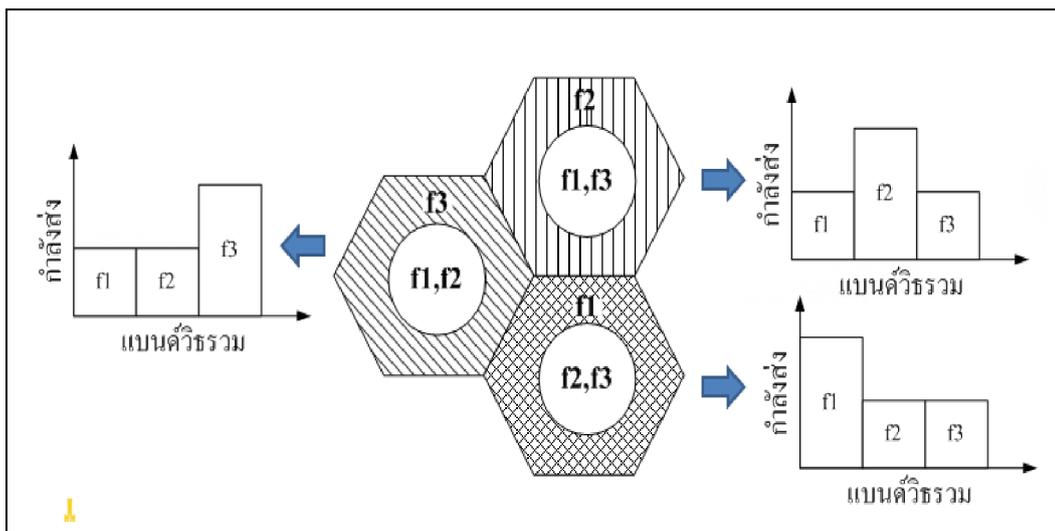
เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ (Fractional Frequency Reuse : FFR) เป็นเทคนิคหนึ่งในการบรรเทาปัญหาการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์ เป็นวิธีการแบ่งทรัพยากรความถี่ออกเป็นส่วนและนำทรัพยากรความถี่เหล่านั้นมาใช้ใหม่ เป็นการใช้ทรัพยากรให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ

2.3.2 เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์

เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์ (Soft Fractional Frequency Reuse : Soft FFR) เป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนามาจากเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ โดยมีการกำหนดกำลังงานของสัญญาณที่ส่งจากสถานีฐานไปยังผู้ใช้บริการในระดับที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีฐานและผู้ใช้บริการ กล่าวคือหากผู้ใช้บริการอยู่ที่บริเวณขอบเขต สถานีฐานจะส่งสัญญาณที่มีกำลังสูงไปยังผู้ใช้บริการ และในทางกลับกัน เมื่อผู้ใช้บริการอยู่ที่บริการกลาง เซลล์ สถานีฐานจะส่งสัญญาณที่มีกำลังงานที่ต่ำกว่า ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ช่วยลดปัญหาของสัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานข้างเคียงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์

2.4 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับ (antenna array) เป็นการนำสายอากาศมาเรียงตัวกันในรูปแบบต่างๆ ซึ่งสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น เรียกว่า องค์ประกอบ (element) การนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้น ทำได้โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลายๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ สายอากาศแถวลำดับจึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญมากต่อระบบสายอากาศเก่งที่ทำให้สามารถหันลำคลื่นหลัก (main lobe) ไปยังทิศทางตามสัญญาณที่ต้องการและสามารถหันลำคลื่นรอง (side lobes) หรือจุดศูนย์ (nulls) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น สายอากาศแถวลำดับที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นและสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขป ดังต่อไปนี้

2.4.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear antenna array) เป็นสายอากาศแถวลำดับที่พื้นฐานและมีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด คือประกอบด้วยสายอากาศแต่ละต้นวางตัวเรียงกันเป็นเส้นตรงซึ่งอาจจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถวลำดับในรูปที่ 2.5 เป็นสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน N ต้นหรือ $N \times 1$ ต้น ในการวางตัวสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่น

ของสายอากาศโดยปกติแล้วสายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1)

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

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น

ในรูปที่ 2.5 แสดงถึงสายอากาศแบบเชิงเส้น $N \times 1$ ต้น โดยที่ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้นและมีแอมพลิจูดเท่ากัน ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีรูปแบบดังกล่าวจะเรียกว่าแถวลำดับสม่ำเสมอ (uniform array) ซึ่งจะมีองค์ประกอบแถวลำดับที่เหมือนกัน มีการป้อนกระแสให้กับทุกๆ องค์ประกอบเท่ากัน และจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกันไปอย่างเท่าๆกัน เราสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแถวลำดับนี้จากการคูณกันระหว่างค่าพลังงานของสายอากาศต้นเดียวที่จุดอ้างอิงหรือจุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor : AF) ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

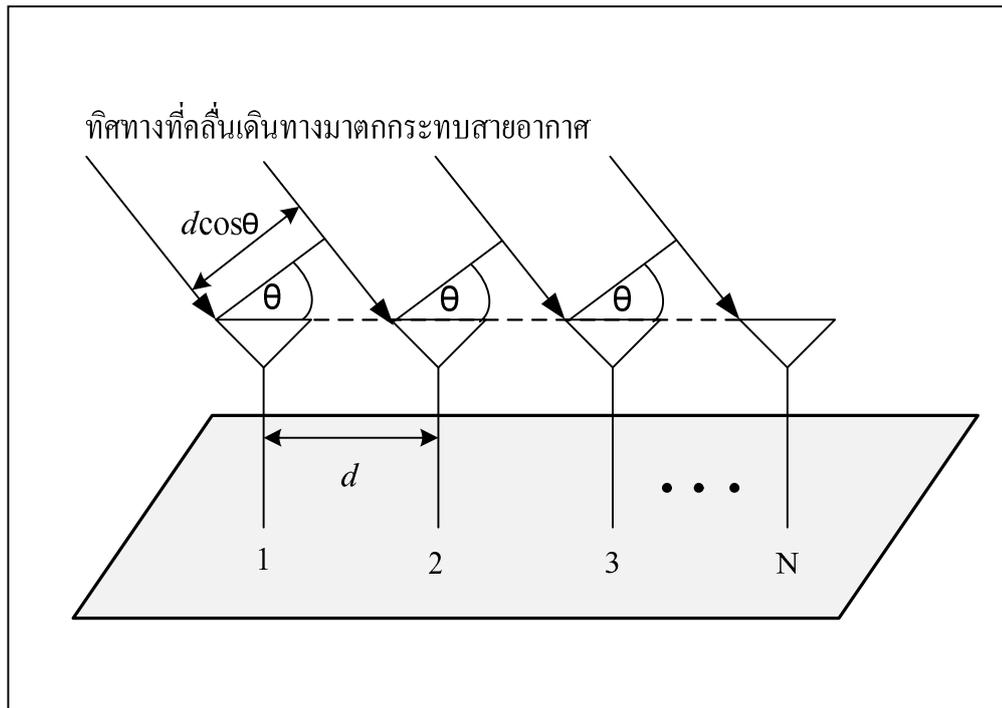
$$AF = \sum_{n=1}^n e^{j(n-1)\Psi} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\Psi = kd \cos \theta + \beta$ k คือหมายเลขคลื่น (wave number) $= 2\pi/\lambda$ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นและ β คือ ความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น จากสมการ (2.4) เราสามารถลดรูปของสมการได้ดังนี้

$$(AF)e^{jN\Psi} = e^{j\Psi} + e^{j2\Psi} + e^{j3\Psi} + \dots + e^{j(N-1)\Psi} + e^{jN\Psi} \quad (2.5)$$

แทนสมการ (2.4) ลงใน (2.5) จะสามารถลดรูปของสมการลงเหลือ

$$(AF)(e^{j\Psi} - 1) = (-1 + e^{jN\Psi}) \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.5 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น

ย้ายข้างและจัดรูปสมการจะได้

$$\begin{aligned}
 AF &= \left[\frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right] \\
 &= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi}}{e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi}} \right] \\
 &= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \tag{2.7}
 \end{aligned}$$

ถ้ากำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของสายอากาศแถวลำดับ ดังนั้นค่าของระยะห่างของสายอากาศ $d = 0$ และ $\beta = 0$ ดังนั้น $\psi = kd \cos \theta + \beta = 0$ ดังนั้นสมการที่ (2.7) จะสามารถลดรูปลงได้เท่ากับ

$$AF = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.8)$$

ค่าของ ψ จะถือว่าน้อยมาก ๆ ดังนั้นเราสามารถประมาณค่าสมการได้เท่ากับ

$$AF \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{\psi}{2}} \right] \quad (2.9)$$

ค่าสูงสุดของสมการที่ (2.8) และ (2.9) จะมีค่าเท่ากับ N เพื่อที่จะกำหนดให้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเป็นมาตรฐานเราจึงต้องกำหนดให้ค่าสูงสุดของแต่ละสมการเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นสมการมาตรฐานของตัวประกอบแถวลำดับคือ

$$(AF)_n = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \quad (2.10)$$

$$(AF)_n \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \quad (2.11)$$

2.4.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ

สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ (planar antenna array) เป็นรูปแบบที่ประยุกต์มาจากรูปแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นที่ได้อธิบายใน 2.4.1 สายอากาศแต่ละตัวถูกจัดวางตัวเป็นสี่เหลี่ยมหรือที่เรียกว่าสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบเชิงเส้น คือสามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่พลังงานได้ ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบมีความเอนกประสงค์มากและสามารถให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีความสมดุลและมีพูรองที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบสามารถที่จะหันพู่หลักในมุมเงยและทุก ๆ ทิศรอบตัว 360° ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบจึง

เหมาะกับการนำไปใช้ในงานเรดาร์ การชี้ทางระยะไกล (remote sensing) การสื่อสารไร้สายและรวมถึงระบบสายอากาศแก่งค้ำย ตามที่ได้อธิบายไว้ในหนังสือของ B.Allen, M. Ghavami (2005) เราสามารถคำนวณหาพลังงานของสายอากาศแวลำดับระนาบโดยใช้สมการที่ (2.12) ได้ เช่นเดียวกับสายอากาศแวลำดับแบบเส้น แต่จะมีค่าตัวประกอบแวลำดับแตกต่างกันซึ่งสามารถหาได้ โดยเริ่มจากพิจารณามุม γ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 จะได้

$$\begin{aligned}\cos \gamma &= \hat{\mathbf{a}}_x \cdot \hat{\mathbf{a}}_r = \hat{\mathbf{a}}_x \cdot (\hat{\mathbf{a}}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{\mathbf{a}}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{\mathbf{a}}_z \cos \theta) \\ &= \sin \theta \cos \phi\end{aligned}\quad (2.12)$$

เมื่อ $\hat{\mathbf{a}}_x$ $\hat{\mathbf{a}}_y$ $\hat{\mathbf{a}}_z$ และ $\hat{\mathbf{a}}_r$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกน x y z และ r ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแวลำดับดังนี้

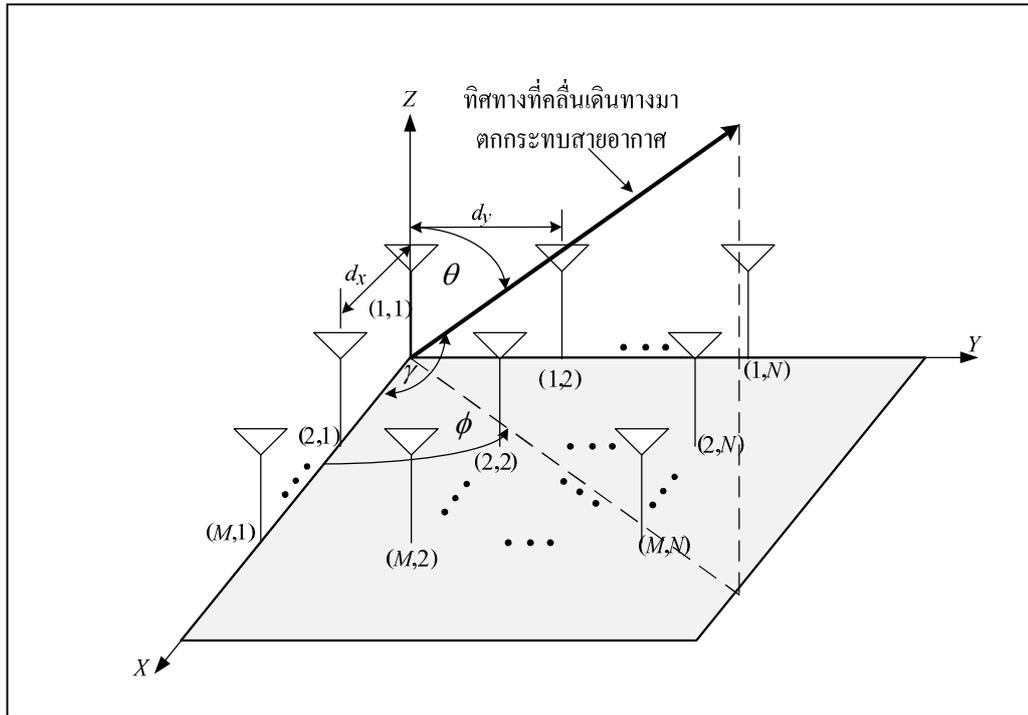
$$\begin{aligned}AF_x &= \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \cos \gamma + \beta_x)} \\ &= \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)}\end{aligned}\quad (2.13)$$

เมื่อ I_{m1} คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_x คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ β_x คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน y เช่นเดียวกันกับที่พิจารณาแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแวลำดับเท่ากับ

$$AF_y = \sum_{n=1}^N I_{1n} e^{j(m-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)}\quad (2.14)$$

เมื่อ I_{1n} คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_y คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y และ β_y คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y ดังนั้นเราสามารถหาค่าตัวประกอบแวลำดับของทั้งแกน x และ y รวมกันหรือที่เรียกว่าแบบระนาบได้ด้วยการคูณค่าตัวประกอบแวลำดับของทั้งแกน x และ y เข้าด้วยกันจะได้

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{1n} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)}\quad (2.15)$$



รูปที่ 2.6 สายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน $M \times N$

ถ้าสมมติให้แอมพลิจูดของสายอากาศแต่ละต้นทั้งในแกน x และ y มีค่าเท่ากันจะได้

$$I_{mn} = I_{m1} I_{1n} \quad (2.16)$$

และกำหนดให้แอมพลิจูดมีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วยจะได้ $I_{mn} = I_0$ ดังนั้นเราสามารถลดรูปสมการ (2.16) ลงเหลือเท่ากับ

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta x)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta y)} \quad (2.17)$$

เช่นเดียวกันกับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นเราสามารถทำสมการค่าตัวประกอบให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้โดยใช้ฟังก์ชันไซน์ตามที่แสดงในสมการที่ (2.10) และ (2.11) ซึ่งจะได้เท่ากับ

$$AF_n(\theta, \phi) = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$\psi_x = kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x \quad (2.19)$$

$$\psi_y = kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y \quad (2.20)$$

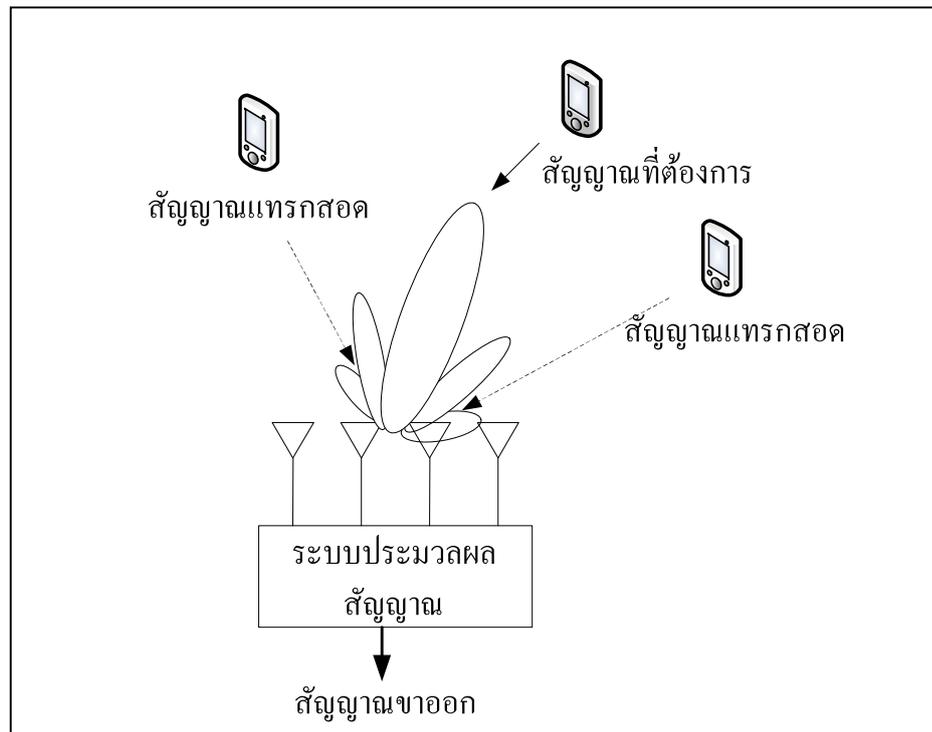
2.5 ระบบสายอากาศเก่ง

ระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ได้เริ่มพัฒนามาตั้งแตในช่วงปี ค.ศ.1980 เป็นต้นมา แต่เดิมระบบสายอากาศเก่งได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในระบบเรดาร์แต่ต่อมาได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับงานสื่อสารไร้สายจนเป็นที่นิยม ซึ่งระบบสายอากาศเก่งจะประกอบด้วยกลุ่มของสายอากาศหลาย ๆ ต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ กัน ร่วมกับการประมวลผลสัญญาณทั้งทางเวลาและทางตำแหน่งเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สาย เช่น

1. เพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจึงขยายพื้นที่ครอบคลุมให้กว้างขึ้น และทำให้ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลสูงขึ้น
2. ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น
3. เนื่องจากระบบสายอากาศเก่งจะหันพู่หลักไปเฉพาะในทิศทางที่ต้องการเท่านั้น จึงไม่สูญเสียพลังงานไปในทิศทางอื่น ทำให้ประหยัดพลังงานและยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่
4. ลดสัญญาณแทรกสอด

รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศเก่งซึ่งระบบสายอากาศเก่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ สายอากาศแถวลำดับและระบบประมวลผลสัญญาณ(signal processing systems) ซึ่งในระบบประมวลผลจะทำหน้าที่ในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Direction of Arrival : DOA) และการคำนวณเพื่อก่อรูปลำคลื่น ตามที่ได้แสดงในหนังสือของ Liberti,J.J.C.,and Rappaport,T.S.(1999) ซึ่งระบบนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้โดยการก่อรูปลำคลื่นของพู่หลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการในขณะที่หันจุดศูนย์หรือพู่รองไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด โดยหลักการเบื้องต้นในการที่จะหันลำคลื่นสามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้นตามที่แสดงในรูปที่ 2.8 จากรูป D คือความต่างเฟสของสัญญาณที่มาจากกระทบสายอากาศแต่ละต้น d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ W คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ θ_0 และ θ_1 คือมุมที่มาจากกระทบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับจากรูปสัญญาณขาออกคือ

$$y_{out} = y_1 + y_2 \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.7 ระบบสายอากาศเก่ง

และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นจะได้

$$y_{2d} = A \quad (2.22)$$

$$y_{2i} = A_i \quad (2.23)$$

$$y_{1d} = A_d e^{j\theta_d} \quad (2.24)$$

$$y_{1i} = A_i e^{j\theta_i} \quad (2.25)$$

เมื่อ y_{1d} y_{1i} y_{2d} และ y_{2i} คือ สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 2 และสัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้น

$$y_2 = y_{2d} + y_{2i} = w_2 (A_d + A_i) \quad (2.26)$$

$$y_1 = y_{1d} + y_{1i} = w_1 (A_d e^{j\theta_d} + A_i e^{j\theta_i}) \quad (2.27)$$

ดังนั้น

$$y_{out} = A_i (w_2 + w_1 e^{j\theta_i}) + A_d (w_2 + w_1 e^{j\theta_d}) \quad (2.28)$$

เราต้องการพจน์ของ A_i เท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดให้หมดไปและต้องการพจน์ของ A_d เท่ากับ A_d เพื่อยังคงรักษาสัญญาณที่ต้องการเอาไว้ ดังนั้นต้องทำให้

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_i} = 0 \quad (2.29)$$

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \quad (2.30)$$

เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.29) เราจะได้

$$w_2 = -w_1 e^{j\theta_i} \quad (2.31)$$

แทนสมการที่ (2.31) ลงใน (2.30) จะได้

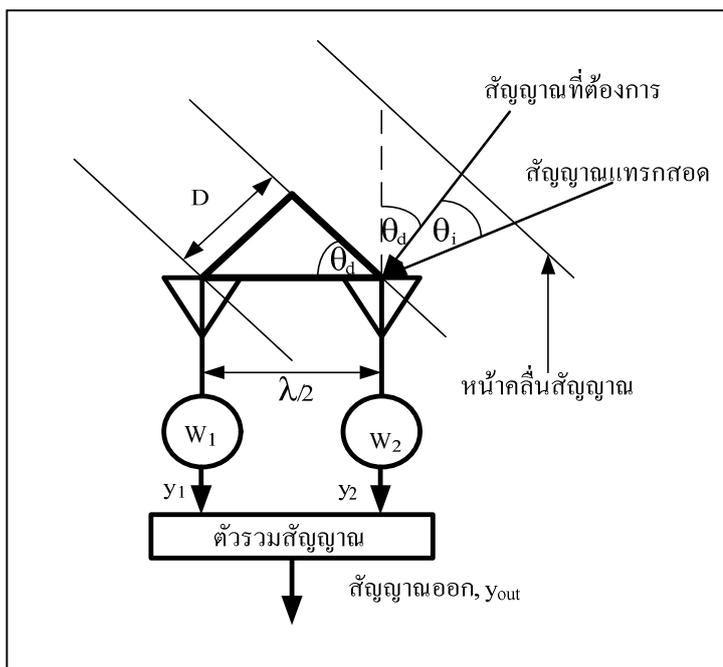
$$-w_1 e^{j\theta_i} + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \quad (2.32)$$

$$w_1 (e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i}) = 1 \quad (2.33)$$

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) ของสายอากาศต้นที่ 1 เท่ากับ

$$w_1 = \frac{1}{(e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i})} \quad (2.34)$$

เช่นเดียวกันกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 เมื่อย้ายข้างสมการที่



รูปที่ 2.8 ระบบสายอากาศแก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ

(2.29) เราจะได้

$$w_1 = \frac{-w_2}{e^{j\theta_i}} \quad (2.35)$$

แทนสมการที่ (2.34) ลงใน (2.30) จะได้

$$w_2 - \frac{w_2 e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} = 1 \quad (2.36)$$

$$w_2 \left(1 - \frac{e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} \right) = 1 \quad (2.37)$$

$$w_2 \left(\frac{e^{j\theta_i} - e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} \right) = 1 \quad (2.28)$$

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 2 เท่ากับ

$$w_2 = \left(\frac{e^{j\theta_i}}{e^{j\theta_i} - e^{j\theta_d}} \right) \quad (2.40)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.35) และ (2.40) เข้าไปในสมการที่ (2.29) สุดท้ายเราจะได้สัญญาณขาออกเท่ากับ

$$y_{out} = A_d \quad (2.41)$$

ระบบสายอากาศเก่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้ ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น (switched beam systems) และระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว (adaptive antenna systems)

2.5.1 ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น

ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น ประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) ซึ่งสามารถสร้างลำคลื่นได้ M ลำคลื่นในเวลาเดียวกัน และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weight, T) สำหรับสัญญาณขาออกที่มีลำคลื่นซึ่งไปยังทิศทางที่ m^{th} สามารถแสดงในสมการ (2.42) ดังนี้

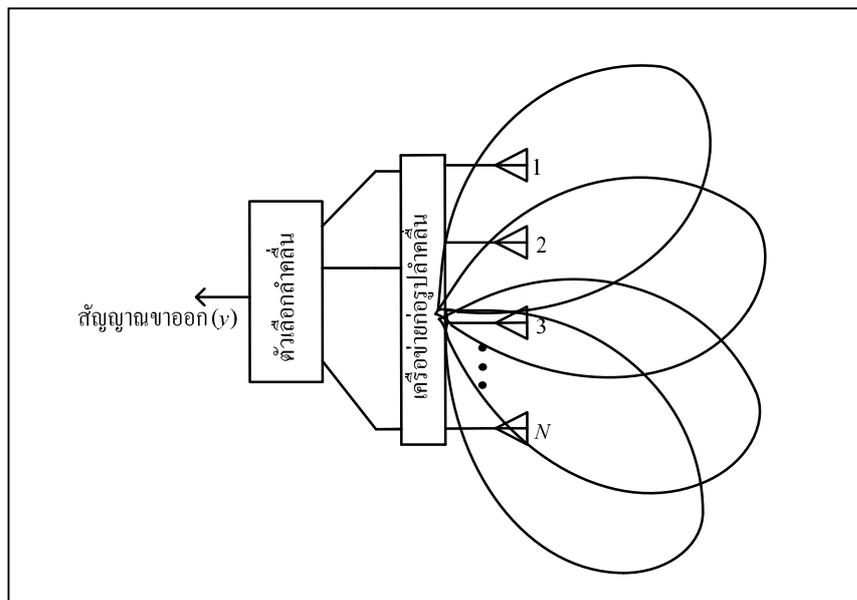
$$T_m = [w_{0,m} \quad w_{1,m} \quad \dots \quad w_{N-1,m}] \quad (2.42)$$

เมื่อ $w_{n,m}$ คือค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ n^{th} สำหรับการก่อรูปลำคลื่นในทิศทางที่ m^{th} ซึ่งสัญญาณขาออกสามารถเขียนได้ดังนี้

$$y = T^{-1}x \quad (2.43)$$

เมื่อ x คือสัญญาณที่รับเข้ามาจากสายอากาศ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมทริกซ์การทำงานของสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบทิศทางความแรงของสัญญาณ
2. เลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นที่ถูกเลือกไว้เหมาะสม
3. ใช้ลำคลื่นในทิศทางที่เลือกเมื่อผู้ใช้ไม่มีการเคลื่อนที่
4. สับเปลี่ยนลำคลื่นเดิมไปยังลำคลื่นใหม่เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่น นอกจากนี้การรวมสัญญาณขาออกของสายอากาศหลาย ๆ ตัวทำให้สายอากาศแบบปรับเลือกลำคลื่นสามารถสร้าง



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิทช์ค่าคลื่น

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้หลากหลายมากขึ้น ซึ่งทำให้ระบบมีทางเลือกของรูปแบบการแพร่กระจายแบบรูปการแผ่พลังงานที่มากกว่าการใช้สายอากาศต้นเดียว

เราสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิทช์ค่าคลื่นได้ดังนี้

ข้อดี

1. มีความซับซ้อนน้อย
2. สามารถติดตามสัญญาณได้รวดเร็วตามอัตราการปรับเปลี่ยนค่าคลื่น
3. ในกรณีที่ระบบใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก ประสิทธิภาพของสายอากาศเก่งแบบสวิทช์ค่าคลื่นจะใกล้เคียงกับสายอากาศเก่งแบบปรับค่าคลื่น

ข้อเสีย

1. ในกรณีที่สัญญาณไม่ชัดเจน มีการบดบัง มีการแทรกสอดของสัญญาณหรือมีสัญญาณมาถึงในมุมกว้างหลาย ๆ มุม อาจมีความผิดพลาดในการเลือกสัญญาณได้
2. อัตราการขยายสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างค่าคลื่น
3. การลดจำนวนสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัด

2.5.2 ระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว

สายอากาศชนิดนี้เป็นสายอากาศชนิดที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าคลื่นให้ชี้ไปในทิศทางใด ๆ ได้โดยอิสระ โดยจะมีตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อทำการปรับค่าคลื่น และมีส่วนที่เรียกว่า

อัลกอริทึมแบบปรับตัว (adaptive algorithm) เป็นตัวคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ โดยหลักการทำงานของระบบคือเมื่อสัญญาณตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นสัญญาณจะถูกส่งมาที่ส่วนอัลกอริทึมแบบปรับตัวเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักแล้วส่งค่ากลับไปให้ตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อคูณเข้ากับสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศดังนั้นจึงได้สัญญาณขาออกดังสมการที่ (2.44)

$$y = \mathbf{W}x \quad (2.44)$$

เมื่อ x คือสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น

ระบบจะทำงานเป็นรูปแบบวงจรปิดแบบนี้ไปเรื่อย ๆ วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีหลายวิธีขึ้นกับอัลกอริทึมที่เลือกใช้ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป จากกระบวนการดังกล่าวจะส่งผลให้ระบบสามารถหันพู่หลักไปยังทิศทางที่ต้องการและหันพู่รองหรือจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดตามที่แสดงในรูปที่ 2.10

เราสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัวได้ดังนี้

ข้อดี

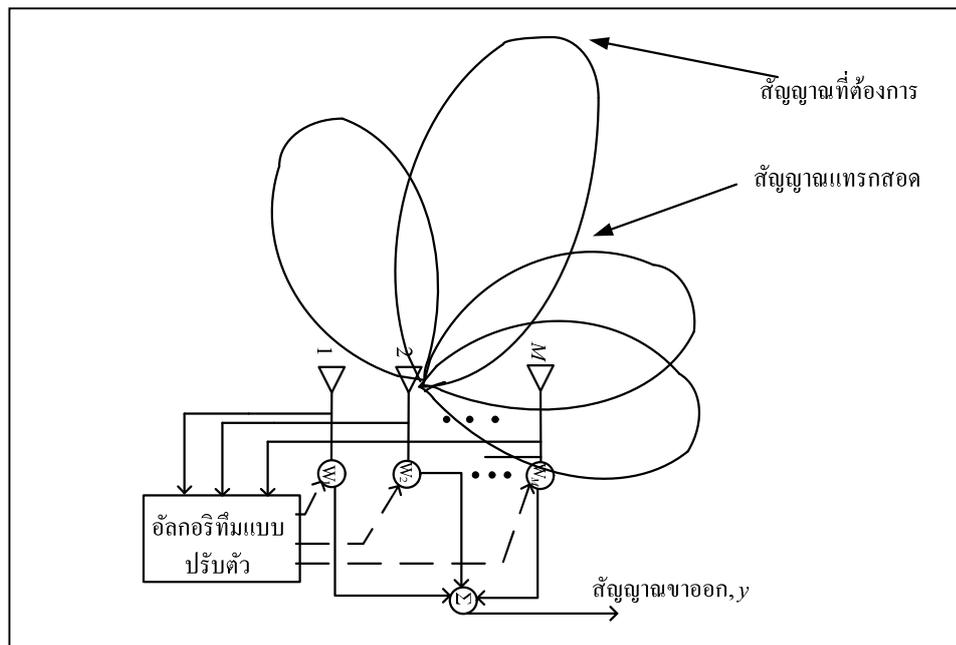
1. มีอัตราส่วนสัญญาณที่ต้องต่อสัญญาณรบกวนสูง
2. ไม่ต้องมีการปรับเทียบสายอากาศ (calibration)
3. มีประสิทธิภาพดีแม้ในกรณีที่จำนวนสัญญาณรบกวนมากกว่าจำนวนสายอากาศ

ข้อเสีย

1. มีความซับซ้อนสูงมากกว่าสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลาคี่น
2. ต้องการสัญญาณอ้างอิงที่ดีเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด
3. ต้องการหน่วยประมวลผลความเร็วสูง

2.6 เทคนิคการหันลาคี่น

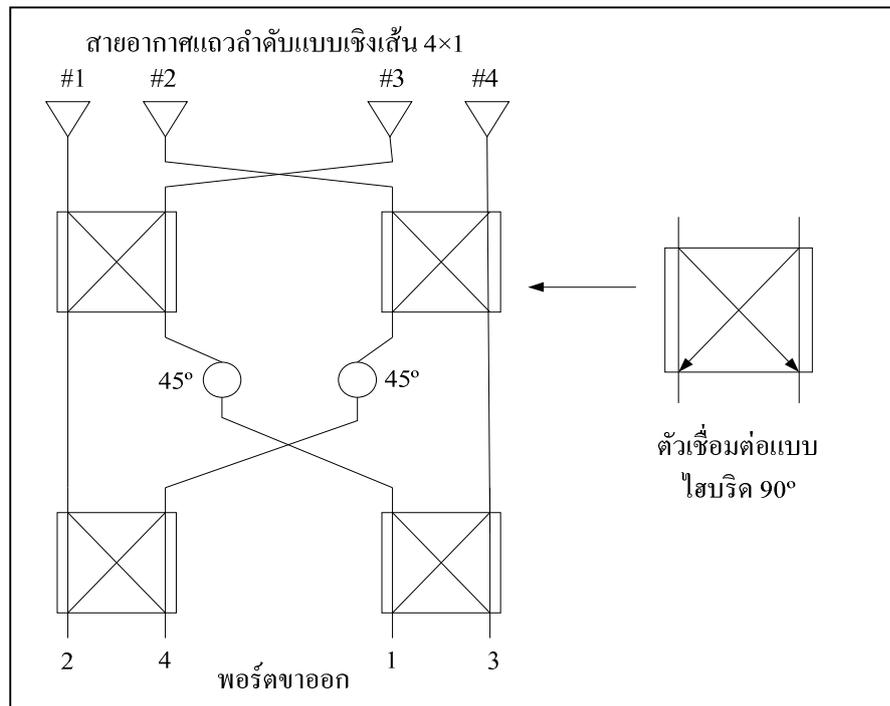
จากที่กล่าวมาข้างต้นถึงข้อดีของระบบสายอากาศเก่งที่สามารถหันลาคี่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ โดยการหันลาคี่นของระบบสายอากาศเก่งนั้นทำได้หลายเทคนิค เช่น การเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณ การลัดวงจรหรือเปิดวงจร แต่วิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในระบบสายอากาศเก่งคือ วิธีแบบบัทเลอร์เมทริกซ์ (Butler matrix) ซึ่งในงานวิจัยนี้นำเทคนิคของแบบบัทเลอร์เมทริกซ์ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายและมีต้นทุนการผลิตต่ำซึ่งอาศัยการกัลดายวงจรบนแผงวงจรพิมพ์เท่านั้น ดังนั้นจึงเหมาะกับการนำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศสวิตช์ลาคี่นของงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสายอากาศแ่งแบบปรับตัว

2.6.1 เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัทเลอร์เมทริกซ์

ในระบบสายอากาศแ่งประเภทสายอากาศแ่งแบบสวิตช์ลำคลื่น (switched-beam antenna) นี้จะมีตัวถ่วงน้ำหนัก (weight) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เพื่อที่จะนำหน้าที่เป็นตัวปรับเลือกลำคลื่นให้ชี้ไปในทิศทางที่ต้องการ โดยตัวถ่วงน้ำหนักที่เราได้กล่าวถึงนั้น เรียกว่า เครือข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) นั่นเอง ซึ่งสายอากาศแ่งแบบสวิตช์ลำคลื่นนั้นจะมีเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นเป็นตัวปรับลำคลื่นเพื่อชี้ไปในทิศทางที่ต้องการแบบเจาะจง เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่กล่าวถึงนี้อาจจะมีหลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมในระบบสายอากาศแ่งก็คือ วิธีแบบบัทเลอร์เมทริกซ์ ซึ่งวิธีนี้นั้นจะใช้ได้กับสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear array) เท่านั้น ส่วนประกอบของบัทเลอร์เมทริกซ์ ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศ 4 ต้น วางเรียงกันเป็นแถวลำดับแบบเชิงเส้น วงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° (90° hybrid coupler) วงจรไขว้สัญญาณ (cross over) และวงจรเลื่อนเฟส 45° (Phase shift 45°) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ตามที่แสดงในงานวิจัยของ Moody, H. (1994) โดยหลักการทำงานของบัทเลอร์เมทริกซ์ คือเมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบที่สายอากาศสัญญาณจะถูกส่งไปที่ตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° และตัวไขว้สัญญาณ จากนั้นสัญญาณอาจผ่านตัวเลื่อนเฟส 45° แล้วจึงถูกส่งผ่านตัวไขว้สัญญาณและตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สร้างลำคลื่นที่มีลำคลื่นหลักหันไปที่ 41.4° , 75.5° , 104.5° และ 138.6° แสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัทเลอร์เมทริกซ์

2.6.2 เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3

จากที่กล่าวมาข้างต้น บัทเลอร์เมทริกซ์เป็นเทคนิคการหันลำคลื่นที่ใช้กับสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ซึ่งเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบ 4×1 เท่านั้น ในงานวิจัยฉบับนี้ได้รูปแบบของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับใช้ใน 1 เซกเตอร์ของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ คือใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น 5×1 และจำนวนลำคลื่นที่เหมาะสมกับเซลล์ใน 1 เซกเตอร์คือจำนวน 3 ลำคลื่น ดังนั้นจึงได้ออกแบบรูปแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น แสดงโครงสร้างของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3 ดังรูปที่ 2.12 โดยใช้วิธีการเดียวกันกับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ บัทเลอร์เมทริกซ์ โดยจะต้องหาความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น ดังรูปที่ 2.13 สมการการคำนวณหาความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นซึ่งหาได้จากทิศทางที่ต้องการหันลำคลื่น ดังนี้

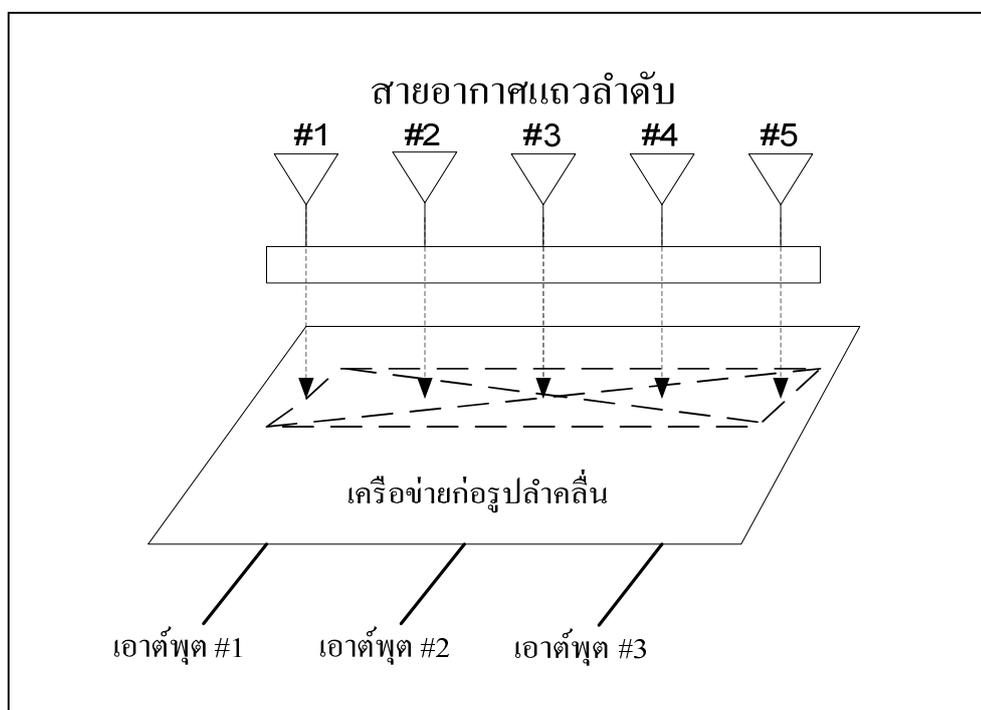
$$\begin{aligned}
 \text{Inter element phasing} &= kd \cos \theta \\
 &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{2} \cos \theta \\
 &= \pi \cos \theta
 \end{aligned}$$

โดย θ คือทิศทางของลำคลื่น

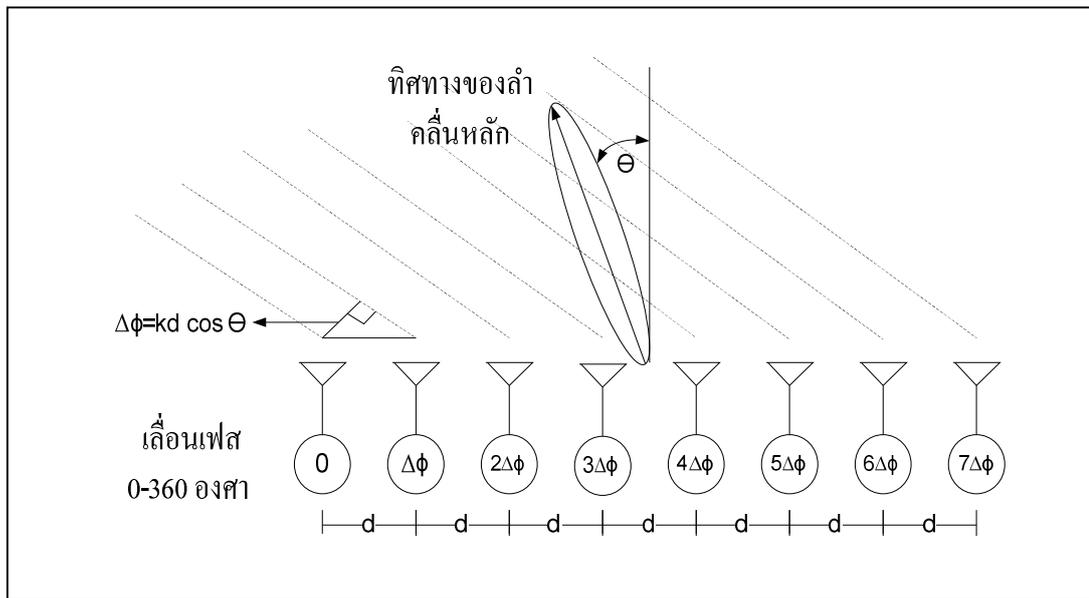
ตารางที่ 2.1 ค่ามุมเฟสที่ต่างกันเมื่อผ่านเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัทเลอร์เมทริกซ์

พอร์ตขาออก	สายอากาศ				ความต่างเฟส	ทิศทางของลำคลื่นหลัก
	สายอากาศ 1	สายอากาศ 2	สายอากาศ 3	สายอากาศ 4		
พอร์ต 1	-45°	-180°	45°	-90°	-135°	138.6°
พอร์ต 2	0°	-45°	-90°	-135°	-45°	104.5°
พอร์ต 3	-135°	-90°	-45°	0°	45°	75.5°
พอร์ต 4	-90°	45°	-180°	-45°	135°	41.4°

ทิศทางทั้ง 3 ลำคลื่นที่ได้ออกแบบและสร้างเพื่อให้เหมาะสมใน 1 เซกเตอร์ โดยทิศทางของลำคลื่นหลัก คือ 27.26° , 61.82° และ 96.37° และได้ออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น 5×3 ที่ออกแบบได้ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ประกอบด้วยวงจรเชื่อมต่อแบบไฮบริด (hybrid coupler) วงจรไขว้สัญญาณ (crossover) วงจรรวมสัญญาณ (combiner) วงจรแยกสัญญาณ (splitter) และตัวเลื่อนเฟส (phase shift) และค่าความต่างเฟสที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.12 เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3



รูปที่ 2.13 ความต่างเฟสของแต่ละต้นของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

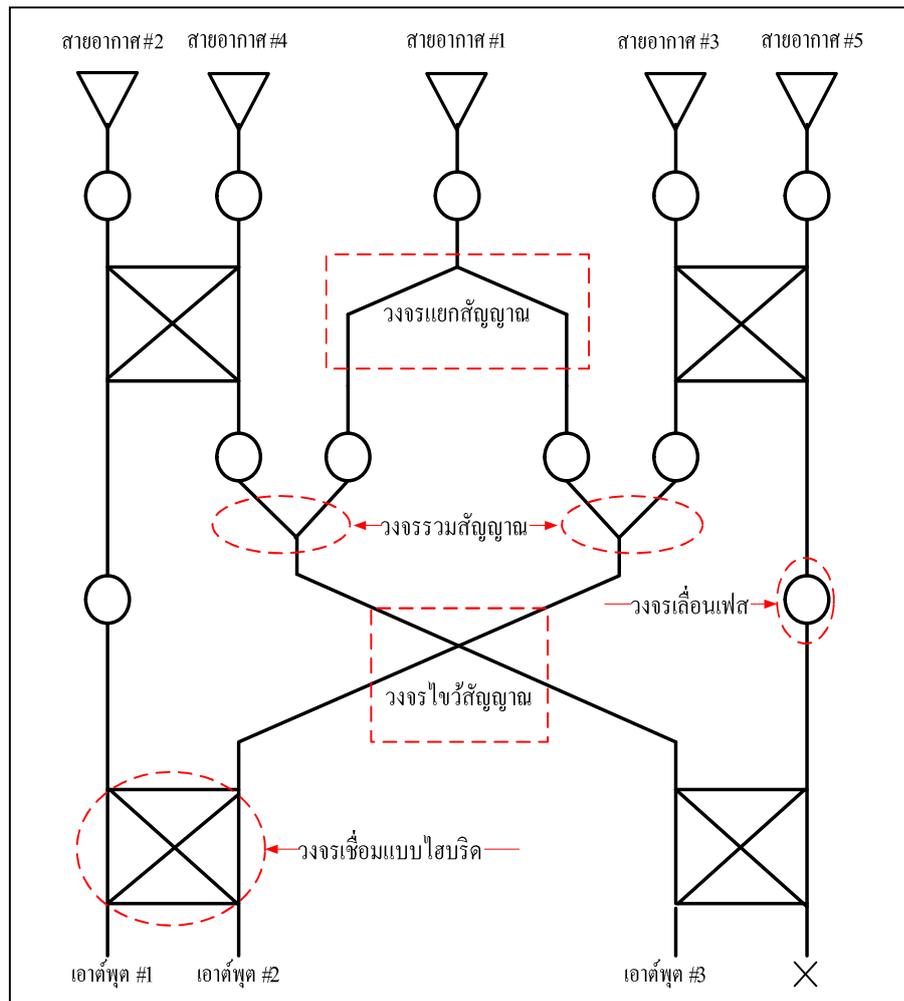
ตารางที่ 2.2 ค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น 5×3

พอร์ตขาออก	สายอากาศ					ทิศทางของลำคลื่นหลัก
	สายอากาศ 1	สายอากาศ 2	สายอากาศ 3	สายอากาศ 4	สายอากาศ 5	
เอาต์พุต 1	0°	-20°	-40°	-60°	-80°	96.37°
เอาต์พุต 2	90°	-110°	50°	-150°	10°	27.26°
เอาต์พุต 3	0°	85°	170°	-105°	-20°	61.82°

2.7 ความจุช่องสัญญาณ

ความจุช่องสัญญาณ (Channel Capacity) คืออัตราที่ผู้ส่งสามารถส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณหนึ่งๆที่กำหนดในเงื่อนไขหรือภาวะที่กำหนดได้ ตามที่ได้อธิบายไว้ในหนังสือของ F. Khan (2009) โดยเงื่อนไขหลักๆที่จะกำหนดค่าความจุช่องสัญญาณคือแบนด์วิดท์และค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (SIR)

Shannon ได้แสดงให้เห็นว่าความจุที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ทางทฤษฎี ตามในหนังสือของ T. S. Rappaport (2002) ดังสมการ (2.45)



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของเครื่องข่ายก่อรูปลำคลื่น 5x3

$$C = B \log_2(1 + SIR) \quad (2.45)$$

โดย C คือ ความจุช่องสัญญาณ ในหน่วยบิตต่อวินาที (bits/sec)

B คือ แบนด์วิดท์

SIR คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด

โดยปกติแล้วการส่งข้อมูลจะส่งได้ที่อัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำกว่าความจุช่องสัญญาณ C มาก เหตุผลหนึ่งก็เนื่องมาจากว่าในสูตรนี้ Shannon ตั้งสมมติฐานว่า จะมีสัญญาณรบกวนแบบไวท์ (White noise) เท่านั้น ซึ่งสัญญาณรบกวนแบบไวท์นี้อาจเกิดจากสัญญาณรบกวนจากความร้อน (Thermal noise) เป็นต้น แต่ไม่ได้รวมถึงกรณีที่มีสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ (Impulse noise)

หรือการเพี้ยนไปของสัญญาณ (distortion) เนื่องจากปัจจัยอื่นๆ ดังนั้นช่องสัญญาณที่ใช้งานจริงจึงมักมีคุณภาพต่ำกว่าช่องสัญญาณตามสมมติฐานนี้ อย่างไรก็ตามค่าความจุช่องสัญญาณที่หาได้จากสมการที่ (2.45) จะเป็นค่าความจุที่สูงสุดที่เป็นไปได้ตามทฤษฎีซึ่งมีประโยชน์ในการออกแบบและเปรียบเทียบอัตราการส่งข้อมูลของระบบสื่อสารต่างๆ ค่าความจุช่องสัญญาณนี้อาจถูกเรียกว่าเป็นความจุปลอดความผิดพลาด เนื่องจาก Shannon ได้พิสูจน์ทฤษฎีที่เรียกว่า ทฤษฎีการเข้ารหัสช่องสัญญาณ ซึ่งกล่าวย่อๆ ได้ว่า ถ้าอัตราที่แท้จริงของการส่งนั้นน้อยกว่าความจุปลอดความผิดพลาดแล้วในทางทฤษฎีจะสามารถใช้การเข้ารหัสช่องสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณโดยไม่มีผิดพลาดเกิดขึ้นเลย

2.8 สรุป

ตามเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นในบทนี้จะเห็นว่า ระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ในยุคต่างๆ ยังคงมีปัญหาในเรื่องสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ แม้แต่ในยุคที่สี่ ที่ยังคงมีปัญหานี้เกิดขึ้น โดยเทคโนโลยีแอลทีอีเป็นเทคโนโลยีที่จะเข้ามามีบทบาทในยุคที่สี่ จึงได้มีเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำและเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ ในการลดปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ แต่ยังคงมีประสิทธิภาพไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคโนโลยีสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น โดยออกแบบระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นที่มีความเหมาะสมในการใช้งานในเซลล์ 1 เซลล์เตอร์ของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ในยุคที่สี่

บทที่ 3

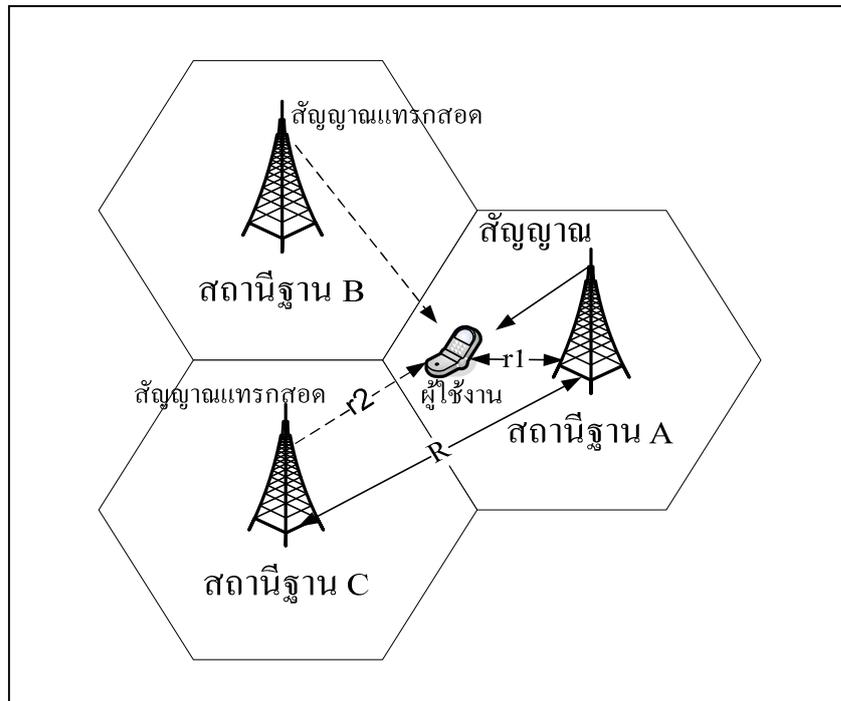
การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

3.1 กล่าวนำ

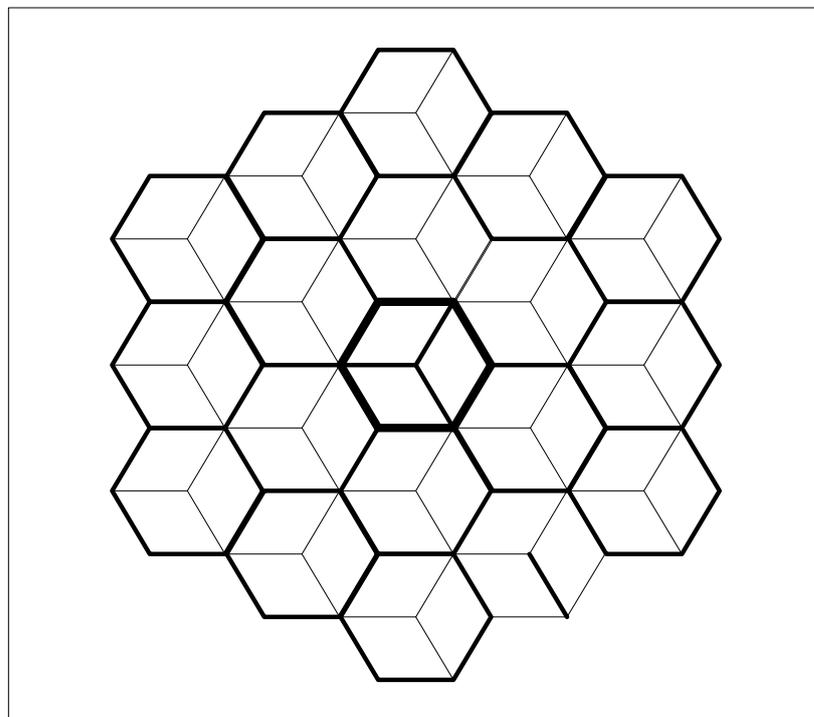
เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ในส่วนของ การนำเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำรูปแบบต่างๆ มาเปรียบเทียบกับและกรณีที่น่าเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของระบบสายอากาศ่งมาใช้งานร่วมกันกับเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำรูปแบบต่างๆ ในระบบแอลทีอีเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้น สำหรับระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่

3.2 การจำลองเปรียบเทียบเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ

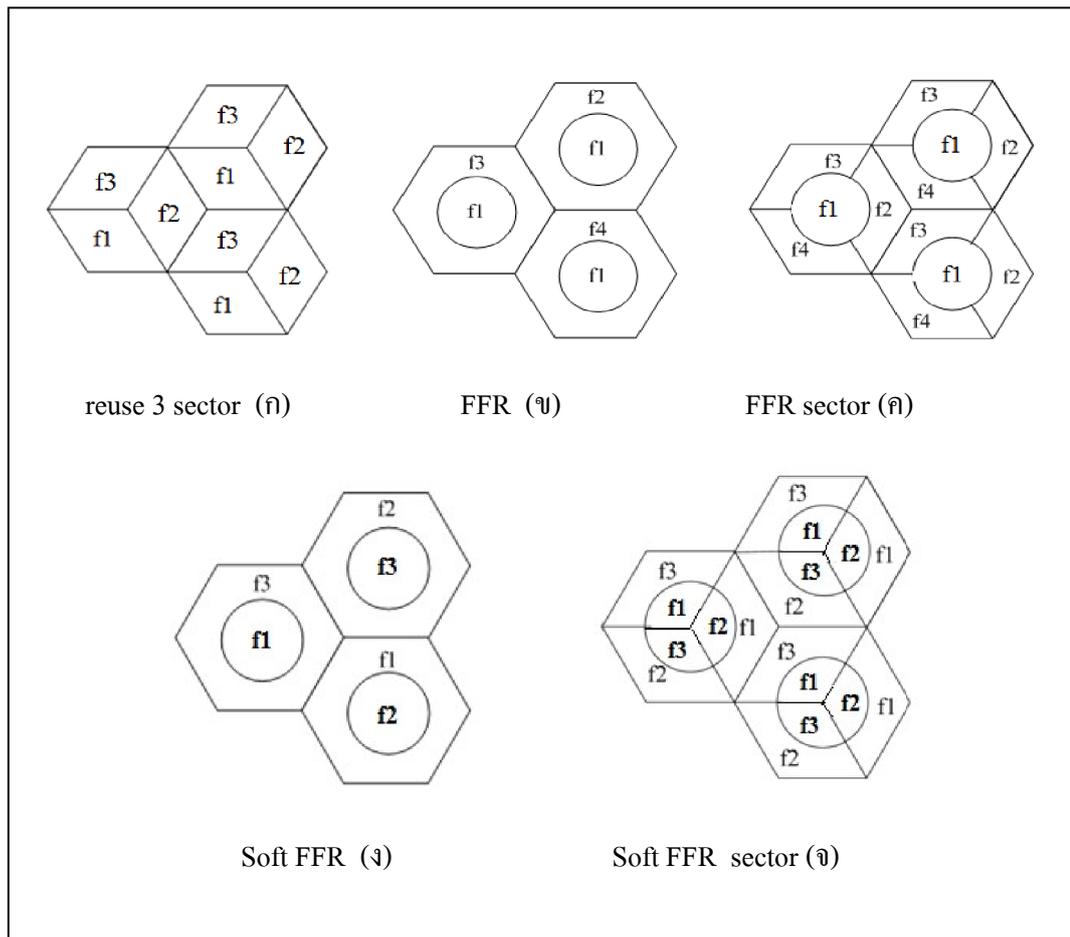
ในการสร้างแบบจำลองเราพยายามสร้างแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงที่สุด ในรูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองการเกิดการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์ โดยพิจารณาสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้งาน เมื่อผู้ใช้งานอยู่บริเวณเซลล์ของสถานีฐาน A ผู้ใช้งานจะต้องได้รับสัญญาณในการใช้งานจากสถานีฐาน A แต่สถานีฐานอื่นๆ ข้างเคียงก็ยังคงส่งสัญญาณมาแทรกสอดผู้ใช้งานด้วย ซึ่งปัญหานี้ นับว่าเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในทุกยุคของการสื่อสารเคลื่อนที่ โดยการจำลองแบบที่สร้างขึ้นในงานวิจัยชิ้นนี้มีข้อกำหนดในการสร้างแบบจำลองโดยรูปแบบเครือข่ายที่จำลองเป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบรังผึ้ง (cellular system) ดังรูปที่ 3.2 จากการศึกษาเราได้ทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมแมทแลบ โดยการจำลองแบบโดยจำลองการใช้งานความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบเครือข่ายแบบต่างๆ เพื่อหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพดีและเหมาะสมในการใช้งานในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ โดยแบ่งออกเป็น การจำลองการใช้งานความถี่ซ้ำจำนวน 5 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 (reuse 3 sector) เป็นรูปแบบเซลล์ที่มีการแบ่งเซลล์ที่มีการใช้ความถี่ซ้ำ 3 ความถี่ ดังรูปที่ 3.3 (ก) รูปแบบที่ 2 (FFR) จำลองโดยใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ โดยบริเวณกลางเซลล์ใช้ความถี่เดียวกันทุกเซลล์แต่บริเวณขอบเซลล์ใช้ 3 ความถี่สลับกันไป ดังรูปที่ 3.3 (ข) รูปแบบที่ 3 (FFR sector) เป็นการจำลองโดยใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ โดยมีการกำหนดระดับกำลังสัญญาณที่ส่งบริเวณกลางเซลล์ซ้ำ โดยมีการกำหนดระดับกำลังสัญญาณที่ส่งบริเวณกลางเซลล์และขอบเซลล์แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.3 (ง) รูปแบบที่ 5 (Soft FFR sector) เป็นการจำลองโดยใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบ



รูปที่ 3.1 แบบจำลองการเกิดการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์



รูปที่ 3.2 รูปแบบเครือข่ายแบบรังผึ้ง



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการใช้งานความถี่ซ้ำในรูปแบบต่างๆ

ซอฟต์แวร์ โดยเซลล์ถูกแบ่งออกเป็นเซกเตอร์ ดังรูปที่ 3.3(จ) สมการที่ใช้ในการจำลองหาค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ดังสมการที่ 3.1

$$SIR = \frac{P_{r_1}^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n P_i (r_{2i})^{-\alpha}} \quad (3.1)$$

- P_i คือ กำลังส่งที่สถานีฐานภายในเซลล์ตัวเอง
- P_i คือ กำลังส่งที่สถานีฐานข้างเคียง
- i คือ สถานีฐาน
- r_1 คือ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานภายในเซลล์ตัวเองกับผู้ใช้งาน

r_{2i} คือ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานข้างเคียงกับผู้ใช้งาน

α คือ pathloss exponent

โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองหาค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแล็บของทั้ง 5 รูปแบบข้างต้น กรณีที่มีการร่วมกับเทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ โดยดูประสิทธิภาพจากค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function : PDF) ดังรูปที่ 3.4 จากกราฟพบว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดของรูปแบบที่ 5 (Soft FFR sector) ที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ โดยเซลล์ถูกแบ่งออกเป็นเซกเตอร์ มีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาเป็นรูปแบบที่ 3 (FFR sector) รูปแบบที่ 4 (Soft FFR) รูปแบบที่ 2 (FFR) และรูปแบบที่ 1 (reuse 3 sector) ตามลำดับ

จากการจำลองแบบเพื่อเปรียบเทียบเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ นี้สามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ในเซลล์ที่ถูกแบ่งเป็นเซกเตอร์ ให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดสูงสุด จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

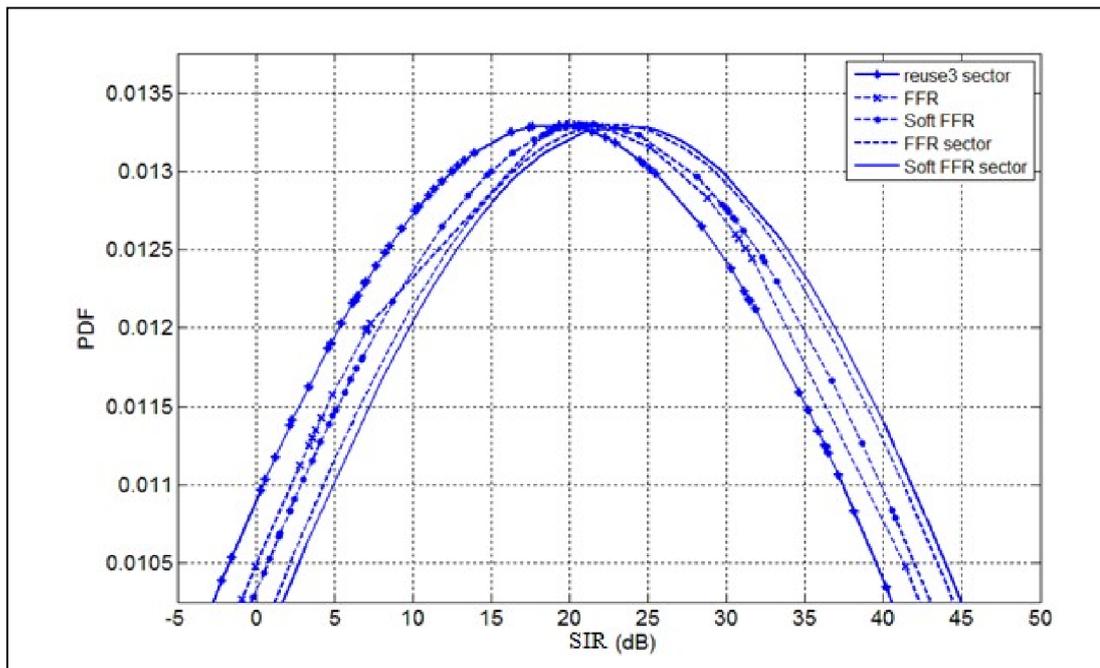
3.3 การจำลองแบบเปรียบเทียบเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ เมื่อใช้งานร่วมกับเทคนิคการก่อรูปลำคลื่น

สมมติฐานในงานวิจัยนี้ที่ตั้งไว้คือระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ได้ ถึงแม้ว่าในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่จะมีการพัฒนาเทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำเพื่อแก้ไขปัญหาการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์ก็ตามแต่ยังคงไม่มีประสิทธิภาพสูงสุด จากการศึกษาปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่าระบบสายอากาศเก่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครือข่ายเคลื่อนที่ในยุคที่สี่ได้ ดังนั้นจึงได้จำลองแบบเพื่อเปรียบเทียบเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำทั้ง 5 รูปแบบใหม่อีกครั้งโดยเพิ่มเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของระบบสายอากาศเก่งเข้าไปในระบบ เพื่อช่วยเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด สมการที่ใช้ในการจำลองหาค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดกรณีเพิ่มเทคนิคการก่อรูปลำคลื่น ดังสมการที่ 3.2

$$SIR = \frac{P_1 r_{11}^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n G(\theta)_i P_1 (r_{2i})^{-\alpha}} \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ
ในรูปแบบต่างๆ

รูปแบบเครือข่าย	แบบรั้งผึ้ง (cellular systems)
จำนวนสถานีฐาน	19 สถานี
รัศมีของแต่ละเซลล์ (r)	500 เมตร
ระยะห่างระหว่างสถานีฐาน (R) [F. Khan (2009)]	1 กิโลเมตร
จำนวนผู้ใช้งาน (สุ่มแบบ Uniform distribution)	100 คน
path-loss exponent (α) [F. Khan (2009)]	4
มุมของเซลล์ที่แบ่งเซกเตอร์	120°



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ

- P_1 คือ กำลังส่งที่สถานีฐานภายในเซลล์ตัวเอง
- P_i คือ กำลังส่งที่สถานีฐานข้างเคียง
- $G(\theta)_i$ คือ อัตรายายของสายอากาศ
- i คือ สถานีฐาน
- r_1 คือ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานภายในเซลล์ตัวเองกับผู้ใช้งาน
- r_{2i} คือ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานข้างเคียงกับผู้ใช้งาน
- α คือ pathloss exponent

โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองหาค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นร่วมเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.2 ผลการจำลองที่ได้แสดงในรูปที่ 3.5 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็นในกรณีที่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศแก่มาใช้ร่วมกันกับเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ ผลของการจำลองในรูปแบบที่ 5 (Soft FFR sector) ยังคงให้ประสิทธิภาพสูงสุดเช่นเดิม รองลงมาในรูปแบบที่ 3 (FFR sector) รูปแบบที่ 4 (Soft FFR) รูปแบบที่ 2 (FFR) และรูปแบบที่ 1 (reuse 3 sector) ตามลำดับ

จากการจำลองแบบเพื่อเปรียบเทียบเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ เมื่อใช้งานร่วมกับเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นนี้สามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้

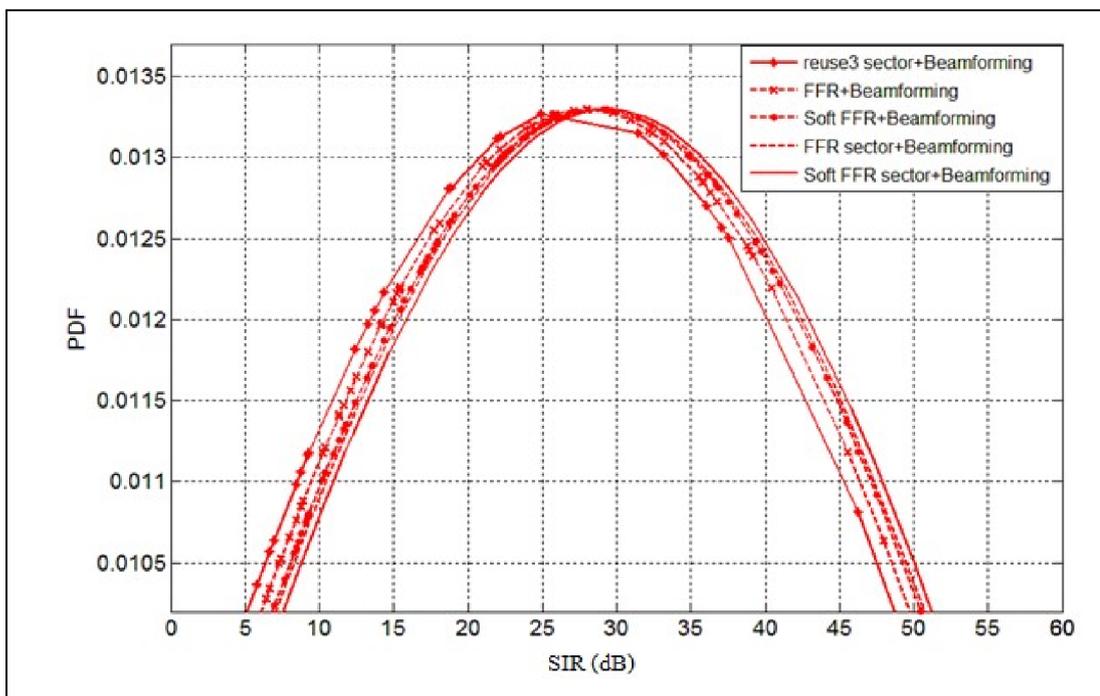
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบในกรณีที่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นร่วมเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ

รูปแบบเครือข่าย	แบบรังผึ้ง (cellular systems)
จำนวนสถานีฐาน	19 สถานี
รัศมีของแต่ละเซลล์ (r)	500 เมตร
ระยะห่างระหว่างสถานีฐาน (R) [F. Khan (2009)]	1 กิโลเมตร
จำนวนผู้ใช้งาน (สุ่มแบบ Uniform distribution)	100 คน
path-loss exponent (α) [F. Khan (2009)]	4
มุมของเซลล์ที่แบ่งเซกเตอร์	120°
สายอากาศแถวลำดับ	แบบเชิงเส้น
จำนวนสายอากาศ	4 ต้น
ความถี่กลางที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ	2.595 GHz

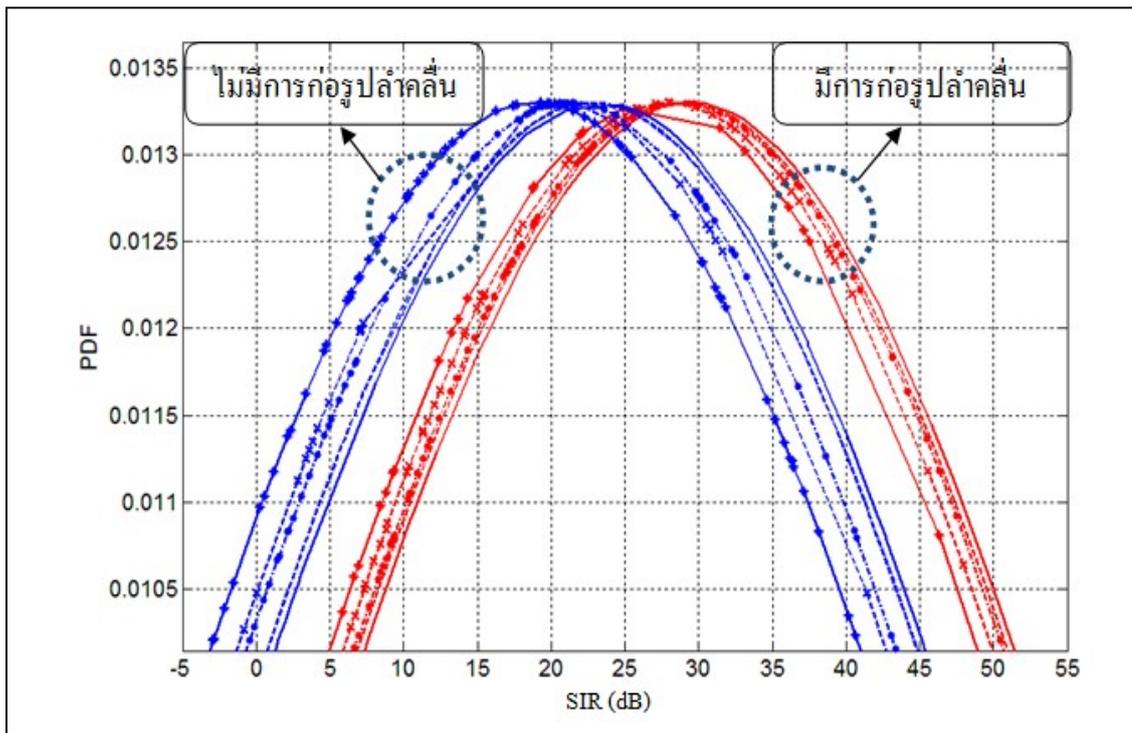
ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ใช้งานร่วมกับเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นในเซลล์ที่ถูกแบ่งเป็นเซกเตอร์ให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดสูงสุด จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่มากที่สุด

3.4 การจำลองแบบเพื่อหาค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด

จากการจำลองทั้งสองหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าเมื่อนำกราฟการจำลองทั้ง 2 กราฟมาเปรียบเทียบกัน พบว่ากรณีที่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของสายอากาศแงมาใช้ร่วมกันกับเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบต่างๆ มีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำอย่างเดียว โดยดูจากค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดที่มีค่ามากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ดังนั้นแสดงว่าเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของระบบสายอากาศแงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ได้มากขึ้น โดยมีค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดที่มากขึ้น จึงได้นำอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดจากกรณีที่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของระบบสายอากาศแงร่วมกับเทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นร่วมเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 3.6 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในกรณีที่มีการก่อรูปลำคลื่นและไม่มีการก่อรูปลำคลื่น

แบบซอฟต์แวร์ โดยแบ่งเซลล์ออกเป็นเซกเตอร์เทียบกับกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์โดยแบ่งเซลล์ออกเป็นเซกเตอร์เช่นกัน ซึ่งต่างก็เป็นรูปแบบที่ให้ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุด จากนั้นจึงได้ทำการจำลองแบบโดยดูค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดที่ตำแหน่งผู้ใช้งานที่สุ่ม 100 คน เพื่อเปรียบเทียบกันว่าเมื่อใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นทำให้มีค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดมากกว่ากรณีที่ไม่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ในเซลล์ที่แบ่งเซกเตอร์ ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ภาคผนวก ข จากนั้นนำค่าที่เป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด เพื่อดูค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็นในแต่ละค่าเป็นเท่าใด ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.3 เป็นตารางแจกแจงอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและนำค่าที่ได้จึงนำมาแสดงในรูปของกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นกราฟแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (SIR gain) ระหว่างใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นและไม่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นร่วมกับเทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ในเซลล์ที่แบ่งเซกเตอร์

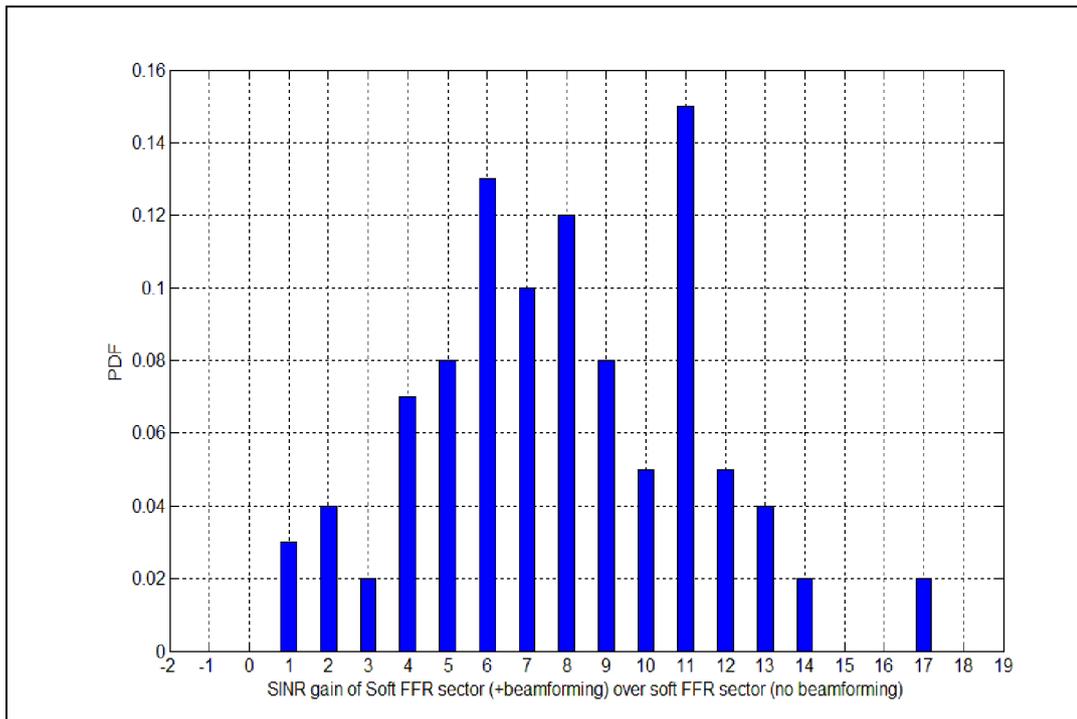
ตารางที่ 3.3 ตารางแจกแจงอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด

อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอด(SIR gain) (dB)	จำนวนความถี่	ฟังก์ชันการแจกแจงความ หนาแน่นของความน่าจะเป็น
1	3	0.03
2	4	0.04
3	2	0.02
4	7	0.07
5	8	0.08
6	13	0.13
7	10	0.10
8	12	0.12
9	8	0.08
10	5	0.05
11	15	0.15
12	5	0.05
13	4	0.04
14	2	0.02
17	2	0.02

รูปที่ 3.7 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด พบว่า ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดนั้นเพิ่มขึ้น 11 dB มีโอกาสเกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมาเพิ่มขึ้น 6 dB และ 8 dB ตามลำดับ โดยจากการจำลองสามารถสรุปได้ว่าเทคนิคการก่อรูป ลำคลื่นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบได้ในระดับที่น่าพอใจ

3.5 การจำลองแบบเพื่อหาค่าความจุช่องสัญญาณ

นอกจากค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดแล้ว ยังมีอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบ คือค่าความจุของช่องสัญญาณ ซึ่งการหาค่าความจุของช่องสัญญาณในแต่ละรูปแบบในการจำลองดังรูปที่ 3.3 (ก) – (จ) สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.3 – 3.7 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็นเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด ของกรณีใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นและไม่ใช่เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น

$$\frac{C}{B} = \log_2(1 + SIR) \quad (3.3)$$

$$\frac{C}{B} = \frac{1}{4} \log_2(1 + SIR_{center}) + \frac{1}{4} \log_2(1 + SIR_{edge}) \quad (3.4)$$

$$\frac{C}{B} = \frac{1}{4} \log_2(1 + SIR_{center}) + \frac{3}{4} \log_2(1 + SIR_{edge}) \quad (3.5)$$

$$\frac{C}{B} = \frac{2}{3} \log_2(1 + SIR_{center}) + \frac{1}{3} \log_2(1 + SIR_{edge}) \quad (3.6)$$

$$\frac{C}{B} = 2 \log_2(1 + SIR_{center}) + \log_2(1 + SIR_{edge}) \quad (3.7)$$

โดย C คือ ความจุช่องสัญญาณ ในหน่วยบิตต่อวินาที (bits/sec)

B คือ แบนด์วิดท์

SIR คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด

SIR_{center} คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบริเวณกลางเซลล์

SIR_{edge} คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบริเวณขอบเซลล์

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าความจุของช่องสัญญาณทั้ง 5 รูปแบบ โดยเปรียบเทียบกันในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำเพียงอย่างเดียวกับกรณีที่นำเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นมาใช้ร่วมกัน ซึ่งพบว่าค่าความจุของช่องสัญญาณกรณีที่มีการใช้เทคนิคก่อรูปลำคลื่นมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีการใช้เทคนิคก่อรูปลำคลื่น

ตารางที่ 3.4 ค่าความจุของช่องสัญญาณ

รูปแบบ	ความจุช่องสัญญาณ [b/s/Hz]	
	ไม่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น	ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น
1	1.4655	2.0127
2	2.4513	2.9962
3	2.9987	3.3491
4	2.8769	3.2697
5	3.0176	3.5531

3.6 การจำลองแบบเพื่อหาจำนวนลำคลื่นและจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม

จากการจำลองแบบข้างต้นทำให้ทราบว่าเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของระบบสายอากาศแงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบแอลทีอีที่จะใช้ในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ได้ จึงได้ทำการจำลองแบบอีกเพื่อหาว่าระบบสายอากาศแงที่จะนำมาก่อรูปลำคลื่นควรมีลักษณะใด โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแงแบบสวิทช์ลำคลื่นตามที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 จากนั้นต้องมาจำลองว่าระบบสายอากาศแงแบบสวิทช์ลำคลื่นที่จะนำมาใช้ในระบบเครือข่ายควรมีการสร้างลำคลื่นหลักจำนวนกี่ลำคลื่นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีสำหรับระบบแอลทีอี ตารางที่ 3.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาจำนวนลำคลื่นที่เหมาะสมในระบบ และรูปที่ 3.8 กราฟแสดงผลการจำลองการหาจำนวนลำคลื่นที่ใช้ในแต่ละเซกเตอร์ โดยจากกราฟพบว่าลำคลื่นจำนวน 3 ลำคลื่นให้ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวนดีที่สุด จากนั้น

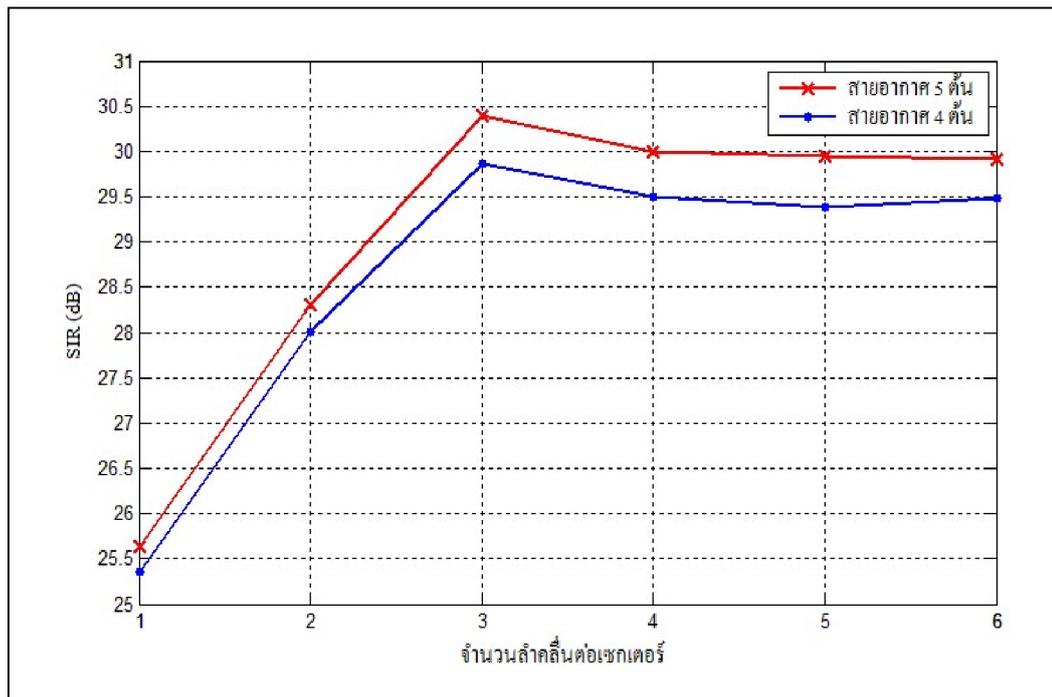
เมื่อทราบแล้วว่าลำคลื่นจำนวน 3 ลำคลื่นมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบใน 1 เซกเตอร์ และเพื่อประสิทธิภาพของระบบที่ดีขึ้นจึงต้องให้ความกว้างของลำคลื่น 3 ลำคลื่นมีพื้นที่ครอบคลุมทั้ง เซกเตอร์คือ 120° ดังนั้นลำคลื่นควรจะมี ความกว้างลำคลื่นละ 40° จึงได้ทำการจำลองผลเพื่อหา จำนวนของสายอากาศที่นำมาเรียงเป็นแถวลำดับแบบเชิงเส้นให้สามารถก่อรูปลำคลื่นที่มีความ กว้างลำคลื่น 40° ตารางที่ 3.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาจำนวนของสายอากาศ ที่เหมาะสม และรูปที่ 3.9 แสดงผลการจำลองเพื่อหาจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม พบว่า ใช้ สายอากาศจำนวน 5 ต้นจะทำให้ความกว้างของลำคลื่น 40.5°

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาค่าจำนวนลำคลื่นที่เหมาะสมในระบบ

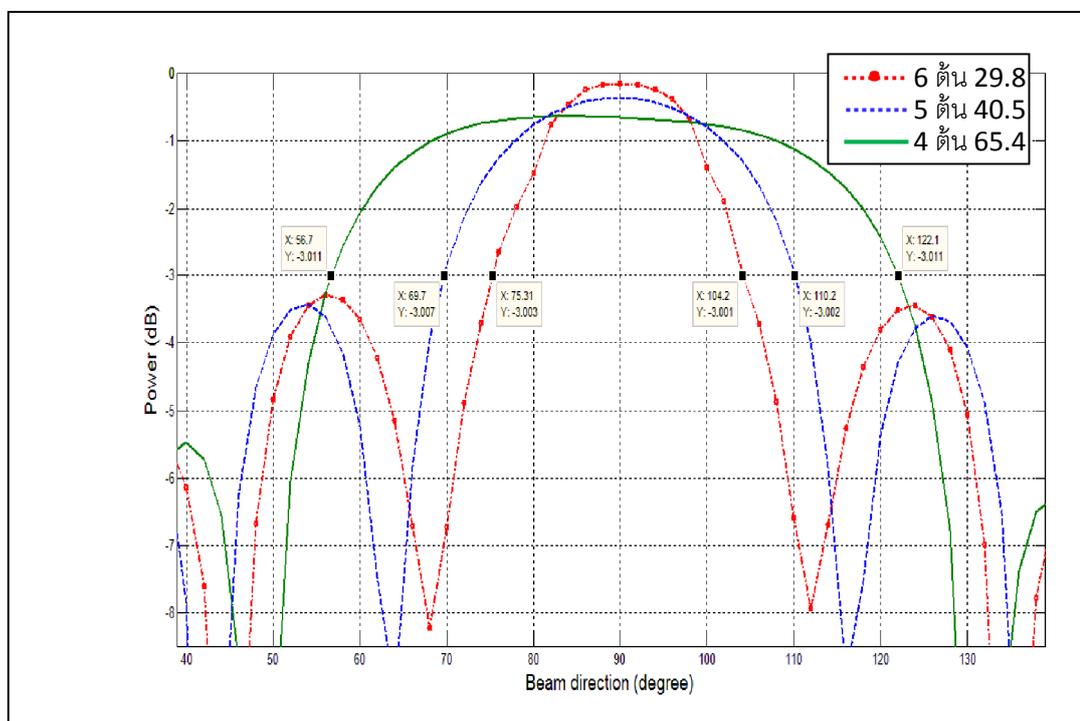
รูปแบบเครือข่าย	แบบรังผึ้ง (cellular systems)
จำนวนสถานีฐาน	19 สถานี
รัศมีของแต่ละเซลล์ (r)	500 เมตร
ระยะห่างระหว่างสถานีฐาน (R) [F. Khan (2009)]	1 กิโลเมตร
จำนวนผู้ใช้งาน (ลุ่มแบบ Uniform distribution)	100 คน
มุมของเซลล์ที่แบ่งเซกเตอร์	120°
จำนวนสายอากาศ	5 ต้น
สายอากาศแถวลำดับ	แบบเชิงเส้น
ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น	$\lambda/2$
ความถี่กลางที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ	2.595 GHz

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาจำนวนของสายอากาศที่เหมาะสม

สายอากาศแถวลำดับ	แบบเชิงเส้น
ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้น	$\lambda/2$
ความถี่กลางที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ	2.595 GHz



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงผลการจำลองการหาจำนวนลำคลื่นที่เหมาะสมในแต่ละเซกเตอร์



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงผลการจำลองเพื่อหาจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม

3.7 กล่าวสรุป

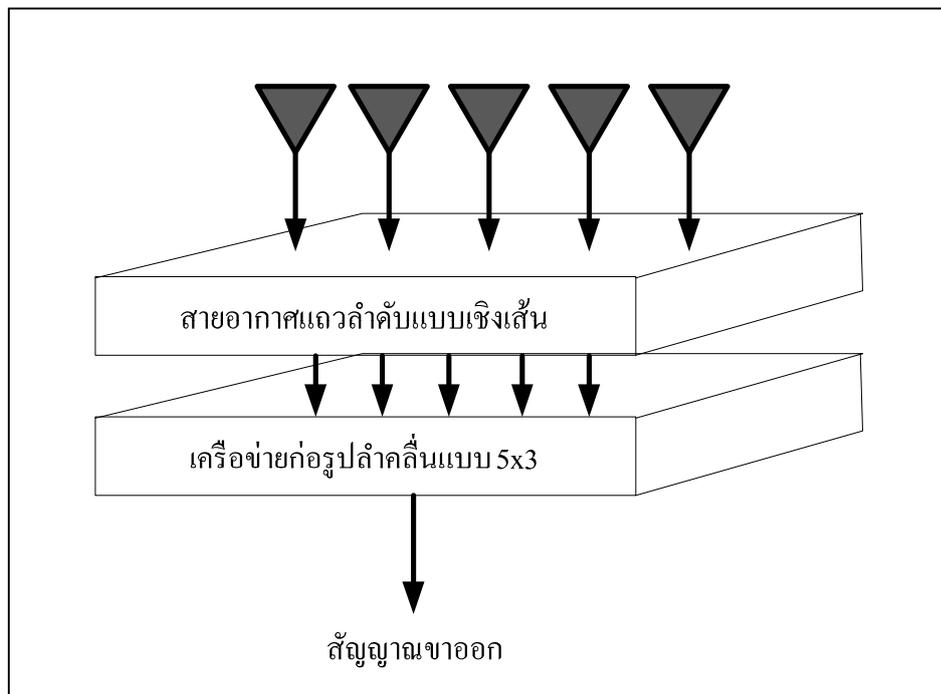
จากการที่ได้นำเสนอผลการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้พบว่าระบบสายอากาศแก่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ได้ โดยดูประสิทธิภาพของระบบจากค่าพารามิเตอร์หลัก 2 ค่า คือ ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวนและค่าความจุของช่องสัญญาณ จากนั้นจึงได้จำลองเพื่อหาความเหมาะสมของจำนวนสายอากาศและจำนวนลำคลื่นสำหรับในเซลล์ 1 เซกเตอร์ พบว่าควรใช้สายอากาศ 5 ต้น ลำคลื่น 3 ลำคลื่น ที่ทำให้ระบบเกิดประสิทธิภาพดีที่สุดเพื่อนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ได้

บทที่ 4

การออกแบบระบบสายอากาศเก็งแบบสวิตช์ลำคลื่นแบบ 5×3

4.1 กล่าวนำ

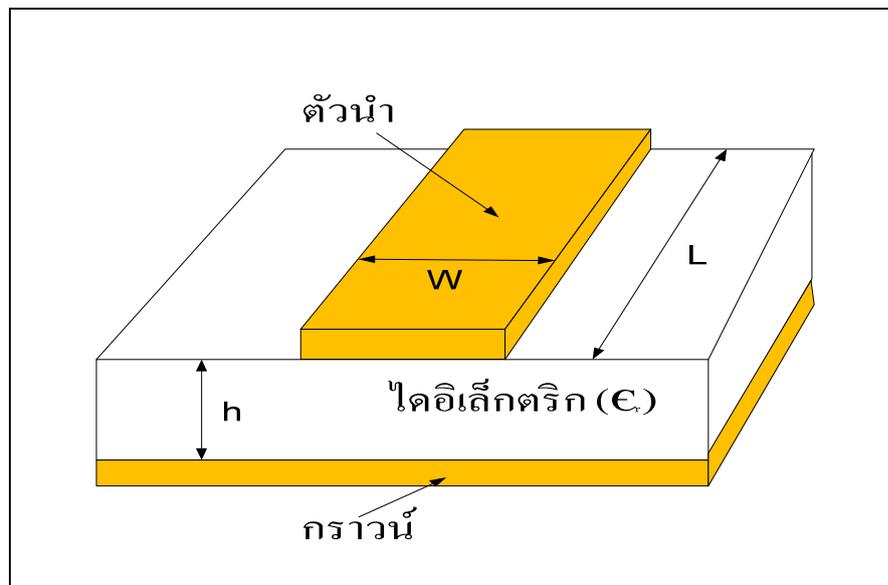
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบระบบต้นแบบของสายอากาศเก็งแบบสวิตช์ลำคลื่นแบบ 5×3 เพื่อนำไปใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีแอลทีไอทีที่เป็นเทคโนโลยีที่จะเข้ามามีบทบาทอย่างมากในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ ออกแบบระบบต้นแบบเพื่อทำงานในย่านความถี่ 2.5 – 2.69 GHz รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของระบบต้นแบบของงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นการออกแบบในส่วนของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นและส่วนที่สองเป็นการออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3 ในการออกแบบส่วนประกอบของระบบดังกล่าวเราจะใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองผลเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบต่อไป



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของระบบสายอากาศเก็งแบบสวิตช์ลำคลื่นสำหรับใช้งานในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่

4.2 การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบเชิงเส้น

สายอากาศในชุดอุปกรณ์ต้นแบบของระบบสายอากาศแฉวแบบสวิตช์ลำดับนี้จะเป็นสายอากาศประเภทแฉวลำดับเชิงเส้น ซึ่งจะมียอดประกอบคือ สายอากาศ 5 ต้น เรียงตัวเป็นเส้นตรง โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) เนื่องจากเราจำเป็นต้องเลือกใช้สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กระจายคลื่นได้รอบทิศทาง อีกทั้งสามารถออกแบบได้ง่ายครอบคลุมในย่านความถี่ที่ต้องการ และได้ทำการออกแบบที่ย่านความถี่ 2.5-2.69 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ใช้งานและใช้สายอากาศไมโครสตริปโมโนโพลที่มีการแผ่กระจายรอบทิศทาง โดยคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้คำนวณหาความกว้างของสายไมโครสตริป พิจารณาดังที่แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

กำหนดให้

$$\text{ความถี่กลางที่ใช้งาน (f)} = 2.595 \text{ GHz}$$

$$\epsilon_r = 4.5$$

$$\text{ความสูงของไดอิเล็กตริก (h)} = 1.66 \text{ mm}$$

$$\text{ออกแบบที่ } Z_0 = 50 \text{ } \Omega$$

จากการพิจารณาเงื่อนไขของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

$$\text{เนื่องจาก ค่า } Z_0 = 50 \text{ } \Omega \text{ ซึ่ง } Z_0 \geq 23.6 \text{ } \Omega$$

การคำนวณหาความกว้างของไมโครสตริป (W) เราใช้สมการที่ 4.1

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A}-2} & ; \frac{W}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.6}{\epsilon_r} \right\} \right] & ; \frac{W}{h} > 2 \end{cases} \quad (4.1)$$

หาค่า

$$A = \frac{Z_o}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (4.2)$$

แทนค่าจะได้

$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.5+1}{2}} + \frac{4.5-1}{4.5+1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.5} \right)$$

$$A = 1.54$$

นำค่า A แทนค่าในสมการที่ 4.1 เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A}-2}$$

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^{1.54}}{e^{2(1.54)}-2}$$

$$\frac{w}{h} = 1.89 \quad ; \frac{w}{h} < 2 \quad \text{เป็นไปตามเงื่อนไข}$$

ดังนั้น

$$w = 1.89h = 1.89(1.66) = 3.14 \text{ มิลลิเมตร}$$

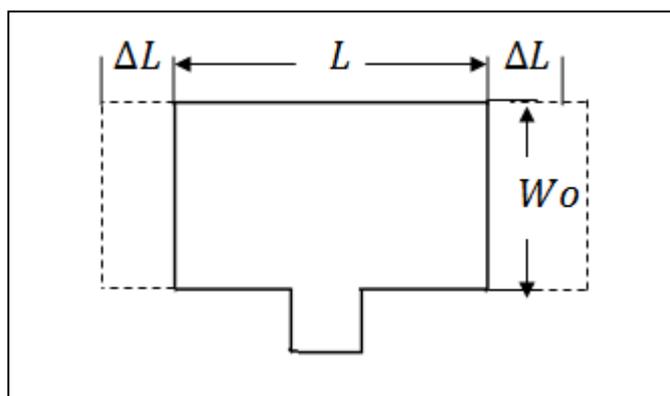
จากนั้นคำนวณหาความกว้างและความยาวของสายอากาศไมโครสตริป พิจารณาดังรูปที่แสดงในรูปที่ 4.3 จาก

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \left[1 + \frac{12h}{w} \right]^{-1/2} \quad (4.3)$$

จะได้

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{4.5} \left[1 + \frac{12(1.66)}{1.89} \right]^{-1/2}$$

$$\epsilon_{eff} = 2.98$$



รูปที่ 4.3 การคำนวณสายอากาศไมโครสตริป

หาความกว้างของสายอากาศ

$$w_0 = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4.4)$$

$$f_r = f \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (4.5)$$

$$W_o = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.595 \times 10^9 \times \sqrt{2.98}} \sqrt{\frac{2}{4.5+1}}$$

$$W_o = 20.19 \text{ มิลลิเมตร}$$

หาความยาวของสายอากาศ

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (4.6)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W_o}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W_o}{h} + 0.8 \right)} \quad (4.7)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W_o}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W_o}{h} + 0.8 \right)} \quad (4.8)$$

แทนค่าในสมการ (4.8) ได้ดังนี้

$$\Delta L = 0.412(1.66\text{mm}) \frac{(2.98 + 0.3) \left(\frac{20.19\text{mm}}{1.66\text{mm}} + 0.264 \right)}{(2.98 - 0.258) \left(\frac{20.19\text{mm}}{1.66\text{mm}} + 0.8 \right)}$$

$$\Delta L = 1.154 \text{ มิลลิเมตร}$$

จะได้

$$L = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 2.595 \times 10^9 \sqrt{2.98}} - 2 \times (1.154\text{mm})$$

$$L = 31.18 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นจะได้สายอากาศไมโครสตริปที่มีความกว้าง $W_o = 20.19$ มิลลิเมตร

$$\text{ความยาว } L = 31.18 \text{ มิลลิเมตร}$$

และความกว้างของสายไมโครสตริป = 3.14 มิลลิเมตร

ในรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการวางตัวของสายอากาศที่ใช้ในระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ ลำคลื่นที่มีการวางตัวเป็นเส้นตรง ซึ่งใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศ $d = \lambda/2$ ซึ่งเป็นระยะที่มีความเหมาะสมกับการวางตัวแบบเชิงเส้นมากที่สุด โดยสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นได้จากสมการที่ 4.9

$$v = f\lambda \quad (4.9)$$

ความยาวคลื่น (λ)

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2.595 \times 10^9}$$

$$\therefore \lambda = 10.17 \text{ เซนติเมตร}$$

โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศ

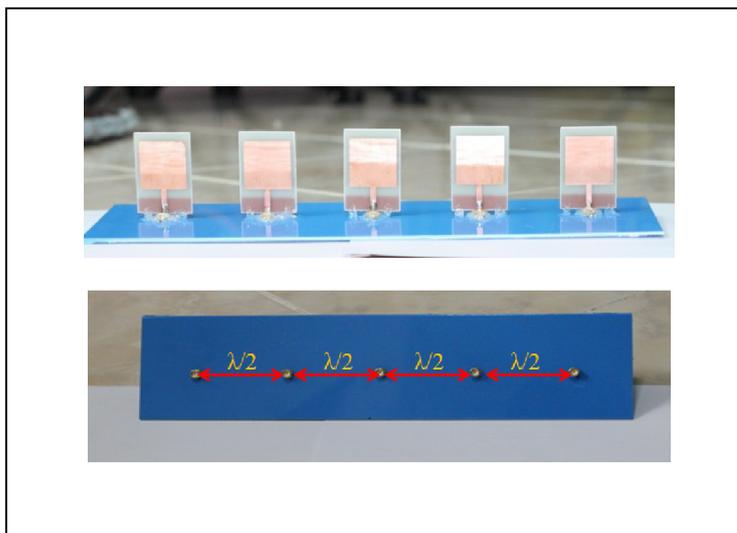
$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{10.17 \text{ cm}}{2}$$

$$\therefore d = 5.085 \text{ เซนติเมตร}$$

4.3 การออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3

เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นที่มีขนาด 5×1 และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/2$ และต้องการให้เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นสร้างลำคลื่นจำนวน 3 ทิศทาง ดังนั้นจึงไม่สามารถนำเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัทเลอร์เมทริกซ์มาใช้ได้โดยตรง จึงได้ทำการออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3 ได้โครงสร้างของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น 5×3 ดัง

แสดงในรูปที่ 2.14 โดยประกอบด้วยอุปกรณ์เชื่อมแบบไฮบริด (hybrid coupler) วงจรไขว้สัญญาณ (crossover) วงจรรวมสัญญาณ (combiner) วงจรแยกสัญญาณ (splitter) และวงจรเลื่อนเฟส (phase shifter) เราได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ทั้งหมดโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองผลเพื่อนำไปสร้างชิ้นงานจริงต่อไป



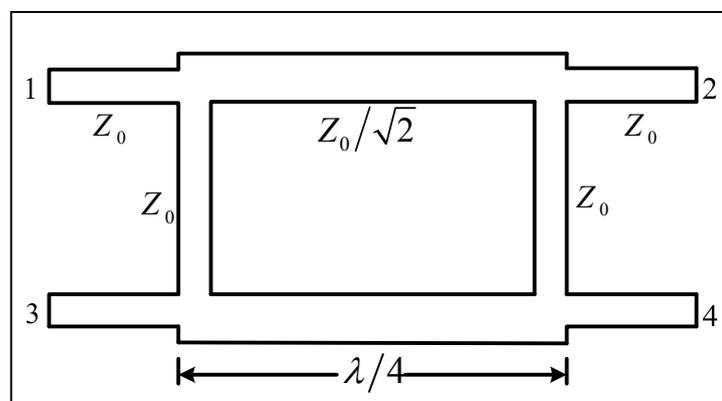
รูปที่ 4.4 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น 5×1 โดยใช้สายอากาศโมนโพล

4.3.1 การออกแบบวงจรเชื่อมแบบไฮบริด

จากโครงสร้างของเครื่องข่ายก่อรูปลำดับแบบ 5×3 จะต้องใช้วงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° และวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105° ซึ่งวิธีการออกแบบนั้นได้อ้างอิงทฤษฎีการออกแบบสายส่งสัญญาณจากหนังสือของ David M. Pozar (1998) โดยวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° คืออุปกรณ์เชื่อมต่อเกี่ยวกับทิศทางทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ถูกส่งเข้ามายังพอร์ตขาเข้าและส่งออกไปยังพอร์ตขาออกอย่างเท่ากัน โดยพอร์ตขาออกทั้งสองจะมีความต่างเฟส 90° พอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตขาเข้าจะเป็นพอร์ตแยกสัญญาณ เช่น เมื่อสัญญาณถูกส่งเข้ามายังพอร์ต 1 สัญญาณจะถูกส่งออกที่พอร์ต 2 และพอร์ต 4 อย่างละเท่าๆกัน โดยสัญญาณที่พอร์ตทั้งสองมีความต่างเฟส 90° พอร์ต 3 เป็นพอร์ตแยกโดดเดี่ยว (isolation port) ซึ่งเป็นพอร์ตที่ไม่ควรมีสัญญาณออกเลย ไฮบริดชนิดนี้มักจะทำมาจากไมโครสตริป ดังแสดงในรูปที่ 4.5 คือลักษณะพื้นฐานของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° ซึ่งจะเห็นว่าวงจรเชื่อมนี้จะสมมาตรกันแต่แต่ละพอร์ตสามารถใช้เป็นพอร์ตขาเข้าได้และพอร์ตขาออกจะเป็นพอร์ตที่อยู่ตรงข้ามกันกับที่เป็นพอร์ตขาเข้าเสมอ ส่วนพอร์ตแยกก็ยังคงเป็นพอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตขาเข้าเช่นกัน

สำหรับวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105° ก็ใช้หลักการออกแบบเช่นเดียวกันกับวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° โดยคัดแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองผลเพื่อให้ได้ค่ามุมเฟสที่เราต้องการ

ในการออกแบบเราจะใช้การคำนวณพื้นฐานมาจากการคำนวณของไมโครสตริป เช่นเดียวกับสายอากาศที่ได้ออกแบบ ดังสมการที่ 4.1 ซึ่งทำการออกแบบบนแผงวงจรพิมพ์แบบ FR4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 4.5 และมีความหนาของแผ่นไดอิเล็กตริก (d) เท่ากับ 1.66 มิลลิเมตร ที่ความถี่กลาง 2.595 GHz ดังนั้นสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 4.5 วงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90°

เมื่อ 1) $Z_0 = 50\Omega$ แทนค่าในสมการ (4.2) จะได้

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

แทนค่าจะได้
$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{4.5 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.5} \right)} = 1.54$$

เมื่อเรานำ ($A = 1.54$) ไปแทนใน 4.1 จะได้

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^{1.54}}{e^{2(1.54)} - 2} = \frac{37.32}{19.76}$$

$$\frac{w}{h} = 1.88 \quad ; \quad \left(\frac{w}{h} < 2 \right) \text{ แสดงว่าใช้ได้}$$

เพราะฉะนั้น

$$w = h(1.88) = (1.66)(1.88) = 3.14 \text{ มิลลิเมตร}$$

และจากสมการที่ 4.3 แทนค่าจะได้

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.5+1}{2} + \frac{4.5-1}{4.5} \left[1 + \frac{12(1.66)}{1.88} \right]^{-1/2}$$

$$\epsilon_{eff} = 2.98$$

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

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}(f)} \quad (4.10)$$

แทนค่าจะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.98}(2.595 \text{ GHz})}$$

$$\lambda = 52.44 \text{ มิลลิเมตร}$$

ที่ 90° ;

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{52.44}{4} = 26.22 \text{ มม.}$$

เมื่อ 2) $\frac{Z_0}{\sqrt{2}} = \frac{50}{\sqrt{2}} \Omega = 35.3553$

จาก

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0(\sqrt{\epsilon_r})} \quad (4.11)$$

แทนค่าจะได้

$$B = \frac{377\pi}{2(35.3553)(\sqrt{4.5})} = 8$$

และแทนค่า B ในสมการ 4.1 จะได้

$$\begin{aligned} \frac{w}{h} &= \frac{2}{\pi} \left[8 - 1 - \ln(2(8) - 1) + \frac{4.5 - 1}{2(4.5)} \left\{ \ln(8 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.5} \right\} \right] \\ &= \frac{2}{\pi} [4.29 + 0.39\{1.42\}] \end{aligned}$$

$$\frac{w}{h} = 3.22 \quad ; \left(\frac{w}{h} > 2 \right) \text{ แสดงว่าใช้ได้}$$

เพราะฉะนั้น

$$w = h(3.22) = (1.66)(3.22) \approx 5.34 \text{ มิลลิเมตร}$$

และจากสมการที่ (4.3) แทนค่าจะได้

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{4.5} \left[1 + \frac{12(1.66)}{3.22} \right]^{-1/2}$$

$$\epsilon_{eff} = 3.04$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_e \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ แสดงว่าค่าที่ได้เป็นจริงเพราะฉะนั้นจากสมการที่ (4.9) จะได้

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}(f)}$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.04}(2.595 \text{GHz})}$$

$$\lambda = 66.3 \text{ มิลลิเมตร}$$

ที่ 90° ;

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{66.3}{4} = 16.575 \text{ มิลลิเมตร}$$

เราจึงนำค่าที่หาได้ไปแทนในรูปที่ 4.5 ซึ่งเขียนใหม่ได้ในรูปที่ 4.6

- ที่เส้นที่ Z_0 จะมี

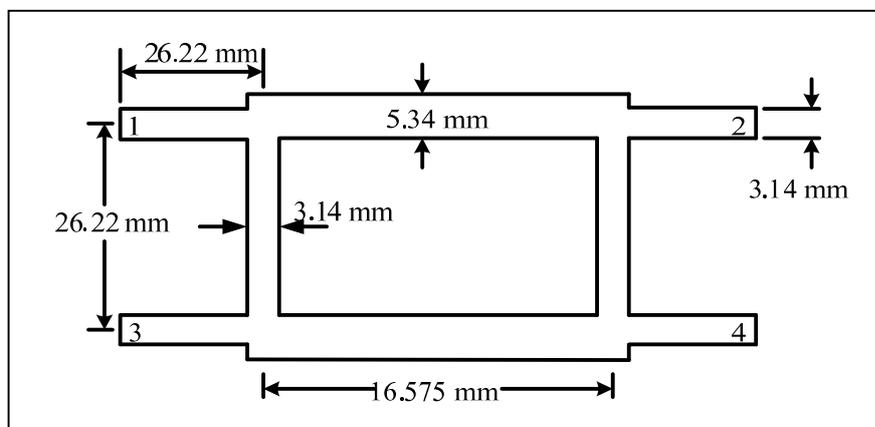
ความกว้าง = 3.14 มิลลิเมตร

ความยาว = 26.22 มิลลิเมตร

- ที่เส้นที่ $\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$ จะมี

ความกว้าง = 5.34 มิลลิเมตร

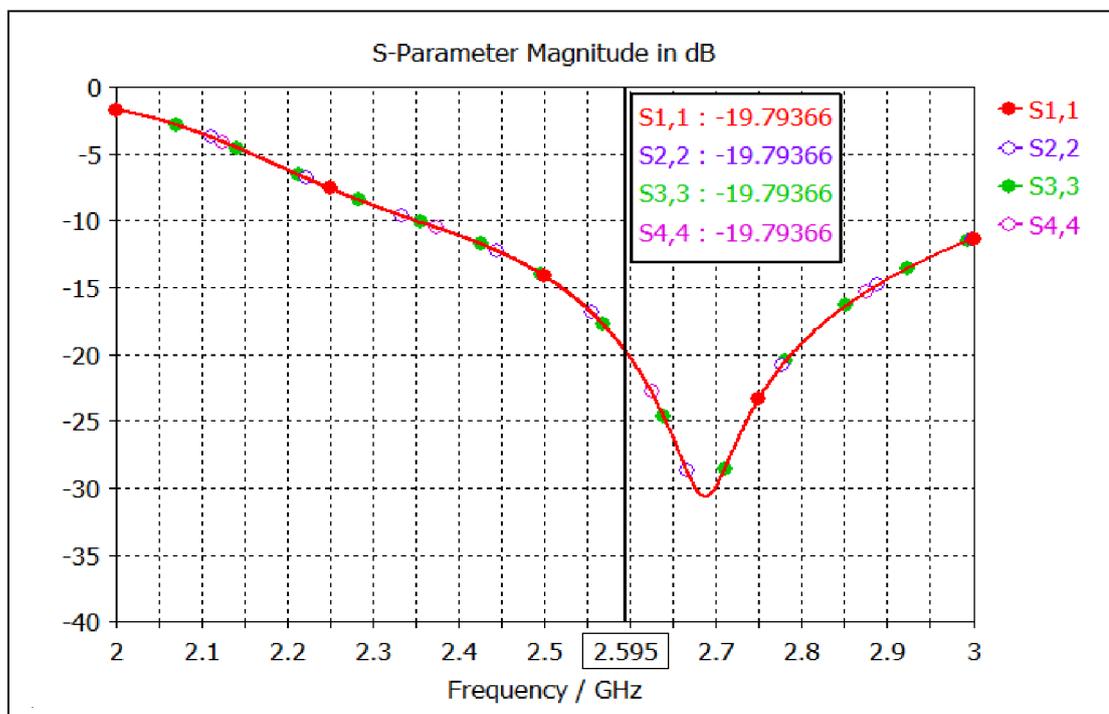
ความยาว = 16.575 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.6 ขนาดของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90°

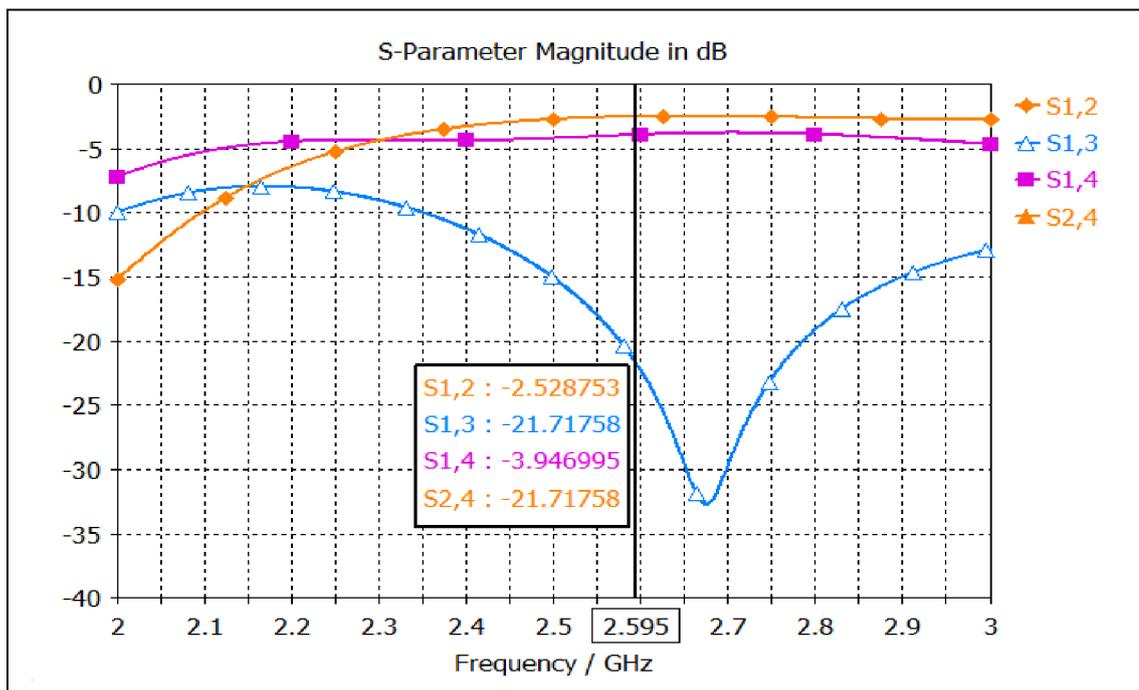
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° แล้ว ได้นำวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° ที่คำนวณได้ไปจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ผลดังรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° นี้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 และ 4 ได้มากและมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองพอร์ต โดยที่สัญญาณจะไม่มี การส่งผ่านไปยังพอร์ต 1 และพอร์ต 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 นอกจากนี้มุมเฟสของสัญญาณเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ต 1 ผ่านไปออกที่พอร์ต 2 และ 4 นั้นมีมุมเฟสต่างกันอยู่ประมาณ 90° แสดงดังรูปที่ 4.9 จากผลที่ได้พบว่าเป็นไปตามทฤษฎีและสามารถนำไปใช้สร้างจริงได้

เมื่อได้วงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° แล้ว จึงได้ดัดแปลงวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° เพื่อให้ได้ค่าความต่างเฟสเปลี่ยนกลายเป็นวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105° โดยใช้โปรแกรมจำลองผลช่วยปรับค่าพารามิเตอร์ ซึ่งในการจำลองนั้นนอกจากจะให้มุมเฟสที่ต้องการแล้วยังต้องคำนึงถึงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยวและค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อให้มีค่าที่เหมาะสมอีกด้วย ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105° ที่จำลองผลได้นั้นแสดงดังรูปที่ 4.10 และผลการจำลองดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105° นี้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้

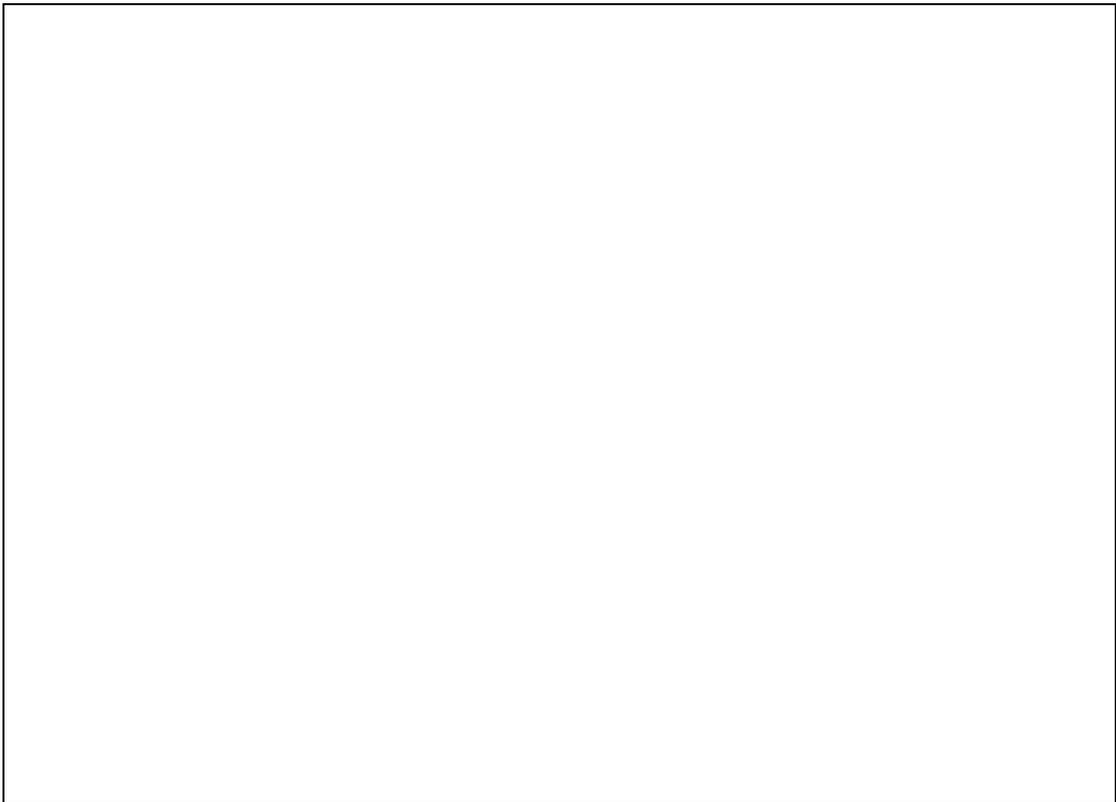


รูปที่ 4.7 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90°

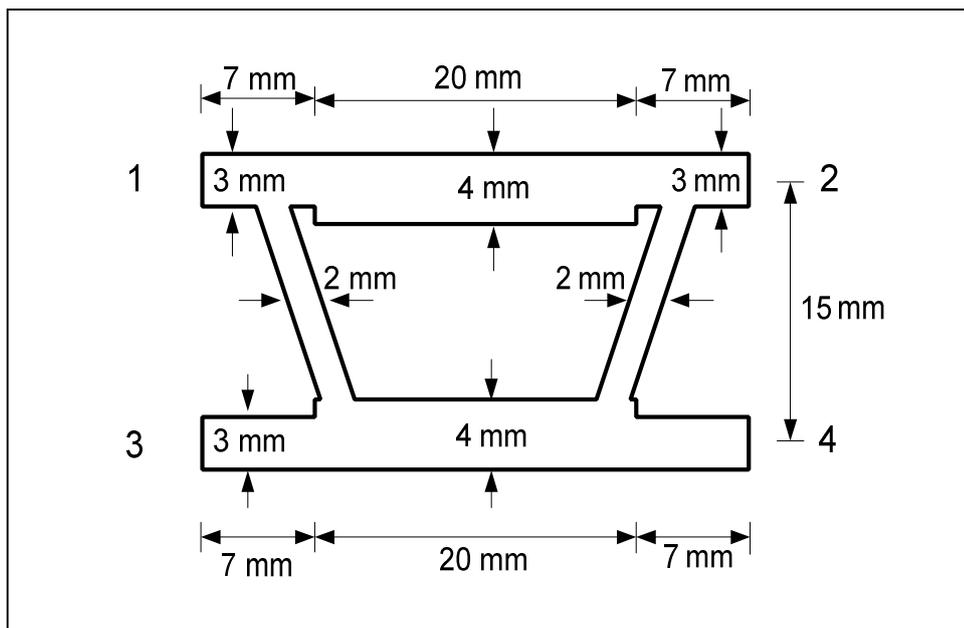
และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 และ 4 ได้มากและมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองพอร์ต โดยที่สัญญาณจะไม่มี การส่งผ่านไปยังพอร์ต 1 และพอร์ต 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 นอกจากนี้มุมเฟสของสัญญาณเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ต 1 ผ่านไปออกที่พอร์ต 2 และ 4 นั้นมีมุมเฟสต่างกันอยู่ 104.6° แสดงดังรูปที่ 4.13 จากการจำลองผลนั้นมุมเฟสที่ได้อาจจะมีความไม่ตรง 105° มากนักแต่ทิศทางของลำคลื่นยังคงมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบ



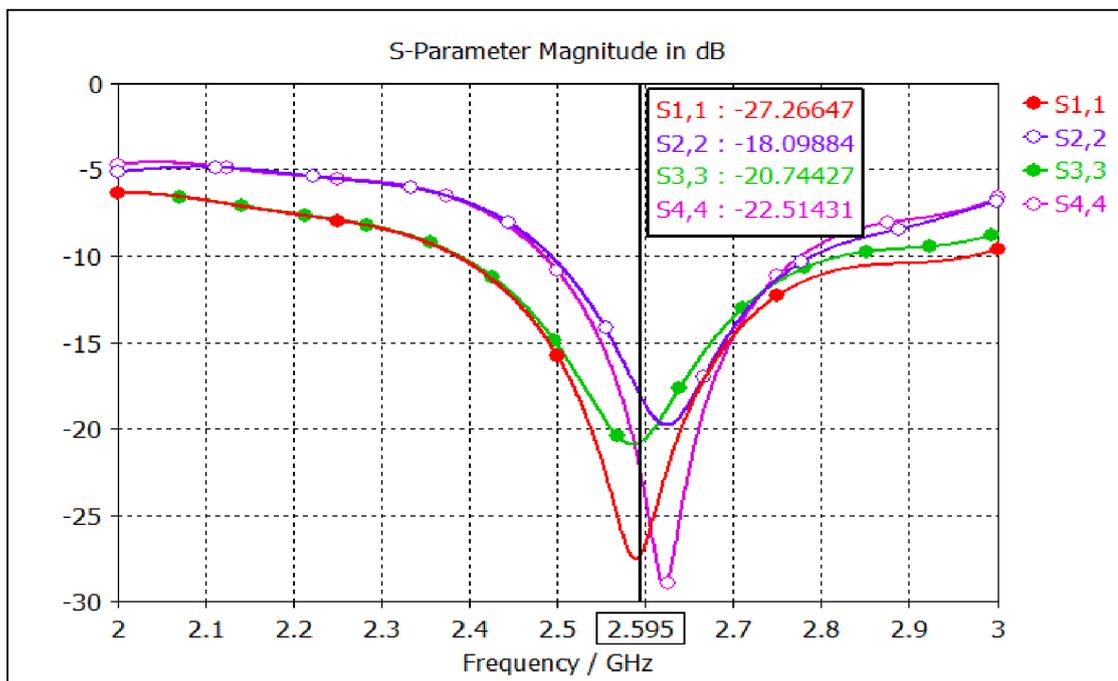
รูปที่ 4.8 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคียวในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90°



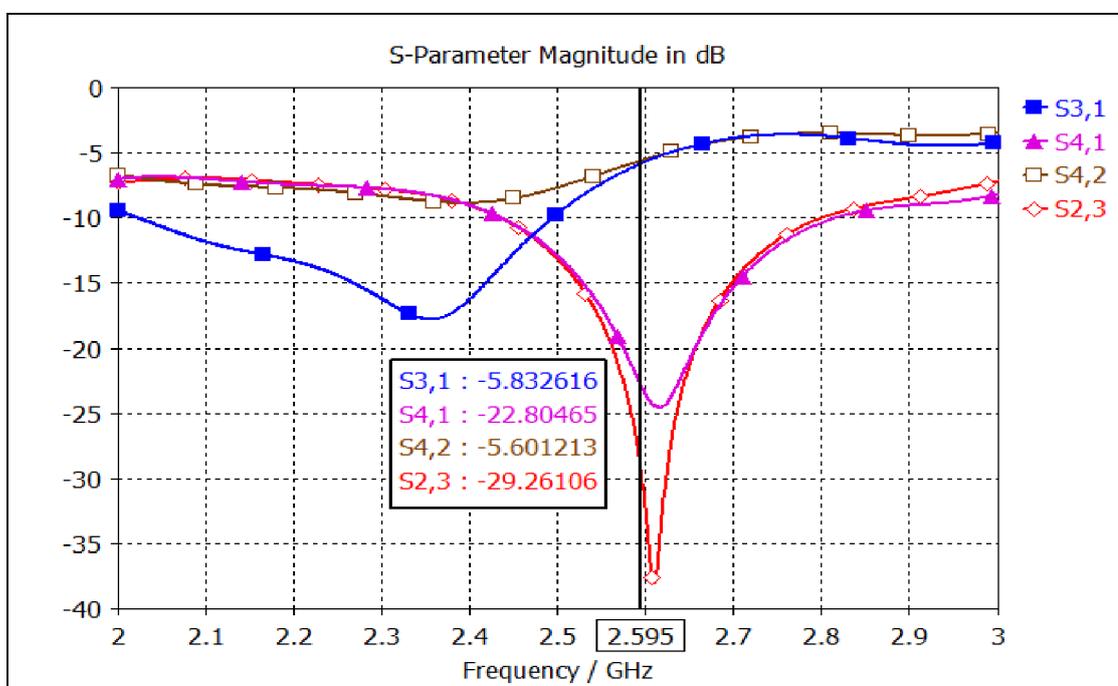
รูปที่ 4.9 มุมเฟสของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90°



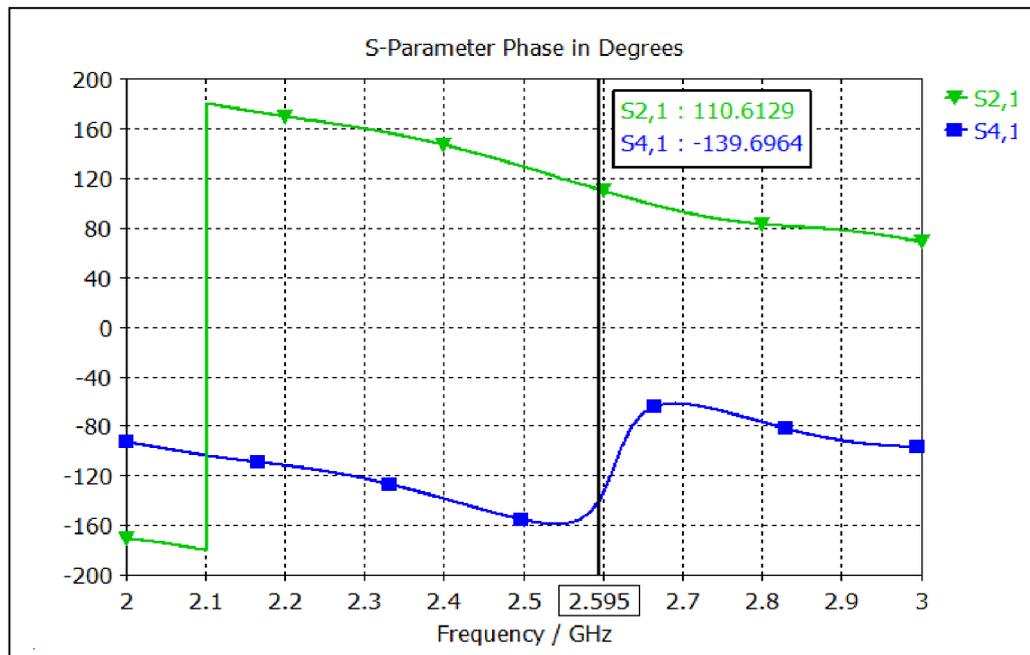
รูปที่ 4.10 ขนาดของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105°



รูปที่ 4.11 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรถูกเชื่อมแบบไฮบริด 105°



รูปที่ 4.12 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรถูกเชื่อมแบบไฮบริด 105°

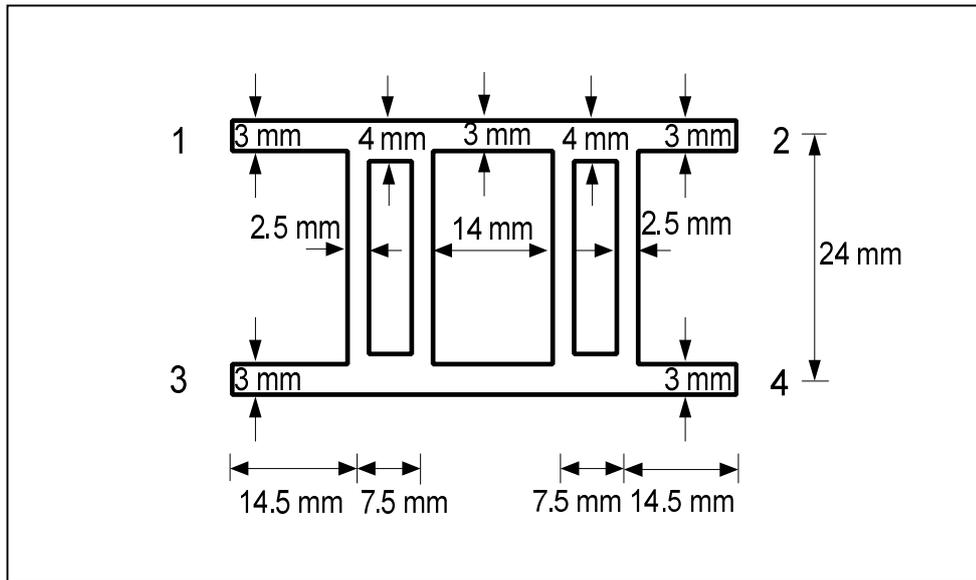


รูปที่ 4.13 มุมเฟสของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 105°

4.3.2 การออกแบบวงจรไขว้สัญญาณ

ในส่วนที่เรียกว่าตัวไขว้สัญญาณจะทำหน้าที่เป็นทางผ่านของสัญญาณ โดยสัญญาณที่เข้ามานั้นจะเดินทางในลักษณะไขว้คือเมื่อสัญญาณเข้าที่พอร์ต 1 จะเดินทางออกที่พอร์ต 4 และเมื่อสัญญาณเข้าที่พอร์ต 3 จะเดินทางออกพอร์ต 2 ซึ่งในการคำนวณเพื่อออกแบบนั้นจะใช้สมการเช่นเดียวกันกับวงจรเชื่อมแบบไฮบริด โดยเป็นการนำวงจรเชื่อมแบบไฮบริดมาต่อเข้ากันสองตัวก็จะได้เป็นวงจรไขว้สัญญาณ

รูปที่ 4.14 แสดงขนาดของวงจรไขว้สัญญาณที่ได้จากการนำวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° มาต่อกันสองตัวและนำไปจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ได้จำลองผลดังรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณนี้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 4 และสัญญาณจากพอร์ต 2 ไป 3 ได้มาก ซึ่งแสดงว่าสัญญาณสามารถเดินทางผ่านได้มาก โดยที่สัญญาณจะไม่มี การส่งผ่านจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 และพอร์ต 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.16 นอกจากนี้มุมเฟสของสัญญาณเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ต 1 ผ่านไปออกที่พอร์ต 4 นั้น มีมุมเฟสเท่ากับมุมเฟสของสัญญาณเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ต 1 ผ่านไปออกที่พอร์ต 4 นั้นมีมุมเฟสเท่ากับมุมเฟสของสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ต 3 ผ่านไปออกที่พอร์ต 2 แสดงดังรูปที่ 4.17 จากผลที่ได้พบว่าเป็นไปตามทฤษฎีและสามารถนำไปใช้สร้างจริงได้



รูปที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ของตัวไขว้สัญญาณ



รูปที่ 4.15 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ

4.3.3 การออกแบบวงจรรวมและแยกสัญญาณ

ลักษณะของวงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณมีหลายรูปแบบ ทั้งแบบ wilkinson และแบบอื่น ๆ ซึ่งการออกแบบและการสร้างอาจจะมีหลายแบบ เช่น แบบใช้หม้อแปลง ลักษณะของรูปแบบนี้จะใช้ระบบของความถี่ต่ำไม่สูงมาก กำลังงานสูง แบบใช้สายโคแอกเชียลซึ่งใช้ได้ที ความถี่กลางระดับเมกะเฮิรตซ์และการออกแบบ โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ เป็นวงจรแบบ ไมโครสตริปเหมาะกับการใช้กับความถี่สูงหรือช่วงกำลังงานไม่สูงมากนัก

ลักษณะวงจรแยกสัญญาณ (splitter) เป็นการแยกสัญญาณออกเป็นสองทางหรือหลายทาง ก็ได้แล้วแต่ความต้องการที่ออกแบบ แต่ต้องพิจารณาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจรซึ่งคือการแมตช์ซิ่งของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต ทั้งนี้ขนาดของสัญญาณจะลดลงตามจำนวนการแยกสัญญาณด้วย ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.18 เป็นบล็อกรูปไดอะแกรมของวงจรการแยกสัญญาณ จาก 1 เป็น 2 ทาง สำหรับเป็นสัญญาณอินพุตให้กับภาควงจรอื่น ลักษณะวงจรรวมสัญญาณ (combiner) เป็นการรวมสัญญาณจากสองทิศทางหรือหลายทิศทางให้เป็นสัญญาณรวมเพียงสัญญาณเดียว ซึ่งต้องพิจารณาถึงอิมพีแดนซ์ของวงจรของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต เช่นเดียวกับวงจรแยกสัญญาณดังรูปที่ 4.19 จะเป็นบล็อกรูปไดอะแกรมวงจรรวมสัญญาณของการรวมสัญญาณจาก 2 สัญญาณเป็นทิศทางเดียวเพื่อให้ได้กำลังรวมทั้งหมดของวงจร ซึ่งทางเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะต้องมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ที่จะแมตช์เพื่อให้ได้กำลังงานสูงสุดและมีการสูญเสียน้อยที่สุด โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วงจรแยกสัญญาณและวงจรรวมสัญญาณแบบ Wilkinson โดยวงจรรวมสัญญาณและแยกสัญญาณแบบ Wilkinson แสดงดังรูปที่ 4.20

ในส่วนของการออกแบบนั้นจะใช้การคำนวณพื้นฐานมาจากการคำนวณของไมโครสตริปเช่นเดียวกับสายอากาศที่ได้ออกแบบ ดังสมการที่ 4.1 เช่นเดิม ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

เมื่อ 1) $Z_0 = 50\Omega$ จาก

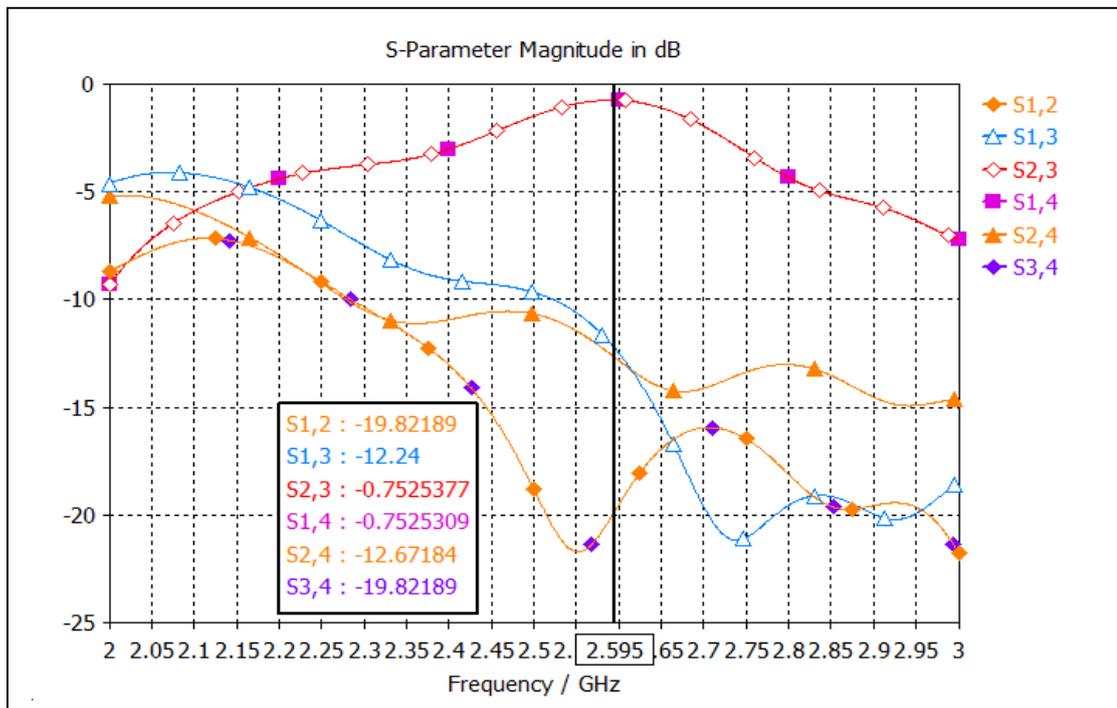
$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)}$$

แทนค่าจะได้

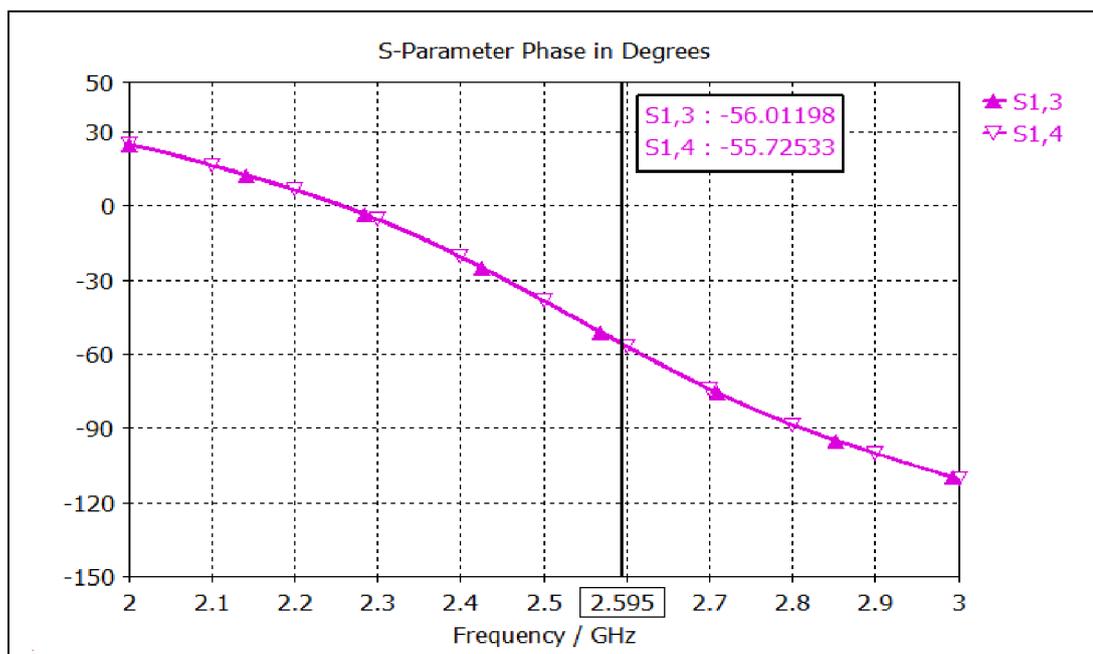
$$A = \frac{50}{60} \sqrt{\frac{4.5 + 1}{2} + \frac{4.5 - 1}{4.5 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.5} \right)} = 1.54$$

และ

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}$$



รูปที่ 4.16 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ



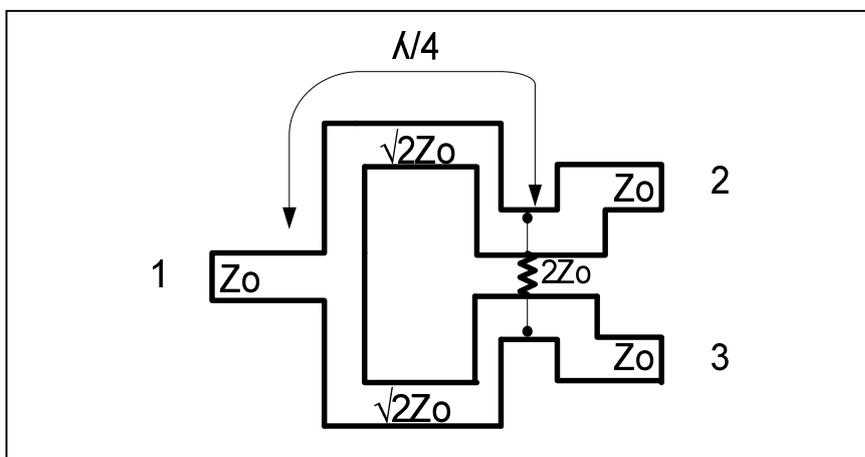
รูปที่ 4.17 มุมเฟสของวงจรไขว้สัญญาณ



รูปที่ 4.18 บล็อกไดอะแกรมของวงจรแยกสัญญาณ



รูปที่ 4.19 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรวมสัญญาณ



รูปที่ 4.20 วงจรรวมสัญญาณและแยกสัญญาณแบบ Wilkinson

เมื่อเรานำ ($A = 1.54$) ไปแทนจะได้

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^{1.54}}{e^{2(1.54)} - 2}$$

$$= \frac{37.32}{19.76}$$

$$\frac{w}{h} = 1.88 \quad ; \left(\frac{w}{h} < 2 \right) \text{ แสดงว่าใช้ได้}$$

$$w = h(1.88) = (1.66)(1.88) = 3.14 \text{ มม.}$$

และจาก

$$\varepsilon_{eff} = \frac{4.5+1}{2} + \frac{4.5-1}{4.5} \left[1 + \frac{12(1.66)}{1.88} \right]^{-1/2}$$

$$\varepsilon_{eff} = 2.98$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ แสดงว่าค่าที่ได้เป็นจริงเพราะฉะนั้นจากสมการที่ (4.10) จะได้

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}(f)}$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.98}(2.595 \text{ GHz})}$$

$$\lambda = 66.96 \text{ มิลลิเมตร}$$

ที่ 90° ;

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{66.96}{4} = 16.74 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อ 2) $\sqrt{2}Z_0 = \sqrt{2}(50) = 70.7\Omega$

จาก

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

แทนค่าจะได้ $A = \frac{70.7}{60} \sqrt{\frac{4.5+1}{2}} + \frac{4.5-1}{4.5+1} \left(0.23 + \frac{0.11}{4.5} \right) = 2.12$

และ

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}$$

เมื่อเรานำ ($A = 2.12$) ไปแทนจะได้

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^{2.12}}{e^{2(2.12)} - 2}$$

$$\frac{w}{h} = 1.00 \quad ; \left(\frac{w}{h} < 2 \right) \text{ แสดงว่าใช้ได้}$$

$$w = h(1.00) = (1.66)(1.00) = 1.66 \text{ มิลลิเมตร}$$

และจาก

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.5+1}{2} + \frac{4.5-1}{4.5} \left[1 + \frac{12(1.66)}{1.00} \right]^{-1/2}$$

$$\epsilon_{eff} = 2.92$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_e \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ แสดงว่าค่าที่ได้เป็นจริงเพราะฉะนั้นจากสมการที่ (4.10) จะได้

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}(f)}$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.92} (2.595 \text{GHz})}$$

$$\lambda = 67.65 \text{ มิลลิเมตร}$$

ที่ 90° ;

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{67.65}{4} = 16.9125 \text{ มิลลิเมตร}$$

- ที่เส้นที่ Z_0 จะมี

$$\text{ความกว้าง} = 3.14 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{ความยาว} = 16.74 \text{ มิลลิเมตร}$$

- ที่เส้นที่ $\sqrt{2}Z_0$ จะมี

$$\text{ความกว้าง} = 1.66 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$\text{ความยาว} = 16.9125 \text{ มิลลิเมตร}$$

- ที่ $2Z_0$ เป็นการต่อตัวต้านทานเพื่อแมตซ์ซิ่งวงจร

$$\text{โดย } Z_0 = 50\Omega$$

ดังนั้น

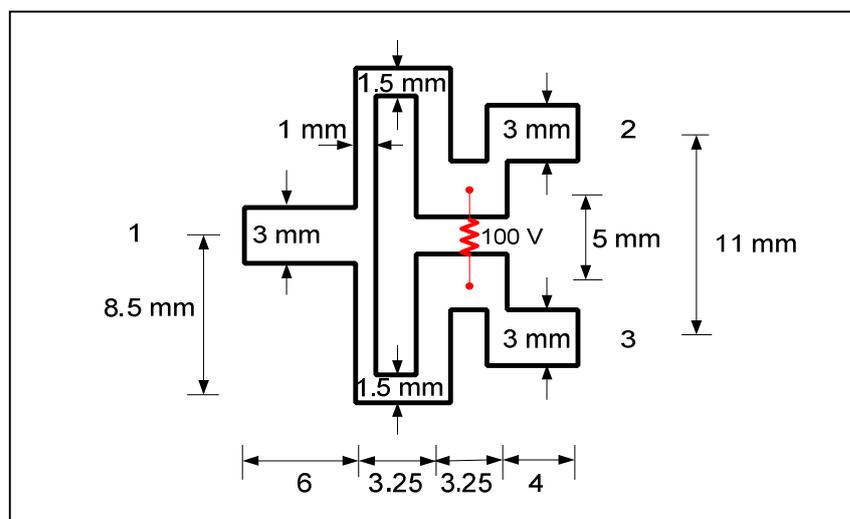
$$2Z_0 = 2 \times 50\Omega = 100\Omega$$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ขนาดครบได้ขนาดแสดงดังรูปที่ 4.21 จากนั้นจึงได้ทำการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรรวมสัญญาณและแยกสัญญาณนี้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 และ 3 อย่างละเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ

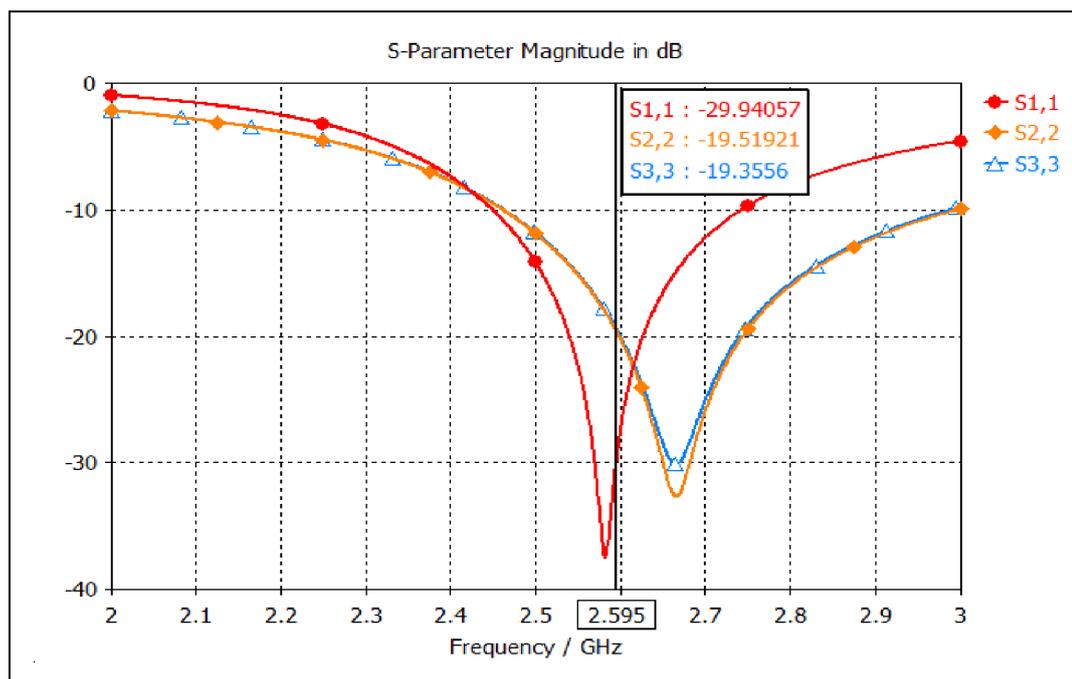
4.3.4 การออกแบบวงจรเลื่อนเฟส

เป็นวงจรที่มีการเลื่อนเฟสไปยังมุมเฟสที่ต้องการ ออกแบบโดยใช้ไมโครสตริป ซึ่งมีการปรับค่าความยาวและขีดเส้นไมโครสตริปเพื่อให้ได้ค่ามุมเฟสที่ต้องการ ความกว้างของสายไมโครสตริปก็จะมีขนาดเท่ากับอุปกรณ์อื่นๆที่ได้คำนวณมา มีความกว้างเท่ากับ 3.14 มิลลิเมตร สำหรับความยาวนำอุปกรณ์ตัวอื่นๆมาต่อกันแล้ววัดความยาวที่ต้องการ บางจุดต้องมีการขีดเพื่อให้

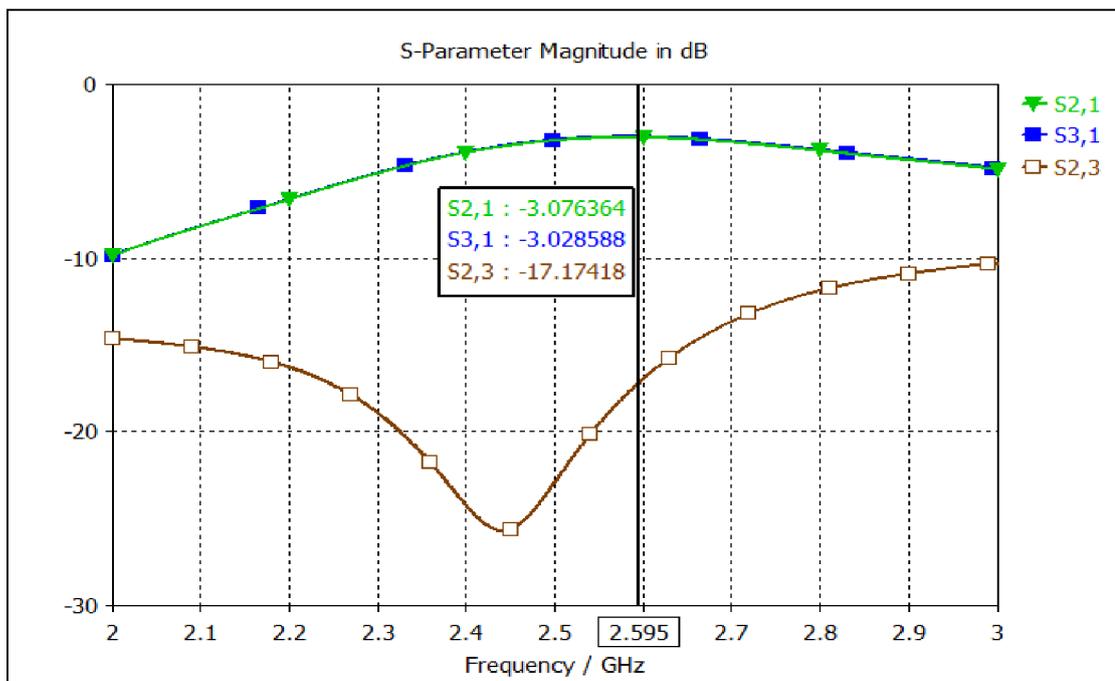
ได้ความยาวและเฟสที่ต้องการ ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองแบบ โดยวงจรเลื่อนเฟสที่ต้องใช้ในเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ออกแบบไว้ พร้อมผลการจำลองแบบแสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเลื่อนเฟส ค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 และค่ามุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟสที่ค่าความต่างเฟสต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 ถึง 4.45 ซึ่งผลที่ได้มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้และค่าความต่างเฟสที่ออกแบบได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5° ถือว่าใช้งานได้เช่นกัน



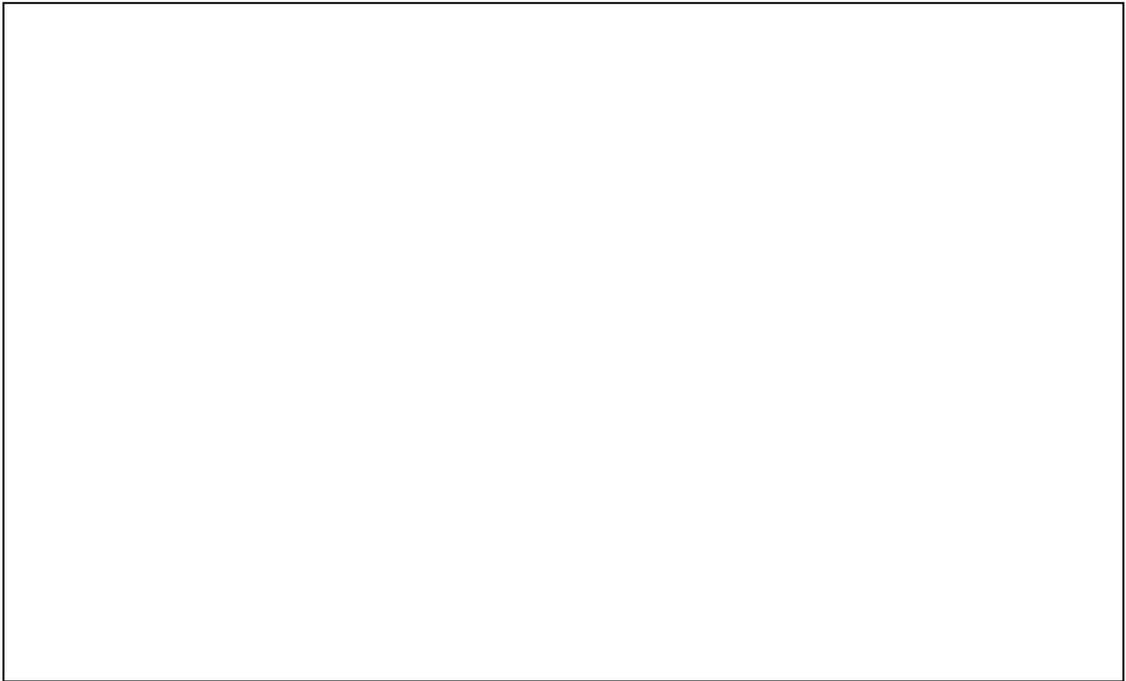
รูปที่ 4.21 ขนาดของวงจรรวมสัญญาณและแยกสัญญาณแบบ Wilkinson



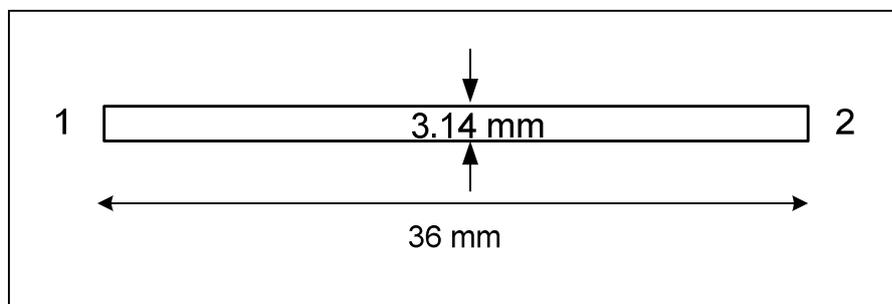
รูปที่ 4.22 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรรวมสัญญาณและแยกสัญญาณ



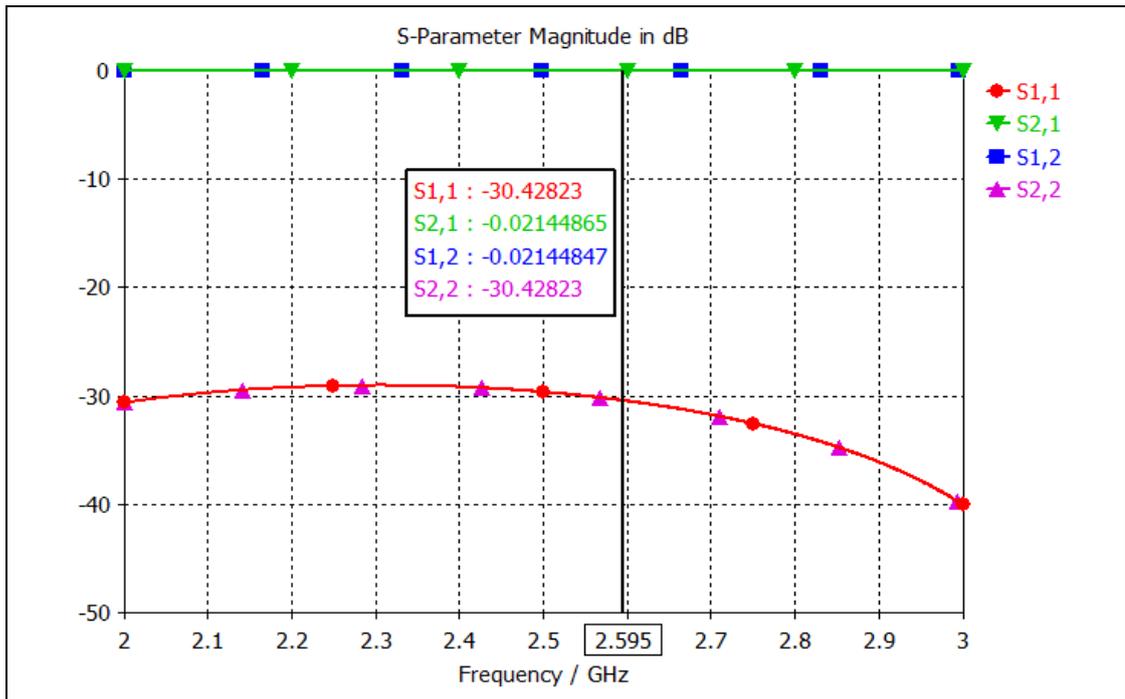
รูปที่ 4.23 ค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 และ 3



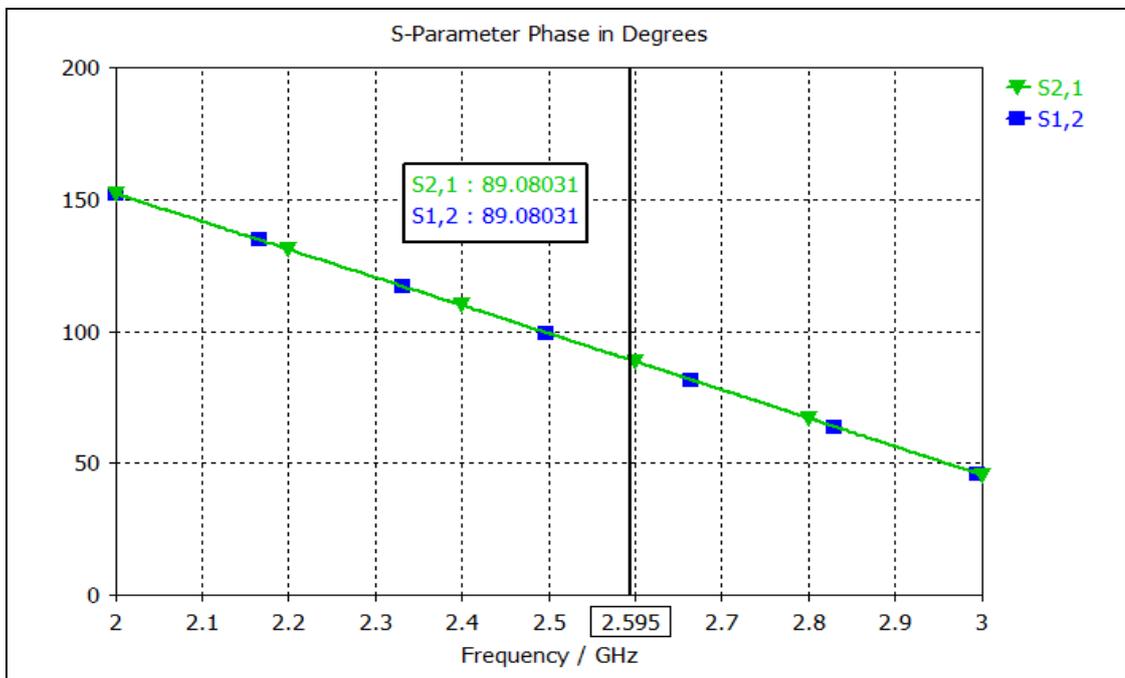
รูปที่ 4.24 มุมเฟสของวงจรรวมและแยกสัญญาณ



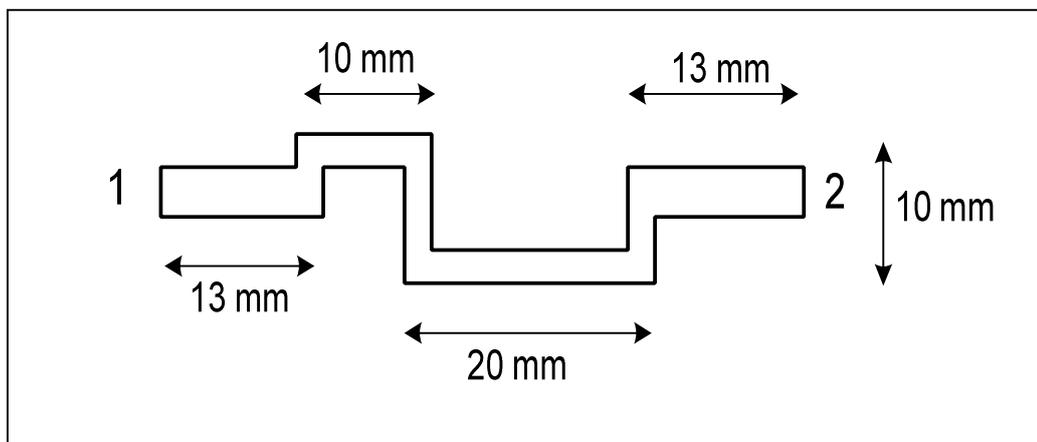
รูปที่ 4.25 วงจรเลื่อนเฟส 0°



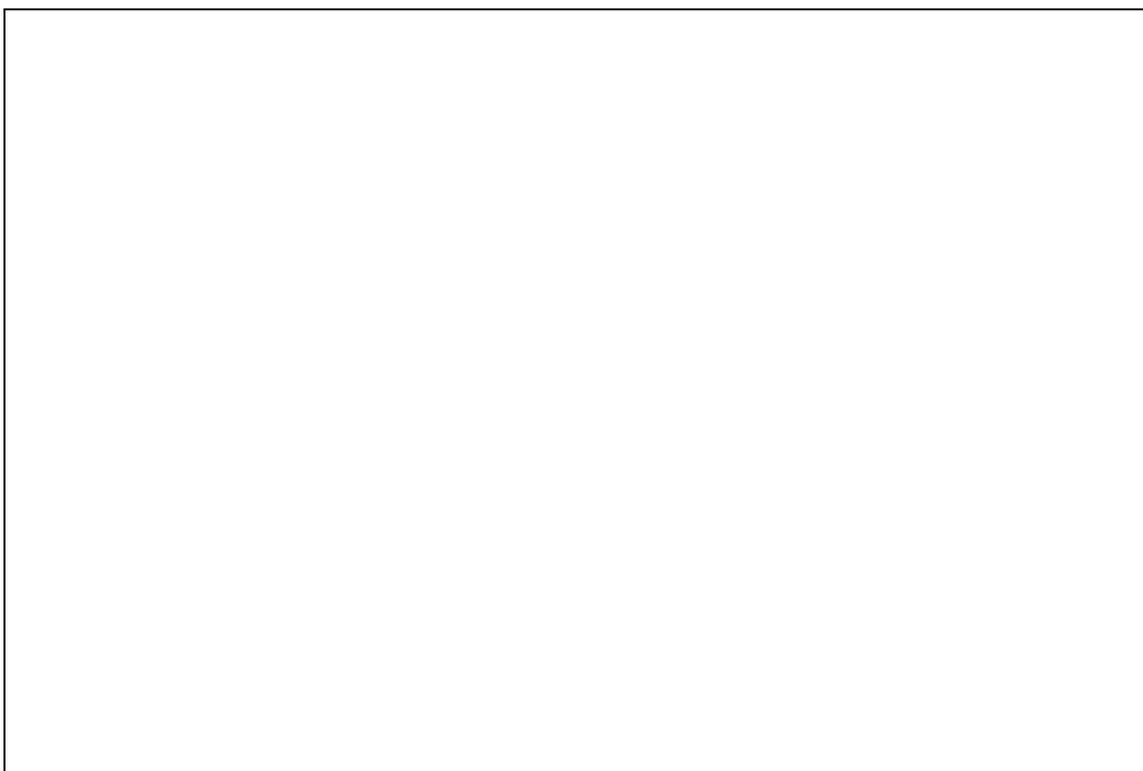
รูปที่ 4.26 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตและค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรเลื่อนเฟส 0°



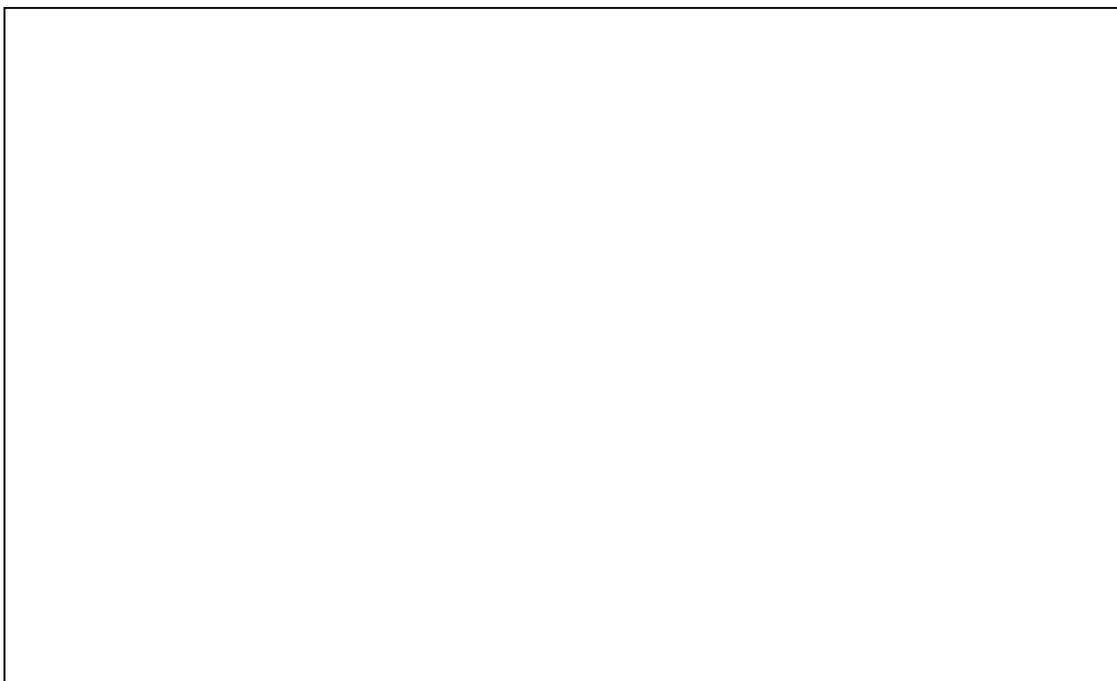
รูปที่ 4.27 ค่ามุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 0°



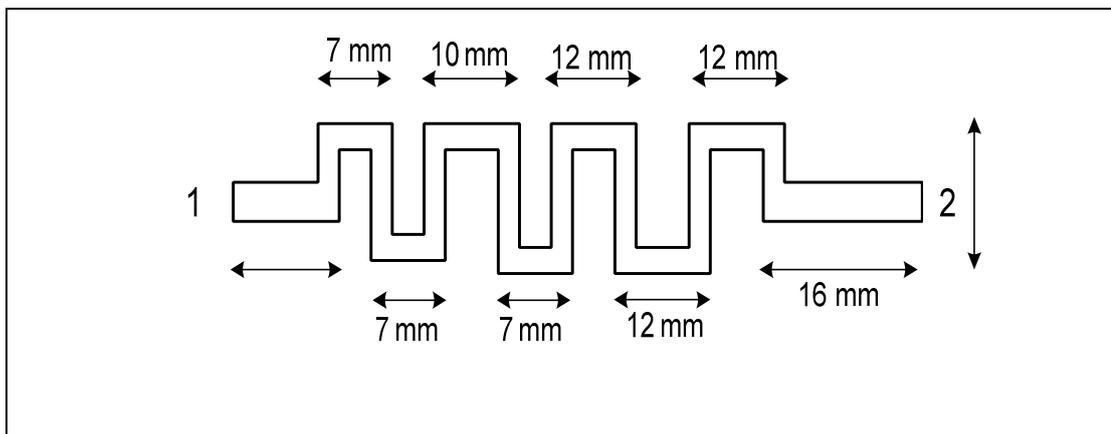
รูปที่ 4.28 วงจรเลื่อนเฟส 25°



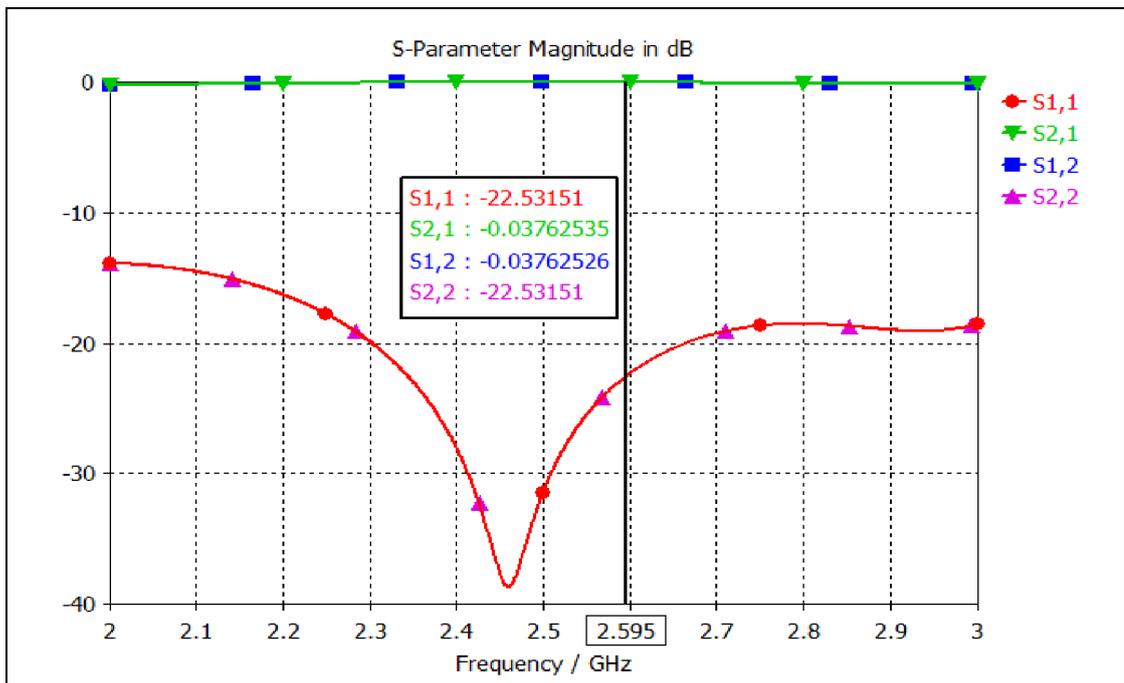
รูปที่ 4.29 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตและค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรเลื่อนเฟส 25°



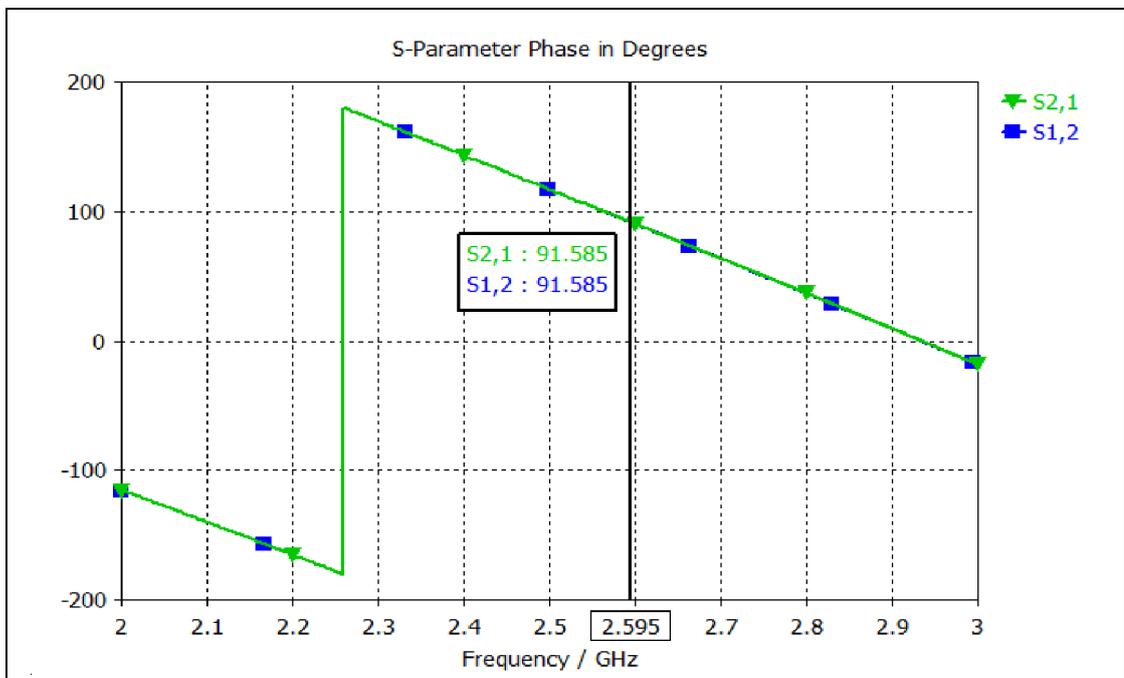
รูปที่ 4.30 คำนวมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 25°



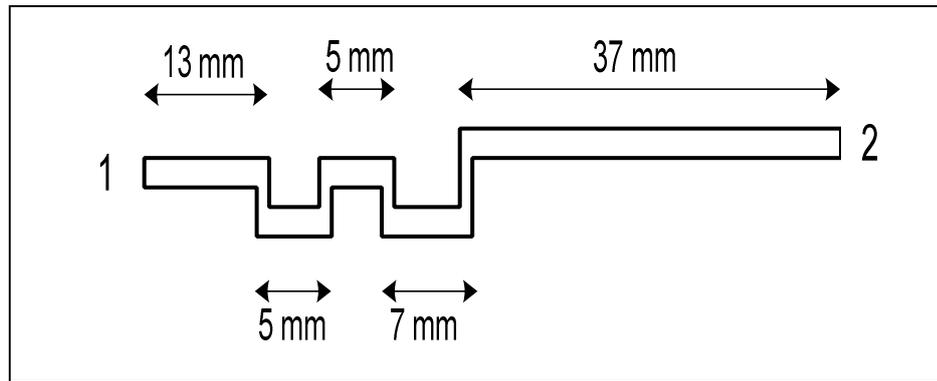
รูปที่ 4.31 วงจรเลื่อนเฟส 90°



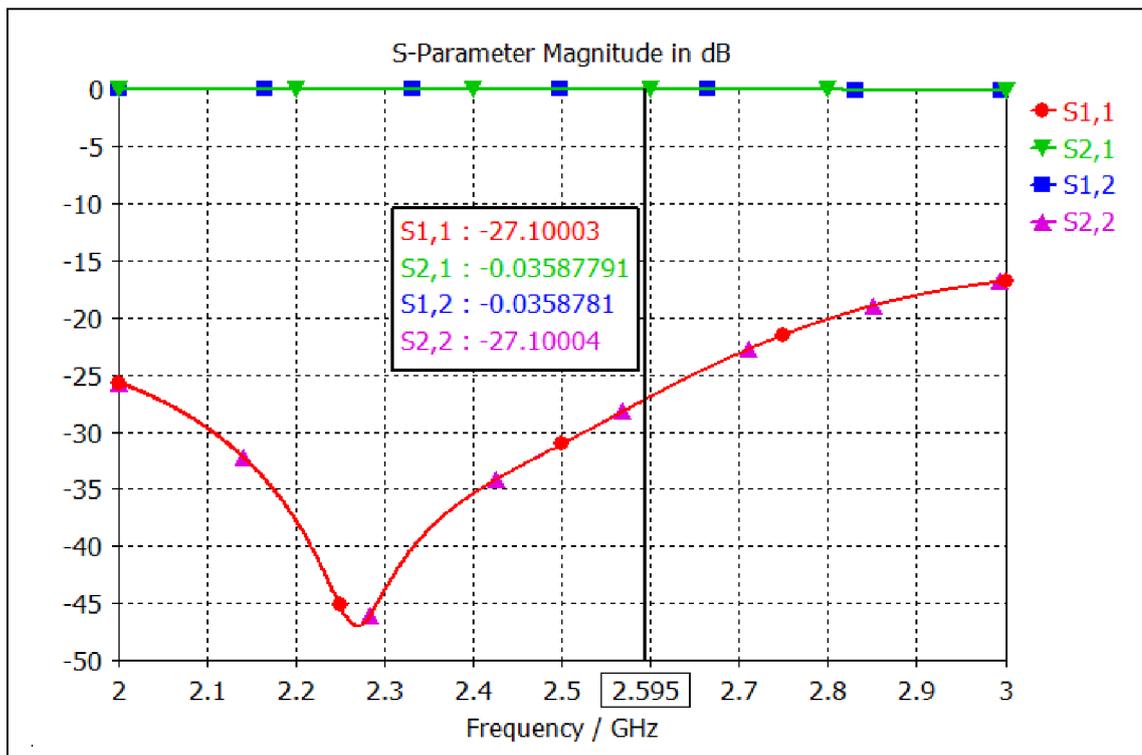
รูปที่ 4.32 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตและค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรเลื่อนเฟส 90°



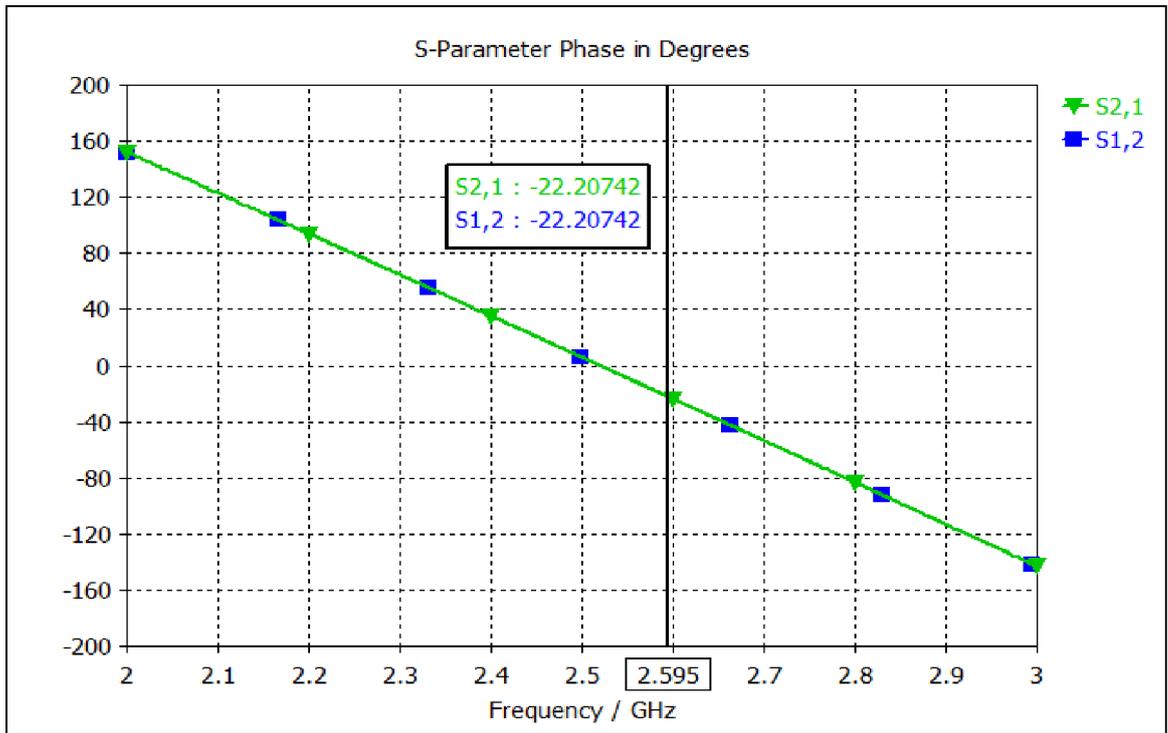
รูปที่ 4.33 ค่ามุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 90°



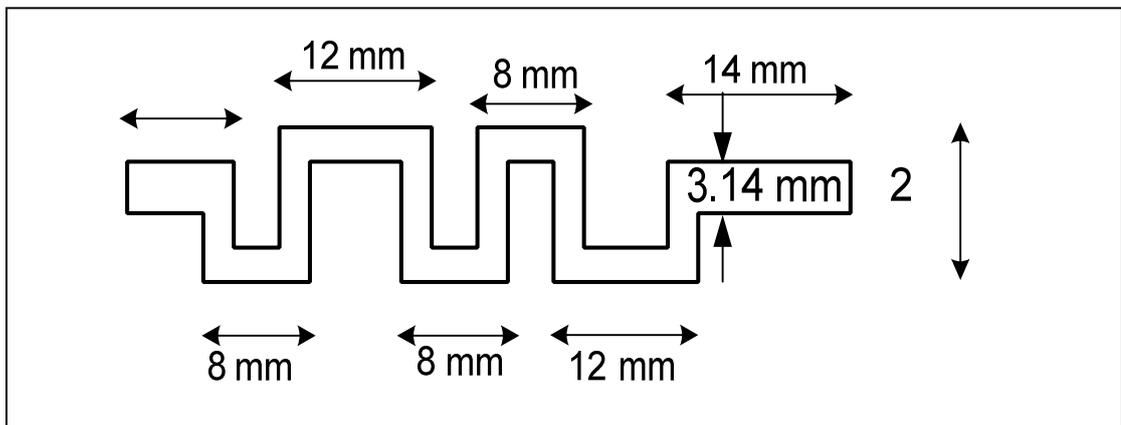
รูปที่ 4.34 วงจรเลื่อนเฟส -20°



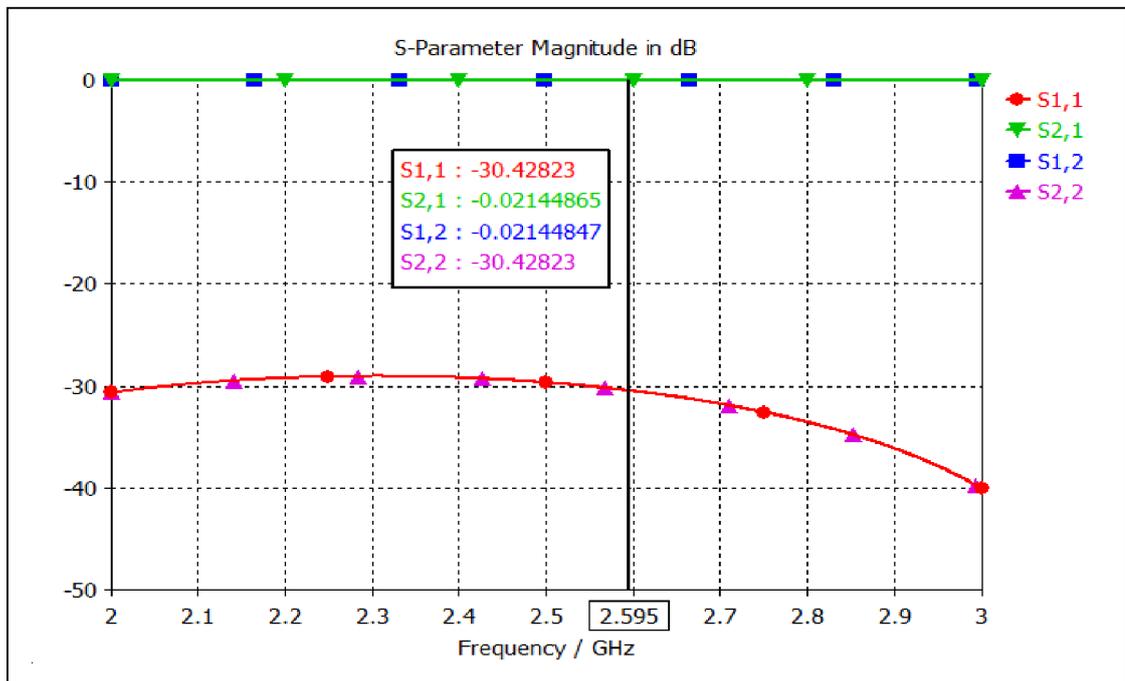
รูปที่ 4.35 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตและค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรเลื่อนเฟส -20°



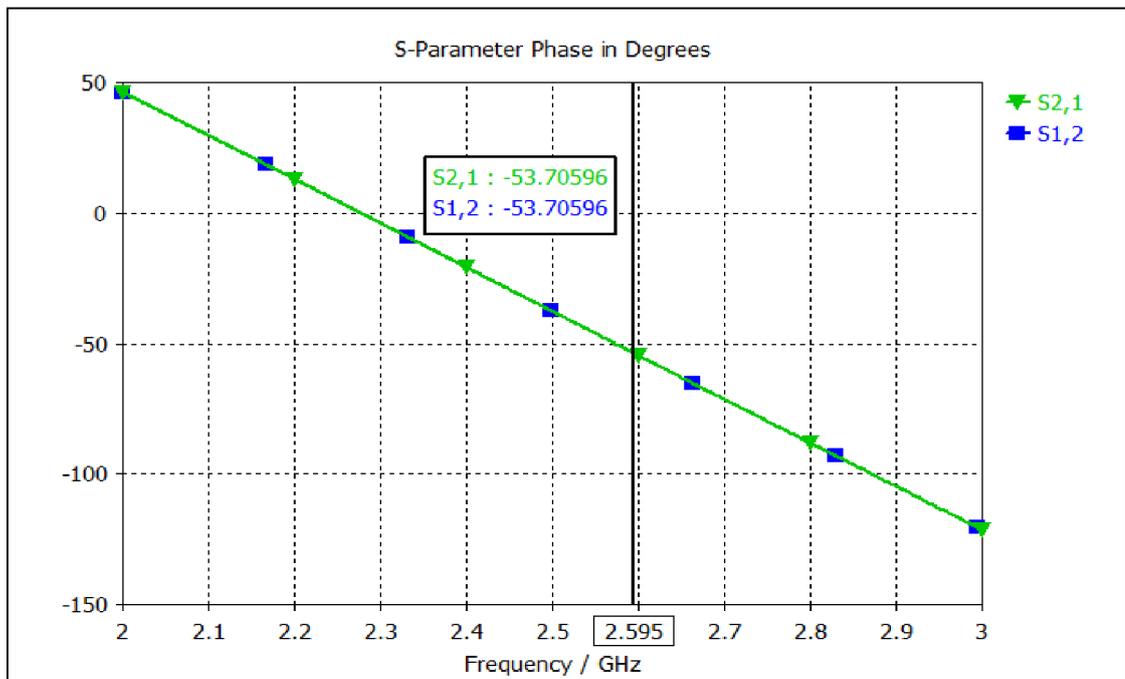
รูปที่ 4.36 ค่ามุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -20°



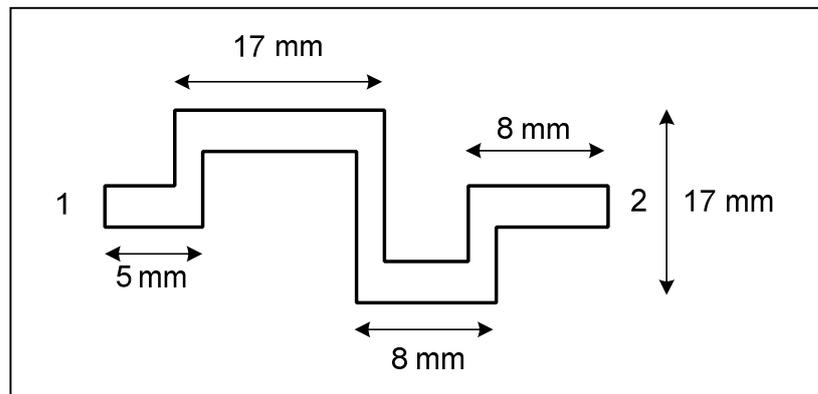
รูปที่ 4.37 วงจรเลื่อนเฟส -52.5°



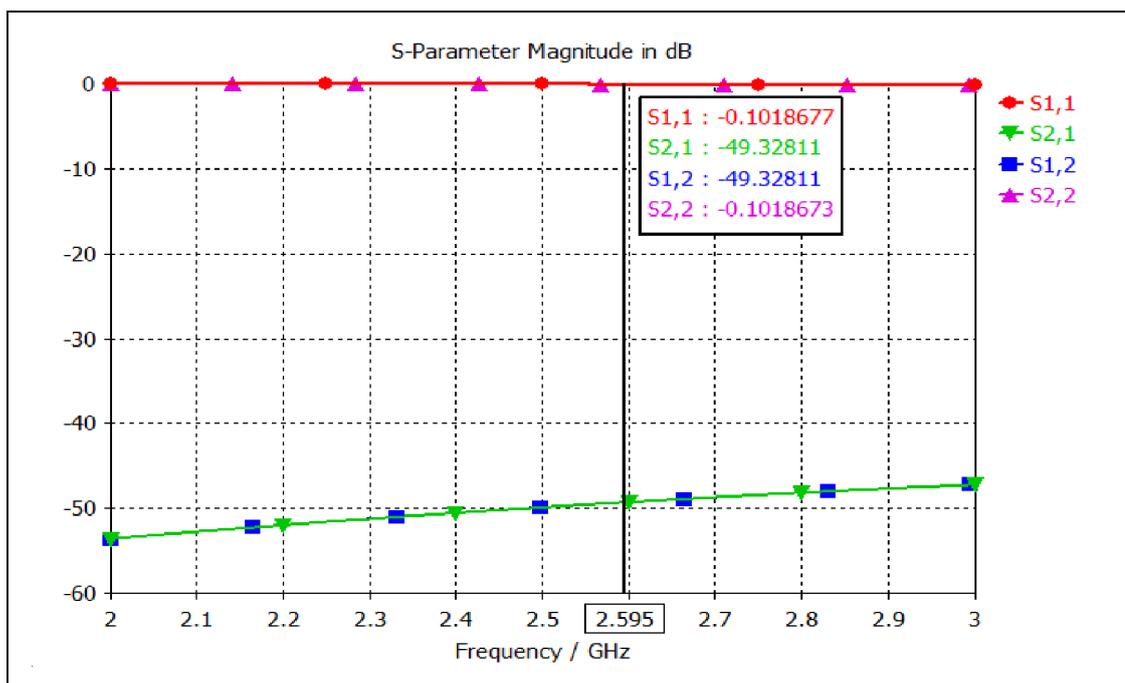
รูปที่ 4.38 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตและค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรเลื่อนเฟส -52.5°



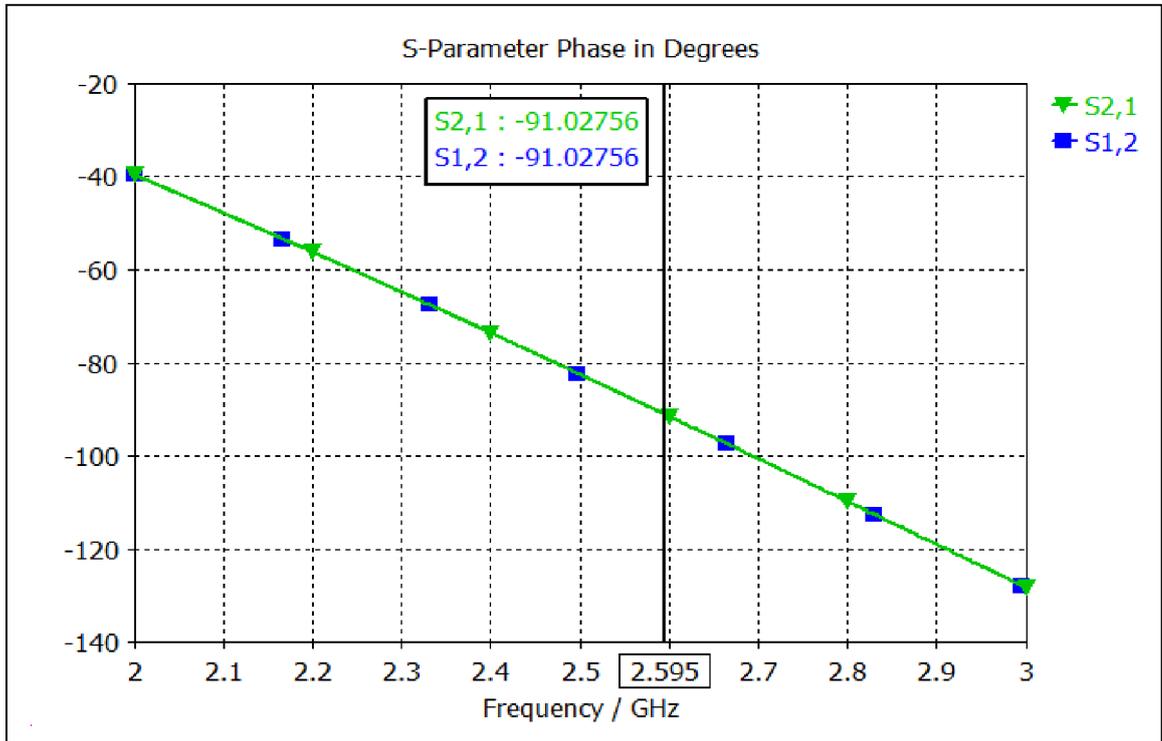
รูปที่ 4.39 ค่านุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -52.5°



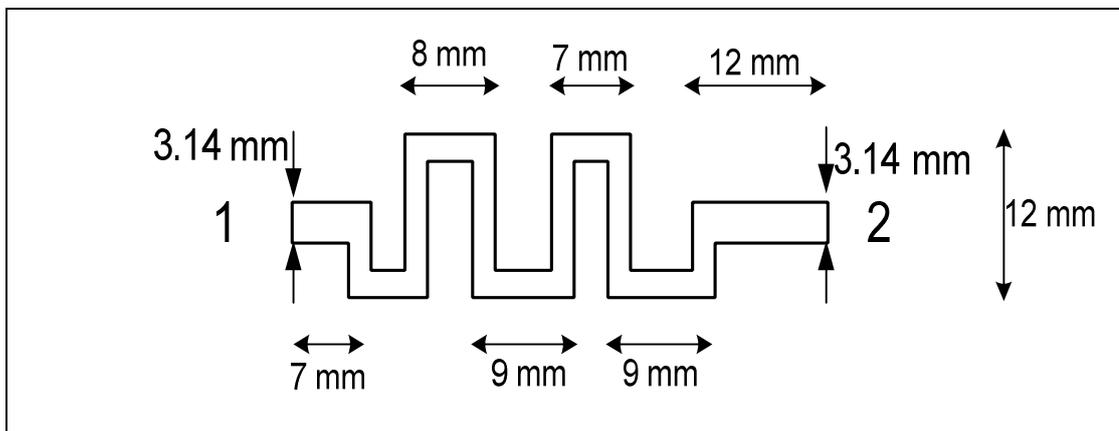
รูปที่ 4.40 วงจรเลื่อนเฟส -90°



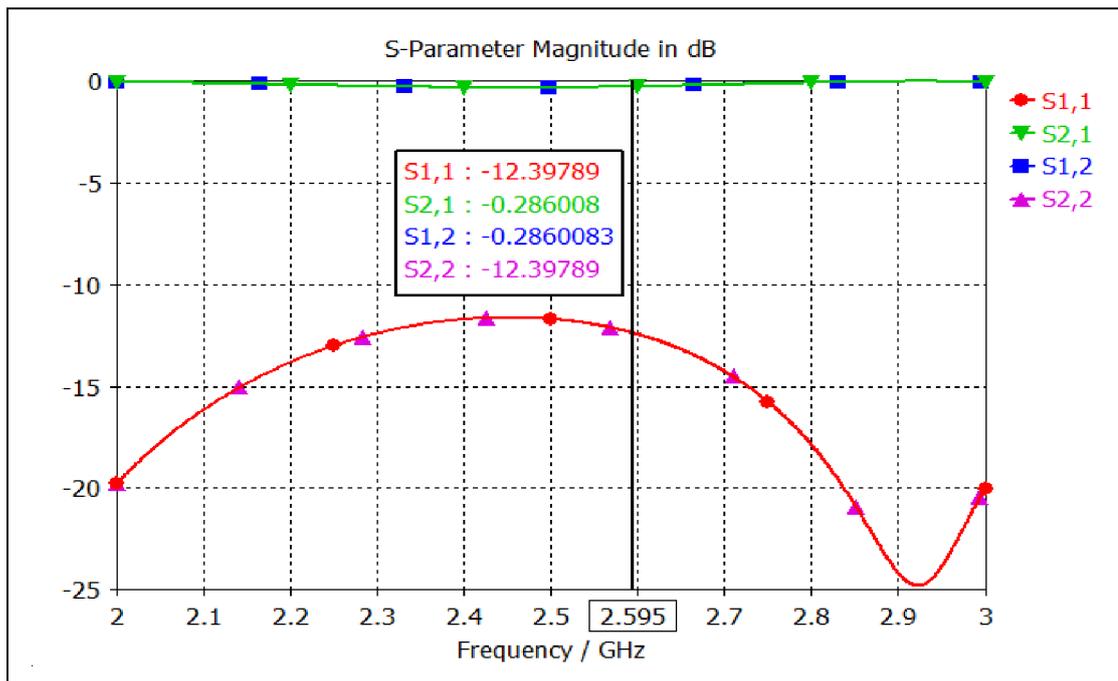
รูปที่ 4.41 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตและค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรเลื่อนเฟส -90°



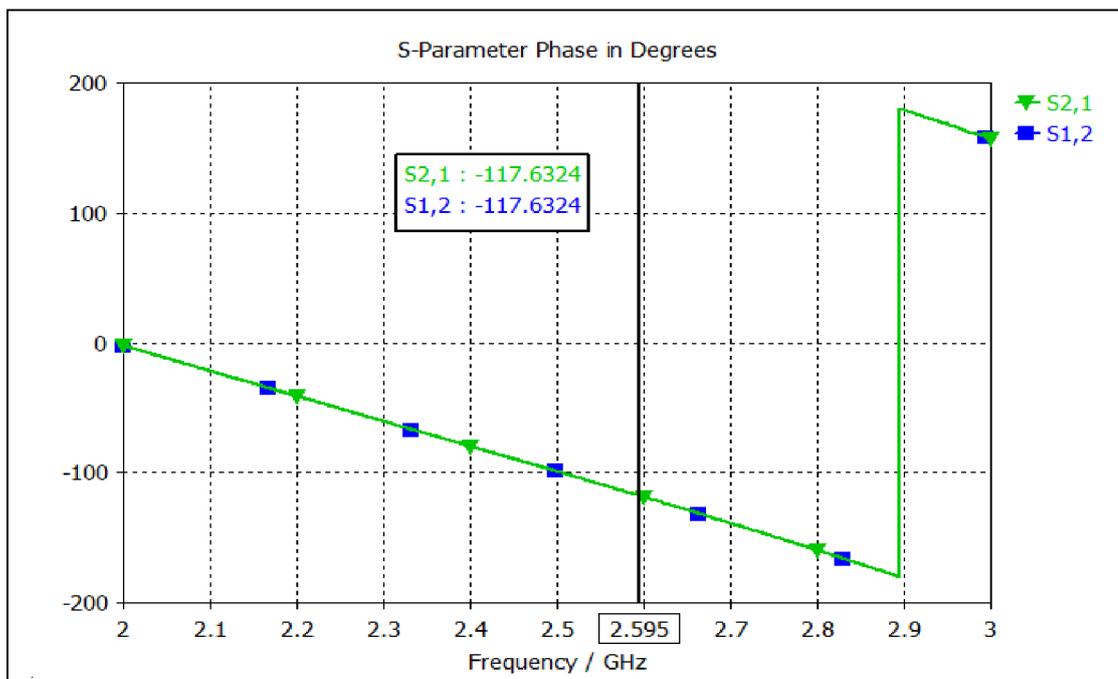
รูปที่ 4.42 ค่ามุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -90°



รูปที่ 4.43 วงจรเลื่อนเฟส -117.5°

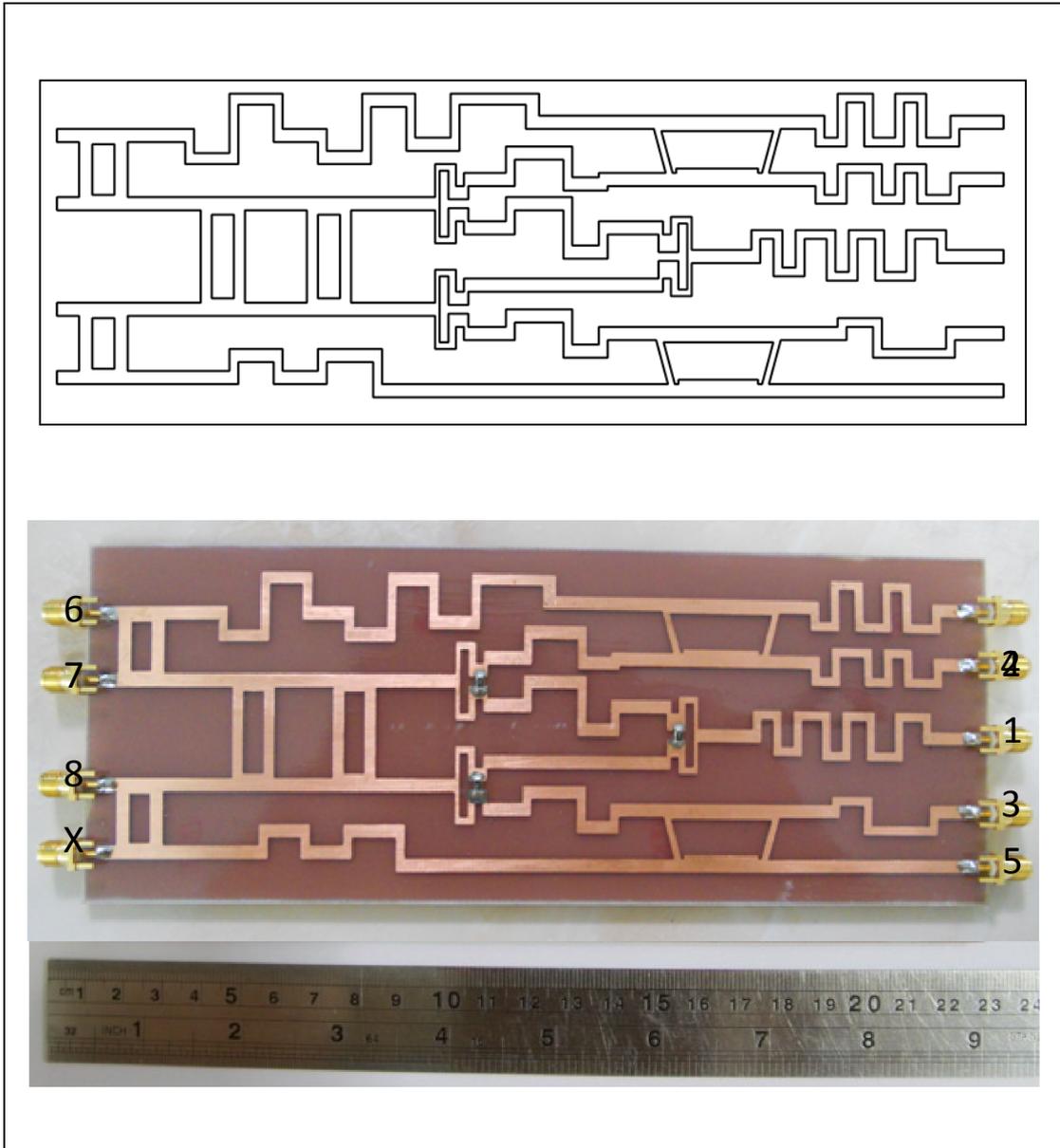


รูปที่ 4.44 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตและค่าการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ของวงจรเลื่อนเฟส -117.5°



รูปที่ 4.45 ค่ามุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -117.5°

จากนั้นเมื่อออกแบบอุปกรณ์ทุกตัวครบนำมารวมกันทั้งหมดจะได้เครือข่ายท่อรูปลาคลิ้นแบบ 5×3 ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 เครือข่ายท่อรูปลาคลิ้นแบบ 5×3

จากเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3 ที่เราสร้างขึ้นมานั้น นำไปวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่าย ซึ่งทำการวัดพารามิเตอร์ ดังนี้ เริ่มจากการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกมาจากพอร์ตที่ป้อนสัญญาณเข้าไป ซึ่งควรมีค่าต่ำกว่า -10 dB นั้นแสดงว่าอุปกรณ์ที่เราสร้างขึ้นสามารถส่งผ่านสัญญาณได้ดี ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคียว คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกจากอิกพอร์ตหนึ่งที่อยู่ข้างเดียวกันกับพอร์ตที่ป้อนสัญญาณเข้าไป โดยจะต้องมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตขาเข้าไปยังพอร์ตขาออกของสัญญาณ ซึ่งควรมีค่ามาก หรือมากกว่า -5 dB และวัดค่ามัมเฟสของสัญญาณ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวัดจริงของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3 ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคียว ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ และค่ามัมเฟสของสัญญาณ พบว่าค่าพารามิเตอร์เป็นค่าที่ยอมรับได้ในทางทฤษฎี จากนั้นจึงนำค่ามัมเฟสที่ได้ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้น จากค่าที่ได้นั้นมีความผิดพลาดไปจากตารางที่ 2.2 เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ แต่เมื่อนำค่าที่ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3 ที่เราสร้างขึ้น พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักได้ 3 ทิศทางที่เราต้องการนั้นมีค่าใกล้เคียงตามที่ได้แสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นค่าในทางทฤษฎี

ในส่วนที่ผ่านมารเราได้แสดงให้เห็นถึงการออกแบบและสร้างวงจรต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3 บนแผงวงจรพิมพ์ รูปที่ 4.47 แสดงระบบต้นแบบที่ใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 5 ต้นหรือ 5×1 โดยสายอากาศจะต่อเข้ากับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นทางฝั่งสัญญาณเข้า

4.4 สรุป

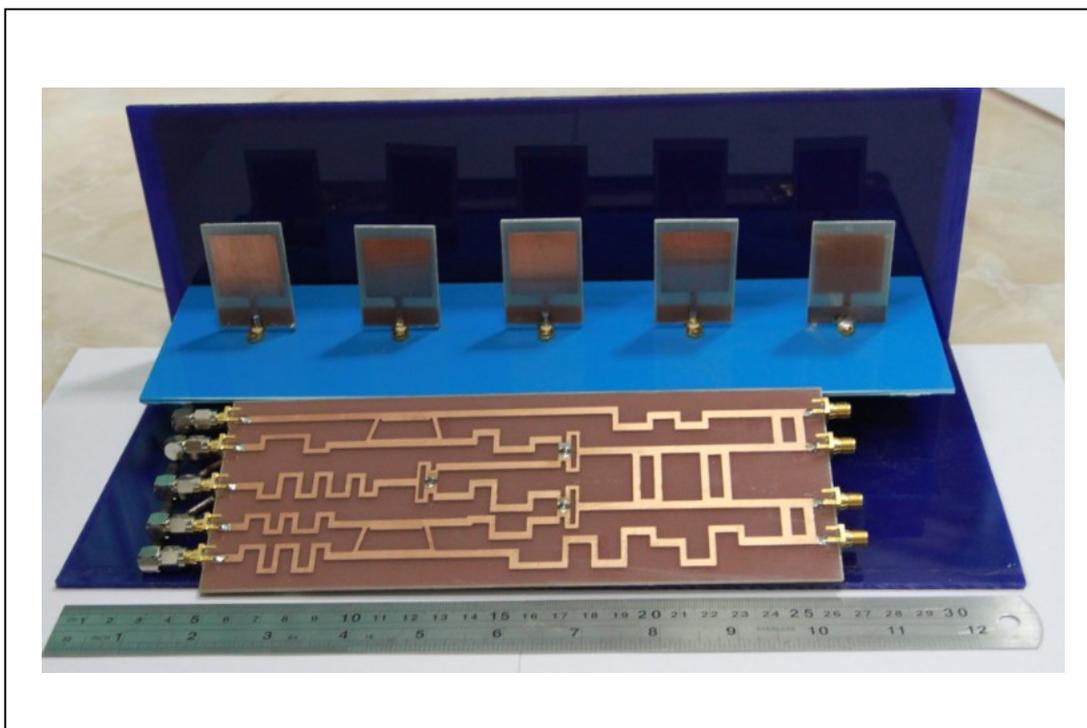
ในบทนี้เราได้แสดงการออกแบบและสร้างเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นจากทฤษฎีของบัทเลอร์ เมทริกซ์ ซึ่งประกอบด้วยวงจรเชื่อมแบบไฮบริด วงจรไขว้สัญญาณ วงจรรวมสัญญาณ วงจรแยกสัญญาณ และวงจรเลื่อนเฟส ซึ่งผลจากการนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่ได้จากเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ออกแบบมา ใส่ในโปรแกรมจำลองแบบ จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้ใกล้เคียงกับค่าตามทฤษฎี ดังนั้นสุดท้ายเราจะได้ระบบต้นแบบโดยการนำเอาเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ออกแบบมาประกอบรวมกับสายอากาศ จากนั้นเราจะนำอุปกรณ์เหล่านี้ไปวัดผลและจำลองในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ โดยเราจะนำเสนอในบทที่ 5 ต่อไป

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3

ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ			
พารามิเตอร์	แอมพลิจูด (dB)	พารามิเตอร์	แอมพลิจูด (dB)
S11	-18.73	S55	-16.67
S22	-17.54	S66	-19.01
S33	-17.12	S77	-18.47
S44	-16.96	S88	-17.78
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคียว			
พารามิเตอร์	แอมพลิจูด (dB)	พารามิเตอร์	แอมพลิจูด (dB)
S21	-22.14	S51	-24.56
S31	-23.53	S76	-23.59
S41	-25.22	S86	-22.61
S51	-23.86		
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ			
พารามิเตอร์	แอมพลิจูด (dB)	พารามิเตอร์	แอมพลิจูด (dB)
S61	-3.56	S83	-3.67
S71	-3.82	S64	-3.77
S81	-3.66	S74	-3.85
S62	-3.68	S84	-3.92
S72	-3.71	S65	-3.83
S82	-3.77	S75	-3.86
S63	-3.59	S85	-3.96
S73	-3.84		

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่วัดได้ของสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3

พอร์ตขาออก	สายอากาศ				
	1	2	3	4	5
6	2.54°	-18.64°	-41.63°	-59.84°	-76.49°
7	87.83°	-106.88°	53.42°	-146.57°	13.62°
8	2.38°	83.91°	164.61°	-108.39°	-25.69°



รูปที่ 4.47 ระบบต้นแบบสายอากาศเก้งแบบสวิตช์ลำคลื่นแบบ 5×3

บทที่ 5

ผลการทดสอบระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลาค์ลิ้นแบบ 5×3

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เราได้นำเอาระบบต้นแบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลาค์ลิ้นแบบ 5×3 ที่ได้ออกแบบในบทที่ 4 มาทดสอบการใช้งานโดยวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลาค์ลิ้นแบบ 5×3 เพื่อให้ได้ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ตามทฤษฎี จากนั้นก็นำแบบรูปการแผ่พลังงานที่วัดได้จริงนี้ไปจำลองระบบสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ขึ้นเพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบ และในที่สุดท้ายจะเป็นบทสรุปของบทนี้

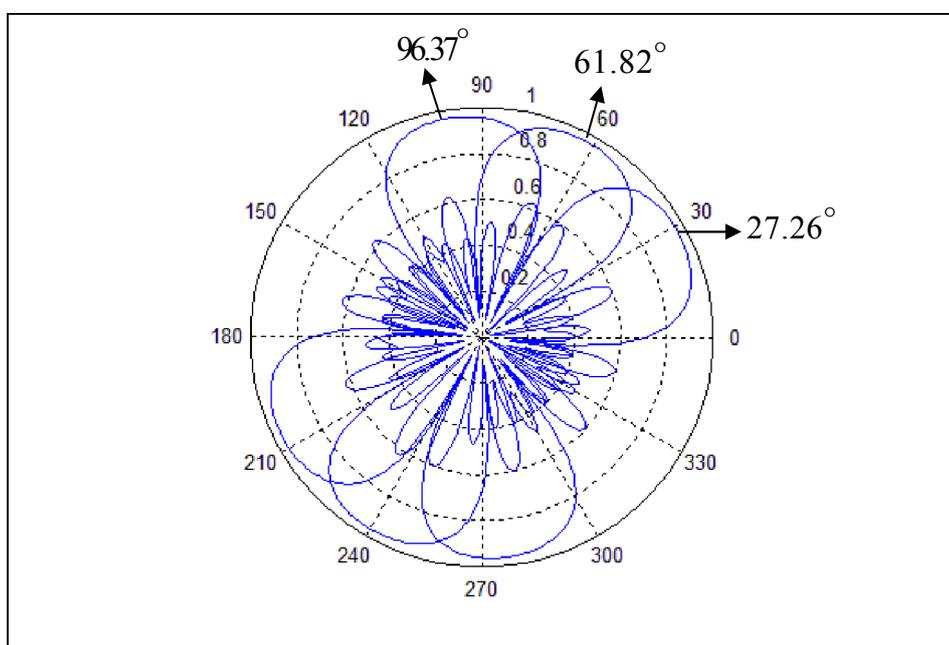
5.2 การทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลาค์ลิ้นแบบ 5×3

ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลาค์ลิ้นแบบ 5×3 แล้ว จากนั้นเราจึงนำมาสร้างเพื่อทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศที่ออกแบบว่าลาค์ลิ้นของต้นแบบหันไปตามทิศทางที่ได้ออกแบบไว้ตามทฤษฎีหรือไม่ จากตารางที่ 2.2 ได้แสดงค่าการเลื่อนมุมเฟสของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นของเครือข่ายก่อรูปลาค์ลิ้น 5×3 โดยทิศทางของลาค์ลิ้นหลัก 3 ทิศทางที่ต้องการคือ 27.26° 61.82° และ 96.37° จากการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบที่แสดงในบทที่ 4 รูปที่ 4.46 ได้ค่าการเลื่อนมุมเฟสและทิศทางของลาค์ลิ้นดังตารางที่ 5.1 ในรูปที่ 5.1 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลาค์ลิ้นที่ออกแบบได้จากทฤษฎี รูปที่ 5.3-5.5 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลาค์ลิ้นที่ได้สร้างวัดจริงเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี โดยพบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของอุปกรณ์ต้นแบบที่ได้มีค่าคลาดเคลื่อนจากแบบรูปที่จำลองแบบ แต่ค่าที่ได้นั้นมีการคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ตาม Ahmed, E.Z.(2005) ซึ่งถือว่าเป็นที่ยอมรับได้

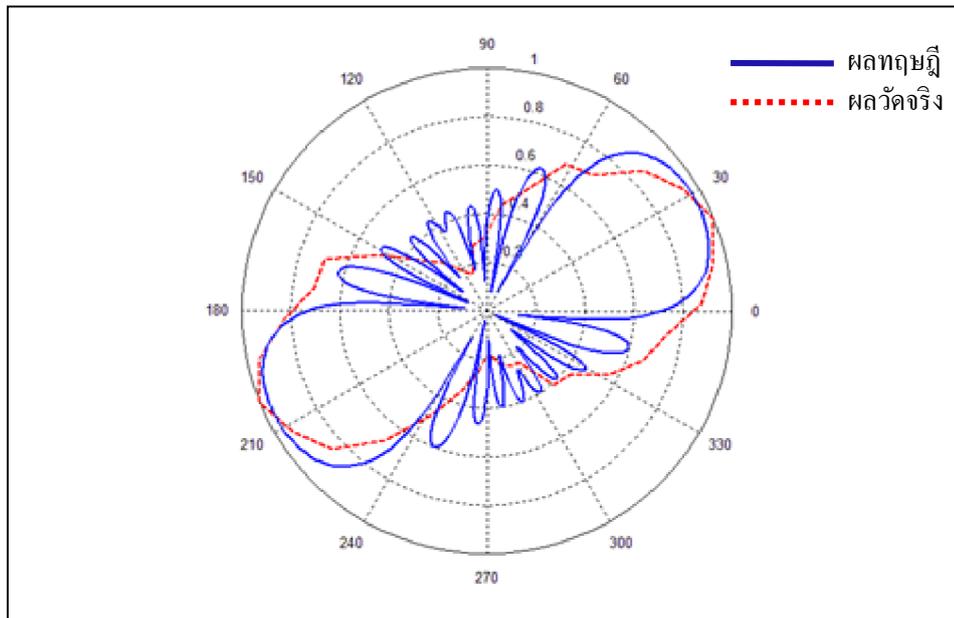
จากนั้นนำแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศแก่งที่วัดได้จริงนำไปจำลองผลในรูปแบบทั้ง 5 รูปแบบอีกครั้งเพื่อตรวจสอบว่าการก่อรูปลาค์ลิ้นของระบบต้นแบบยังคงมีประสิทธิภาพที่น่าพอใจ รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ ร่วมกับเทคนิคการก่อรูปลาค์ลิ้น รูปที่ 5.6 เป็นค่าที่ได้มาจากเทคนิคการก่อรูปลาค์ลิ้นที่ได้จากการวัดจริงของอุปกรณ์ต้นแบบ พบว่าค่าประสิทธิภาพลดลงจากค่าทางทฤษฎีแต่ก็ยังมีประสิทธิภาพมากกว่ากรณีที่ไม่ใช้เทคนิคการก่อรูปลาค์ลิ้น

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบได้ค่าการเลื่อนมุมเฟสและทิศทางของลำคลื่น

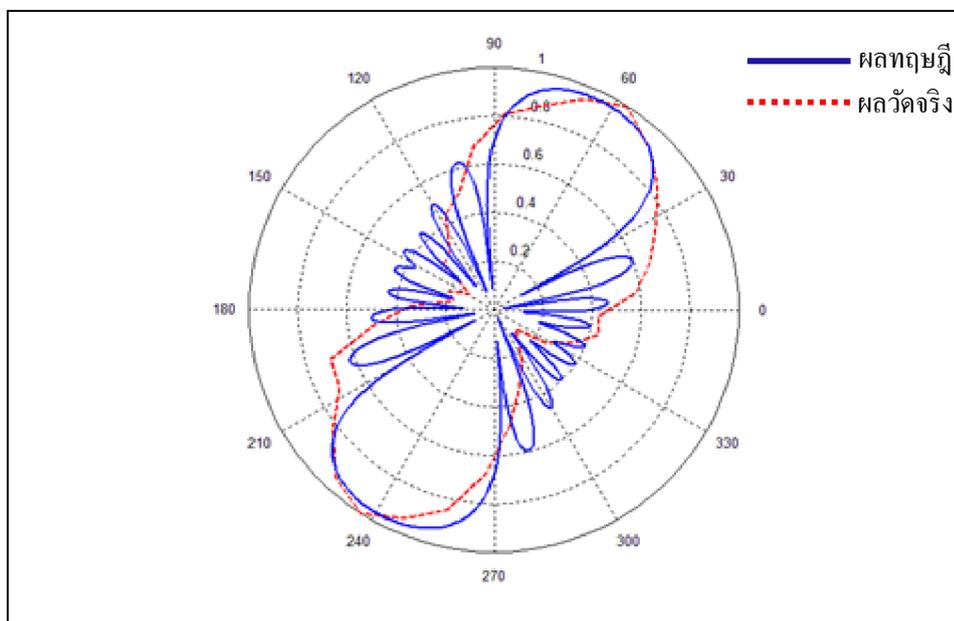
พอร์ตขา ออก	สายอากาศ					ทิศทางของลำ คลื่นหลักที่วัดได้
	1	2	3	4	5	
6	2.54°	-18.64°	-41.63°	-59.84°	-76.49°	94.58°
7	87.83°	-106.88°	53.42°	-146.57°	13.62°	24.82°
8	2.38°	83.91°	164.61°	-108.39°	-25.69°	58.73°



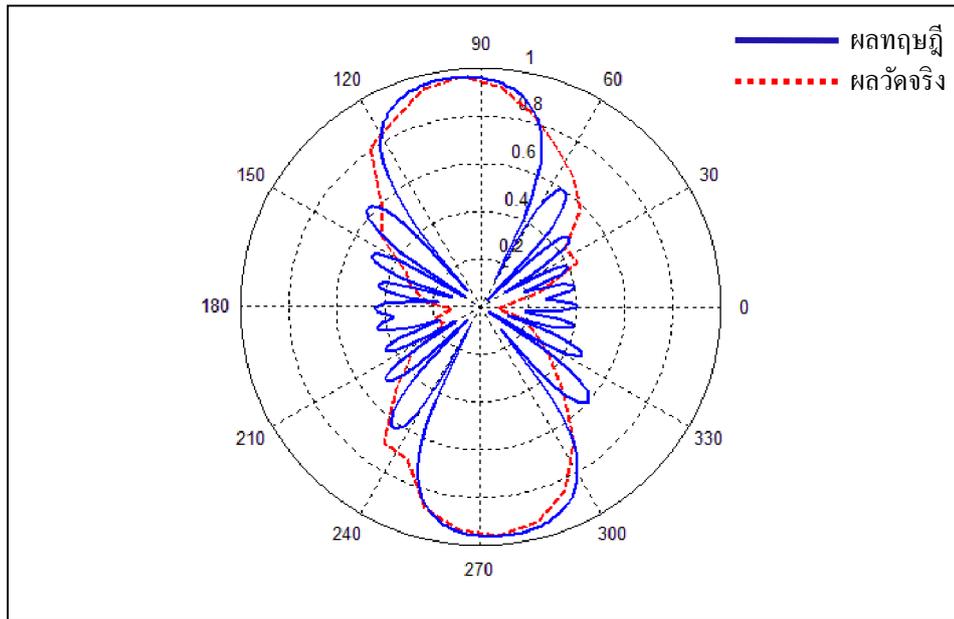
รูปที่ 5.1 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ออกแบบได้จาก
ทฤษฎี ทิศทางของลำคลื่น 27.26° 61.82° และ 96.37°



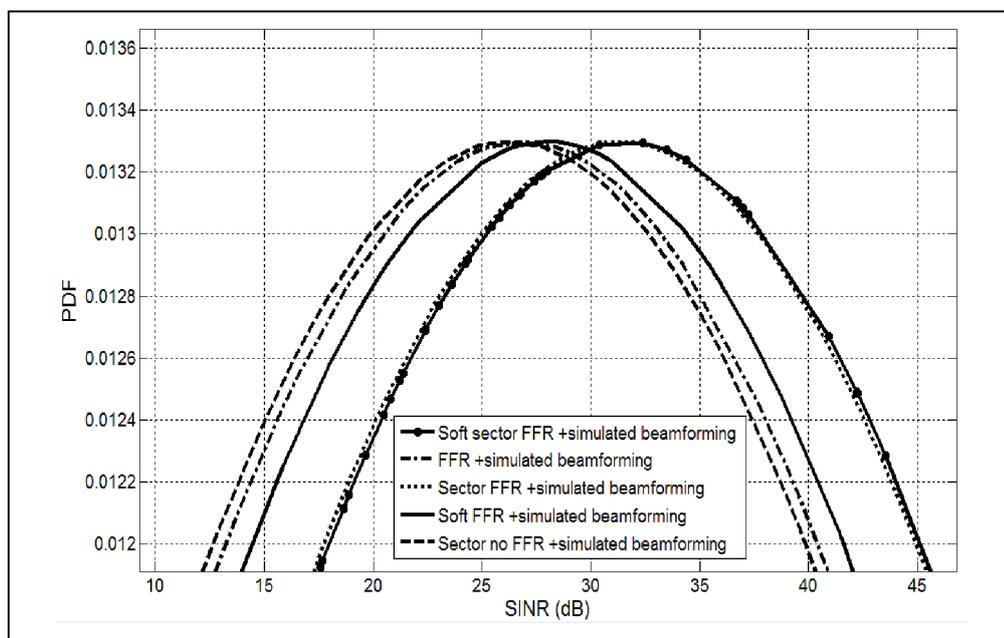
รูปที่ 5.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศแบบสวิทซ์ลำคลื่นที่ได้สร้างวัดจริง 24.82° เทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี 27.26°



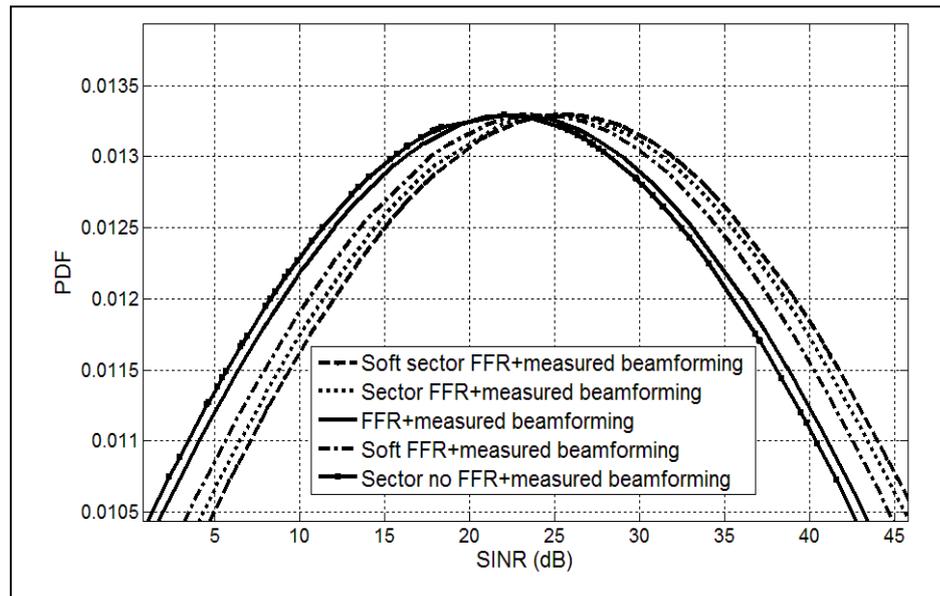
รูปที่ 5.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศแบบสวิทซ์ลำคลื่นที่ได้สร้างวัดจริง 58.73° เทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี 61.82°



รูปที่ 5.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ได้สร้างวัดจริง 94.58° เทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี 96.37°



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ ร่วมกับเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นจากทฤษฎี



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเทียบกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ในกรณีที่ใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในรูปแบบต่างๆ ร่วมกับเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นจากการวัดจริง

เมื่อนำผลจากการวัดจริงที่วัดได้กลับไปจำลองแบบเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพค่าความจุของช่องสัญญาณ ดังตารางที่ 5.2 ยังคงพบว่าคุณค่าความจุของช่องสัญญาณมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น แต่ปรากฏว่าคุณค่าที่ได้จากผลการวัดอุปกรณ์จริงนั้นทำให้ค่าความจุของช่องสัญญาณลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัดวัดจากทฤษฎี ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุความผิดพลาดในระหว่างการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

5.3 สรุป

จากการที่ได้ทดสอบของอุปกรณ์ต้นแบบ ผลที่ได้พบว่าระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ได้ออกแบบนี้มีแบบรูปการแผ่พลังงานไปในทิศทางที่ออกแบบ และเมื่อนำไปจำลองแบบกลับพบว่าระบบต้นแบบที่ออกแบบนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ได้ ซึ่งดูได้จากอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและค่าความจุของช่องสัญญาณที่มีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น

ตารางที่ 5.2 ค่าความจุของช่องสัญญาณทั้ง 3 กรณี

รูปแบบ	ความจุช่องสัญญาณ [b/s/Hz]		
	ไม่ใช่เทคนิคการก่อรูป ลำคลื่น	ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น จากผลจำลองแบบ	ใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่น จากผลวัดจริง
1	1.4655	2.0127	1.9878
2	2.4513	2.9962	2.8539
3	2.9987	3.3491	3.2989
4	2.8769	3.2697	3.1445
5	3.0176	3.5531	3.4543

บทที่ 6

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปเนื้อหางานวิจัย

ระบบสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการติดตั้งสถานีฐานในพื้นที่ต่างๆ มากขึ้น อีกทั้งระบบการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่ก็มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานของผู้ใช้งานที่มีมากขึ้น โดยการเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานและสถานีฐานนั้น เมื่อผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่ไกลออกไปจากเซลล์ของสถานีฐานตนเองโดยอาจทำให้ได้รับสัญญาณไม่ดี ไม่ชัดเจน ซึ่งอาจเกิดได้ 2 กรณี กรณีที่ 1 เกิดจากสัญญาณของสถานีฐานในเซลล์ตนเองลดลง กรณีที่ 2 เกิดจากการรบกวนหรือสัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานข้างเคียง โดยทั้ง 2 กรณีนี้ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานลดลง โดยเทคโนโลยีแอลทีอีเป็นเทคโนโลยีเป้าหมายสำหรับระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ มีวิธีการลดปัญหานี้คือใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ แต่ยังคงไม่มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงได้มีแนวคิดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ โดยลดปัญหาการเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างเซลล์ โดยใช้เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของระบบสายอากาศกึ่งแบบสวิตช์ลำคลื่นร่วมกับเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำในเทคโนโลยีแอลทีอี ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ออกแบบระบบสายอากาศกึ่งแบบสวิตช์ลำคลื่นที่มีการก่อรูปลำคลื่นที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ที่มีโครงสร้างรูปแบบระบบเครือข่ายเคลื่อนที่เป็นแบบรังผึ้งหรือระบบเซลล์ลูลาร์ ที่ถูกแบ่งออกเป็นเซกเตอร์ โดยจากการจำลองผลพบว่าการใช้เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์ร่วมกับเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นให้ประสิทธิภาพของระบบดีที่สุด จากนั้นจึงออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่เป็นส่วนประกอบหลักของระบบสายอากาศกึ่งแบบสวิตช์ลำคลื่น เพื่อให้สร้างและหันลำคลื่นไปยังที่ต้องการจึงได้จำลองระบบเพื่อหาจำนวนลำคลื่นที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานใน 1 เซกเตอร์ของเซลล์ ซึ่งจากการจำลองพบว่าจำนวน 3 ลำคลื่นให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวนสูงสุด และลำคลื่นควรมีความกว้างลำคลื่น 40° ความกว้างของลำคลื่นขึ้นอยู่กับจำนวนสายอากาศที่นำมาเรียงแบบแถวลำดับซึ่งได้ว่าต้องใช้สายอากาศจำนวน 5 ต้นเพื่อให้ได้ความกว้างของลำคลื่นที่ต้องการ จากการผลการจำลองทราบแล้วว่าเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นจะต้องมีลักษณะคือทางด้านอินพุตต้องต่อเข้ากับสายอากาศจำนวน 5 ต้น และทางด้านเอาต์พุตต้องให้ลำคลื่นออกมาจำนวน 3 ลำคลื่น โดยทั่วไปในระบบสายอากาศกึ่งแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้มากที่มีเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 4×4 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องออกแบบ

และสร้างเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบใหม่ขึ้น เป็นเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3 เมื่อสร้างแล้วจึงนำระบบไปวัดแบบรูปการแผ่พลังงานและนำผลกลับไปจำลองเพื่อดูว่าระบบต้นแบบที่สร้างมา มีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการออกแบบระบบทั้งหมดได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และบทที่ 4 ซึ่งจากผลการจำลองและทดสอบทำให้ทราบว่าระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายไร้สายเคลื่อนที่ได้ โดยดูจากค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวนและค่าความจุของช่องสัญญาณ โดยแนวคิดนี้ยังสามารถนำไปใช้ในระบบเครือข่ายไร้สายอื่นๆ ได้อีก

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันยังไม่มีระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ ในการใช้งานจริง ซึ่งเทคโนโลยีแอลทีอีเป็นหนึ่งในเป้าหมายหลักที่จะเข้าเป็นเทคโนโลยีหลักของระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ในยุคที่สี่ ซึ่งในการวัดทดสอบประสิทธิภาพของระบบของงานวิจัยที่ได้ในบทที่ 4 นั้น จึงต้องทำการจำลองสถานการณ์ของระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ แต่ในการทดสอบยังคงสามารถทดสอบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3 ที่ให้ทิศทางของลำคลื่นที่ต้องการได้

6.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้ได้นำเสนอการออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ 5×3 สำหรับใช้งานในระบบเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่ ซึ่งเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นนี้เป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่สามารถหันลำคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการได้ ซึ่งในอนาคตอาจจะพัฒนาระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นนี้ให้หันลำคลื่นหรือควบคุมได้อย่างอัตโนมัติและรวดเร็วในทิศทางอื่นๆ ที่ต้องการ

ภาคผนวก ก

ตารางการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อ
สัญญาณแทรกสอดรวมกับสัญญาณรบกวน (SINR gain)

ผู้ใช้งาน คนที่	อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอดรวมกับ สัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้ เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ แบบซอฟต์แวร์ (dB)	อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอดรวมกับ สัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้ เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของ ระบบสายอากาศเก่งร่วมกับ เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ แบบซอฟต์แวร์ (dB)	อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า อัตราส่วนของสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอด รวมกับสัญญาณรบกวน (SINR gain) (dB)
1	22	28	6
2	24	32	8
3	15	26	11
4	17	29	12
5	11	22	11
6	26	34	8
7	25	36	11
8	8	19	11
9	27	35	8
10	6	16	10
11	17	25	8
12	18	27	9
13	15	23	8
14	32	40	8
15	26	38	12
16	37	42	5
17	39	44	5
18	45	49	4
19	42	50	8
20	36	41	5
21	22	31	9

ผู้ใช้งาน คนที่	อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอดรวมกับ สัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้ เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ แบบซอฟต์แวร์ (dB)	อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอดรวมกับ สัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้ เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของ ระบบสายอากาศแก่ร่วมกับ เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ แบบซอฟต์แวร์ (dB)	อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า อัตราส่วนของสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอด รวมกับสัญญาณรบกวน (SINR gain) (dB)
22	7	13	6
23	14	22	8
24	15	22	7
25	29	36	7
26	10	17	7
27	16	22	6
28	31	40	9
29	39	49	10
30	40	46	6
31	11	23	12
32	18	39	11
33	24	31	7
34	5	15	10
35	6	13	7
36	16	29	13
37	23	30	7
38	18	32	14
39	22	31	9
40	16	29	13
41	36	44	8
42	11	22	11

ผู้ใช้งาน คนที่	อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอดรวมกับ สัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้ เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ แบบซอฟต์แวร์ (dB)	อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอดรวมกับ สัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้ เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของ ระบบสายอากาศแก่ร่วมกับ เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ แบบซอฟต์แวร์ (dB)	อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า อัตราส่วนของสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอด รวมกับสัญญาณรบกวน (SINR gain) (dB)
43	41	49	8
44	33	37	4
45	12	20	8
46	18	35	17
47	29	41	12
48	32	44	12
49	17	30	13
50	13	22	9
51	18	22	4
52	30	40	10
53	24	28	4
54	41	46	7
55	24	28	4
56	25	27	2
57	19	36	17
58	13	17	4
59	16	22	6
60	4	15	11
61	30	41	11
62	21	32	11
63	47	48	1

ผู้ใช้งาน คนที่	อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอดรวมกับ สัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้ เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ แบบซอฟต์แวร์ (dB)	อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอดรวมกับ สัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้ เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของ ระบบสายอากาศแก่ร่วมกับ เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ แบบซอฟต์แวร์ (dB)	อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า อัตราส่วนของสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอด รวมกับสัญญาณรบกวน (SINR gain) (dB)
64	3	10	7
65	26	40	14
66	18	29	11
67	34	41	7
68	35	39	4
69	47	48	1
70	37	43	6
71	25	30	5
72	22	33	11
73	32	38	6
74	44	50	6
75	26	31	5
76	34	37	3
77	36	37	1
78	23	29	6
79	11	23	11
80	5	12	7
81	10	21	11
82	7	16	9
83	9	11	2
84	27	38	11

ผู้ใช้งาน คนที่	อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอดรวมกับ สัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้ เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ แบบซอฟต์แวร์ (dB)	อัตราส่วนของสัญญาณต่อ สัญญาณแทรกสอดรวมกับ สัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้ เทคนิคการก่อรูปลำคลื่นของ ระบบสายอากาศแก่ร่วมกับ เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ แบบซอฟต์แวร์ (dB)	อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า อัตราส่วนของสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอด รวมกับสัญญาณรบกวน (SINR gain) (dB)
85	40	49	9
86	44	47	3
87	30	39	9
88	22	32	10
89	22	28	6
90	29	35	6
91	23	25	2
92	12	17	5
93	25	30	5
94	16	18	2
95	3	9	6
96	16	22	6
97	15	28	13
98	7	18	11
99	6	14	8
100	18	23	5

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

P. Wongchampa, M. Uthansakul and N. Seman, “A Beamformer for 120-degree Sectorization in LTE systems”, SUT Journal, vol. 22, No. 1, 2015.

รายการอ้างอิง

- F. Khan . LTE for 4G mobile broadband air interface technologies and performance. **Cambridge University Press 2009.**
- A. Alexiou , M. Haardt. Smart antenna technologies for future wireless systems: trends and challenges. **IEEE communications Magazine**, vol. 42, 2004, pp. 90-97.
- G.Liu , J. Zhang , et al . Downlink interference coordination and mitigation for future LTE-Advanced system. **Proceedings of the 15th Asia-Pacific Conference on Communications 2009.**
- M. Lott . Adaptive random access with beam-forming in 4G mobile networks. **Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference 2006**
- T. S. Rappaport (2002). Wireless Communication : Principles And Practice 2nd edition, **Printice Hall PTR, NJ, 2002**
- S.H. Chu, H.P. Lin, D.B. Lin. Performance enhancement by using switch-beam smart antenna in 802.11a WLAN system. **IEEE/ACES Intern. Conf. on Wirel. Comm. and Applied Comp. Electromag.**, 3-7 April 2005, pp. 1001 – 1005.
- 3GPP TSG RAN TR 25.913 v7.3.0, Requirements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN).
- J. C. Liberti Jr. , T. S. Rappaport (1999). Smart Antennas for Wireless Communication :IS-95 and Third Generation CDMA Applications, **Printice Hall PTR,NJ** , 1999K. P. Ray, P.
- V. Anob, R. Kapur, and G. Kumar. Broadband planar rectangular monopole antennas . **Microwave and Optical Technology Letters**, vol. 28, no. 1, pp. 55–59, 2001.
- Ahmed, E.Z.(2005) Smart Antenna Engineering , **ARTECH HOUSE**, INC.
- Frank,B.G.,Ph.D. (2005). Smart Antennas for Wireless Communication With MATLAB. **Fairfax, Virginia,2005.**
- C.Y. Wong , Cheng, R. S, et al. Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation. **IEEE Journal on Selected Areas in communication**, vol. 17, pp. 1747 - 1758, Oct.1999.

- T. W. Nuteson, G. S. Mitchell, J. S. Clark, D. S. Haque (2004). Smart antenna systems for wireless applications. **Antennas and Propagation Society International Symposium 2004 IEEE**, Vol. 3 20-25 June 2004, pp. 2804-2807.
- C.F. du Toit, O.P. Gupta, W.J. Brown, D. He, J. Patel, P.F. Acsadi, C. Sui, M. Peyghaleh (2003) Smart multibeam phased array antenna for GSM, GPRS and EDGE. **Proc. IEEE Inter. Sym. on Phased Array Systems and Tech.**2003, 14-17 Oct. 2003, pp. 146-151.
- F. Rayal (2005). Why Have Smart Antennas Not Yet Gained Traction with Wireless Network Operators?. **IEEE Ant. And Prop. Mag.**, Vol. 47, No.6, Dec. 2005.
- M. Peng, W. Wang (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, 8-12 Aug. 2005 pp. 135 – 139.
- C. Seungwon, D. Shim, T.K. Sarkar (1999). A comparison of tracking-beam arrays and switching-beam arrays operating in a CDMA mobile communication channel. **IEEE Ant. and Prop. Mag.**, Vol. 41, Dec. 1999. pp.10 - 56.
- H. Moody (1964). The systematic design of the Butler matrix. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Vol. 12, Nov. 1964, pp. 786-788.
- David M. Pozar (1998). *Microwave Engineering* 2nd edition, **John Wiley & Sons**, Inc. 1998.
- C. A. Balanis (1997). *Antenna Theory: Analysis and Design* 2nd edition . **John Wiley& Sons, Inc.** 1997.