

การเพิ่มสมรรถนะของเครือข่ายไร้สายด้วยสายอากาศที่มีแบบรูป
การแผ่พลังงานมีทิศทางในภาคส่งและรับรอบทิศทางในภาครับ



นายอัครชัย อินทนิล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF WIRELESS NETWORKS USING
ANTENNA WITH DIRECTIONAL RADIATION PATTERN FOR
TRANSMISSION AND OMNIDIRECTIONAL RADIATION PATTERN
FOR RECEPTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Telecommunication
and Computer Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การเพิ่มสมรรถนะของเครือข่ายไร้สายด้วยสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงาน
มีทิศทางในภาคส่งและรับรอบทิศทางในภาครับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.ชาญชัย ไทยเยี่ยม)
ประธานกรรมการ



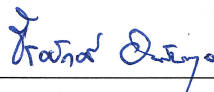
(รศ. ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)
กรรมการ



(รศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)
กรรมการ



(ดร.ธีรศักดิ์ อนันตกุล)
กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อักรชัย อินทนิล : การเพิ่มสมรรถนะของเครือข่ายไร้สายด้วยสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานมีทิศทางในภาคส่งและรับรอบทิศทางในภาครับ (PERFORMANCE ENHANCEMENT OF WIRELESS NETWORKS USING ANTENNA WITH DIRECTIONAL RADIATION PATTERN FOR TRANSMISSION AND OMNIDIRECTIONAL RADIATION PATTERN FOR RECEPTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุซารสกุล, 110 หน้า.

คำสำคัญ: เครือข่ายไร้สาย/แบบรูปการแผ่พลังงาน

เครือข่ายไร้สายเป็นเครือข่ายสำคัญในการติดต่อสื่อสารทั้งในปัจจุบันและอนาคต เพราะรูปการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์หลังจากสถานการณ์โควิด-19 ได้เปลี่ยนไป การทำงานยุคใหม่มีการจัดสรรให้เกิดการทำงานที่บ้าน (Work from home) การเรียนที่บ้าน และการทำกิจกรรมออนไลน์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น มนุษย์จึงมีความต้องการใช้งานอุปกรณ์สื่อสารไร้สายเพิ่มมากขึ้น เมื่อจำนวนผู้ใช้งานในเครือข่ายไร้สายเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณข้อมูลที่ถูกส่งและถูกรับในแต่ละวันจึงเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล งานวิจัยที่พัฒนาเครือข่ายไร้สายเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่ การเข้ารหัส การใช้ความถี่ซ้ำ การออกแบบโปรโตคอล ออกแบบสายอากาศ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การศึกษาเกี่ยวกับแบบรูปการแผ่พลังงานเพื่อพัฒนาเครือข่ายไร้สายนั้น ช่วยลดความซับซ้อนในการผสมเข้ากับเทคโนโลยีเดิม ปัจจุบันการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานถูกนำไปใช้งานอย่างยืดหยุ่น เช่น การใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบสลับกัน การใช้งานแบบแบ่งพื้นที่ การใช้งานคนละช่องความถี่ และการใช้งานคนละแอมพลิจูด (Amplitude) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานพร้อมกันระหว่างภาครับและภาคส่ง โดยออกแบบการทำงานของวงจรด้วยการแยกสัญญาณภาครับและสัญญาณภาคส่งออกจากกัน จากนั้น นำสัญญาณภาครับและสัญญาณภาคส่งที่ถูกแยกสัญญาณมาปรับแต่งเฟส (Phase) ของสัญญาณก่อนจะส่งไปยังสายอากาศชุดเดียวกัน ผลวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงาน แบบมีทิศทางในภาคส่งและรับรอบทิศทางในภาครับช่วยให้ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของเครือข่ายไร้สายดีขึ้นและทำให้ความหน่วง (Delay) ของเครือข่ายไร้สายลดลงเมื่อเทียบกับการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบเดิม

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
ปีการศึกษา 2565

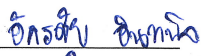

ลายมือชื่อนักศึกษา อักรชัย อินทนิล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Dr.

AKARACHAI INTHANIL : PERFORMANCE ENHANCEMENT OF WIRELESS NETWORKS USING ANTENNA WITH DIRECTIONAL RADIATION PATTERN FOR TRANSMISSION AND OMNIDIRECTIONAL RADIATION PATTERN FOR RECEPTION.
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. MONTHIPPA UTHANSAKUL, Ph.D., 110 PP.

Keyword: Wireless network/Radiation pattern

Wireless networks are important for communication in the present and future. After the Covid-19 situation, daily human life has also changed. Currently, working and studying are allowed to do home, which causes an increase in online activity. Therefore, many people use wireless communication devices more than previous years. As the grow up of users on the wireless network increases. That factor increases a huge throughput in daily. Most of wireless networks research support the growing of users. There has often focused on encryption, frequency, reuse protocol design, and antenna design etc. However, the study of radiation patterns for wireless networks has simple to adapt to normal technologies. At present, radiated pattern has been applied flexibly, whether it is the use of the alternating radiating pattern between transmission or reception, the divided area each frequency, and amplitude modulation, etc. In this research, the design use simultaneous radiating between the receiving and transmitting. The principle is the design the operation of the circuit. We separate the receiver signal and the transmitting signal from each other. Then we take the separated signal from the transmitter to adjust the phase before transmitting to the same antenna. The result shows the directional radiated power use to transmit and omni-directional use to receiver signal. There increase throughput and reduces delay on the wireless network when there compared with the conventional forms.

School of Telecommunication Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature 
Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือเป็นอย่างดีทั้งด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและคณะบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำปรึกษา และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยังต้องงานวิจัยให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดรวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล ที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการและให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษกที่มอบทุนสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณวีรินทร์ อัจฉาญ เลขานุการสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้คำปรึกษาและจัดการด้านเอกสารตลอดระยะเวลาการศึกษา และขอบคุณพี่ เพื่อน น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

อัครชัย อินทนิล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	7
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	7
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	8
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
2 ปรัชญาวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายไร้สาย.....	9
2.2.1 โครงสร้างและการทำงานของเครือข่ายเฉพาะกิจ	10
2.2.2 โครงสร้างและการทำงานของเครือข่ายไร้สายแบบกลุ่มโครงสร้าง	12
2.3 MEDIA ACCESS CONTROL (MAC).....	13
2.3.1 การทำงานของ MAC	13
2.3.2 กรณีศึกษาสำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้โปรโตคอล MAC	15
2.3.3 ขั้นตอนการส่งข้อมูล	18
2.3.4 กลไกการทำงานสำหรับการสื่อสารระหว่างโนด.....	19
2.3.5 โปรโตคอลที่เกี่ยวข้องกับแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	สายอากาศ.....	26
2.4.1	สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง.....	27
2.4.2	สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง.....	28
2.4.3	สายอากาศที่ใช้เทคโนโลยีแบบ MIMO.....	28
2.4.4	สายอากาศเก่ง.....	29
2.5	กลไกการทำงานของคลื่นในวงจร.....	33
2.5.1	การส่งและรับสัญญาณของสายอากาศแถวลำดับ.....	33
2.5.2	การแยกสัญญาณของภาครับและภาคส่ง.....	34
2.6	แบบจำลองสายอากาศและช่องสัญญาณ.....	37
2.6.1	แบบจำลองสายอากาศและช่องสัญญาณ.....	37
2.6.2	สมมุติฐานของเครือข่ายไร้สายสำหรับหาคู่การสื่อสาร.....	39
2.6.3	แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์หาค่าวิสัยสมารถและความหน่วง.....	42
2.7	สรุป.....	45
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	47
3.1	บทนำ.....	47
3.2	วงจรสำหรับควบคุมการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	47
3.2.1	วงจรแบบดั้งเดิม.....	47
3.2.2	วงจรที่ใช้เซอร์คูเลเตอร์ (Circulator).....	48
3.3	การหาค่าถ่วงหนัก.....	49
3.4	แบบจำลองเครือข่ายไร้สาย.....	52
3.4.1	การหาคูโนดในเครือข่ายไร้สาย.....	52
3.4.2	ค่าวิสัยสมารถและความหน่วงของเครือข่ายไร้สาย.....	57
3.5	การทดสอบอุปกรณ์.....	61
3.5.1	การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรับและแบบส่ง.....	61
3.5.2	การวัดค่าวิสัยสมารถ.....	62
3.6	สรุป.....	63
4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 บทนำ.....	64
4.2 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานและผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	65
4.3 ผลการจำลองคูลินด.....	66
4.4 ผลการจำลองค่าวิสัยสามารถและความหวัง	69
4.5 ผลกระทบของแบบรูปการแผ่พลังงานต่อเครือข่ายไร้สาย	71
4.6 การวัดผลแบบโนดต่อโนด.....	73
4.7 สรุป.....	75
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	79
รายการอ้างอิง	81
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	85
ประวัติผู้เขียน	110

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	43
4.1	ผลการทดสอบการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 1.....	74
4.2	ผลการทดสอบการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 2.....	75
4.3	ผลการทดสอบการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3.....	75
5.1	สรุปข้อเปรียบเทียบของงานวิจัยเทียบกับงานวิจัยอื่น	78

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ปัญหาการไม่รู้ของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง	2
1.2	ปัญหาการไม่รู้ ของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง	3
1.3	ปริมาณค่าวิสัยสามารถสูงสุดของเครือข่ายไร้สายที่ในหนึ่งช่วงเวลา	4
1.4	ปริมาณค่าวิสัยสามารถสูงสุดของเครือข่ายไร้สายด้วยวิธีการรับและส่งข้อมูล ในเวลาเดียวกัน	4
1.5	ตัวอย่างการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงาน	5
1.6	การแผ่พลังงานแบบพร้อมกันของอุปกรณ์จัดเส้นทาง	5
2.1	โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายไร้สาย	9
2.2	โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเฉพาะกิจ	11
2.3	โครงสร้างของเครือข่ายไร้สายแบบกลุ่ม	12
2.4	สถานการณ์ของการมีโนดซ่อนเร้น	13
2.5	กลไกการทำงานของเฟรม RTS/CTS/DATA/ACK	14
2.6	ตัวอย่างปัญหาการไม่รู้ของโนด	15
2.7	ตัวอย่างปัญหาโนดซ่อนเร้น	17
2.8	ตัวอย่างปัญหาโนดซ่อนเร้น (ต่อ)	18
2.9	การทำงานของ Circular Directional RTS MAC (CDR-MAC)	21
2.10	การทำงานของโปรโตคอล BIBD	22
2.11	การทำงานของโปรโตคอล SYN-DMAC	23
2.12	การทำงานของโปรโตคอล DBTMA/DA	24
2.13	ประเภทของสายอากาศ	26
2.14	องค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ	31
2.15	ไดอะแกรมการส่งสัญญาณด้วยสายอากาศ	34
2.16	วงจรแบ่งสัญญาณแบบ 4 พอร์ต	35
2.17	เซอร์คูลเตอร์โครงสร้าง Y	36
2.18	ไดอะแกรมเซอร์คูลเตอร์	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19	สมมติฐานของเครือข่ายไร้สาย..... 40
3.1	ไดอะแกรมของวงจรดั้งเดิมสำหรับการสร้าง (ก) แบบรูปการแผ่พลังงานเดียว (ข) แบบรูปการแผ่พลังงาน 2 แบบ..... 48
3.2	ไดอะแกรมและวงจรต้นแบบที่ใช้เซอร์คูเลเตอร์แบบสำเร็จรูป..... 40
3.3	การทำงานของวงจรต้นแบบที่ใช้เซอร์คูเลเตอร์..... 49
3.4	ภาพการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนัก (ก) กราฟแอมพลิจูดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง (ข) ภาพทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่ควรจะเป็นจากการ ถ่วงค่าน้ำหนัก (ค) กราฟแอมพลิจูดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (ง) ภาพทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางที่ควรจะเป็น จากการถ่วงค่าน้ำหนัก..... 50
3.5	สถานการณ์ของเครือข่ายไร้สาย (ก) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (ค) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมี ทิศทางในภาคส่งและแบบรอบทิศทางในภาครับ..... 51
3.6	ไดอะแกรมการหาคูนิตในเครือข่ายไร้สาย..... 54
3.7	แบบจำลอง Markov 57
3.8	ไดอะแกรมการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน (ก) ภาคส่ง (ข) ภาครับ..... 60
3.9	การทดสอบตัวต้นแบบในห้องปฏิบัติการ 61
3.10	สถานการณ์ของการเก็บผลการทดลองของเครือข่ายไร้สาย 62
3.11	ลักษณะการเก็บผลการทดลองตามแบบรูปการแผ่พลังงาน (ก) แบบรอบทิศทาง (ข) แบบมีทิศทาง (ค) แบบรอบทิศทางในภาครับและมีทิศทางในภาคส่ง..... 63
4.1	แบบรูปการแผ่พลังงานตัวต้นแบบ ก) จากการจำลอง ข) จากการวัด..... 64
4.2	การใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบดั้งเดิมและแบบที่เสนอ..... 65
4.3	จำนวนคูนิตของแบบรูปการแผ่พลังงานที่สามารถใช้งานได้พร้อมกันในเครือข่ายไร้สาย..... 66
4.4	การจำลองคูนิตกับ (ก) ความกว้างลำสัญญาณ (ข) จำนวนสายอากาศแถวลำดับ (ค) อัตราขยาย..... 68
4.5	ผลจำลองค่าวิสัยสามารถในเครือข่ายไร้สาย..... 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ผลจำลองความหน่วงในเครือข่ายไร้สาย.....	70
4.7 ผลกระทบจากค่าครึ่งลำคลื่นต่อเครือข่ายไร้สาย	70
4.8 ผลกระทบของระยะทางระหว่างโนดต่อเครือข่ายไร้สาย	72
4.9 ผลกระทบของอัตราส่วนพูนหน้าต่อพูนหลัง.....	72
4.10 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ก) ประเภทที่ 1 ข) ประเภทที่ 2 ค) ประเภทที่ 3	73



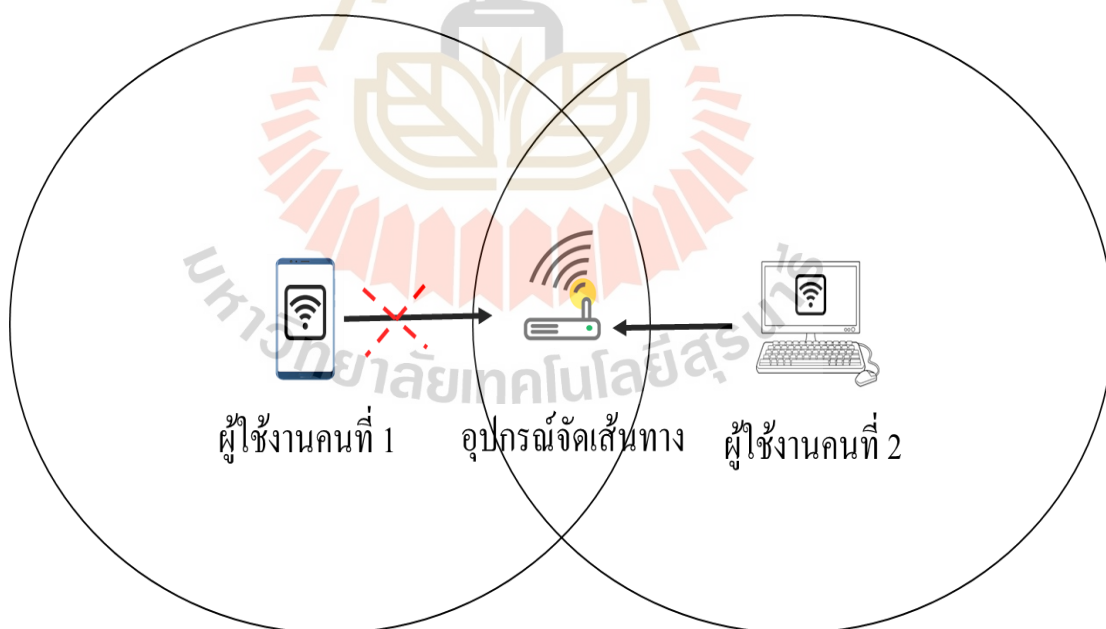
บทที่ 1

บทนำ

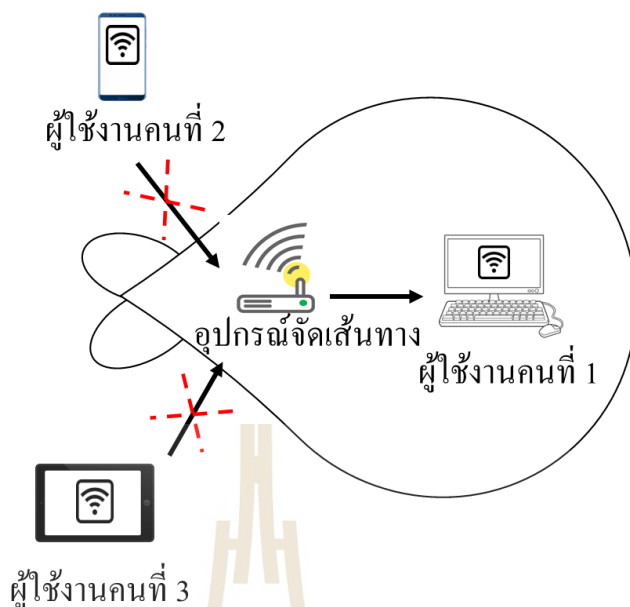
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบการสื่อสารเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) เข้ามามีส่วนสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ปัจจุบันสถานการณ์โควิด-19 ทำให้มนุษย์ต้องเปลี่ยนวิถีชีวิตในการทำงานและใช้ชีวิตอยู่กับที่พักอาศัยมากขึ้น ดังนั้น ผู้ใช้งานบริการเครือข่ายไร้สายจึงมีความจำเป็นในการใช้งานเครือข่ายไร้สายเพิ่มขึ้น เช่น การเรียนออนไลน์ การทำงานที่บ้าน เป็นต้น วิถีชีวิตแบบใหม่ที่เกิดขึ้นส่งผลให้ผู้ใช้งานจำนวนมากหันมาใช้งานข้อมูลในปริมาณที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ความต้องการใช้งานเครือข่ายไร้สายก็มีความหลากหลายมากขึ้นเช่นกัน สำหรับการส่งข้อมูลและการรับข้อมูลระหว่างอุปกรณ์นั้น เครือข่ายไร้สายจำเป็นต้องพัฒนาเพื่อรองรับผู้ใช้งานที่มากขึ้น ซึ่งการพัฒนาเครือข่ายไร้สายที่ได้รับความนิยมคือ การพัฒนาระดับสัญญาณของภาครับและระดับสัญญาณของภาคส่ง จำนวนผู้เข้าใช้งานที่สามารถเข้าถึงเครือข่ายไร้สายได้ และความหน่วงที่เกิดขึ้นระหว่างใช้งาน การเข้าถึงเครือข่ายไร้สายของผู้ใช้งานจำเป็นต้องสื่อสารผ่านอุปกรณ์ที่มีสายอากาศติดตั้งอยู่ นอกจากนี้เพื่อกระจายสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้ครอบคลุมตามพื้นที่ที่ต้องการสายอากาศแต่ละประเภทต้องสามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern) ได้ในรูปแบบที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่แล้วการแผ่พลังงานของสายอากาศจะมุ่งเน้นไปที่ในระนาบแอสิมัท (Azimuth) เป็นหลัก การแผ่พลังงานของสายอากาศแสดงถึงพื้นที่ครอบคลุมของการรองรับผู้ใช้งาน ปกติแล้วการแผ่พลังงานบนความถี่ (Frequency) เดียวกันจะแบ่งตามประเภทของสายอากาศ ในขณะที่อุปกรณ์ใช้งานภาคส่งอยู่ อุปกรณ์จะไม่สามารถรับสัญญาณอื่นเข้ามาได้เนื่องจากข้อจำกัดด้านการแทรกสอด (Interference) อย่างไรก็ตามการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานพร้อมกันกลับมีข้อได้เปรียบในหลายแง่มุม เช่น การสร้างความยืดหยุ่นในมุมเป้าหมาย เป็นต้น แบบรูปการแผ่พลังงานแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional radiation pattern) รัศมีของการแผ่พลังงานจะอยู่ในทุกมุมตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา ดังนั้น ข้อดีของแบบรูปการแผ่พลังงานนี้คือ ผู้ใช้งานสามารถเข้าใช้งานเครือข่ายไร้สายได้ทุกมุมรอบเครื่องส่ง (transmitter) ข้อเสียของแบบรูปการแผ่พลังงานชนิดนี้คือ อัตราขยาย (Gain) แบบรูปการแผ่พลังงานชนิดนี้ มีอัตราขยายต่ำ เพราะพลังงานกระจายไปทุกทิศทาง แบบที่สองคือ แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง (Directional radiation pattern) แบบรูปการแผ่พลังงานนี้ มุ่งเน้นลำคลื่นไปยังทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างเจาะจง การรวมพลังงานไปยังทิศทาง

ที่ต้องการทำให้ผู้รับได้รับสัญญาณที่ดีขึ้น ข้อเสียของแบบรูปการแผ่พลังงานนี้คือ พื้นที่บริเวณที่สามารถใช้งานได้นั้นแคบและมีข้อจำกัดต่อผู้ใช้งาน (User) ที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้จากทุกมุม อย่างไรก็ตามเพื่อทำให้ผู้ใช้งานได้รับระดับสัญญาณ (Signal level) ที่สูงขึ้น กลไกการทำงานของเครื่องส่งจึงมีการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งสองแบบร่วมกัน ซึ่งใช้การประมวลสัญญาณดิจิทัล (Digital signal processing) เพื่อจัดสรรให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ในทุกมุมและได้รับอัตราขยายที่ดีที่สุดในปัจจุบันสายอากาศแถวลำดับ (Array antenna) ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย สายอากาศแถวลำดับทำงานร่วมกับการประมวลสัญญาณดิจิทัล โดยความสามารถในการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้หลายรูปแบบในระนาบสนามไฟฟ้า (Electric field) และระนาบสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ทำให้การประมวลสัญญาณดิจิทัลสามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานได้ด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟสและการเปลี่ยนแอมพลิจูดของสายอากาศแต่ละต้น นอกจากนี้ คุณสมบัติของสายอากาศแบบแถวลำดับยังมีอัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศประเภทอื่น ลักษณะการควบคุมลำคลื่นของสายอากาศแบบแถวลำดับสามารถบังคับให้จุดศูนย์ (Null) ของลำคลื่นชี้ไปยังผู้ใช้งานคนอื่นได้ ดังนั้น ผู้ใช้งานคนอื่นในเครือข่ายไร้สายจะได้รับผลกระทบจากการแทรกสอดน้อยลงจากการเลือกใช้สายอากาศแถวลำดับจึงมีส่วนช่วยอย่างมากต่อเครือข่ายไร้สาย



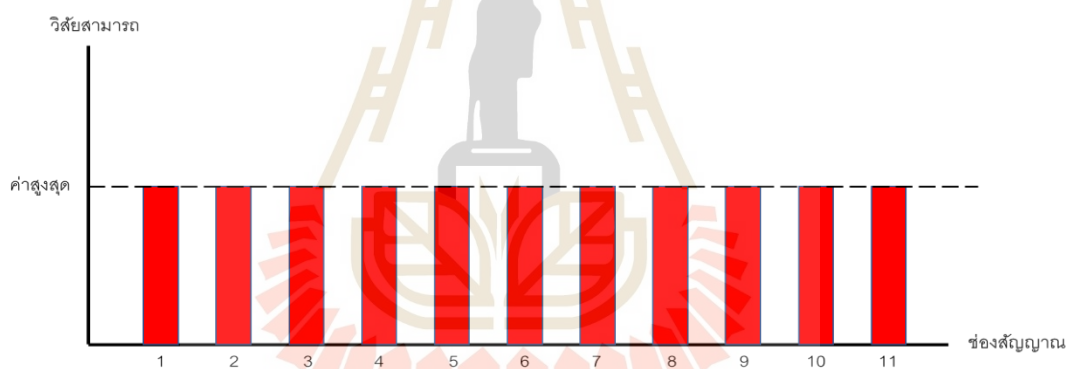
รูปที่ 1.1 ปัญหาการไม่รับรู้ของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง



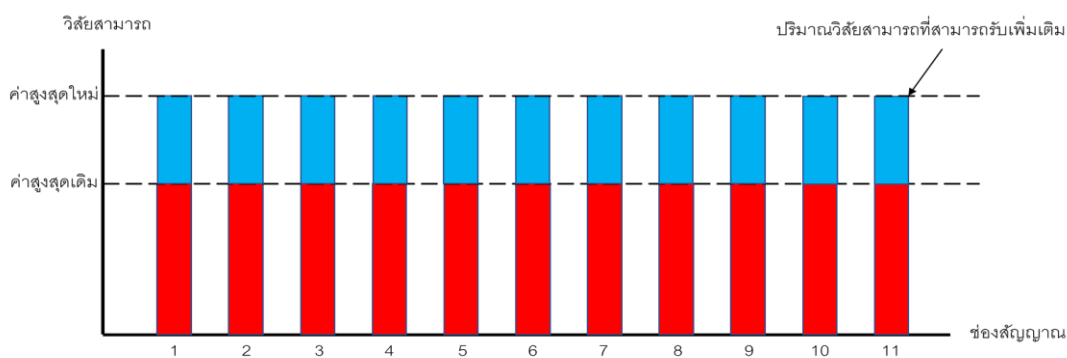
รูปที่ 1.2 ปัญหาการไม่รับรู้ของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง

ในการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องส่งและผู้ใช้งานในหนึ่งช่องสัญญาณ (Channel) นั้น เครื่องส่งและผู้ใช้งานจะใช้งานแถบความถี่ (Frequency band) เดียวกันในการติดต่อสื่อสารเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแทรกสอดไปยังเครื่องส่งและผู้ใช้งานคนอื่น อย่างไรก็ตามการใช้งานการสื่อสารเพียงช่องการสื่อสารเดียวนั้นทำให้เกิดข้อจำกัดด้านจำนวนผู้ที่สามารถเข้าใช้งานเครือข่ายไร้สาย โดยเฉพาะพื้นที่ที่เครื่องส่งสามารถส่งไปถึง ในบริเวณนอกลำคลื่นของแบบรูปการแผ่พลังงานนั้น ผู้ใช้งานคนอื่นจะไม่สามารถใช้งานช่องสัญญาณเดียวกันได้ ถึงแม้ว่าบริเวณดังกล่าวจะมีการแทรกสอดที่น้อยหรือไม่มีเลยก็ตาม สาเหตุมาจากการแทรกสอดที่เกิดขึ้นในเครือข่ายไร้สายรวมถึงปัญหาของการไม่รับรู้และปัญหาในกรณีที่ผู้ใช้งานอยู่ในพื้นที่ของแบบรูปการแผ่พลังงานเอง ซึ่งเกิดได้จากแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางหรือแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางทั้งสองแบบ จากรูปที่ 1.1 เมื่อผู้ใช้งานคนหนึ่งต้องการเข้าใช้งานในช่องสัญญาณเดียวกัน อุปกรณ์จัดเส้นทาง (Router) จะไม่อนุญาตให้ผู้ใช้งานคนหนึ่งเข้าใช้งาน เนื่องจากผู้ใช้งานคนที่สองได้ใช้งานช่องสัญญาณนี้มาก่อนแล้ว ดังนั้นผู้ใช้งานคนหนึ่งจำเป็นต้องรอการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทางและผู้ใช้งานคนที่สองสื่อสารกันจนเสร็จสิ้น หลังจากนั้นผู้ใช้งานคนหนึ่งจึงสามารถเข้าใช้งานช่องสัญญาณนี้ได้ ในรูปที่ 1.2 ระหว่างที่อุปกรณ์จัดเส้นทางส่งข้อมูลกับผู้ใช้งานคนหนึ่ง ผู้ใช้งานที่ไม่อยู่ในทิศทางของลำคลื่นจะไม่สามารถรับรู้ถึงการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทางกับผู้ใช้งานคนหนึ่งได้ ซึ่งต้องใช้กระบวนการของการชี้ทิศทางของคลื่นพาห์ (Carrier sensing) โดยการใช้งานกระบวนการดังกล่าวช่วยแก้ปัญหาของการไม่รับรู้และปัญหาในกรณีที่ผู้ใช้งานอยู่ในพื้นที่ของ

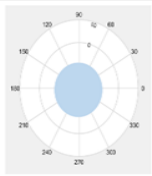
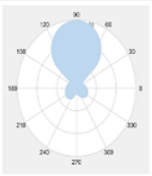
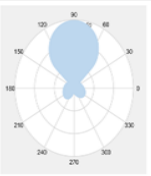
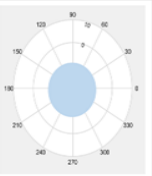
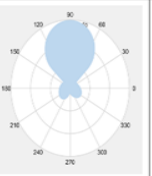
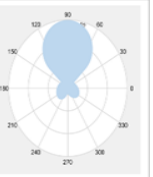
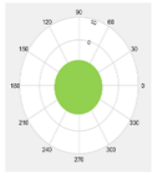
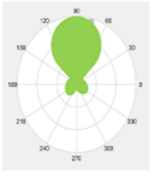
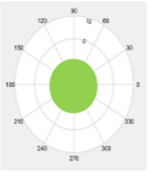
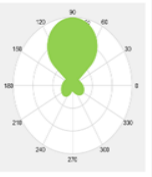
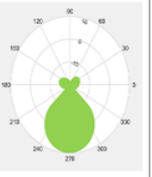
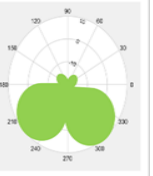
แบบรูปการแผ่พลังงานได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องแลกเปลี่ยนกับการใช้งานช่องสัญญาณหลายช่องสัญญาณ กระบวนการดังกล่าวทำให้ขีดจำกัดของการใช้งานช่องสัญญาณลดลงเพราะบางพื้นที่ใช้งาน ผู้ใช้งานไม่สามารถเข้าใช้งานได้ จากปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้ผู้วิจัยได้เล็งเห็นประโยชน์ในการสร้างความได้เปรียบด้านการเพิ่มความจุของเครือข่ายไร้สาย ซึ่งเป็นที่รู้กันดีว่าปัจจุบันจำนวนอุปกรณ์ที่เข้าถึงเครือข่ายไร้สายได้นั้นเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากและจำนวนของช่องสัญญาณมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น การพัฒนาเพื่อเพิ่มความจุของผู้ใช้งานในเครือข่ายไร้สายเพื่อใช้งานช่องสัญญาณเดียวจึงจำเป็นในแง่ของการส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันและค่าวิสัยสามารถ (Throughput) สูงสุดเท่ากันดังรูปที่ 1.3 โดยปกติค่าของวิสัยสามารถรวมทั้งจุดที่อุปกรณ์จัดเส้นทางสามารถสร้างได้ ไม่ว่าจะเป็นการรับข้อมูลจากผู้ใช้งานหรือการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์นั้นจะถูกจำกัดด้วยค่าสูงสุด (Maximum value) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวคิดในการเพิ่มปริมาณความจุผู้ใช้งานในเครือข่ายไร้สายดังรูปที่ 1.4 ด้วยการเพิ่มความสามารถของอุปกรณ์จัดเส้นทางให้สามารถรับและส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันได้และทำให้ค่าสูงสุดที่เครือข่ายไร้สายสามารถรองรับผู้ใช้งานเพิ่มขึ้น



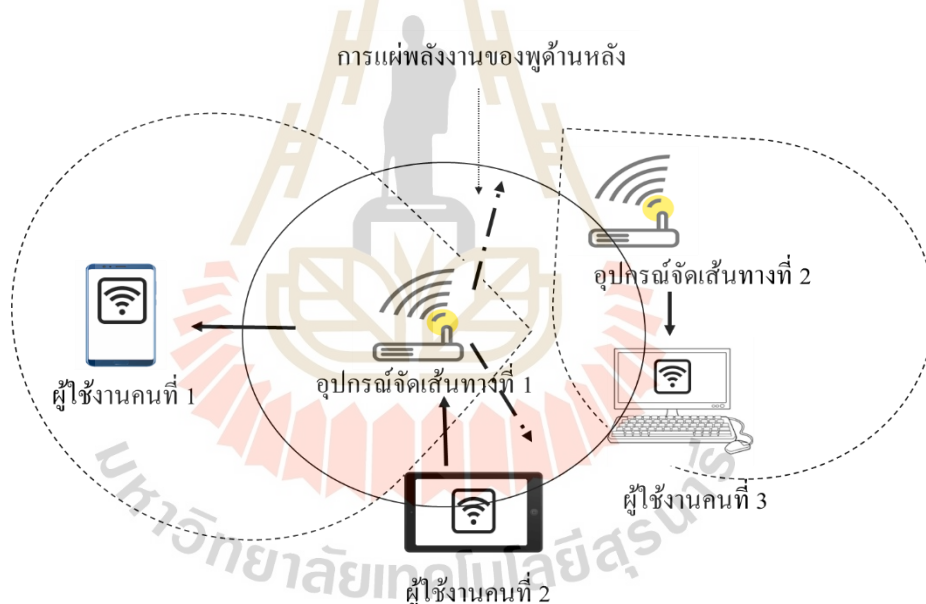
รูปที่ 1.3 ปริมาณค่าวิสัยสามารถสูงสุดของเครือข่ายไร้สายที่ในหนึ่งช่วงเวลา



รูปที่ 1.4 ปริมาณค่าวิสัยสามารถสูงสุดของเครือข่ายไร้สายด้วยวิธีการรับและส่งข้อมูลในเวลาเดียวกัน

ประเภท รูปแบบ	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	ประเภทที่ 3	ประเภทที่ 4	ประเภทที่ 5	ประเภทที่ 6
แบบ รูปการแผ่ พลังงาน ภาคส่ง						
แบบ รูปการแผ่ พลังงาน ภาครับ						
	การใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบดั้งเดิม			การใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานที่นำเสนอ		

รูปที่ 1.5 ตัวอย่างการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงาน



รูปที่ 1.6 การแผ่พลังงานแบบพร้อมกันของอุปกรณ์จัดเส้นทาง

งานวิจัยนี้เสนอให้ในหนึ่งช่องสัญญาณผู้ใช้สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าหนึ่งผู้ใช้งาน โดยใช้การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเชิงพื้นที่สำหรับการสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์และผู้ใช้งานปกติ เมื่อมีการส่งข้อมูลหรือรับข้อมูลที่อุปกรณ์จัดเส้นทาง ผู้ใช้งานจำนวนหนึ่งจะไม่สามารถเข้าใช้งานเครือข่ายไร้สายได้ ดังนั้น ผู้วิจัยได้ออกแบบการทำงานของอุปกรณ์ให้มีความสามารถในการรับและการส่งข้อมูลพร้อมกัน เพื่อเพิ่มปริมาณค่าวิสัยความสามารถที่สามารถทำได้ในช่วงเวลาเดียวกัน

โดยการแบ่งการทำงานตามแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งสามารถทำงานตามที่มาตรฐาน IEEE 802.11 กำหนด นอกจากนี้ ความซับซ้อนของการทำงานยังสะดวกขึ้น เพราะการออกแบบจะอยู่ในส่วนของแอนะล็อก (Analog) ซึ่งไม่จำเป็นต้องเข้าไปแก้ไขการทำงานในส่วนของการประมวลสัญญาณดิจิทัลแต่อย่างใด ประโยชน์ที่ได้รับจากการออกแบบการทำงานของอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับประเภทของการใช้แบบรูปการแผ่พลังงาน ดังรูปที่ 1.5 ในเครือข่ายไร้สายแบบดั้งเดิมผู้วิจัยจำแนกตามการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานให้เป็นประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ในขณะที่อุปกรณ์จัดเส้นทางใช้แบบรูปการแผ่พลังงานรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง เมื่อมีการส่งข้อมูลเกิดขึ้นอุปกรณ์จัดเส้นทางจะไม่สามารถรับข้อมูลได้ ดังนั้น แบบรูปการแผ่พลังงานที่สามารถใช้งานจึงถูกจำกัดให้ใช้เพียงรูปแบบเดียว ยกเว้นกรณีที่มีการใช้สายอากาศคนละชุดและเครื่องรับทำงานแยกจากเครื่องส่ง เมื่อใช้หลักการการทำงานที่งานวิจัยนี้ออกแบบจะทำให้การทำงานของตัวจัดเส้นทางสามารถทำงานได้กับหลากหลายงานประยุกต์ (Application) ในการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3 เราเสนอให้การทำงานเหมาะสมสำหรับเครือข่าย Wi-Fi โดยอุปกรณ์จัดเส้นทางส่งข้อมูลให้กับผู้ใช้งานด้วยการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางในขณะเดียวกันอุปกรณ์จัดเส้นทางยังสามารถรับสัญญาณกับผู้ใช้งานคนอื่นได้ด้วยการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ในกรณีนี้ไม่รวมถึงการแลกเปลี่ยนข้อมูลขึ้นพื้นฐานระหว่างอุปกรณ์ ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากดังรูปที่ 1.6 เมื่ออุปกรณ์จัดเส้นทางที่ 1 ส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งานคนที่ 1 แล้ว ผู้ใช้งานคนที่ 2 สามารถส่งข้อมูลมายังอุปกรณ์จัดเส้นทางที่ 1 ได้เช่นกัน นอกจากนี้ก่อนที่อุปกรณ์จัดเส้นทางที่ 2 จะส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งานคนที่ 3 อุปกรณ์จัดเส้นทางที่ 1 ก็สามารถรับรู้ถึงการส่งข้อมูลของอุปกรณ์จัดเส้นทางที่ 2 ได้ ดังนั้น อุปกรณ์จัดเส้นทางที่ 1 จะหันพู่ด้านหลังของแบบรูปการแผ่พลังงานออกจากการสื่อสารของอุปกรณ์จัดเส้นทางที่ 2 กับผู้ใช้งานคนที่ 3 ตัวอย่างนี้เป็นประโยชน์อย่างมากในการใช้งานเชิงพื้นที่และเป็นการหลีกเลี่ยงการชนกันของสัญญาณที่จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการสื่อสาร ประเภทการแผ่รังสีแบบที่ 4 เหมาะสมกับการสื่อสารแบบออกอากาศ (Broadcast) เป็นอย่างมาก โดยปกติแล้วเครือข่ายที่ใช้การออกอากาศจะใช้การรับสัญญาณด้วยเครื่องส่งและเครื่องรับเพื่อรับสัญญาณคนละชุดทำให้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับประมวลผลแยกกัน อย่างไรก็ตามแนวคิดที่ถูกรับรองนี้ อุปกรณ์จัดเส้นทางที่ทำหน้าที่กระจายสัญญาณสามารถใช้ชุดอุปกรณ์ชุดเดียวกันเพื่อประมวลผล นอกจากนี้ยังสามารถส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งานรอบสถานีได้ด้วยสายอากาศชุดเดียวกันกับสายอากาศภาครับ ดังนั้น ต้นทุนในการกระจายสัญญาณเพื่อออกอากาศไปยังอุปกรณ์อื่นจะลดลง แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 5 เหมาะสำหรับอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) อุปกรณ์ชนิดนี้ประกอบไปด้วยสายอากาศที่ทำหน้าที่รับข้อมูลและส่งไปยังผู้ใช้งานเป้าหมายในระยะที่ไกลขึ้น ดังนั้น การใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานคนละทิศทางจะทำให้เครือข่ายไร้สายได้รับค่าวิสัยที่สามารถที่เพิ่มในช่วงเวลาเดียวกัน ดังนั้น การใช้งานจะเหมือนกับการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3 สำหรับ

แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 6 เหมาะสำหรับเครือข่ายที่ต้องการรับข้อมูลในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เช่น เครือข่ายตัวตรวจรู้ (Sensor network) เป็นต้น ตำแหน่งของอุปกรณ์และอุปกรณ์จัดเส้นทาง ถูกกำหนดไว้คงที่ทำให้การส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันมีค่าวิสัยสามารถที่เพิ่มขึ้น ในปัจจุบันมีความต้องการเข้าถึงเครือข่ายไร้สายด้วยคุณภาพที่ดีที่สุด ดังนั้น การใช้แบบรูปการแผ่พลังงานที่หลากหลายแบบจากอุปกรณ์ชุดเดียวกันจะช่วยเพิ่มอัตราขยายที่ดีขึ้น ส่งผลให้คุณภาพสัญญาณของเครือข่ายไร้สายดีขึ้นด้วย นอกจากนี้ ยังลดความผิดพลาดของการส่งและรับในเครือข่ายไร้สาย รวมถึงประโยชน์ของการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกันจะเพิ่มความสุขของเครือข่ายไร้สาย

จากความสำคัญของปัญหาและประโยชน์ที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยชิ้นนี้ได้ผ่านการศึกษาค้นคว้าและรวบรวมองค์ความรู้ โดยมุ่งหวังที่จะพัฒนาเครือข่ายไร้สายให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้เพื่อขยายพื้นฐานในการต่อยอดเทคโนโลยีให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปและวัดผลจากอุปกรณ์ต้นแบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบอุปกรณ์สำหรับใช้งานสายอากาศสำหรับเครือข่ายไร้สายให้ทำงานพร้อมกัน ในการส่งข้อมูลและการรับข้อมูล
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ทำงานพร้อมกันต่อเครือข่ายไร้สาย
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สายในด้านจำนวนผู้ใช้ในเครือข่าย

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

เมื่อทำการออกแบบอุปกรณ์แล้วการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานพร้อมกันจะส่งผลให้เครือข่ายไร้สายสามารถรองรับผู้ใช้งานได้มากขึ้นและสามารถรองรับระบบสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE 802.11

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการออกแบบจำลองการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต่างกันบนความถี่ 2.45 GHz และจำลองเครือข่ายไร้สายที่ประกอบไปด้วยโนด (Node) จำนวนมากในเครือข่ายไร้สาย
- 1.4.2 ใช้ชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบทดสอบเฉพาะบนเครือข่ายวายฟาย (Wi-Fi)

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1.5.1.1 สำรวจบริษัทที่นวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 1.5.1.2 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแบบรูปการแผ่พลังงาน
- 1.5.1.3 ศึกษาทฤษฎีของแบบจำลองเครือข่ายไร้สาย
- 1.5.1.4 ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ผลกระทบของแบบรูปการแผ่พลังงานที่มีต่อเครือข่าย

ไร้สาย

- 1.5.1.5 ออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานพร้อมกัน
- 1.5.1.6 สร้างแบบจำลองเครือข่ายไร้สาย
- 1.5.1.7 วัดผลและวิเคราะห์ความแตกต่างของแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกัน
- 1.5.1.8 วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินการวิจัย

1.5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1.5.2.1 อุปกรณ์จัดเส้นทาง
- 1.5.2.2 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 1.5.2.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้ชุดอุปกรณ์ที่สามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานแบบพร้อมกันได้
- 1.6.2 ได้ต้นแบบสำหรับแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์จำนวนผู้ใช้ในเครือข่ายไร้สาย

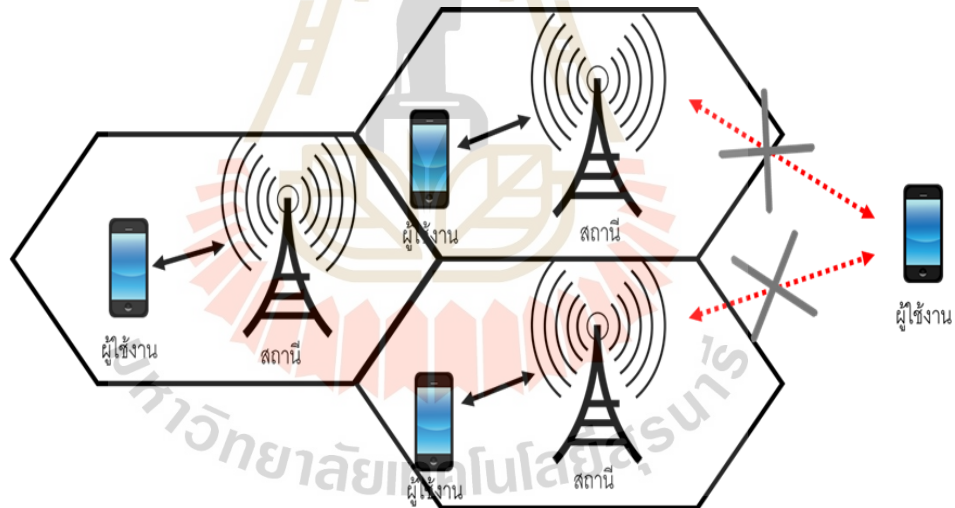
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวกับเครือข่ายไร้สาย ซึ่งมุ่งเน้นที่การส่งข้อมูลของโนดในเครือข่ายไร้สาย ส่วนที่สองของบทจะอธิบายถึงโครงสร้างและการทำงานของเครือข่ายไร้สาย ส่วนที่สามกล่าวถึงโปรโตคอลที่มีในเครือข่ายไร้สาย ส่วนที่สี่เกี่ยวข้องกับพื้นฐานของสายอากาศซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับส่งสัญญาณ ส่วนที่ห้าเกี่ยวข้องกับการควบคุมทิศทางของคลื่นบนตัวกลาง ส่วนที่หกเกี่ยวข้องกับเทคนิคการวิเคราะห์เครือข่ายไร้สายจากตัวสายอากาศและจากแบบจำลอง Markov chain



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายไร้สาย

2.2 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายไร้สาย

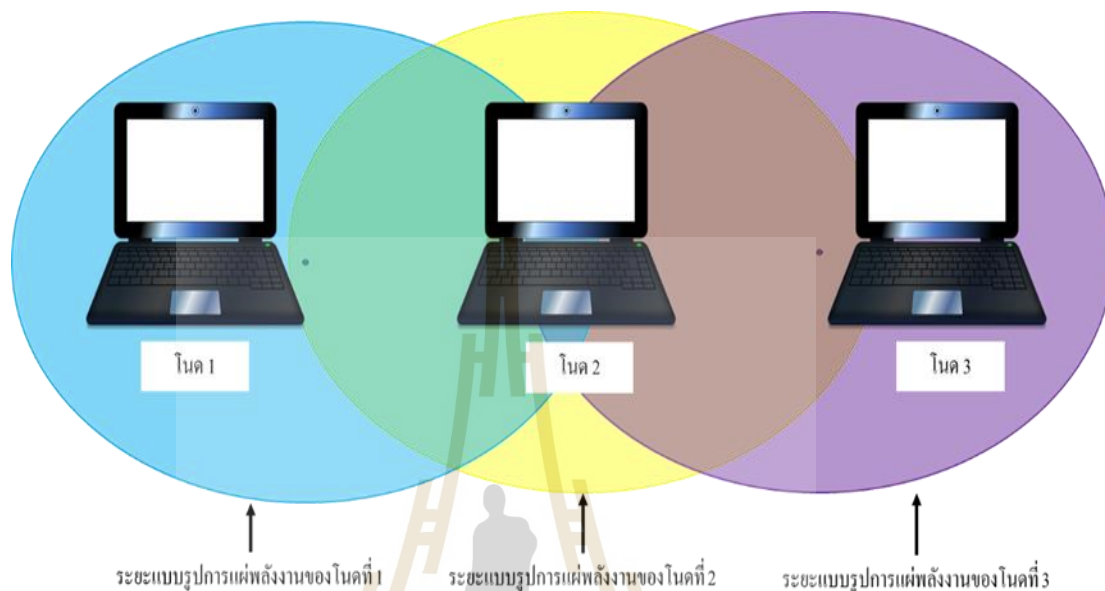
เครือข่ายไร้สายคือ เทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ตั้งแต่สองอุปกรณ์ อุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สายจะทำหน้าที่ส่งข้อความที่ต้องการสื่อสารไปยังผู้รับข้อความ ข้อความที่ถูกส่งจะอยู่ในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าและเดินทางในอากาศ การสื่อสารไร้สายที่เดินทางผ่านอากาศว่างใช้คลื่นวิทยุในการรับส่งข้อมูลแทนสายส่งสัญญาณ การสื่อสารไร้สายจะขึ้นอยู่กับสถานีและผู้ใช้งานดังรูปที่ 2.1

สถานีทำหน้าที่เป็นตัวกลางของการติดต่อสื่อสารและจัดสรรเส้นทางการส่งข้อมูล เมื่อผู้ใช้งานในเครือข่ายไร้สายต้องการสื่อสารกับผู้ใช้งานปลายทาง ผู้ใช้งานต้องร้องขอการเข้าใช้ช่องสัญญาณในพื้นที่ตัวเอง ทั้งนี้ ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องรู้เส้นทางที่จะถูกจัดสรรในทำนองเดียวกันเมื่อมีผู้ใช้งานช่องสัญญาณของสถานีอยู่แล้ว ช่องสัญญาณจะอยู่ในสถานะไม่ว่างและผู้ใช้งานอื่นจะไม่สามารถเข้าใช้งานเครือข่ายไร้สายเพื่อส่งข้อมูลได้ จนกว่าช่องสัญญาณจะอยู่ในสถานะว่าง ปกติแล้วช่องสัญญาณที่มีในเครือข่ายไร้สายจะมีจำนวนที่จำกัดและมากกว่าหนึ่งช่องสัญญาณเพื่อใช้งานในการสื่อสาร อย่างไรก็ตามเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สายให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาการสื่อสารบนช่องสัญญาณเดียว ซึ่งสามารถต่อยอดไปยังการทำงานในช่องสัญญาณที่มากขึ้นต่อไป เครือข่ายไร้สายสามารถแบ่งตามขนาดการสื่อสารได้เป็นเครือข่ายเฉพาะกิจ (Ad-hoc network) และเครือข่ายโครงสร้าง (Infrastructure) ทั้งสองเครือข่ายมีการทำงานที่คล้ายกันคือ การมีโหนดกลางเพื่อจัดสรรข้อมูลโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 โครงสร้างและการทำงานของเครือข่ายเฉพาะกิจ

เครือข่ายเฉพาะกิจเป็นเครือข่ายไร้สายที่ถูกใช้งานในกรณีที่เครือข่ายไร้สายแบบปกติไม่สามารถใช้งานได้ เครือข่ายประเภทนี้มักใช้สื่อสารกันในช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น (ส่งข้อมูลเสร็จสิ้นหนึ่งชุดข้อมูล) โครงสร้างของเครือข่ายเฉพาะกิจประกอบไปด้วยอุปกรณ์ตั้งแต่ 2 อุปกรณ์ขึ้นไปที่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยตรง การสื่อสารจะไม่ผ่านอุปกรณ์กระจายสัญญาณหรืออุปกรณ์กลางที่ถูกออกแบบสำหรับใช้งานในการจัดเส้นทางของข้อมูลโดยเฉพาะ หลักการทำงานของเครือข่ายเฉพาะกิจคือ การเปลี่ยนหนึ่งในผู้ใช้งานในเครือข่ายไร้สายให้เข้ามาทำหน้าที่จัดสรรเส้นทางและกระจายสัญญาณ เนื่องจากการจัดเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลไปยังปลายทางซับซ้อนน้อยกว่าเครือข่ายแบบโครงสร้าง ทำให้เครือข่ายแบบเฉพาะกิจสามารถกำหนดเป้าหมายในการส่งได้แม่นยำ วิธีการเชื่อมต่อแบบนี้สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้ เช่น การแชร์ไฟล์ การแชร์เครื่องพิมพ์ และการต่อวงแลน ตัวอย่างเครือข่ายเฉพาะกิจ เช่น การส่งข้อมูลในที่ไม่มีสัญญาณของเครือข่ายโทรศัพท์มือถือเมื่ออยู่ในป่า ดังนั้น การใช้งานเครือข่ายเฉพาะกิจเป็นเครือข่ายสำรองจึงมีความจำเป็น ซึ่งเครือข่ายเฉพาะกิจยังไม่มีค่าใช้จ่ายในแง่ทุนทรัพย์ในการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ เพราะไม่ต้องอาศัยสถานีในการจัดเส้นทาง ในเครือข่ายเฉพาะกิจอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกเรียกว่าโหนด โหนดที่ทำหน้าที่จัดสรรข้อมูลเราเรียกว่าโหนดกลาง โหนดกลางจะทำหน้าที่กำหนดเส้นทางการส่งต่อข้อมูล กำหนดความเร็ว และกำหนดทิศทางของข้อมูล โดยปกติจำนวนช่วงการสื่อสารที่ข้อมูลใช้เป็นทางผ่านจะอยู่ที่ 1 ช่วงการส่ง ดังนั้น โหนดกลางจึงเป็นส่วนสำคัญของเครือข่ายนี้ รูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเฉพาะกิจที่ประกอบด้วย 3 โหนดคือ โหนดที่ 1 โหนดที่ 2 (โหนดกลาง) และโหนดที่ 3 เมื่อผู้ใช้งานคนใดคนหนึ่งต้องการส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งานคนอื่น โหนดใด

โนดหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นโนดกลางเพื่อจัดสรรการส่งข้อมูล ไม่ว่าจะป็นกรณีที่เป็นกรณืที่เป็นการส่งข้อมูลแบบหนึ่งต่อหนึ่งหรือกรณีทีผู้รับอยู่ไกลเกินกว่าผู้ส่งจะส่งไปถึงก็ตาม

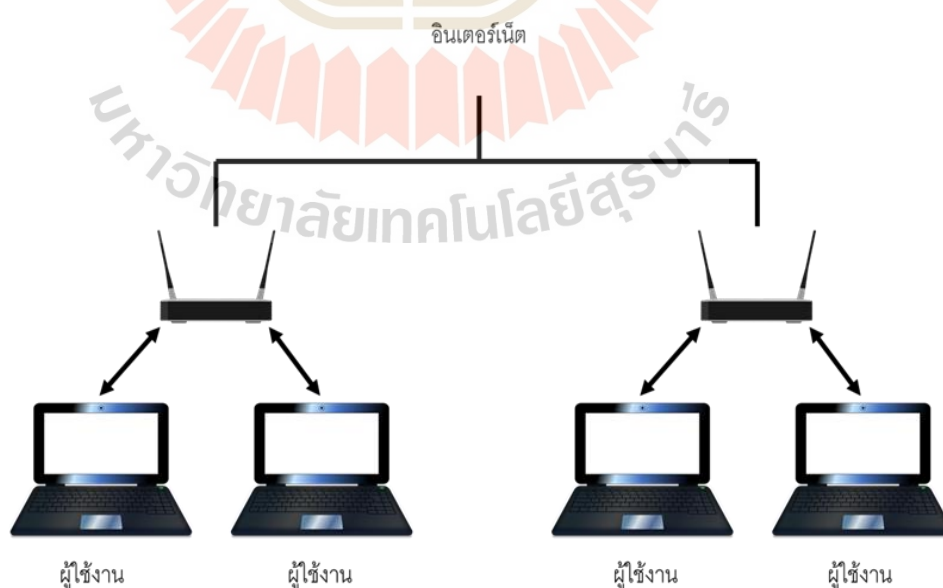


รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเฉพาะกิจ

การทำงานของเครือข่ายเฉพาะกิจจะใช้การตั้งค่าอุปกรณ์แบบกำหนดเอง โดยเชื่อมต่อระหว่างโนดก่อนการส่งข้อมูล การเชื่อมต่อโนดก่อนการส่งทำให้แต่ละโนดรับรู้ถึงตำแหน่งและข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นในการส่งข้อมูล ดังนั้น จึงทำให้การสื่อสารไม่จำเป็นต้องใช้เครือข่ายเดิมที่มีประจำอยู่แล้ว ซึ่งโนดมีอิสระที่จะใช้งานเครือข่ายไร้สาย เนื่องจากความถี่ในการใช้งานจะไม่ตรงกับเครือข่ายไร้สายดั้งเดิม (Frodigh, Magnus, Per Johansson and Peter Larsson, 2000) รูปที่ 2.2 คือ ตัวอย่างสำหรับการทำงานของเครือข่ายเฉพาะกิจที่ประกอบไปด้วยโนดทั้งหมด 3 โนด จากรูปเห็นได้ว่าโนดที่ 1 ไม่อยู่ในระยะของการส่งข้อมูลกับโนดที่ 3 ดังนั้น โนดที่ 1 จึงจำเป็นต้องใช้โนดที่ 2 ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังโนดที่ 3 เมื่อโนดทั้ง 3 ตั้งค่าการเชื่อมต่อสำหรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลเพื่อฐานแล้วโนดที่ 1 จะส่งข้อมูลไปยังโนดกลาง (โนดที่ 2) เพื่อเตรียมข้อมูลส่งไปยังโนดที่ 3 ซึ่งโนดกลางจะทำงานเป็นทั้งโนดและตัวจัดเส้นทางในเวลาเดียวกัน ถึงแม้ว่าการเชื่อมต่อกันระหว่างโนดนั้นจะไม่มีค่าใช้จ่าย แต่ปัญหาที่พบในเครือข่ายประเภทนี้คือ การแทรกสอดจากเครือข่ายเฉพาะกิจอื่น เนื่องจากไม่มีการติดต่อสื่อสารกันนอกเครือข่ายทำให้ลำคลื่นที่ใช้ในการส่งข้อมูลและรับข้อมูลไม่เป็นระเบียบ ซึ่งยากที่จะควบคุม

2.2.2 โครงสร้างและการทำงานของเครือข่ายไร้สายแบบกลุ่มโครงสร้าง

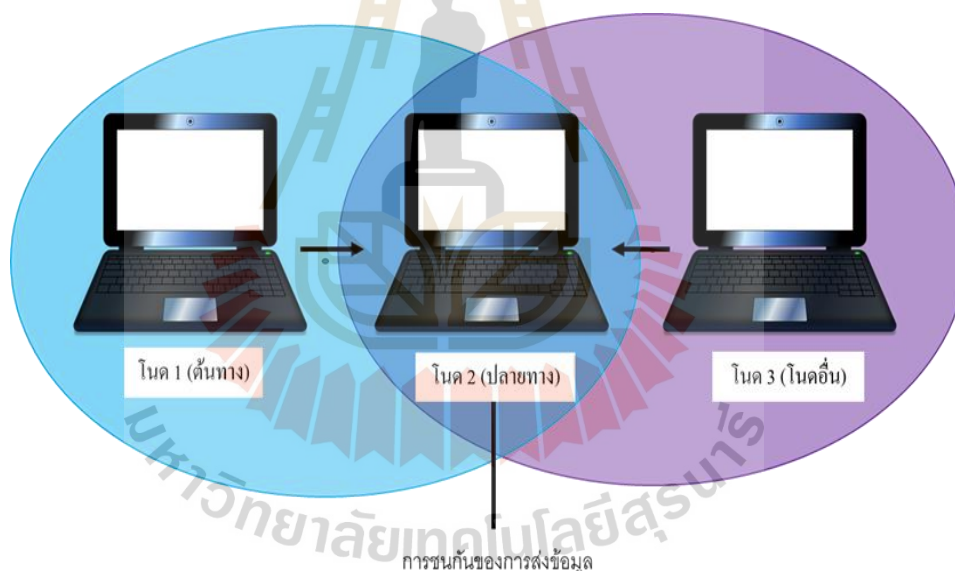
เครือข่ายไร้สายแบบกลุ่มโครงสร้างมีลักษณะดังรูปที่ 2.3 สถาปัตยกรรมเครือข่ายประกอบไปด้วยจุดเชื่อมต่อ (Access point) หลายจุด หน้าที่ของจุดเชื่อมต่อคือ เชื่อมต่อเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายกับระบบเคเบิลที่มีอยู่ ซึ่งทำให้เครือข่ายท้องถิ่นสามารถส่งออกข้อมูลไปยังเครือข่ายภายนอกได้ การออกแบบเครือข่ายลักษณะนี้ทำให้แต่ละโหนดที่อยู่ในเครือข่ายสามารถเชื่อมต่อกันได้อย่างเสถียรภาพ ดังนั้น จึงเป็นการลดการแทรกสอดที่อาจเกิดขึ้นจากการไม่รับรู้ตำแหน่งของอุปกรณ์ในเครือข่าย เครือข่ายไร้สายแบบกลุ่มโครงสร้างมีการกำหนดตำแหน่งในการจัดเส้นทางล่วงหน้า มีตำแหน่งสถานีและมีโครงข่ายที่ชัดเจน (Li, and Xuefei, 2006) อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของเครือข่ายแบบกลุ่มไม่ได้จำกัดอยู่แค่จุดเชื่อมต่อ แต่ยังรวมถึงหอคอย (Tower) สถานี (Microcell Small cell Relay RF Baseband processors Radio resource และ Controller) เครือข่ายหลัก (Gate way Switchers และ Routers) การใช้งานเครือข่ายไร้สายแบบกลุ่มโครงสร้างจะช่วยลดการแทรกสอดระหว่างโหนด เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลพื้นฐานของโหนดสำหรับสื่อสารกันภายในเครือข่ายอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น เครือข่ายลักษณะนี้จึงมีความสะดวกรวดเร็วในการส่งข้อมูลและมีการชนกันของข้อมูลน้อยกว่าเครือข่ายแบบเฉพาะกิจ อย่างไรก็ตามปัญหาการแทรกสอดที่เกิดขึ้นกับเครือข่ายยังคงมีอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เนื่องจากแนวโน้มของโหนดที่เกิดขึ้นมาใหม่ในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นโหนดที่เป็นอุปกรณ์สำหรับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of thing) หรืออุปกรณ์สำหรับควบคุมโดรน เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเครือข่ายไร้สายแบบกลุ่ม

2.3 Media Access Control (MAC)

โพรโทคอลสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างโนดในเครือข่ายไร้สายทั่วไปนั้นจะใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.11 อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าโพรโทคอลที่ใช้จะเป็นโพรโทคอลที่เป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ แต่โพรโทคอลดั้งเดิมยังคงมีคุณภาพที่ต่ำและมีปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสื่อสารมากมายที่ถูกศึกษา ปัญหาสำคัญที่เรารู้จักกันเป็นอย่างดีคือ ปัญหาโนดซ่อนเร้น (Hidden terminal) เมื่อมีการใช้งานเทคนิคการก่อลำคลื่นตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ประสิทธิภาพที่เครือข่ายไร้สายได้รับนั้นไม่ได้อยู่ในค่าที่สูงที่สุด เช่น ประสิทธิภาพในด้านของค่าวิสัยและความหน่วงปัญหาดังกล่าวเกิดได้จากหลายปัจจัยและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นการกระทบจากสัญญาณการแทรกสอดหรือการชนกันของข้อมูล ซึ่งในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างโพรโทคอลที่มีอยู่ในปัจจุบัน โพรโทคอลสำหรับควบคุมแบบบูรณาการแผ่พลังงานของสายอากาศ ขั้นตอนการส่งข้อมูลของโนดที่มีส่วนช่วยทำให้เครือข่ายไร้สายมีประสิทธิภาพมากขึ้น

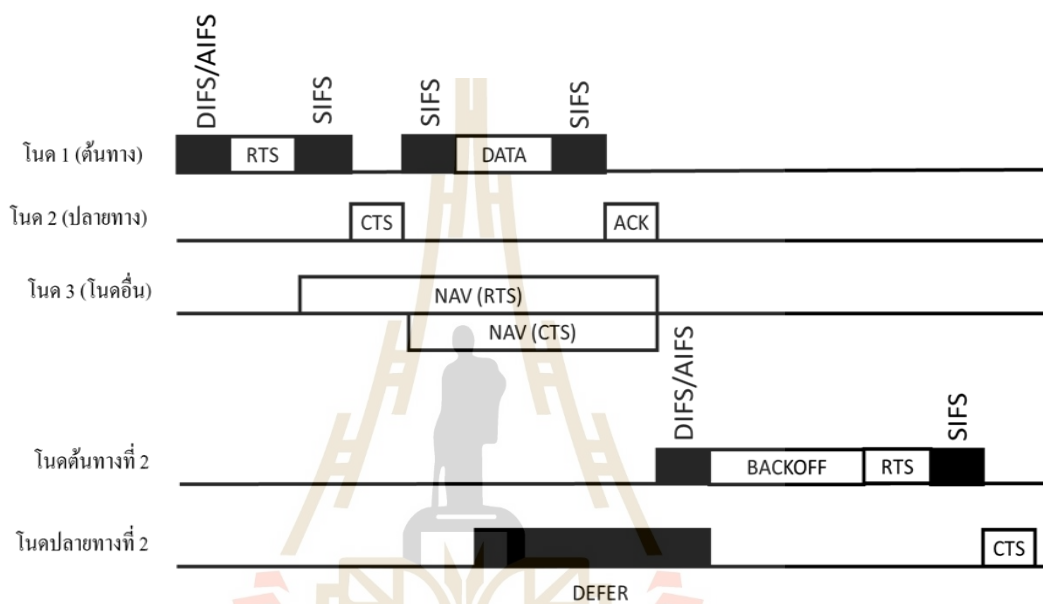


รูปที่ 2.4 สถานการณ์ของการมีโนดซ่อนเร้น

2.3.1 การทำงานของ MAC

การสื่อสารไร้สายเกิดจากการแชร์ข้อมูลระหว่างโนดหลายโนด โนดจะมีการใช้งานช่องสัญญาณพร้อมกันจำนวนมาก ดังนั้นเป้าหมายการทำงานของ MAC โพรโทคอลคือ การควบคุมและการกำหนดความเท่าเทียมในการส่งข้อมูลของแต่ละโนดเพื่อใช้ประโยชน์จากการสื่อสารพร้อมกันให้ได้มากที่สุด เราสามารถแบ่ง MAC โพรโทคอลเป็น 2 ประเภทหลักได้แก่ โพรโทคอลที่เน้น

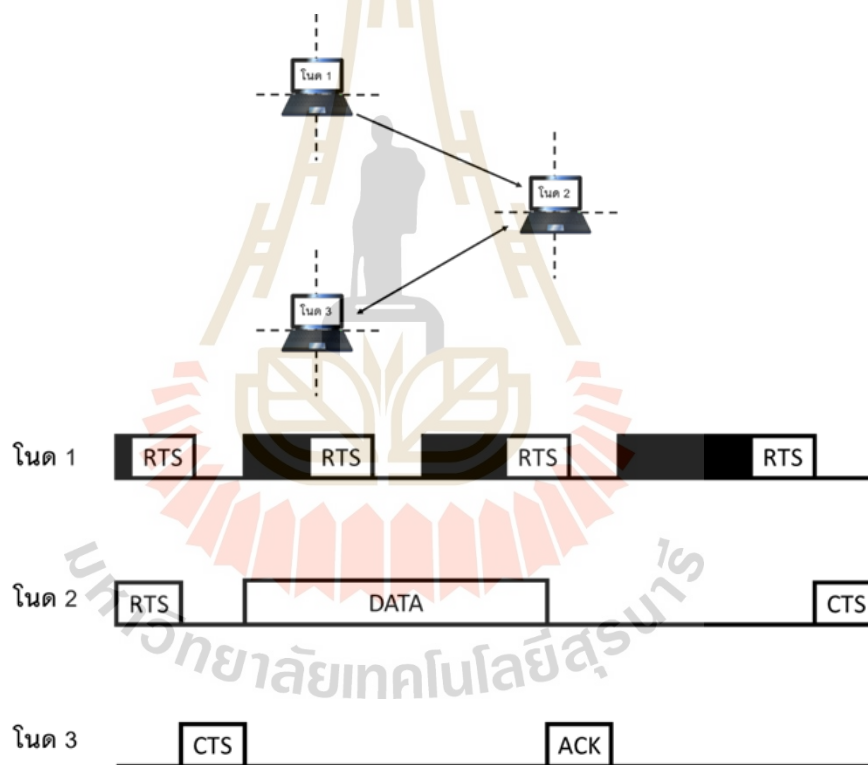
การช่วงชิง (Contention) ช่องสัญญาณเป็นหลัก ซึ่งโนดใช้โปรโตคอลเพื่อแย่งชิงการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบสุ่ม ในกรณีที่เกิดการชนกันของข้อมูลและการเข้าถึงข้อมูลพร้อมกัน โหนดภาครับจะใช้โปรโตคอล ซีเอสเอ็มเอ/ซีเอ (CSMA/CA) ในการจัดสรรข้อมูล สำหรับโปรโตคอลประเภทที่ 2 คือโปรโตคอลใช้การช่วงชิงช่องสัญญาณ อย่างอิสระ โดยกำหนดและจัดสรรช่องสัญญาณที่โนดกลางไว้ล่วงหน้าเพื่อให้การส่งข้อมูลจากหลายโนดไม่มีการชนกัน



รูปที่ 2.5 กลไกการทำงานของเฟรม RTS/CTS/DATA/ACK

มาตรฐาน IEEE 802.11 ฟังก์ชันการประสานงานแบบกระจาย (Distributed coordination function: DCF) เป็นส่วนหนึ่งของโปรโตคอล CSMA/CA สำหรับโปรโตคอลนี้กำหนดให้โนดที่ต้องการเข้าใช้ช่องสัญญาณจำเป็นต้องตรวจจับการใช้งานช่องสัญญาณที่อยู่บริเวณโดยรอบก่อนส่งข้อมูลทุกครั้ง การใช้งานโปรโตคอลนี้มีประสิทธิภาพอย่างมากในด้านการลดการแทรกสอด แต่ในเครือข่ายไร้สายที่มีผู้ใช้งานและมีการส่งข้อมูลจำนวนมาก ดังนั้น โปรโตคอลจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สายลดลง เมื่อโนดในเครือข่ายไร้สายอยู่นอกช่วงการรับรู้ จะถูกเรียกว่า ปัญหาโนดซ่อนเร้น ขอบเขตการค้นหาของโนดคือ ระยะทางของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ตัวโนด หากมีโนดพยายามสื่อสารกับโนดกลางพร้อมกันจะเกิดการชนกันของข้อมูล ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งต้องใช้กลไกสำหรับการจองช่องสัญญาณตามมาตรฐาน IEEE 802.11 กลไกการส่งข้อมูลประกอบไปด้วยเฟรมร้องขอเพื่อส่ง (Request To Send: RTS) เฟรมทำให้ว่างเพื่อส่ง (Clear To Send: CTS) เฟรมข้อมูล (Data: DATA) และเฟรมการตอบรับ (Acknowledgement: ACK)

ทุกครั้งที่มีโหนดต้องการส่งข้อมูลไปยังโหนดอื่นนั้น โหนดต้นทางต้องมีการตรวจสอบช่องสัญญาณทุกครั้ง เพื่อจองช่องสัญญาณการส่งข้อมูลอาศัยการทำงานของ DCF โดยโหนดที่ต้องการส่งข้อมูลต้องรอเวลาเพื่อส่งเฟรมด้วยระยะเวลาตามระยะห่างของเฟรม สำหรับมาตรฐานปี 2005 โหนดต้องรอเวลาในการส่งข้อมูลตามลำดับความสำคัญที่ถูกกำหนด ในกรณีที่โหนดเป้าหมายมีการใช้งาน โหนดต้นทางจะถูกกำหนดเวลาไว้ตามเวลาของตัวจับเวลา (Backoff timer) และรอจนกว่าเวลาของตัวจับเวลาหมด เมื่อเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารเฟรม RTS และเฟรม CTS ประกอบไปด้วยข้อมูลในด้านระยะเวลาในการส่งข้อมูล ซึ่งโหนดข้างเคียงจะได้รับข้อมูลนี้เช่นเดียวกัน โดยมาจากการตั้งค่าเวกเตอร์สำหรับจัดสรรเครือข่าย (Network allocation vector: NAVs) เพื่อเป็นการลดจำนวนการชนกันของสัญญาณดังรูปที่ 2.5

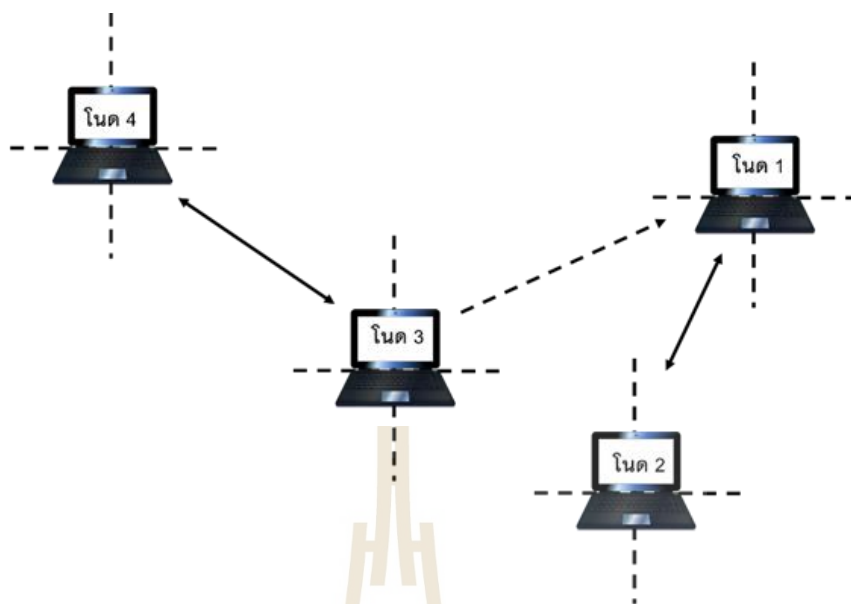


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างปัญหาการไม่รู้ของโหนด

2.3.2 กรณีศึกษาสำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้โปรโตคอล MAC

ปกติแล้วสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงาน 2 แบบ ซึ่งเกิดจากการใช้สายอากาศรูปแบบดั้งเดิมและเกิดจากการใช้เทคนิคการก่อดำคลื่นเพื่อประโยชน์ในเชิงพื้นที่ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่พบได้โดยทั่วไปคือ การไม่รู้ของโหนดไม่ว่าจะใช้สายอากาศแบบใดก็ตาม จากรูปที่ 2.6

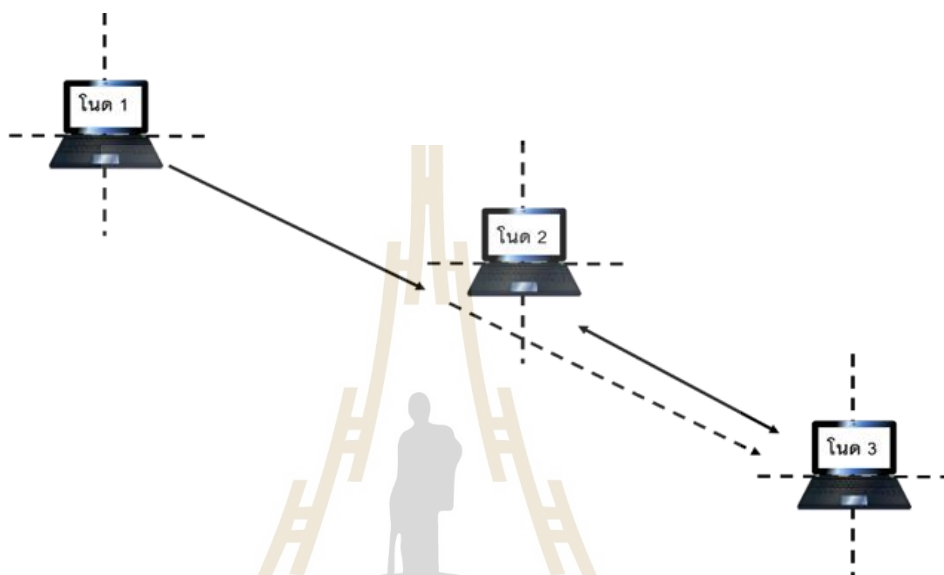
โหนดที่ 2 และโหนดที่ 3 กำลังสื่อสารกันอยู่ด้วยโหมตการทำงานแบบมีทิศทาง ในขณะที่โหนดที่ 1 อยู่ในสถานะจับเวลา ดังนั้น โหนดที่ 1 จะไม่รับรู้ถึงการส่งข้อมูลระหว่างโหนดที่ 2 และโหนดที่ 3 ถ้าโหนดที่ 1 มีข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังโหนดที่ 2 โหนดที่ 1 จะพยายามสื่อสารกับโหนด 2 จนหมดเวลาการส่ง เนื่องจากการก่อกำลั่นหันลำคลื่นของโหนดที่ 2 ซึ่งทิศทางไปยังโหนดที่ 3 จากกรณีนี้ถือว่าโหนดที่ 1 ไม่ได้รับรู้การส่งข้อมูลของโหนดปลายทาง ดังนั้นโหนดจะไม่สามารถตอบสนองได้เพราะไม่ได้รับเฟรม CTS ที่ถูกต้อง โหนดที่ 1 จะถือว่าการส่งข้อมูลดังกล่าวเป็นการส่งข้อมูลที่ล้มเหลว เนื่องจากการชนกันของข้อมูลและโหนดที่ 1 จะตอบสนองด้วยการส่งข้อมูลไปยังโหนดที่ 2 ใหม่อีกครั้งด้วยระยะเวลาที่นานขึ้น การทำงานของโหนดที่ 1 จะสิ้นสุดลงเมื่อโหนดที่ 2 ตอบรับโหนดที่ 1 ด้วยโหมตรอบทิศทางหรือจำนวนการส่งใหม่ถึงขีดจำกัดที่กำหนดไว้ การส่งข้อมูลซ้ำหลายรอบของโหนดที่ 1 เป็นปัจจัยที่ทำให้ความจุของเครือข่ายไร้สายลดลง (ผู้ใช้งานอื่นควรจะสื่อสารกับโหนดที่ 1 ได้ แต่จากผลกระทบของการส่งซ้ำดังกล่าวทำให้ในขณะนี้โหนดที่ 1 ไม่พร้อมใช้งาน) ผลกระทบที่เกิดขึ้นอาจดูไม่รุนแรงเมื่อเป็นการส่งเพียงกลุ่มข้อมูล (Packet) เดียว อย่างไรก็ตามในกรณีที่โหนดที่ 3 มีกลุ่มข้อมูลที่ต้องส่งจำนวนมากไปยังโหนดที่ 2 จะทำให้โหนดที่ 2 เลือกรับส่งข้อมูลกับโหนดที่ 3 ก่อนโหนดที่ 1 ถึงแม้ว่าโหนดที่ 2 จะส่งกลุ่มข้อมูลชุดแรกเสร็จสิ้นแล้วก็ตาม เนื่องจากเงื่อนไขจากลำดับความสำคัญที่ถูกกำหนดให้โหนดที่ 1 มีขนาดเล็กน้อย ดังนั้น จึงมีโอกาสที่โหนดที่ 1 จะทำให้ลำดับความสำคัญในการส่งลดลงไปอีกและทำให้เกิดความเท่าเทียมกันสำหรับโหนดที่ 1 ซึ่งถ้ายังใช้โปรโตคอล MAC ดังกล่าวอยู่นั้นผู้ใช้งานต้องทนกับระยะเวลาที่ยาวนานของปัญหาไม่รับรู้ของโหนด ซึ่งการไม่รับรู้ของโหนดยังสามารถทำให้โหนดอื่นไม่รับรู้การส่งข้อมูลตามไปด้วย เนื่องจากอยู่ในช่วงของการส่งซ้ำ ดังนั้น โหนดที่ 1 จำเป็นต้องรอส่งข้อมูลกันเป็นลำดับขั้นต่อกันไป จากการศึกษาทีมงานวิจัยที่พยายามแก้ปัญหาการไม่รับรู้ของโหนด ซึ่งงานวิจัยช่วยลดทอนผลกระทบดังกล่าวลงด้วยกลไกการใช้งานสัญญาความเสี่ยง (Choudhury, Romit Roy, and Nitin H. Vaidya. 2004) ช่วงเวลาต่อมากลไกการใช้สัญญาความเสี่ยงถูกพัฒนาเป็นโปรโตคอล DMAC-PCDR ซึ่งทำงานบนพื้นฐานของอุปกรณ์ที่มี GPS ติดตั้งอยู่กับโหนดทุกโหนดในเครือข่ายไร้สายและสายอากาศไม่สามารถขยับได้ ทำให้สามารถลดทอนปัญหาของโหนดซ่อนเร้นได้ (Takatsuka, Yuya, and et al., 2008)



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างปัญหาโนตซ่อนเร้น

นอกจากปัญหาการไม่รับรู้ของโนตที่เกิดขึ้นแล้วยังมีตัวอย่างของปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ปัญหาโนตซ่อนเร้นดังรูปที่ 2.7 ถึงแม้ว่าการใช้งานกลไกการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโนตจะป้องกัน ปัญหาโนตซ่อนเร้นได้ในบางส่วน อย่างไรก็ตามโนตซ่อนเร้นก็ยังไม่ได้หมดไปจากเครือข่าย ปกติแล้ว โนตซ่อนเร้นมักเกิดจากแบบรูปการแผ่พลังงานที่สร้างจากสายอากาศเป็นหลัก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีอยู่แล้วว่าสายอากาศแบบรอบทิศทางจะมีอัตราขยายที่น้อยกว่าสายอากาศแบบมีทิศทางที่เกิดจากการก่อลำคลื่น ดังนั้น ถ้าโนตในสถานะว่างใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางเพื่อรอรับข้อมูล โนตจะพลาดการรับรู้การส่งข้อมูลจากโนตอื่น จากรูปที่ 2.7 โนตที่ 2 ส่งเฟรม RTS ไปยังโนตที่ 3 จากนั้นโนตที่ 3 ตอบกลับด้วยเฟรม CTS สมมติว่าโนตที่ 1 อยู่ในสถานะปกติใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ซึ่งอยู่ห่างไกลเกินกว่าจะรับเฟรม CTS ของโนตที่ 3 ได้ ในขณะเดียวกันโนตที่ 1 ก็มีข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังโนตที่ 2 ดังนั้น ลำคลื่นที่โนต 1 สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับส่งข้อมูลจะอยู่บนเส้นทางที่ใกล้เคียงกับการส่งข้อมูลของเส้นทางที่โนตที่ 2 ส่งไปยังโนตที่ 3 ซึ่งอาจเกิดการชนกันของข้อมูล ดังนั้นอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลระหว่างคู่โนตที่ 2 และโนตที่ 3 ทั้งนี้ลำคลื่นจากโนตที่ 1 ยังเป็นสัญญาณแทรกสอดของคู่การสื่อสารนี้และถือว่าเป็นโนตซ่อนเร้น นอกจากนี้ปัญหาดังกล่าวยังมี ปัญหาจากโนตข้างเคียงที่เกิดขึ้นในเครือข่ายไร้สาย ขณะที่โนตก่อลำคลื่นดังรูปที่ 2.8 โนตที่ 3 ก่อลำคลื่นเพื่อส่งข้อมูลไปยังโนตที่ 4 ในขณะเดียวกันโนตที่ 2 ต้องการส่งข้อมูลไปยังโนตที่ 1 ด้วยการส่งเฟรม RST ไปยังโนตที่ 1 เมื่อโนตที่ 1 ได้รับเฟรม RTS แล้ว โนตที่ 1 จะตอบกลับโนตที่ 2 และตอบกลับโนตโดยรอบด้วยเฟรม CTS ช่วงเวลาที่โนตที่ 3 ก่อลำคลื่นนั้น โนตที่ 3 จะไม่สามารถ

รับเฟรม CTS ได้ เพราะทิศทางของลำคลื่นชี้ไปยังโนดที่ 4 และอยู่ในช่วงของการส่งข้อมูล เมื่อโนดที่ 3 ส่งข้อมูลเสร็จสิ้นก่อนการส่งข้อมูลของโนดที่ 1 และโนดที่ 2 แล้ว โหนดที่ 3 ที่มีข้อมูลที่ต้องส่งมายังโนดที่ 1 จะส่งเฟรม RTS ดังนั้น เฟรมที่โนดที่ 3 ส่งไปจะกลายเป็นสัญญาณรบกวนต่อการสื่อสารของโนดที่ 1 และโนดที่ 2



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างปัญหาโนดซ่อนเร้นจากโนดข้างเคียง

2.3.3 ขั้นตอนการส่งข้อมูล

เป้าหมายของการส่งข้อมูลคือ การส่งเฟรม DATA ให้ได้อย่างถูกต้อง การส่งเฟรมดังกล่าวมีการใช้งานทิศทางของลำคลื่นเพื่อให้ได้ประโยชน์ที่สูงที่สุด ทิศทางที่ใช้งานจะสัมพันธ์กับแบบรูปการแผ่พลังงานในทางใดทางหนึ่ง ปกติแล้วการส่งเฟรม DATA มักใช้งานสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ให้อัตราขยายสูงที่สุด ดังนั้นการใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางจึงเหมาะสม เนื่องจากมีอัตราขยายที่สูงและมีคุณสมบัติการใช้ซ้ำเชิงพื้นที่ สำหรับการส่งเฟรม RTS และเฟรม CTS สามารถใช้หลากหลายรูปแบบการส่งตามแบบรูปการแผ่พลังงาน เพราะปริมาณข้อมูลและความสำคัญของข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.11 กำหนดการใช้เฟรม RTS ในการส่งและการรับด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ซึ่งเป็นการส่งและการรับเฟรมในทุกมุมตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา ดังนั้น จึงช่วยลดปัญหาการไม่รับรู้ของโนดและลดปัญหาโนดซ่อนเร้น ซึ่งโนดต้นทางไม่จำเป็นต้องรู้ข้อมูลสำหรับการก่อลำคลื่น เนื่องจากการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง อย่างไรก็ตาม การใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางเป็นการลดการใช้ซ้ำเชิงพื้นที่ ดังนั้น แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางจึงส่งผลให้ความจุของเครือข่ายลดลง

ตรงกันข้ามกับการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่มีส่วนช่วยในการใช้งานซ้ำในเชิงพื้นที่ที่มากกว่า

การสื่อสารเริ่มต้นด้วยการก่อลำคลื่น ซึ่งโนดภาคส่งจำเป็นต้องรู้ข้อมูลพื้นฐานในการใช้ก่อลำคลื่น เช่น ข้อมูลตำแหน่งและข้อมูลทิศทาง ซึ่งการจองช่องสัญญาณยังทำให้เกิดปัญหาการไม่รับรู้ของโนดและโนดซ้อนเร้นดังที่กล่าวไปข้างต้น ในหลายงานวิจัยได้ศึกษาและพบว่า การส่งเฟรม RTS และเฟรม CTS ด้วยสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางดีต่อเครือข่ายไร้สายมากกว่าการใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ปกติแล้วสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางทำงานได้ในบางความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) สำหรับความกว้างของลำคลื่นที่มีมุมที่กว้างจะทำให้ประสิทธิภาพของค่าวิสัยสามารถลดลงจากผลกระทบของปัญหาการไม่รับรู้ของโนด สิ่งที่เกิดขึ้นถือเป็นการแลกเปลี่ยนข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบจากผลกระทบที่เกิดขึ้นในการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งสองแบบ ดังนั้น เพื่อควบคุมการแลกเปลี่ยนข้อมูลพื้นฐานระหว่างเฟรม RTS และเฟรม CTS ทั้ง การใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางและแบบรอบทิศทาง จึงมีงานวิจัยออกแบบโปรโตคอล ในการจองช่องสัญญาณแบบหลายทิศทาง โดยการใช้งานโปรโตคอลกับสายอากาศที่สามารถสลับใช้งานกับสายอากาศอื่นเพื่อควบคุมการส่งเฟรมข้อมูลได้ตลอดเวลา เพื่อป้องกันปัญหาการชนกันของข้อมูลและลดปัญหาการไม่รับรู้ของโนด โปรโตคอลจะพิจารณาว่าทิศทางที่มีการส่งข้อมูลไปนั้นช่องสัญญาณอยู่ในสถานะใด หากช่องสัญญาณอยู่ในสถานะไม่ว่าง พื้นที่บริเวณนั้นจะถูกมองข้ามการส่งเฟรม RTS และเฟรม CTS ไป ดังนั้น การส่งสัญญาณของพื้นที่อื่นจะไม่ถูกปิดและสามารถใช้งานได้ ซึ่งโปรโตคอลยังสามารถส่งเฟรม RTS และเฟรม CTS พร้อมกันได้ โดยใช้สายอากาศแถวลำดับมารองรับการใช้งานดังกล่าว

2.3.4 กลไกการทำงานสำหรับการสื่อสารระหว่างโนด

VCS เป็นหนึ่งในกลไกที่ใช้ป้องกันปัญหาโนดซ้อนเร้น ซึ่งกลไกนี้ถูกนำไปใช้ในโปรโตคอลซีเอสเอ็มเอ/ซีเอ กลไกการทำงานประกอบด้วย การปรับปรุงข้อมูลใน NAV ของโนด ข้อมูลใน NAV ประกอบไปด้วยระยะเวลาของการใช้ช่องสัญญาณโดยประมาณ ปกติแล้ว NAV จะถูกใช้เมื่อการปรับปรุงข้อมูลใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ในกรณีการปรับปรุงข้อมูลใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางเราจะเรียกการปรับปรุงนั้นว่า DNAV ซึ่งจะต่างจาก NAV ในด้านของข้อมูลที่มี นอกจากข้อมูลระยะเวลาของการใช้งานช่องสัญญาณแล้ว DNAV ยังมีข้อมูลทิศทางและข้อมูลระยะทางอีกด้วย การมีข้อมูลดังกล่าวทำให้โนดถูกปิดการส่งข้อมูลในบางทิศทาง ดังนั้น กระบวนการนี้จึงส่งผลกระทบต่อปัญหาโนดซ้อนเร้นลดลงและเพิ่มการใช้งานเชิงพื้นที่มากขึ้น เราเรียกกระบวนการนี้ว่า DVCS

โนดที่ไม่ได้ใช้งานเราเรียกว่าโนดอยู่ในสถานะว่าง ในสถานะนี้โนดจะใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางเพื่อรอรับสัญญาณที่เข้ามา ซึ่งมีการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงาน

แบบมีทิศทางในสถานะนี้ด้วย การทำงานของโนตใช้การรอรับสัญญาณและจะทำงานในลักษณะหมุนไปที่ละมุม เมื่อโนตเจอสัญญาณจะหยุดการหมุนสายอากาศและเริ่มต้นรับสัญญาณ การทำงานลักษณะนี้ภาคส่งต้องรับรู้ข้อมูลการหมุนสายอากาศของภาครับด้วยการใช้โทนเสียงที่มีความยาวคลื่นพอที่จะตรวจรับมุมกวาดของสายอากาศ ซึ่งเป็นการลดปัญหาโนตซ้อนเร้น แต่วิธีนี้เป็นการเพิ่มระยะเวลาในการรับสัญญาณจากโนตอื่น

2.3.5 โพรโตคอลที่เกี่ยวข้องกับแบบรูปการแผ่พลังงาน

โพรโตคอล DMAC เป็นโพรโตคอลที่ทำให้โนตรับรู้ถึงโนตข้างเคียงและโนตสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลพื้นฐานเพื่อสื่อสารกันได้ การทำงานของ DMAC ขึ้นอยู่กับกลไกการแลกเปลี่ยนข้อมูลขั้นพื้นฐานดังนี้ โดยโนตจะตรวจสอบช่องสัญญาณว่าอยู่ในสถานะว่างหรือไม่ว่างด้วยตาราง DNAV เพื่อตรวจเช็คข้อมูลทิศทางของการส่งสัญญาณอย่างต่อเนื่องและเพื่อตรวจสอบระยะเวลาให้สอดคล้องกัน การจองช่องสัญญาณจะทำได้ด้วยการส่งเฟรม RTS และรับเฟรม CTS ตามด้วยขั้นตอนของการติดต่อสื่อสารรวมถึงการจบการสื่อสารด้วยการรับเฟรม ACK ซึ่งการใช้งานนี้จะเกิดเป็นโนตซ้อนเร้นขึ้น

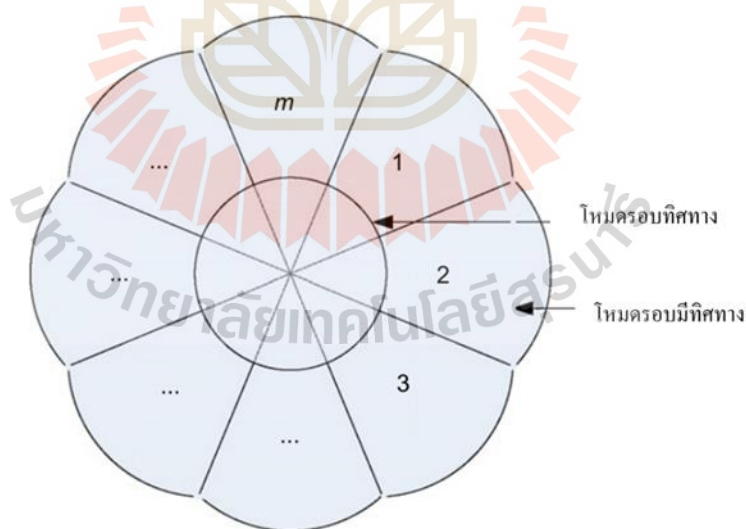
ประโยชน์ของ DMAC คือ การใช้โพรโตคอลควบคุมสายอากาศแบบมีทิศทาง ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าการควบคุมสายอากาศแบบรอบทิศทาง เช่น เพิ่มระยะทางสูงสุดในการสื่อสาร การแทรกสอดจากเครือข่ายไร้สายอื่นน้อยลง สามารถใช้งานในเชิงพื้นที่ได้มากขึ้น ค่าวิสัยสามารถเพิ่มขึ้น ความหน่วงที่ลดลง เป็นต้น ในการส่งข้อมูลด้วยสายอากาศแบบมีทิศทางด้วยพลังงานที่เท่ากันกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง สายอากาศแบบมีทิศทางจะส่งข้อมูลไปยังโนตได้ไกลกว่า เพราะความกว้างของลำคลื่นแคบทำให้พลังงานถูกรวมไปยังทิศทางเป้าหมาย ซึ่งสายอากาศแบบมีทิศทางยังช่วยลดการชนกันของสัญญาณที่เกิดขึ้นในเครือข่ายไร้สายได้อีกด้วย (Huang, Zhuochuan, et al., 2002)

โดยทั่วไปการทำงานของเฟรม RTS และเฟรม CTS คล้ายกับโพรโตคอลมาตรฐานเป็นอย่างมาก แต่การแลกเปลี่ยนเฟรมของโนตสามารถใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง สลับกับการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางได้ การทำงานแบบนี้จะเรียกชื่อเฟรมตามแบบรูปการแผ่พลังงานว่าเฟรม ORTS และเฟรม OCTS สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง และเฟรม DRTS และเฟรม DCTS สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง ดังนั้นโพรโตคอลนี้จึงช่วยให้การส่งสัญญาณมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและเป็นโพรโตคอลที่มีการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานสองแบบในการส่งข้อมูล

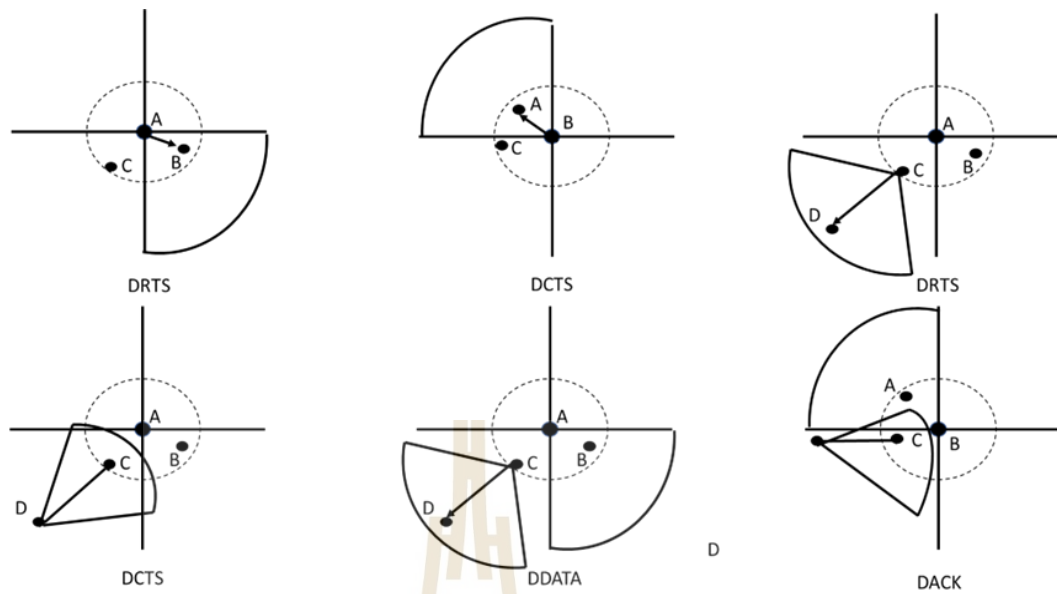
โพรโตคอล DMAC แบบช่วงชิงช่องสัญญาณเดี่ยวคือ โพรโตคอลที่ทำงานบนพื้นฐานของ DMAC โพรโตคอลนี้จำเป็นต้องใช้สายอากาศจำนวนมาก เงื่อนไขของการใช้งานคือ สถานีต้องเปิดและปิดสายอากาศเพื่อจองช่องสัญญาณได้ตลอดเวลา สถานีจะใช้งานสายอากาศต้นเดียวหรือ

จำนวนสายอากาศหลายต้นในการจองช่องสัญญาณก็ได้ การทำงานจะเริ่มต้นเมื่อตัวจับเวลาถูกนับเหลือศูนย์ ช่องสัญญาณจะถือว่าโนดอยู่ในสถานะว่าง ดังนั้นโนดจะสามารถส่งเฟรม DATA ด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางไปยังโนดเป้าหมายทำให้การใช้งานเฟรม RTS และเฟรม CTS เป็นไปอย่างยืดหยุ่น เมื่อการส่งข้อมูลเสร็จสิ้นสถานีจึงส่งเฟรม ACK ด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางเพื่อจบการทำงาน การใช้งานเฟรมลักษณะนี้เฟรม DATA และเฟรม ACK จะถูกเรียกว่าเฟรม DDATA และเฟรม DACK เพื่อบ่งบอกถึงประเภทของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ใช้

โปรโตคอล CDR-MAC เป็นโปรโตคอลที่สนับสนุนการค้นหาโนดข้างเคียงในระยะห่างจากโนด 1 เมตร การค้นหาโนดข้างเคียงเป็นการใช้ลักษณะแบบวงกลมรอบตัว ทั้งนี้สายอากาศที่โนดจะถูกปรับแต่งไว้แล้ว (กำหนดค่าตั้งต้น) ดังรูปที่ 2.9 หลังจากโนดได้รับเฟรม RTS โนดปลายทางจะส่งเฟรม CTS ไปรอบทิศทางของตัวเองเพื่อบอกโนดโดยรอบให้รับรู้ถึงการใช้ช่องสัญญาณ หลังจากนั้นโนดจึงจะส่งเฟรม DATA และเฟรม ACK ตามลำดับ ทั้งนี้ผู้รับจะได้รับการปรับปรุงข้อมูลตลอดเวลาเมื่อได้รับเฟรมข้อมูลพื้นฐาน (Korakis, Thanasis, Gentian Jakllari, and Leandros Tassiulas, 2007) ถึงแม้ว่าโปรโตคอลนี้จะมีประโยชน์ด้านการรับรู้ที่ดีขึ้น แต่การใช้งานโปรโตคอลดังกล่าวยังคงตามมาด้วยเงื่อนไขที่ซับซ้อน เช่น สายอากาศจะต้องเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางเท่านั้น

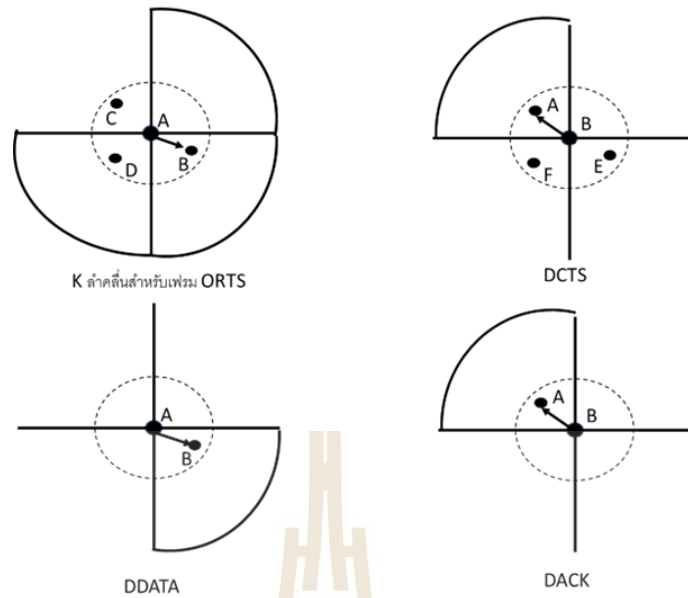


รูปที่ 2.9 การทำงานของ Circular Directional RTS MAC (CDR-MAC) อ้างอิงจาก Korakis, Thanasis, Gentian Jakllari, and Leandros Tassiulas. "CDR-MAC: A protocol for full exploitation of directional antennas in ad hoc wireless networks." IEEE Transactions on Mobile Computing 7.2 (2007): 145-155



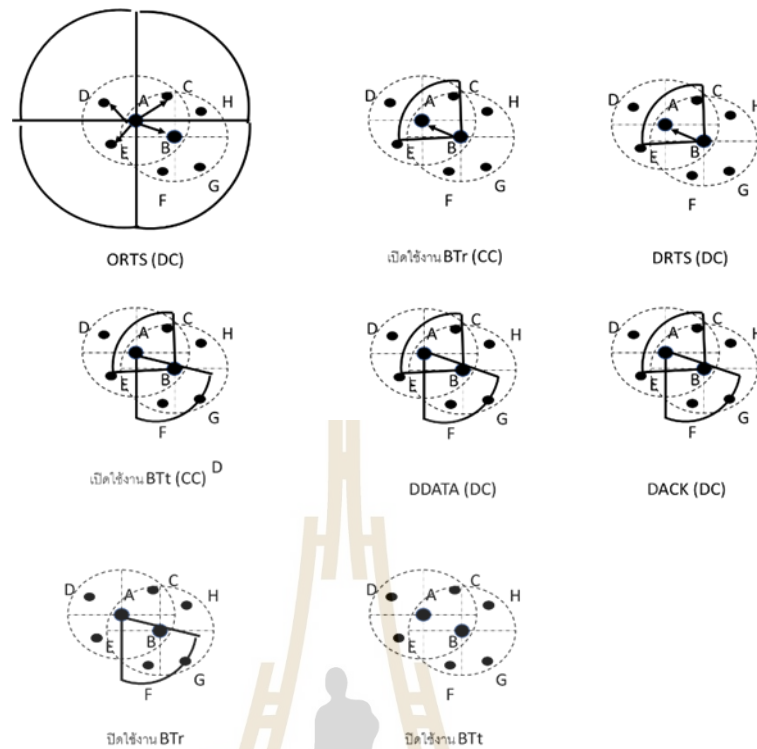
รูปที่ 2.10 การทำงานของโปรโตคอล BIBD

โปรโตคอล BIBD เป็นโปรโตคอลที่ใช้เฟรม ORTS และเฟรม DCTS ดังรูปที่ 2.10 โหนด A ส่งเฟรม ORTS เพื่อร้องขอการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ซึ่งใช้สายอากาศที่สามารถสร้างลำคลื่นได้จำนวน k ลำคลื่น หลังจากทีโหนด B ด้รับการร้องขอเข้าใช้ช่องสัญญาณจากทิศทางของโหนด A แล้ว โหนด B จะตอบกลับโหนด A ด้วยเฟรม DCTS โดยใช้กำลังงานสูงสุดของโหนดเพื่อส่งเฟรม เมื่อการแลกเปลี่ยนเฟรมเพื่อฐานเสร็จสิ้นโหนด A จะส่งเฟรม DDATA ไปยังโหนด B และรอรับเฟรม DACK เพื่อเสร็จสิ้นกระบวนการส่ง จากกระบวนการทั้งหมดนี้ทำให้ปัญหาการไม่รู้ตัวของโหนดลดลง (Shen, Jian, Sangman Moh, and Ilyong Chung, 2012) ข้อแตกต่างที่สำคัญของโปรโตคอล BIBD กับโปรโตคอลอื่นคือ โปรโตคอล BIBD สามารถปรับขนาดของการสื่อสารลงได้ โดยการเพิ่มจำนวนการสื่อสารที่สามารถส่งพร้อมกันสูงสุด ซึ่งยังสามารถแบ่งปันความกว้างแถบความถี่กันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น จึงไม่มีการหน่วงเวลาเพิ่มเติมต่อเครือข่ายไร้สาย อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขของการใช้งานโปรโตคอลนี้คือ อุปกรณ์ต้องรองรับการทำงานทั้งในการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานและการแยกสัญญาณออกจากกันได้ แน่แน่นอนว่าจำเป็นต้องใช้ชุดอุปกรณ์ภาครับและชุดอุปกรณ์ภาคส่งคนละชุดอุปกรณ์กัน



รูปที่ 2.11 การทำงานของโปรโตคอล SYN-DMAC

โปรโตคอล SYN-DMAC เป็นโปรโตคอลที่ใช้งานเฟรม DCTS และเฟรม DCTS ซึ่งเป็นการช่วงชิงช่องสัญญาณเดียว โปรโตคอล SYN-DMAC (Wang, Jianfeng, Yuguang Fang, and Dapeng Wu, 2005) ตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่าอุปกรณ์หรือโหนดทุกโหนดติดตั้งจีพีเอส (GPS) ให้กับทุกโหนดในเครือข่าย ในรูปที่ 2.11 เมื่อโหนด A ส่งเฟรม DCTS ไปยังโหนด B เพื่อขอเข้าใช้ช่องสัญญาณ โดยไม่มีกระบวนการ DNAV เนื่องจากมีจีพีเอสเพื่อระบุตำแหน่งอยู่แล้ว หลังจากนั้นโหนด B จะตอบกลับด้วยเฟรม DCTS เพื่อแจ้งว่าช่องสัญญาณอยู่ในสถานะว่างอยู่ด้วยการสร้างล้อคลื่นที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง ในขณะเดียวกันโหนด C จะส่งเฟรม DCTS ไปยังโหนด D หลังจากโหนด D ได้รับเฟรม DCTS แล้วโหนด D จะส่งเฟรม DCTS เพื่อตอบกลับโหนด C ในช่วงเวลาที่มีการแลกเปลี่ยนเฟรมเสร็จสิ้น ทั้งสองคู่การสื่อสารจะส่งเฟรม DDATA และจบการสื่อสารด้วยเฟรม DACK ซึ่งจะเห็นได้ว่าถึงแม้การสื่อสารในเครือข่ายเดียวกันสามารถใช้งานแบบควบคู่กันได้ ถึงแม้ว่าพูลังของล้อคลื่นจะชี้ไปยังคู่การสื่อสารอื่นบ้างก็ตาม แต่การสื่อสารยังสามารถทำงานได้



รูปที่ 2.12 การทำงานของโปรโตคอล DBTMA/DA

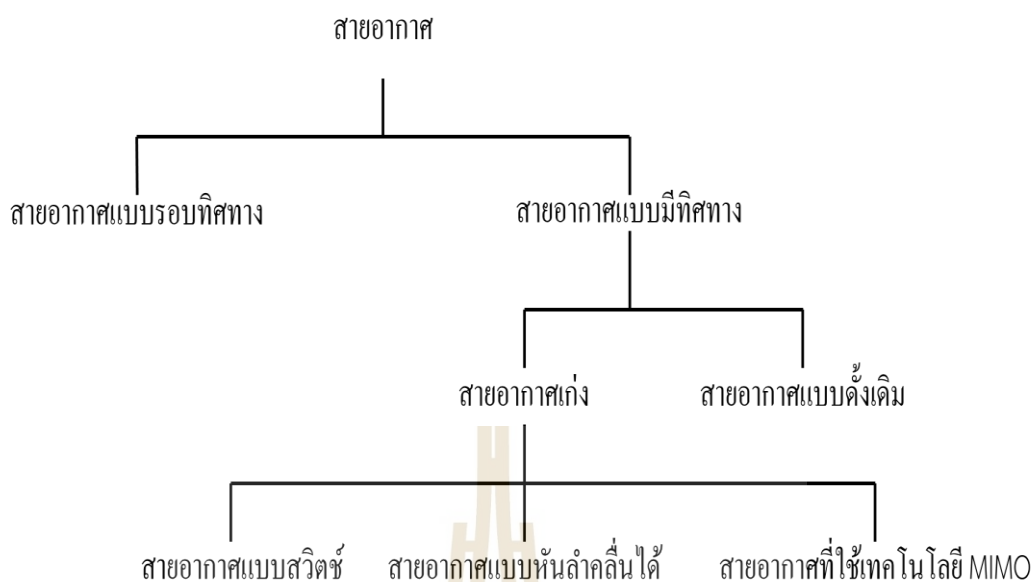
โปรโตคอล DBTMA/DA เป็นโปรโตคอลที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สาย (Huang, Zhuochuan, et al, 2002) วิธีการเข้าถึงเครือข่ายไร้สายของโปรโตคอลนี้ใช้เฟรม ORTS และเฟรม DCTS โดยใช้ช่องสัญญาณ 2 ช่องสัญญาณพร้อมกัน โปรโตคอลประกอบด้วยช่องสัญญาณที่ควบคุมข้อมูล (DC) และช่องสัญญาณที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนพื้นฐาน (CC) เฟรมสำหรับช่องสัญญาณข้อมูลใช้เฟรม ORTS เฟรม DCTS เฟรม DDATA และเฟรม DACK ในขณะที่การควบคุมช่องสัญญาณโหนดจะควบคุมการส่งสัญญาณกับโหนดอื่น โปรโตคอลใช้การส่งสัญญาณเสียงเพื่อบอกสถานะของช่องสัญญาณในกรณีไม่ว่างจำนวน 2 เฟรมคือ เฟรม BTt และเฟรม Btr ทั้งสองสัญญาณนี้จะถูกส่งเมื่อมีการสื่อสารเกิดขึ้น โหนดทั้งหมดโดยรอบจะสามารถรับรู้ถึงช่องสัญญาณที่ไม่ว่างได้ โปรโตคอล DBTMA/DA ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ทุกโหนดมีสายอากาศจำนวนสี่ต้น เมื่อโหนด A มีเฟรม DDATA ที่ต้องการส่งไปยังโหนดปลายทางดังรูปที่ 2.12 โหนด A จะตรวจจับช่องสัญญาณเพื่อรับเฟรม BTr โดยโหนด A จะทำให้แน่ใจว่าโหนด B ยังไม่ได้รับเฟรมอื่นอยู่ เมื่อตรวจสอบแล้วว่าโหนด B อยู่ในสถานะว่างอยู่ โหนด A จะส่งเฟรม ORTS ไปยังโหนด B เพื่อขอเข้าใช้ช่องสัญญาณข้อมูลและรอรับเฟรมสัญญาณเสียง BTr หลังจากนั้นโหนด B จะส่งเฟรม DRTS ไปยังโหนด

A ในระหว่างนั้นโนต B จะส่งเฟรมสัญญาณ BTt ไปรอบตัวเองเพื่อป้องกันสัญญาณแทรกสอดและโนต A จะเริ่มการส่งเฟรมข้อมูล DDATA ในเวลาเดียวกันโนต A จะปิดการรับเฟรม BTt และเฟรม BTr

โปรโตคอล RDMAC ประกอบไปด้วย 2 ช่วงเวลาคือ ช่วงเวลาจองช่องสัญญาณและช่วงเวลาส่งข้อมูล ช่วงเวลาจองช่องสัญญาณมี 2 การทำงานคือ การวัดระยะและการหันลำคลื่น การสื่อสารเริ่มต้นเมื่อโนตส่งเฟรม RTS และเฟรม CTS โดยใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง หลังจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงการทำงานของ การวัดระยะและการวัดทิศทางของลำคลื่น ในระยะนี้โนตจะส่งเฟรม RTS เฟรม CTS เฟรม DATA และเฟรม ACK โดยใช้สายอากาศแบบมีทิศทาง ลักษณะการทำงานของโปรโตคอล RDMAC จะคล้ายกับโปรโตคอล DMAC โดยแต่ละโนตจะใช้ตาราง DNAV ในการตรวจสอบช่องสัญญาณทำให้วิธีนี้มีขั้นตอนในการจองช่องสัญญาณและลดการรบกวนกันระหว่างโนต

โปรโตคอล MCDA กำหนดให้แต่ละโนตมีสายอากาศต้นเดียว ซึ่งโปรโตคอล MCDA สามารถสลับระหว่างการควบคุมข้อมูลและการควบคุมช่องสัญญาณ ดังนั้นจะไม่มีสถานการณ์ของการรับข้อมูลเกิดขึ้นจากสถานการณ์ที่ไม่สามารถได้รับข้อมูลจากโนตได้ โปรโตคอล MACD จึงมีกลไก CSS เปิดใช้งานสลับกันระหว่างการใช้งานช่องสัญญาณ โดยการใช้การแลกเปลี่ยนเฟรมพื้นฐาน RTS/CTS/DATA/ACK ซึ่งแตกต่างจากโปรโตคอล MAC เดิม โปรโตคอล MCDA มีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรกคือ การจองช่องสัญญาณ ขั้นตอนที่สองคือ การสื่อสาร ขั้นตอนที่สามคือ การบล็อกการทำงาน ขั้นตอนแรกโนตต้นทางและโนตปลายทางจะแลกเปลี่ยนเฟรม RTS และเฟรม CTS ในช่วงการควบคุมข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาโนตอ่อนเร็น หากแลกเปลี่ยนเฟรมพื้นฐานกันสำเร็จแล้ว โนตจึงสามารถแลกเปลี่ยนเฟรม DATA/ACK กันต่อไปได้ในช่วงของการสื่อสาร ขั้นตอนที่สามคือ เมื่อจำนวนโนตเกินขีดจำกัดในการติดต่อสื่อสารหรือยังมีการใช้งานช่องสัญญาณอยู่ โนตอื่นที่ต้องการเข้าใช้งานจะถูกบล็อกการเข้าถึงจนกว่าช่องสัญญาณจะว่าง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารไร้สาย

โปรโตคอล MARS เป็นโปรโตคอลที่จะเปลี่ยนเฟรม RTS เป็นเฟรม RTRT ซึ่งอยู่ที่โนตต้นทางและโนตปลายทาง โนตต้นทางส่งเฟรม RTRT เมื่อมีข้อมูลที่ต้องการจะส่ง เฟรม RTRT มีข้อมูลที่อยู่ที่ผู้ส่งอยู่ ซึ่งจะส่งให้กับโนตกลางทำให้โนตกลางสามารถปรับสายอากาศไปตามทิศทางของผู้ส่งได้ อย่างไรก็ตาม หากโนตข้างเคียงไม่มีข้อมูลที่จะส่ง โนตข้างเคียงจะถูกกำหนดขนาดการส่งของข้อมูลเป็นศูนย์ เมื่อมีการรับเฟรม RTS โนตกลางจะปรับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไปยังผู้ส่ง จากนั้นโนตกลางจะส่งเฟรม CTS ไปยังทิศทางที่ถูกกำหนดรวมถึงเฟรม DATA และเฟรม ACK วิธีนี้จะช่วยลดการรบกวนการส่งข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบกับ การส่งตามมาตรฐาน IEEE 802.11



รูปที่ 2.13 ประเภทของสายอากาศ

2.4 สายอากาศ

การพัฒนาเครือข่ายไร้สายจำเป็นต้องมุ่งเน้นไปที่พื้นฐานสำคัญของการสื่อสาร พื้นฐานของการติดต่อสื่อสารกันคือ สายอากาศ หน้าที่หลักของสายอากาศคือ การรับและการส่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งแน่นอนว่าสายอากาศมีหลายประเภท เช่น สายอากาศไอโซโทรปิกที่จะแผ่พลังงานอย่างเท่าเทียมกันออกมาทุกด้าน โดยทั่วไปสายอากาศไอโซโทรปิกจะถูกนำไปใช้อ้างอิง เนื่องจากเป็นสายอากาศในอุดมคติที่ไม่มีอยู่จริง ในทางปฏิบัติสายอากาศที่ใกล้เคียงสายอากาศในอุดมคติที่สุดคือ สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ซึ่งราคาถูกและสร้างได้ง่าย ในทางกลับกันสายอากาศที่แผ่พลังงานด้วยการเน้นไปยังทิศทางใดทิศทางหนึ่งกลับส่งผลให้พลังงานในทิศทางเฉพาะดีกว่าแบบอุดมคติ โดยเรียกว่าสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง สามารถจำแนกประเภทของสายอากาศได้ดังรูปที่ 2.13 ปกติแล้วลักษณะการส่งและการรับของสายอากาศ คือ การติดต่อกันด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นการแผ่พลังงานและรับพลังงานที่แผ่ออกมา อย่างไรก็ตามลักษณะสำคัญที่มักจะต่างกันคือ ขนาดของอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งวัดด้วยหน่วย dBi เทียบกับสายอากาศไอโซโทรปิก

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเป็นค่าที่บ่งบอกถึงขนาดอัตราขยาย ซึ่งแปรผันกับกำลังงานที่สามารถรับได้ แบบรูปการแผ่พลังงานประกอบไปด้วยพูหลัก พูข้าง และพูหลัง พูหลักคือทิศทางของลำคลื่นที่มีอัตราขยายสูงที่สุด ในทางกลับกันบริเวณไหนที่มีการแผ่พลังงานน้อยหรือไม่มี การแผ่พลังงานเราเรียกว่าจุดศูนย์ (Null) ซึ่งมีพลังงานในทิศทางนั้นต่ำ ลักษณะที่น่าสนใจอีกอย่าง

ของสายอากาศคือ ความกว้างของลำคลื่น เรามักใช้ค่าขีดแบ่ง (SINR) ในการแยกลำคลื่นที่ส่งออกจาก พุหลักและพुरुองด้วยคริ่งลำคลื่น

ความสัมพันธ์ของลักษณะเฉพาะของสายอากาศในด้านของกำลังงานอธิบายได้ โดยการ ใช้ สมการระหว่างกำลังและกำลังรับดังนี้

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{K r^\alpha} \quad (2.1)$$

โดยที่	P_r	คือ	กำลังรับ
	P_t	คือ	กำลังส่ง
	r	คือ	ระยะทางที่คลื่นถูกส่งมาจากภาคส่ง
	G_t	คือ	อัตราขยายภาคส่ง
	G_r	คือ	อัตราขยายภาครับ
	α	คือ	เลขชี้กำลังที่แสดงการสูญเสียพลังงานตามระยะทาง
	K	คือ	ค่าคงที่ในรูปแบบของความยาวคลื่น

2.4.1 สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง

สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางเป็นสายอากาศที่แผ่พลังงาน ออกไปรอบทิศทางของผู้ส่งและสามารถรับสัญญาณรอบตัวได้ โดยปกติแล้วสายอากาศประเภทนี้จะ เป็นสายอากาศที่ ออกแบบให้มีรูปร่างที่ไม่สามารถเปลี่ยนได้ งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปยัง การเพิ่มขีดความสามารถอัตราขยายของสายอากาศ เช่น การออกแบบสายอากาศที่มีแบบรูป การแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางที่ทำงานบนความถี่ 915 MHz (Duan, Zhu, and et al, 2020) แบบรูปการแผ่พลังงานที่ถูกออกแบบรองรับผู้ใช้งานเพียงคนเดียวในการติดต่อสื่อสารกันในเครือข่าย ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานครอบคลุมทุกมุมการทำงานตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา สายอากาศชนิดนี้ ไม่จำเป็นต้องใช้วิธีการควบคุมการทำงานที่ซับซ้อน เพราะเป็นอุปกรณ์ทำงานในลักษณะพาสซีฟ (Passive) การออกแบบสายอากาศลักษณะนี้จะต้องจำลอง ทดสอบอุปกรณ์ และวัดผลทดสอบ ทำให้ เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองจนกว่าจะได้ผลตามที่ต้องการ ซึ่งอัตราการขยายของสายอากาศ ประเภทนี้จะต่ำกว่าสายอากาศแบบมีทิศทาง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับเครือข่ายไร้สายที่มีขนาดเล็ก แต่ ข้อเสียของสายอากาศประเภทนี้ คือ อัตราขยายที่ต่ำและพื้นที่ทำงานที่เกินความจำเป็น สายอากาศ ประเภทนี้มักถูกนำไปใช้ในกรณีของการกระจายสัญญาณ ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดไปยัง เครือข่ายข้างเคียงได้มาก ทำให้เกิดปัญหาการไม่รับรู้ของโนด และทำให้เกิดความล่าช้าใน เครือข่ายไร้สาย เพราะโนดจำเป็นต้องรอให้การส่งข้อมูลในเครือข่ายเสร็จสิ้นก่อนแลกเปลี่ยนข้อมูล

พื้นฐานกับโนดหรือเครือข่ายอื่น สายอากาศที่มีลักษณะแบบนี้ได้แก่ สายอากาศที่มุ่งเน้นพัฒนา โพลาริซ (Cai, Xiuzhang, and Kamal Sarabandi, 2020) สายอากาศที่ใช้งานสองโพลาริซใน เครือข่ายไร้สาย และสายอากาศที่ใช้งานกับเทคโนโลยี 5G (Zhao, Lei, Zhao-Min Chen, and Jun Wang, 2019) อย่างไรก็ตามก็ยังมีสายอากาศที่แผ่พลังงานแบบรอบทิศทางที่เกิดจากการใช้โครงสร้าง ของสายอากาศแ่ง ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อของสายอากาศแ่ง

2.4.2 สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง

สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางได้ถูกนำมาใช้ในการชดเชย ด้านอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งเป็นข้อเสียของสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบ ทิศทาง ซึ่งรวมถึงการปรับปรุงและการพัฒนาเพื่อให้สายอากาศสามารถใช้งานในพื้นที่ที่ต้องการได้ มี การออกแบบสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางในช่วงของความถี่ UWB (Klemm, Maciej, et al, 2005) ข้อได้เปรียบที่เด่นชัดของสายอากาศนี้ คือ อัตราขยายที่มากกว่า 10 ดีบี (decibel: dB) ซึ่งถือว่าเป็นขนาดที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงาน แบบรอบทิศทาง ทั้งนี้ยังมีการออกแบบสายอากาศเพื่อสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง อีกมากมาย ซึ่งถูกนำไปใช้ในการทำงานที่ต่างกัน เช่น นำไปใช้งานในน้ำ (Emokpae, Lloyd E., and Mohamed Younis, 2012) ด้วยความหลากหลายที่สายอากาศแบบมีทิศทางสามารถใช้งานได้ ดังนั้นสายอากาศแบบมีทิศทางจึงถูกนิยมนำมาใช้เป็นอย่างมาก แต่ข้อเสียที่เห็นได้ชัดคือ การหมุนมุม ใช้งาน เมื่อต้องการนำสายอากาศประเภทนี้ไปใช้กับโปรโตคอลที่มีการใช้เฟรม DRTS DCTS DDATA DACK จำเป็นต้องใช้สายอากาศจำนวนหลายต้น ซึ่งต้องการความสามารถในการควบคุมแบบเปิดและ แบบปิดสายอากาศ ทำให้เป็นความซับซ้อนในเชิงการควบคุม ดังนั้น เมื่อจำเป็นต้องใช้งานสายอากาศ จำนวนมากขึ้นจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการใช้งานจึงสูง การใช้งานจึงมีการใช้โปรโตคอลเข้ามาช่วย สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางให้ทำงานได้มีประสิทธิภาพ ให้ควบคุมทิศทางของ สายอากาศได้

2.4.3 สายอากาศที่ใช้เทคโนโลยีแบบ MIMO

เทคโนโลยี MIMO เป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับสายอากาศแ่ง ซึ่งสายอากาศสามารถ ปรับแบบรูปการแผ่พลังงานได้ เพราะต้องการเอาชนะขีดจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ในเมืองที่มี การกระเจิงของสัญญาณเกิดขึ้นสูง ดังนั้นจึงมีการใช้การมัลติเพล็กซ์เชิงพื้นที่ (Spatial Multiplexing) การทำงานจะเกิดขึ้นเมื่อข้อมูลถูกส่งออกไปอย่างอิสระไปยังสายอากาศแต่ละต้นด้วยกำลังงานที่ เท่ากัน เช่น สายอากาศต้นที่ 1 ส่งข้อมูลชุดแรก สายอากาศต้นที่ 2 ส่งข้อมูลชุดแรกเช่นกัน เมื่อข้อมูล ไปถึงปลายทางในเวลาที่แตกต่างกัน ภาครับจะทำการรวมข้อมูลเหล่านั้นเข้าด้วยกัน ซึ่งการรวมและแยก ความแตกต่างทางเฟสหรือเวลาทำได้ด้วยการใช้ DSP ดังนั้นยังมีเส้นทางการสูญเสียที่มากขึ้น การ ทำงานของสายอากาศที่ใช้เทคโนโลยี MIMO ก็จะได้สัญญาณที่ดีขึ้น

2.4.4 สายอากาศแก่ง

สายอากาศแก่งมักใช้การก่อลำคลื่นเพื่อรับรู้อำนาจตำแหน่งโนดข้างเคียง สายอากาศที่นำมาใช้คือ สายอากาศประเภทแฉลวดลำดับ สายอากาศแฉลวดลำดับประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานชนิดเดียวกัน เช่น สายอากาศไดโพล (Dipole) การจัดเรียงตัวมักจะใช้การจัดเรียงตัวที่มีอยู่ในรูปแบบเรขาคณิตเพื่ออำนวยความสะดวก ในแต่ละองค์ประกอบมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านที่แตกต่างกันเพื่อให้เฟส (Phase) ไม่ต่างกัน การปรับเฟสเป็นการถ่วงน้ำหนักเพื่อสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานชี้ทิศทางไปยังทิศทางที่ต้องการ ระหว่างองค์ประกอบจะถูกออกแบบให้เหมาะสมกับทิศทางที่ต้องการ ซึ่งขึ้นกับฟังก์ชันของความยาวคลื่น ดังนั้นส่วนใหญ่แล้วขนาดของสายอากาศแฉลวดลำดับมักจะแปรผันตามความยาวคลื่นที่ถูกนำไปใช้งาน ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานโดยรวมจะพิจารณาจากจำนวนองค์ประกอบ ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ รูปร่างในการจัดเรียงองค์ประกอบ แอมพลิจูด (Amplitude) และเฟสที่ใช้ในแต่ละองค์ประกอบ

สายอากาศแฉลวดลำดับสามารถรองรับการทำงานได้ในหลายความถี่ ข้อได้เปรียบของสายอากาศแฉลวดลำดับคือ สามารถควบคุมทิศทางแบบรูปการแผ่พลังงานได้ (Xi, Baoliang, et al, 2020) ทำให้สามารถนำสายอากาศแฉลวดลำดับมาใช้ในการรองรับผู้ใช้งานในเครือข่ายให้ได้มากขึ้น สายอากาศแฉลวดลำดับใช้งานควบคู่กับเทคนิคการเข้าถึงเครือข่ายไร้สาย ข้อดีของสายอากาศประเภทนี้คือ อัตราขยายของสายอากาศที่เกิดจากแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นสูงมาก ดังที่กล่าวไปข้างต้น อัตราขยายที่ได้สูงกว่าสายอากาศแบบดั้งเดิมและสามารถใช้งานร่วมกับเทคโนโลยี MIMO ดังนั้นจึงทำให้หนึ่งความถี่รองรับผู้ใช้งานได้หลายผู้ใช้งาน เพื่ออธิบายการทำงานของสายอากาศแฉลวดลำดับผู้วิจัยจำเป็นต้องกล่าวถึงระนาบของคลื่น โดยปกติฮาร์โมนิก (Harmonic) ของสัญญาณจะถูกเขียนให้อยู่ในรูปของสมการในเชิงมุมดังนี้

$$f(t) = A \cos(\omega t) = A \operatorname{Re}\{e^{j\omega t}\} \quad (2.2)$$

โดยที่	$f(t)$	คือ	ฟังก์ชันของสัญญาณ
	A	คือ	แอมพลิจูด
	ω	คือ	ความเร็วเชิงมุม
	t	คือ	เวลา
	Re	คือ	จำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน

ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการการแพร่กระจายของสัญญาณได้ดังนี้

$$f'(t) = A' \cos\left(\omega t \pm \frac{2\pi}{\lambda} r\right) = A' \Re\{e^{j\omega t \pm kr}\} \quad (2.3)$$

โดยที่ $f'(t)$ คือ ฟังก์ชันการแพร่กระจายของสัญญาณ
 A' คือ แอมพลิจูดของสัญญาณ
 r คือ ระยะทางของการแพร่กระจายคลื่น
 k คือ เลขคลื่น
 λ คือ ความยาวคลื่น

เราสามารถเขียนเฟสของสัญญาณได้ดังสมการต่อไปนี้

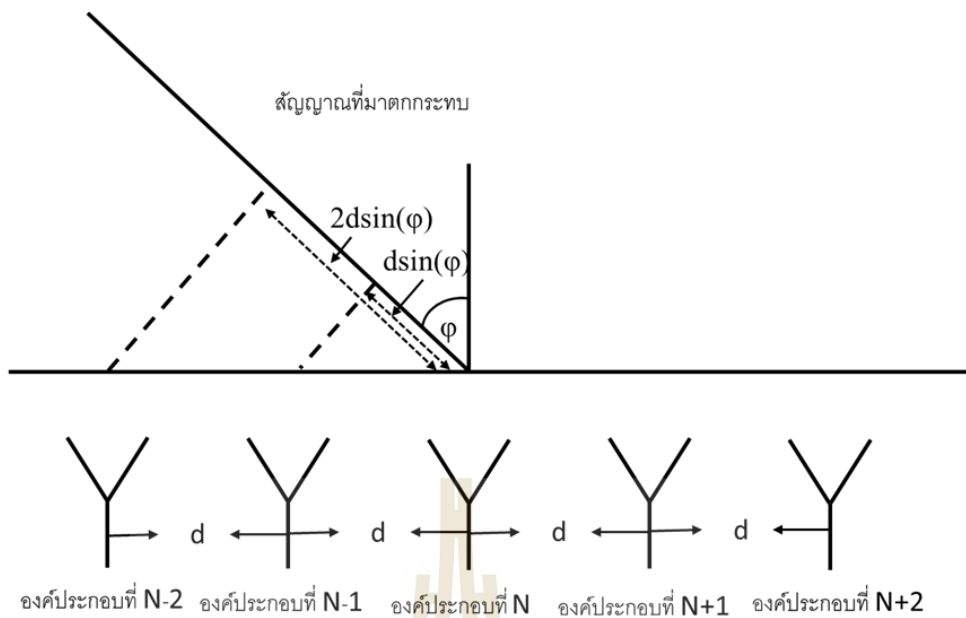
$$\varphi'(t) = \omega t \pm kr \quad (2.4)$$

โดยที่ $\varphi'(t)$ คือ ฟังก์ชันเฟสของสัญญาณ

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นได้รับการศึกษาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1982 (Rudge, A. W., and Milne, 1982) สายอากาศจะมีองค์ประกอบที่วางระยะห่างเท่ากันตามเส้นตรงจำนวน N องค์ประกอบ แต่ละองค์ประกอบจะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า ระนาบคลื่นที่ผ่านจะกระทบกับองค์ประกอบ N องค์ประกอบ จากรูปที่ 2.14 ระนาบคลื่นที่มาจากกระทบบองค์ประกอบที่ $N-1$ จะต้องเดินทางมาเป็นระยะ $d \sin(\varphi)$ ในทำนองเดียวกันที่องค์ประกอบที่ $N-2$ คลื่นที่มาตกกระทบบจะต้องเดินทางมาเท่ากับระยะ $2d \sin(\varphi)$ เมื่อเรากำหนดให้เฟสที่องค์ประกอบ N คือ ศูนย์ ความต่างเฟสในแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับสมการที่ 2.5

$$\varphi_i = k_0(N - i)d \sin(\varphi) \quad (2.5)$$

โดยที่ φ_i คือ มุมเฟสที่องค์ประกอบของสายอากาศ
 φ คือ มุมเฟสที่มุมใด ๆ
 k_0 คือ เลขคลื่นในอากาศว่าง
 d คือ ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ
 i คือ ลำดับขององค์ประกอบตั้งแต่ 1 ถึง N



รูปที่ 2.14 องค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ

สัญญาณที่รับได้จะเดินทางผ่านตัวกลางที่เชื่อมต่อกับองค์ประกอบ เช่น สายส่งและเซอร์คูเลเตอร์ (Circulator) สัญญาณเชิงซ้อนที่ได้รับจากแต่ละองค์ประกอบและผ่านสายส่งมาแล้วสามารถเขียนได้เป็นดังสมการที่ 2.6

$$f_i(\varphi) = f_e(\varphi) a_i e^{jk_0(N-i)d\sin(\varphi)} \quad (2.6)$$

โดยที่ $f_i(\varphi)$ คือ ฟังก์ชันการแผ่พลังงาน
 $f_e(\varphi)$ คือ ฟังก์ชันการแผ่พลังงานในรูปเชิงซ้อน
 a_i คือ แอมพลิจูด

ดังนั้น เมื่อรวมสัญญาณที่รับได้ทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของผลรวมได้ดังสมการที่ 2.7

$$f(\varphi) = \sum_i^N f_i(\varphi) = f_e(\varphi) \sum_i^N e^{jk_0(N-i)d\sin(\varphi)} \quad (2.7)$$

โดยที่ $f(\varphi)$ คือ ฟังก์ชันผลรวมของการแผ่พลังงาน

ในการแสดงความสัมพันธ์ของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ เราใช้ตัวแปรอาร์เรย์แฟกเตอร์ (AF) อาร์เรย์แฟกเตอร์จะแสดงตำแหน่งและแสดงการถ่วงน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบในรูปแบบของฟังก์ชัน เราสามารถอ้างอิงจากสมการของสัญญาณที่ 2.7 เพื่อพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบของเฟสได้เป็นสมการดังนี้

$$f_a(\varphi) = \sum_i^N e^{jk_0(N-i)d\sin(\varphi)} \quad (2.8)$$

โดยที่ $f_a(\varphi)$ คือ ฟังก์ชันการแผ่พลังงานเฉพาะเฟส

จากสมการที่ 2.8 เราจะได้สมการอาร์เรย์แฟกเตอร์ดังสมการที่ 2.9

$$AF(\varphi) = f_a(\varphi) = \frac{\sin\left(\pi\frac{Nd}{\lambda_0}\sin(\varphi)\right)}{\sin\left(\pi\frac{d}{\lambda_0}\sin(\varphi)\right)} \quad (2.9)$$

โดยที่ λ_0 คือ ความยาวคลื่นของแสง

ในกรณีของสายอากาศแถวลำดับที่มีองค์ประกอบในระนาบ x และระนาบ y อาร์เรย์แฟกเตอร์สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 2.10

$$AF_{M,N}(\varphi, \varphi) = AF_{x,y}(\varphi, \varphi) = \left\{ \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\varphi_x\right)}{M\sin\left(\frac{\varphi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\varphi_y\right)}{N\sin\left(\frac{\varphi_y}{2}\right)} \right\} \quad (2.10)$$

โดยที่ N คือ จำนวนสายอากาศในแนวแกน x

M คือ จำนวนสายอากาศในแนวแกน y

φ_x คือ มุมในการรับสัญญาณในแนวแกน x

φ_y คือ มุมในการรับสัญญาณในแนวแกน y

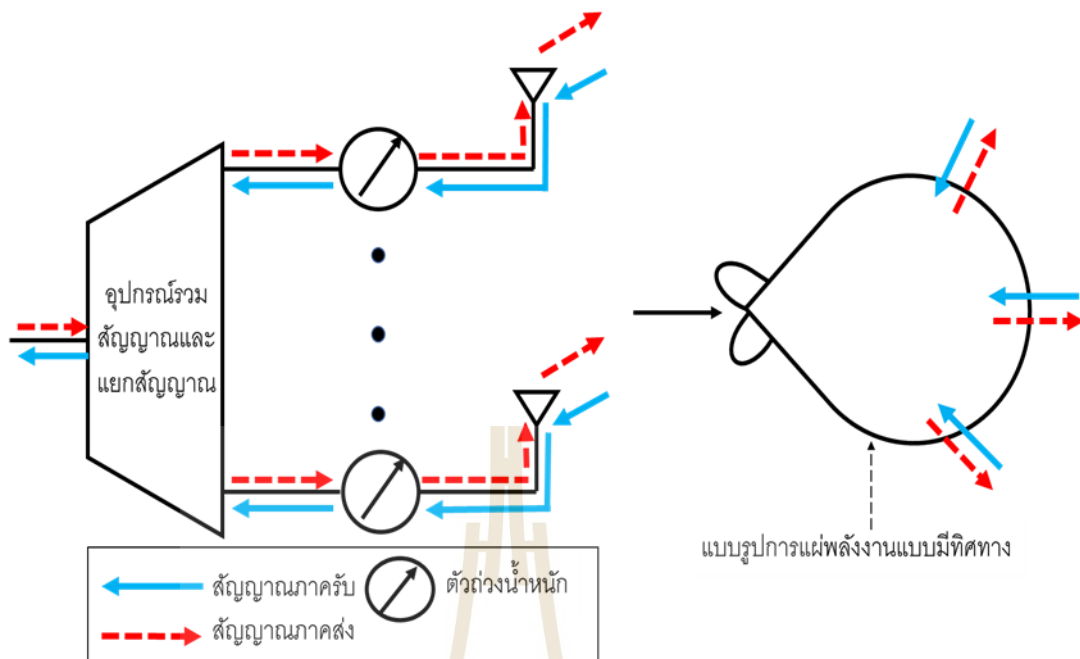
เพื่อหาสัญญาณที่รับได้เราสามารถใช้อาร์เรย์แฟกเตอร์คูณกับกำลังงานในแต่ละมุม ดังนั้น เราจะได้รับสัญญาณที่ได้ที่แท้จริง

2.5 กลไกการทำงานของคลื่นในวงจร

การควบคุมคลื่นนั้นเป็นการจำแนกสัญญาณ ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณภาคส่งหรือสัญญาณภาครับ ปกติแล้วในสายส่งไม่ว่าคลื่นจะเดินทางมาจากฝั่งใดอาจมีการชนกัน แต่มีการลดทอนของสัญญาณที่เกิดขึ้นน้อย ดังนั้นสายส่งสัญญาณภาครับและสัญญาณภาคส่งสามารถใช้งานรวมกันได้ ตัวอย่างของการควบคุมสัญญาณในสายส่งคือ เซอร์คูเลเตอร์ (Circulator) ซึ่งอาศัยเฟสของสัญญาณเพื่อทำให้เกิดการหักกลับกันและอาศัยการใช้สนามแม่เหล็กในการช่วยควบคุมสัญญาณ ในแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ในหัวข้อนี้เริ่มต้นอธิบายการทำงานของวงจรของสายแฉวลำดับร่วมกับเซอร์คูเลเตอร์

2.5.1 การส่งและรับสัญญาณของสายอากาศแฉวลำดับ

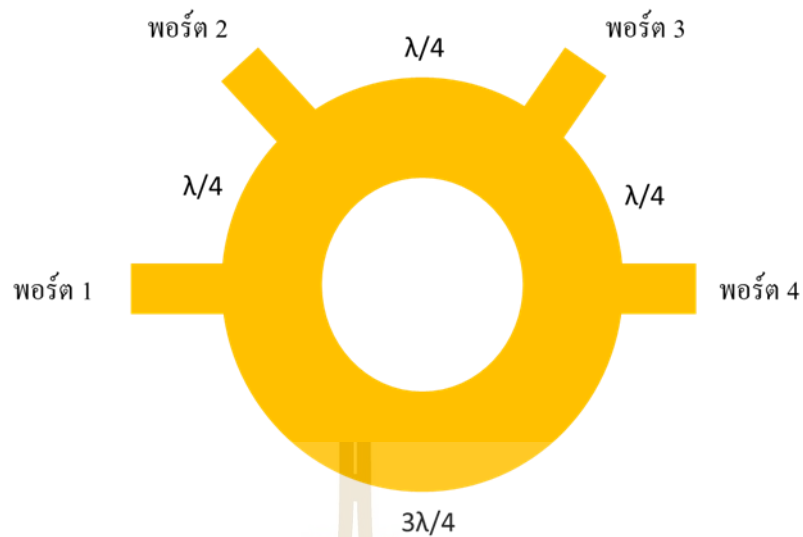
การทำงานในการส่งและการรับในวงจรของสายอากาศแฉวลำดับจะเป็นดังรูปที่ 2.15 เมื่อลูกศรเส้นประคือ ทิศทางการเดินทางของคลื่นสำหรับภาคส่ง ลูกศรเส้นทึบคือ เส้นทางเดินทางของคลื่นสำหรับภาครับ หลังจากภาคส่งผ่านการแปลงสัญญาณจากสัญญาณดิจิทัล (Digital) มาเป็นสัญญาณแอนะล็อก (Analog) แล้ว สัญญาณจะถูกแบ่งออกไปยังเส้นทางขององค์ประกอบในแต่ละเส้นตามจำนวนองค์ประกอบที่มี ในขั้นตอนนี้สัญญาณจะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยการเปลี่ยนเฟส ดังนั้นสัญญาณในแต่ละเส้นทางที่เดินทางไปถึงปลายของสายอากาศจะทำให้สัญญาณมีเฟสที่แตกต่างกัน เมื่อสัญญาณมีเฟสที่แตกต่างกันแล้วอาร์เรย์แพกเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลต่อสัญญาณที่ส่งออกไปยังภาครับ ในทางกลับกันเมื่อมีการรับสัญญาณเข้ามาในวงจร ที่ตำแหน่งของการปรับเฟส จะทำหน้าที่ในการปรับเฟสให้เท่ากันเพื่อช่วยให้สามารถรวมสัญญาณได้ การทำงานในลักษณะนี้ทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานในภาครับและภาคส่งสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานได้เพียงแบบเดียว เนื่องจากตัวถ่วงน้ำหนักที่ใช้งานเป็นชุดเดียวกัน



รูปที่ 2.15 ไดอะแกรมการส่งสัญญาณด้วยสายอากาศ

2.5.2 การแยกสัญญาณของภาครับและภาคส่ง

จากหัวข้อที่แล้วเส้นทางของคลื่นในภาครับและภาคส่งจะซ้อนทับกัน ซึ่งทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเดียวกัน โดยจะขึ้นอยู่กับ การถ่วงน้ำหนัก ดังนั้นในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการแยกสัญญาณของภาครับและภาคส่งเมื่อมีสัญญาณที่วิ่งสวนทางกัน เริ่มต้นจากวงจรแบ่งสัญญาณแบบ 4 พอร์ต เป็นวงจรที่อาศัยความต่างเฟสเพื่อแยกสัญญาณดังรูปที่ 2.16 พอร์ตที่ 1 ถึง พอร์ตที่ 4 คือ พอร์ตหรือจุดเชื่อมต่อของสัญญาณ เมื่อสัญญาณไหลเข้ามาในวงจรสัญญาณแต่ละพอร์ต สัญญาณจะเคลื่อนที่ไปยังทุกพอร์ตที่เป็นไปได้ เมื่อสัญญาณส่งเข้าไปยังพอร์ตที่ 1 สัญญาณจะเดินทางไปยังพอร์ตที่ 2 ด้วยแอมพลิจูดที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้ (ยังมีการสูญเสียที่เกิดจากการเดินทางบนตัวกลาง) ที่พอร์ตที่ 3 แอมพลิจูดจะต่ำที่สุด ซึ่งเท่ากับศูนย์และที่พอร์ตที่ 4 แอมพลิจูดจะสูงที่สุด แต่เฟสจะตรงกันข้ามกับกับพอร์ตที่ 2 ดังสมการที่ 2.11



รูปที่ 2.16 วงจรแบ่งสัญญาณแบบ 4 พอร์ต

$$S = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

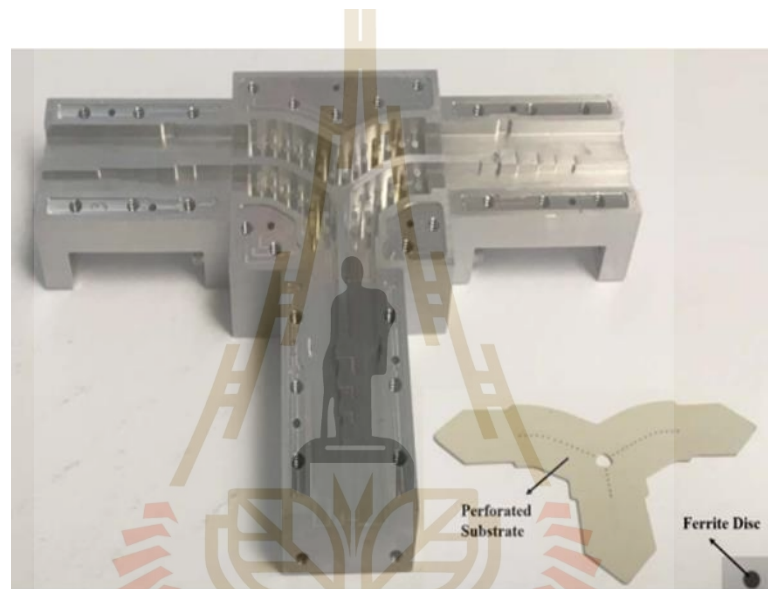
จากสมการที่ 2.11 จะเห็นว่าสัญญาณในวงจรเมื่อเดินทางด้วยระยะทางที่ต่างกัน จะทำให้เฟสและแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย วิธีนี้จะซับซ้อนในการออกแบบวงจร ซึ่งทำให้ในหลายงานวิจัยนิยมใช้การควบคุมสัญญาณด้วยวิธีอื่น

วิธีที่นิยมในการควบคุมสัญญาณคือ เซอร์คูเลเตอร์ องค์ประกอบของเซอร์คูเลเตอร์ที่ตีพิมพ์ไว้สุดจากแม่เหล็ก เนื่องจากคุณสมบัติของแม่เหล็กที่มีความเกี่ยวข้องกับการแผ่พลังงาน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 2.12

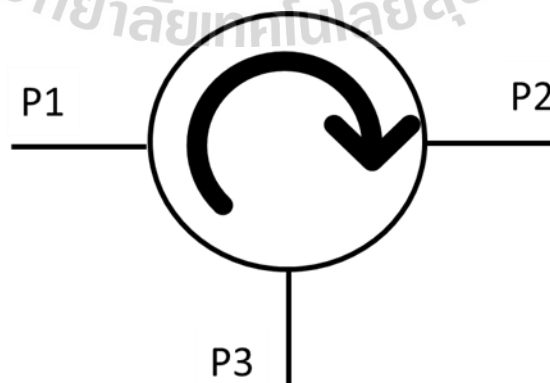
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.12)$$

- โดยที่ \mathbf{B} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
 \mathbf{E} คือ สนามไฟฟ้า
 μ_0 คือ สภาพซึมซาบทางแม่เหล็กของอากาศว่าง
 \mathbf{J} คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

เมื่อคลื่นในอากาศว่างเดินทางมาเจอสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบไปด้วยฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าและมีสนามไฟฟ้าอยู่ด้วย กระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนทิศทาง และเปลี่ยนแอมพลิจูด คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้แม่เหล็กมีคุณสมบัติในการควบคุมทิศทางของคลื่นและ ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในเซอร์คูเลเตอร์ เซอร์คูเลเตอร์ถูกศึกษามาเป็นจำนวนมากและเกี่ยวกับแม่เหล็ก มักใช้แม่เหล็กเฟอร์ไรท์ (Ferrite) มาควบคุมสัญญาณ (Shams, Shoukry I., and et al, 2021) ดังรูปที่ 2.17 รูปแบบส่วนใหญ่ที่ออกแบบมักใช้ลักษณะที่คล้ายกับตัว Y ซึ่งเป็นการประยุกต์การ เคลื่อนที่ของคลื่น โดยนับเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น



รูปที่ 2.17 เซอร์คูเลเตอร์โครงสร้าง Y (Shams, Shoukry I., and et al, 2021)



รูปที่ 2.18 ไดอะแกรมของเซอร์คูเลเตอร์

จากรูปที่ 2.18 จะมีลักษณะเป็น 3 พอร์ตที่ทำงานแยกกัน เราสามารถอธิบายความสามารถของเซอร์คูเลเตอร์ได้ดังนี้ เมื่อสัญญาณถูกส่งเข้าไปยังที่พอร์ตที่ 1 สัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังพอร์ตที่ 3 เพียงอย่างเดียว ถึงแม้ว่าพอร์ตที่ 3 จะเชื่อมต่ออยู่กับสายส่งเดียวกันก็ตาม เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ถูกบังคับจากคุณสมบัติแม่เหล็ก เมื่อการส่งสัญญาณในรูปแบบนี้เกิดขึ้นเราสามารถจำลองได้ว่าภาคส่งคือ สัญญาณที่เข้ามาจากพอร์ตที่ 1 แล้วสัญญาณภาครับคือ สัญญาณที่เข้ามาจากพอร์ตที่ 2 สัญญาณทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันอย่างสิ้นเชิง ถึงแม้จะอยู่บนตัวกลางที่เป็นสายส่งเดียวกันดังสมการที่ 2.13

$$S = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

ในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้เลยที่สัญญาณที่อยู่ในเซอร์คูเลเตอร์จะไม่รบกวนกัน ดังนั้นปกติเราจะมีค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับงานที่ถูกลำนำไปใช้

2.6 แบบจำลองสายอากาศและช่องสัญญาณ

ในการพัฒนาเครือข่ายไร้สายจำเป็นต้องมีการวัดผลของเครือข่ายไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นนักวิจัยจะพัฒนาสิ่งใดมาใช้ในเครือข่ายไร้สาย นักวิจัยจำเป็นต้องมีการทดสอบ ในทางปฏิบัติการวัดเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สายขนาดใหญ่ไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงมีวิธีการประเมินเครือข่ายไร้สายขนาดใหญ่ด้วยการใช้แบบจำลองเครือข่ายไร้สาย ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการใช้แบบจำลองเครือข่ายไร้สาย โดยประเมินเครือข่ายไร้สายด้วยสายอากาศพื้นฐานตามมาตรฐาน IEEE 802.11

2.6.1 แบบจำลองสายอากาศและช่องสัญญาณ

แบบจำลองช่องสัญญาณประกอบไปด้วยตัวแปร เช่น การสูญเสียกำลัง (Path Loss) สัญญาณรบกวน (Noise) คลื่นหลายวิถี (Multipath) และสัญญาณแทรกสอด (Interference) กำหนดให้สายอากาศที่ถูกเปรียบเทียบมีอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 1 กำลังงานสูงที่สุดที่เกิดจากสัญญาณรบกวนสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.14

$$P_n = \frac{P_T H_\alpha}{SINR_{th} R^\alpha} \quad (2.14)$$

โดยที่ P_n คือ กำลังงานของสัญญาณรบกวน

P_T	คือ	กำลังงานภาคส่ง
H_α	คือ	ฟังก์ชันของความสูงที่คิดเทียบกับสายอากาศภาครับและภาคส่ง
$SINR_{th}$	คือ	ค่าขีดแบ่งในการแยกสัญญาณ
R	คือ	ระยะทางระหว่างภาครับและภาคส่ง
α	คือ	การสูญเสียกำลังตามระยะทาง

จากที่กล่าวไปข้างต้นการทำงานของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นต้องใช้เทคนิค DOA เพื่อบอกทิศทางของสัญญาณที่รับได้ ดังนั้น แบบจำลองของการรับสัญญาณจากหลายสัญญาณในแต่ละทิศทางจะถูกออกแบบด้วยฟังก์ชันของ DOA ดังนี้

$$p(\phi') = \begin{cases} \frac{W_L}{\sqrt{2\hat{\sigma}_{\phi'}}} e^{-\frac{\sqrt{2}|\phi'|}{\hat{\sigma}_{\phi'}}} & |\phi'| \leq 2\pi \\ 0 & \text{มุมใด ๆ} \end{cases} \quad (2.15)$$

โดยที่	$p(\phi')$	คือ	ฟังก์ชันของการหาสัญญาณภาครับ
	W_L	คือ	ค่าคงที่
	ϕ'	คือ	มุมอ้างอิง
	$\hat{\sigma}_{\phi'}$	คือ	มุมสำหรับแบ่งช่องสัญญาณ

การแผ่พลังงานของสายอากาศจะถูกจำลองด้วยค่าเปรียบเทียบเพื่อให้สอดคล้องกับแบบจำลองกำลังของสัญญาณรบกวน กำหนดให้แบบรูปการแผ่พลังงานนี้สร้างขึ้นขณะที่ภาครับได้รับเฟรม RTS จากภาคส่งเพื่อรอรับเฟรม DATA การรวมผลลัพธ์ของผลกระทบจากสายอากาศกับช่องสัญญาณจะได้เขียนดังนี้

$$G_F(\phi) = \int_0^{2\pi} G(\phi) p(\phi' - \phi) d\phi' \quad (2.16)$$

โดยที่	$G_F(\phi)$	คือ	อัตราขยายของสายอากาศรอบทิศทาง
	ϕ	คือ	มุมแอสิมัท

สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางไม่สามารถใช้งานสมการนี้ได้ เนื่องจากทิศทางที่ใช้งานของสายอากาศแบบมีทิศทางจะอยู่ในระยะของมุมที่กำลังงานลดลง 3 dB ดังนั้นการคิดผลกระทบจากสายอากาศประเภทนี้จะถูกเฉลี่ยออกไปตามการใช้งานดังสมการต่อไปนี้

$$G_{TX} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} G_F(\phi) d\phi \quad (2.17)$$

$$\bar{G}_{TX} = \frac{1}{2\pi - \frac{\phi_{3dB}}{2}} \int_{\frac{\phi_{3dB}}{2}}^{2\pi - \frac{\phi_{3dB}}{2}} G_F(\phi) d\phi \quad (2.18)$$

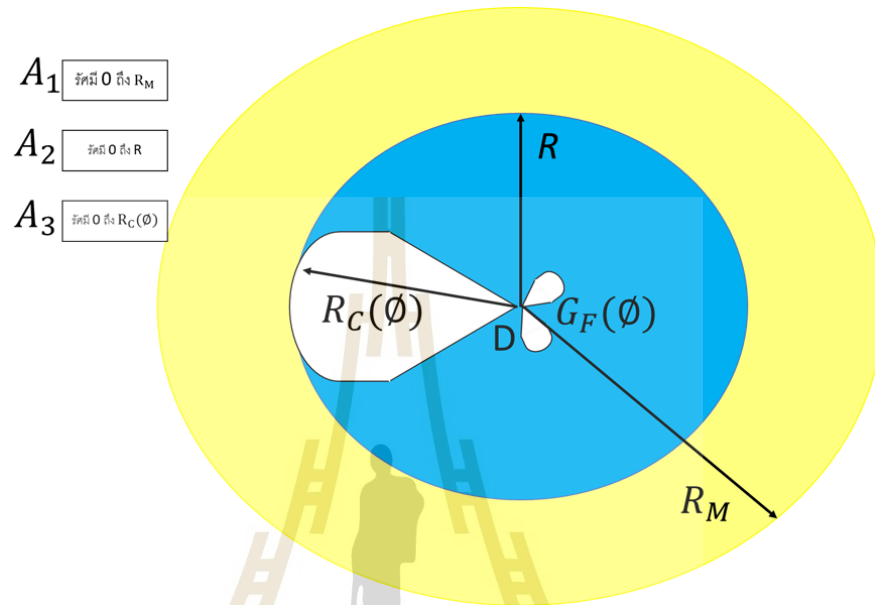
โดยที่ G_{TX} คือ อัตราขยายของสายอากาศมีทิศทางสำหรับพื้นที่ A_1
 \bar{G}_{TX} คือ อัตราขยายของสายอากาศมีทิศทางสำหรับพื้นที่ A_2

อัตราขยายของทั้งสองสมการนี้จะถูกนำไปคำนวณตามลักษณะการแบ่งในเชิงพื้นที่ สำหรับประเภทของสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง

2.6.2 สมมติฐานของเครือข่ายไร้สายสำหรับหาคู่การสื่อสาร

การประเมินเครือข่ายไร้สายด้วยแบบจำลองนั้นจำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งโนดในเครือข่ายไร้สาย ในแบบจำลองนี้จะใช้การแบ่งพื้นที่จากแบบรูปการแผ่พลังงานที่สามารถเข้าเครือข่ายไร้สายได้ ซึ่งแบ่งเป็น 3 พื้นที่ ดังรูปที่ 2.19 การแบ่งพื้นที่แบบนี้จะช่วยทำให้การแยกพื้นที่ของการแทรกสอดชัดเจนขึ้น ซึ่งยังครอบคลุมถึงผลกระทบของที่มีผลต่อโนดทั้งหมดในเครือข่ายไร้สาย พื้นที่ A_1 คือ พื้นที่ที่โนดไม่สามารถส่งกำลังงานไปถึงได้ ดังนั้นข้อสันนิษฐานคือขณะที่โนดมีการส่งเฟรม CTS แล้ว เฟรมดังกล่าวจะไปไม่ถึงโนดโดยรอบ ทำให้ไม่มีการอัปเดตข้อมูลในตารางการส่งของ DNAV ดังนั้นพื้นที่บริเวณนี้มีโอกาสที่จะส่งข้อมูลเข้ามาอย่างไม่เป็นระเบียบและกลายเป็นสัญญาณแทรกสอดได้ ซึ่งสามารถมาจากทุกมุมของแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อสังเกตจากแบบรูปการแผ่พลังงานภาครับ ทั้งนี้ สัญญาณแทรกสอดนี้ไม่ได้เป็นที่ต้องการของเครือข่ายไร้สายแน่นอนว่ามีความเป็นไปได้ที่ไม่ใช่ทุกโนดจะกลายเป็นสัญญาณแทรกสอดของเครือข่ายไร้ แต่ในกรณีเปรียบเทียบนั้นแบบจำลองนี้กำหนดให้ทุกโนดในพื้นที่นี้แทรกสอดกับโนดหลัก เพราะทำให้เกิดสถานการณ์ที่โนดรับสัญญาณได้แย่ที่สุดจากการแทรกสอด ในพื้นที่ A_2 คือ พื้นที่ในการทำงานของแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งสามารถสื่อสารกันในเครือข่ายไร้สายได้ ในพื้นที่นี้โนดสามารถหันลำคลื่นหลักเพื่อเบี่ยงเบนการแทรกสอดได้ ซึ่งยังคงมีสัญญาณแทรกสอดเข้ามากระทบอยู่ โดยเกิดจากพหุหลังและพหุข้างของแบบรูปการแผ่พลังงาน ในพื้นที่ A_3 คือ ส่วนที่ไม่เกิดสัญญาณแทรกสอดอย่างแน่นอนหากใช้ความถี่เดียวกัน เนื่องจากบริเวณนี้จะถูกสัญญาณที่ปล่อยออกมาจากโนดหลัก ซึ่งมีพลังงานใน

การส่งมากกว่าเข้าไปรบกวน ดังนั้น โหนดในบริเวณนี้จึงไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้ จากทั้ง 3 พื้นที่ที่กล่าวมาสิ่งสำคัญหลักคือ สัญญาณแทรกสอดที่เราไม่สามารถรับรู้ปริมาณได้ ดังนั้นการกำหนดปริมาณโหนดกับพื้นที่จึงถูกนำมาใช้งาน



รูปที่ 2.19 สมมุติฐานของเครือข่ายไร้สาย

เมื่อพิจารณาจากขอบเขตของโหนดที่สามารถใช้งานได้จริงคือ พื้นที่ใน A_2 ดังนั้นโหนดทั้งหมดในเครือข่ายไร้สายจึงถูกกำหนดจากพื้นที่ในลักษณะของวงกลมดังสมการที่ 2.19

$$N_M = \frac{R_M^2}{R^2} 2C_L \quad (2.19)$$

- โดยที่ N_M คือ จำนวนโหนดทั้งหมดในเครือข่ายไร้สาย
 C_L คือ จำนวนคู่การสื่อสารที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายไร้สาย
 R_M คือ ระยะทางสูงที่สุดของเครือข่ายไร้สาย
 R คือ ระยะทางสูงที่สุดที่สายอากาศสามารถแผ่พลังงานไปถึงโหนดรับ

นอกจากจำนวนโหนดแล้วสิ่งที่ต้องพิจารณาในเครือข่ายไร้สายคือ โครงสร้างของเครือข่ายไร้สาย ซึ่งสามารถกำหนดได้จากสมการที่ 2.20

$$\delta(r, \phi) = \frac{1}{2\pi R r} \quad (2.20)$$

โดยที่ $\delta(r, \phi)$ คือ ฟังก์ชันการเลือกทอพอโลยี (Topology)
 r คือ ระยะที่สายอากาศสามารถติดต่อสื่อสารได้ตั้งแต่ 0 ถึง R

ดังนั้น ความหนาแน่นของโนดในเครือข่ายไร้สายจึงเท่ากับสมการต่อไปนี้

$$A_N(r, \phi) = N_M \delta(r, \phi) \quad (2.21)$$

เราสามารถพิจารณาจากสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวนได้ดังนี้ ที่พื้นที่ A_1 สัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นมาจากลำคลื่นที่ไม่รู้ตำแหน่งของลำคลื่นที่แน่นอน แต่ถูกสันนิษฐานว่า อยู่ไกลจนเกินจะรับรู้ได้ ดังนั้น พลังงานที่ถูกส่งออกมาเพื่อเป็นสัญญาณแทรกสอดจึงสามารถอนุมานได้ว่ามีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน เราจึงกำหนดกำลังงานด้วยการเฉลี่ยพลังงานจากทุกมุมได้ อัตราขยายที่ถูกนำมาใช้มาจากสมการที่ 2.16 ที่พื้นที่ A_2 อัตราขยายที่ถูกนำมาใช้จะเป็นดังสมการที่ 2.17 เนื่องจากอยู่ในพื้นที่ที่สามารถบังคับลำคลื่นให้หันพหุหลักออกไปได้ ดังนั้นกำลังงานของการแทรกสอดของแต่ละพื้นที่จะเป็นดังสมการที่ 2.22 และ 2.23 ในพื้นที่ A_3 กำลังงานของการแทรกสอดจะเท่ากับศูนย์ เนื่องจากผู้ใช้งานคนอื่นไม่สามารถใช้งานได้ โดยสามารถเขียนเป็นสมการในแต่ละพื้นที่ได้ดังต่อไปนี้

$$P_1 = \int_0^{2\pi} \int_R^R \frac{P_T H_\alpha G_{TX} G_R}{r^\alpha} A_N(r, \phi) r dr d\phi d\theta \quad (2.22)$$

$$P_2 = \int_{\frac{\theta_{3dB}}{2}}^{2\pi - \frac{\theta_{3dB}}{2}} \int_{R_C(\phi)}^R \frac{P_T H_\alpha G_{TX} G_R}{r^\alpha} A_N(r, \phi) r dr d\phi d\theta \quad (2.23)$$

โดยที่ P_1 คือ กำลังงานแทรกสอดจากพื้นที่ที่หนึ่ง
 P_2 คือ กำลังงานแทรกสอดจากพื้นที่ที่สอง
 θ คือ มุมเงย (Elevation)
 G_R คือ อัตราขยายของโนดภาครับ

เมื่อรวมสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่ปลายของสายอากาศ ซึ่งกำหนดให้เท่ากับค่าขีดแบ่งของเครือข่ายไร้สายในภาครับจะได้สมการโนดที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.24

$$C_L = \frac{2^\alpha G_A^2 - 1}{2 \text{SINR}_{th} R_M^2 R^{\alpha-2} (K_1 G_{TX} C_1 + K_2 \bar{G}_{TX} C_2)} \quad (2.24)$$

โดยที่ G_A คือ อัตราขยายของสายอากาศในคู่มือการสื่อสาร
 K_1 และ K_2 คือ ฟังก์ชันของระยะทาง
 C_1 และ C_2 คือ ฟังก์ชันของแบบรูปการแผ่พลังงาน

2.6.3 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ควาวิสัยสามารถและความหน่วง

แบบจำลองควาวิสัยสามารถและความหน่วงมักพิจารณาจากฟังก์ชัน DCF อันดับแรก กลไกที่ถูกนำมาวิเคราะห์คือ การเข้าถึงเครือข่ายไร้สายแบบสุ่ม ซึ่งใช้โปรโตคอล CSMA/CA ที่ประกอบไปด้วยเฟรม RTS และเฟรม CTS การวิเคราะห์จะใช้แบบจำลองจากแบบจำลอง Markov chain แบบจำลองเหล่านี้มักพัฒนาในส่วนของขั้นตอนวิธี (Algorithm) เช่น ขีดจำกัดของการส่งใหม่ เมื่อการส่งซ้ำถึงขีดจำกัดข้อมูลชุดนั้นจะไม่ถูกส่งอีกต่อไป ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเกี่ยวกับการหยุดตัวจับเวลาเพื่อเพิ่มขีดจำกัดของการส่งข้อมูล เมื่อตัวจับเวลาถูกหยุดหนึ่งช่องสัญญาณจะอยู่ในสถานะไม่ว่าง หลังจากนั้นช่องสัญญาณจะกลับมาทำงานอีกครั้งเมื่อมีการตรวจพบว่าช่องสัญญาณว่าง ยังมีหลายงานวิจัยที่ศึกษากลไกการทำงานเหล่านี้ โดยเริ่มต้นจากแบบจำลองแบบสองมิติ (Bianchi, Giuseppe, 1998) แบบจำลองการเพิ่มขีดจำกัดการส่งซ้ำ (Wu, Haitao, et al, 2002) แบบจำลองหยุดตัวจับเวลาหลังจากการส่งซ้ำถึงที่สุด (Ziouva, Eustathia, and Theodore Antonakopoulos, 2002) แบบจำลองที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเฟรม RTS และเฟรม CTS (Yazid, Mohand, et al, 2015) เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองพื้นฐานในมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดสถานะของตัวจับเวลาดังสมการต่อไปนี้

$$\tau = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (2.25)$$

โดยที่ p คือ ความน่าจะเป็นในการส่งของข้อมูล
 W คือ ขนาดของขีดจำกัดการส่งซ้ำ

ความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลอย่างน้อยหนึ่งครั้งเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (2.26)$$

ความน่าจะเป็นที่ส่งข้อมูลสำเร็จจะเท่ากับสมการดังต่อไปนี้

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} \quad (2.27)$$

โดยที่ n คือ จำนวนโนดทั้งหมดในเครือข่ายไร้สาย

ความหน่วงของเครือข่ายไร้สายเท่ากับสมการต่อไปนี้

$$E[\psi] = \frac{1}{P_{tr}} - 1 \quad (2.28)$$

ค่าวิสัยสามารถที่เกิดจากการส่งข้อมูลจะเป็นไปตามสมการที่ 2.29

$$\text{Throughput} = \frac{P_s E[p]}{E[\psi] + P_s T_s + (1 - P_s) T_c} \quad (2.29)$$

ค่าวิสัยสามารถที่เกิดขึ้นเป็นการประเมินประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สายโดยรวม ซึ่งวิธีการนี้ไม่ได้มีการนำผลกระทบจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศมาใช้งาน ดังนั้นวิธีการนี้จึงเป็นการประเมินเครือข่ายไร้สายแบบไม่เฉพาะเจาะจง

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบรูปการแผ่พลังงาน

อ้างอิง	ประเภทเครือข่าย	ประเภทสายอากาศ	แบบรูปการแผ่พลังงาน	จำนวนโหนด	หมายเหตุ
(Cali, Federico, Marco Conti, and Enrico Gregori, 2000)	ทุกเครือข่าย	แบบดั้งเดิม	มี/รอบทิศทาง	1	จำนวนผู้เข้าที่สามารถถึงเครือข่ายไร้สายได้แบบมีน้อย
(Nasipuri, Asis, et al, 2000)	เฉพาะกิจ	แบบดั้งเดิม	มีทิศทาง	1	การใช้พื้นที่ซ้ำและระยะเวลาการติดต่อสื่อสารลดลง
(Fahmy, Nader S., and Terence D. Todd 2004)	เฉพาะกิจ	แถวลำดับ	มีทิศทาง	1	ความมีอิสระของสายอากาศลดลง เมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงาน

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบรูปการแผ่พลังงาน (ต่อ)

อ้างอิง	ประเภท เครือข่าย	ประเภท สายอากาศ	แบบ รูปการแผ่ พลังงาน	จำนวน โหนด	หมายเหตุ
(Mundarath, J.C, Parameswaran Ramanathan, and Barry D. Van Veen, 2004)	เฉพาะกิจ	แถวลำดับ	มีทิศทาง	1	ปริมาณของค่าวิสัยสามารถจะ อ้อมตัว เมื่อสายอากาศเพิ่ม ปริมาณมากขึ้น
(Huang, Zhuochuan, et al, 2005)	ทุกเครือข่าย	แถวลำดับ	มี/รอบ ทิศทาง	1	การใช้ช่องสัญญาณ 2 ช่อง พร้อมกันเพื่อส่งข้อมูลทำให้ จำนวนช่องสัญญาณลดลง
(Korakis, Thanasis, Gentian Jakllari, and Leandros Tassiulas, 2007)	เฉพาะกิจ	แบบดั้งเดิม	มีทิศทาง	1	มีความซับซ้อนในการใช้งาน และความหน่วงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความล่าช้าของการ ตรวจสอบการส่งข้อมูล
(Chang, J-J., Wanjiun Liao, and T-C. Hou, 2009)	ทุกเครือข่าย	แถวลำดับ	มี/รอบ ทิศทาง	1	เกิดปัญหาการปิดกั้นข้อมูลชุด แรก
(Shen, Jian, Sangman Moh, and Ilyong Chung, 2012)	ทุกเครือข่าย	แถวลำดับ	มี/รอบ ทิศทาง	1	อุปกรณ์รับสัญญาณและ อุปกรณ์ส่งสัญญาณคนละชุด กัน ทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่ม
(Kim, J. D., David I. Laurenson, and John S. Thompson, 2017)	วายพาย	แถวลำดับ	มี/รอบ ทิศทาง	2	การทำงานของโปรโตคอล จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ที่ สามารถแยกสัญญาณได้ มากกว่าหนึ่งสัญญาณได้ ซึ่ง ต้องมีสายอากาศจำนวนมาก ในการทำงาน

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบรูปการแผ่พลังงาน (ต่อ)

อ้างอิง	ประเภท เครือข่าย	ประเภท สายอากาศ	แบบ รูปการแผ่ พลังงาน	จำนวน โหนด	หมายเหตุ
(Alam, Md Nasre, et al, 2021)	ทุกเครือข่าย	แถวลำดับ	มีทิศทาง	1	การใช้โปรโตคอลเพื่อเพิ่มการใช้ซ้ำในเชิงพื้นที่ที่จะมีส่วนช่วยเพียงเล็กน้อย เมื่อลำดับการส่งข้อมูลยังคงตั้งอยู่บนพื้นฐานการสื่อสารครั้งละโนด
(Rukaiya, Rukaiya, et al, 2021)	เฉพาะกิจ	แถวลำดับ	มีทิศทาง	2	ใช้สายอากาศที่มีความซับซ้อน

2.7 สรุป

เครือข่ายไร้สายเป็นเครือข่ายที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาคุณภาพชีวิตของมนุษย์ การติดต่อสื่อสารกันของอุปกรณ์ในเครือข่ายไร้สายนั้นจำเป็นต้องมีหลายส่วนทำงานร่วมกัน ดังนั้นการพัฒนาเครือข่ายไร้สายด้านการลดสัญญาณแทรกสอดจึงมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สาย ปัญหาที่พบบ่อยที่สุดในเครือข่ายไร้สายคือ ปัญหาโนดซ่อนเร้นและปัญหาการไม่รู้รู้ของโนด ผลกระทบจากปัญหาเหล่านี้คือ จำนวนโนดที่สามารถใช้งานได้ในช่วงเวลาเดียวกันจะลดลง เวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการสูญเสียข้อมูลที่ส่งจากการส่งซ้ำนั้นจะเกินขีดจำกัด ซึ่งส่งผลกระทบต่อเครือข่ายไร้สายรุนแรงตามขนาดของเครือข่ายไร้สาย วิธีการลดผลกระทบต่อเครือข่ายไร้สายคือ การพัฒนาโปรโตคอล การพัฒนางจรสำหรับทำงานร่วมกันระหว่างโปรโตคอลกับสายอากาศ และการพัฒนาสายอากาศ ถึงแม้ว่าทั้งสามส่วนนี้จะมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันในการวัดผล แต่มีเป้าหมายเดียวกันคือ การเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สายให้ดีขึ้น แนวโน้มที่น่าสนใจของวิธีการลดผลกระทบของโนดซ่อนเร้น การลดผลกระทบของปัญหาไม่รู้รู้ของโนด และการเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สายคือ การควบคุมการทำงานของแบบรูปการแผ่พลังงาน เช่น ตารางที่ 2.1 ในการออกแบบโปรโตคอล มีหลายโปรโตคอลที่ใช้แบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกันเพื่อส่งเสริมในการสื่อสาร ซึ่งข้อจำกัดของวงจรสำหรับควบคุมสัญญาณที่ทำให้โปรโตคอลที่ถูกพัฒนาไม่สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ เช่น โปรโตคอลถูกออกแบบมาเพื่อใช้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ต่างกัน (Kim, J. D., David I. Laurenson, and John S. Thompson, 2017) ต้องสลับการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงาน เพราะการใช้อุปกรณ์จะไม่สามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานได้พร้อมกัน ถึงแม้ว่าจะใช้อุปกรณ์หรือเครื่องส่งมากกว่าสองชุด แต่การใช้งานสายอากาศแบบแยกกันทำงานจะ

เกิดการแทรกสอดกันเอง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้เสนอการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานเพื่อติดต่อสื่อสารแบบพร้อมกันให้กับโนด โหนดจะสามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกันได้ในเวลาเดียวกันและโนดสามารถใช้งานความถี่เดียวกันได้ ทั้งนี้เป็นการนำงานโปรโตคอลและประเภทสายอากาศที่มีอยู่แล้วมาใช้งาน ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปยังการออกแบบการควบคุมคลื่นในวงจรและการวิเคราะห์ผลกระทบของเครือข่ายไร้สายจากการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ยังมีการเปรียบเทียบผลกระทบกับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบอื่นด้วยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าวิสัยสมารถและความหน่วงของเครือข่ายไร้สาย



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

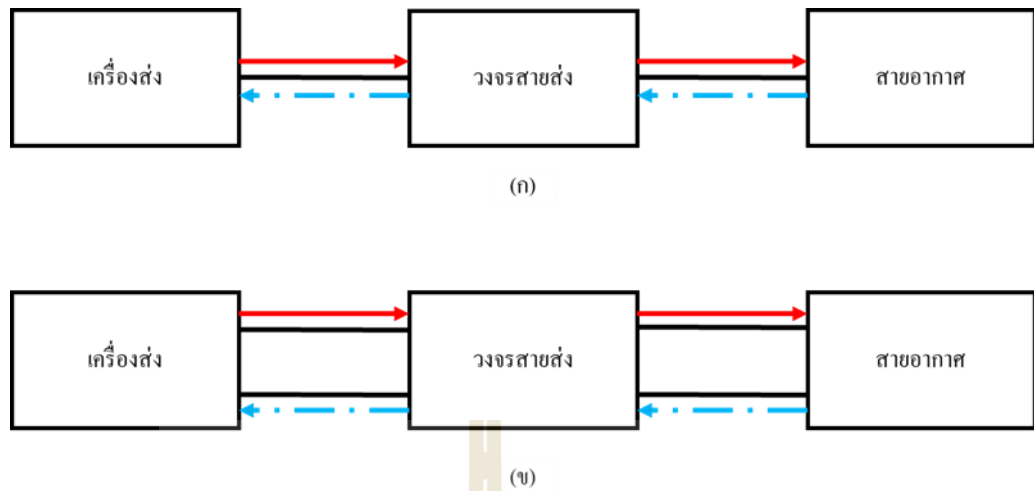
ในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับการทำงานของวงจรถอดรับและวงจรถอดส่งที่สร้างแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกัน แต่ยังสามารถใช้งานได้ในเวลาเดียวกัน บทนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ อุปกรณ์และแบบจำลอง ในส่วนของอุปกรณ์จะเป็นการอธิบายถึงวิธีการทำงานของสัญญาณในวงจร โดยการออกแบบจะอยู่ระหว่างเครื่องส่งและสายอากาศ เป้าหมายหลักของส่วนนี้คือ ควบคุมการเคลื่อนที่ของสัญญาณระหว่างภาครับและภาคส่งให้แยกสัญญาณออกจากกัน ทั้งนี้ มีการป้องกันไม่ให้เกิดการปนกันของสัญญาณ ส่วนที่สองคือ แบบจำลองเครือข่ายไร้สาย แบบจำลองถูกสร้างขึ้นเพื่อประเมินความสามารถในการทำงานของวงจรต้นแบบเทียบกับการไม่ใช้วงจร ทั้งนี้จะเปรียบเทียบกับแบบรูปการแผ่พลังงานในเครือข่ายไร้สายเป็นหลัก

3.2 วงจรสำหรับควบคุมการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน

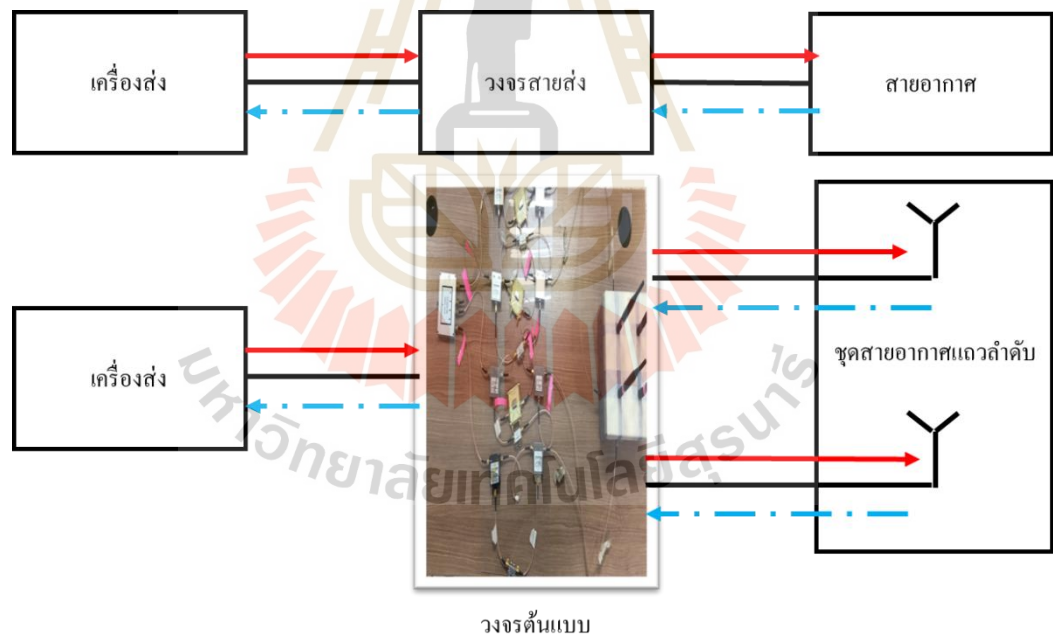
ในหัวข้อนี้เราอธิบายการทำงานของวงจร ซึ่งควบคุมการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การทำงานวงจรดั้งเดิมเปรียบเทียบกับวงจรที่ใช้เซอรัลเตอร์ ซึ่งหลักการการทำงานจะเป็นดังต่อไปนี้

3.2.1 วงจรแบบดั้งเดิม

วงจรแบบดั้งเดิมประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของเครื่องส่ง ซึ่งทำหน้าที่ส่งและรับสัญญาณจากสายส่ง ส่วนของสายส่งทำหน้าที่นำสัญญาณไปยังสายอากาศเพื่อออกอากาศ ข้อมูลและรับสัญญาณจากผู้ใช้งานอื่น ส่วนของสายอากาศทำหน้าที่กระจายสัญญาณและรับสัญญาณ ในส่วนนี้เป็นตัวกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงาน ไม่ว่าจะเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานแบบชี้ทิศทางหรือรอบทิศทาง จากรูปภาพที่ 3.1 (ก) พอร์ตในแต่ละส่วนจะมีเพียงพอร์ตเดียว ดังนั้น แบบรูปการแผ่พลังงานจะสามารถสร้างออกมาได้แบบเดียว ถ้าต้องการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน 2 แบบ พอร์ตที่ใช้ในแต่ละส่วนจะมีอย่างน้อย 2 พอร์ต เพราะต้องแยกสัญญาณภาครับและสัญญาณภาคส่ง ดังในรูปที่ 3.1 (ข) ดังนั้น เพื่อทำให้วงจรแบบดั้งเดิมสามารถใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานได้ 2 แบบ นั้น โหนดจำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในด้านของอุปกรณ์ทั้งในด้านสายอากาศ สายส่ง และเครื่องส่ง



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมของวงจรตั้งเดิมสำหรับการสร้าง (ก) แบบรูปการแผ่พลังงานเดียว (ข) แบบรูปการแผ่พลังงาน 2 แบบ

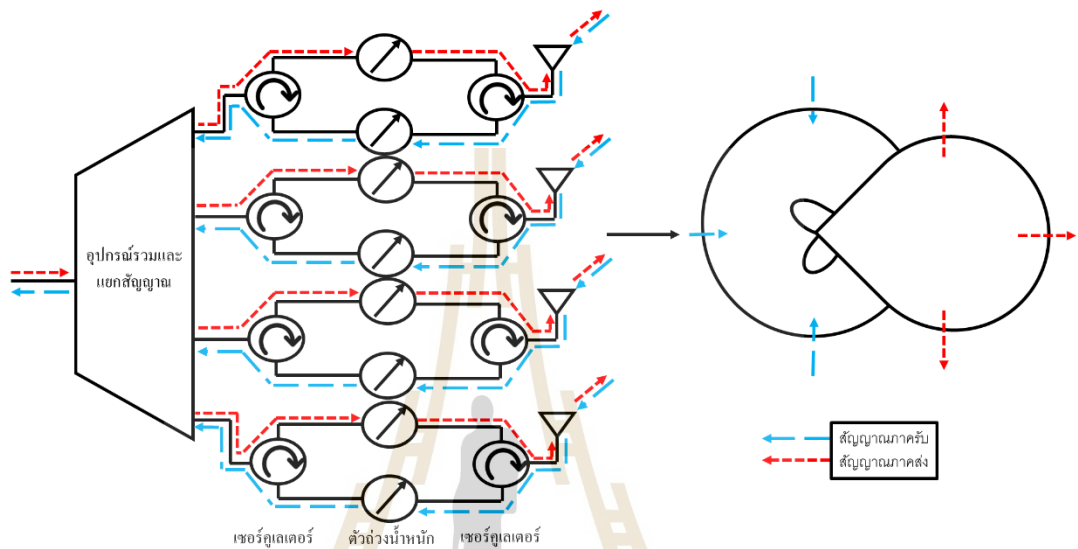


รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมและวงจรต้นแบบที่ใช้เซอร์คูเลเตอร์แบบสำเร็จรูป

3.2.2 วงจรที่ใช้เซอร์คูเลเตอร์ (Circulator)

เพื่อลดความซับซ้อนในการควบคุมสัญญาณของสนามไฟฟ้ากับแม่เหล็ก ลดความซับซ้อนของวงจร และเพื่อเพิ่มความสามารถของสายอากาศให้สามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานที่

มีอัตราการขยายที่สูงขึ้นด้วยการใช้สายอากาศแถวลำดับ ดังนั้น งานวิจัยจึงใช้เซอรัลเตอร์แบบสำเร็จรูปที่เป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟ จากรูปที่ 3.2 เซอรัลเตอร์แบบสำเร็จรูปทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz สัญญาณส่งและสัญญาณรับจะถูกแยกกันอย่างชัดเจน ซึ่งชุดสายอากาศที่ใช้งานยังเป็นชุดเดียวกัน ดังนั้นค่าใช้จ่ายสำหรับสายอากาศจะลดลงและอัตราขยายของการรับและการส่งจะเพิ่มขึ้น



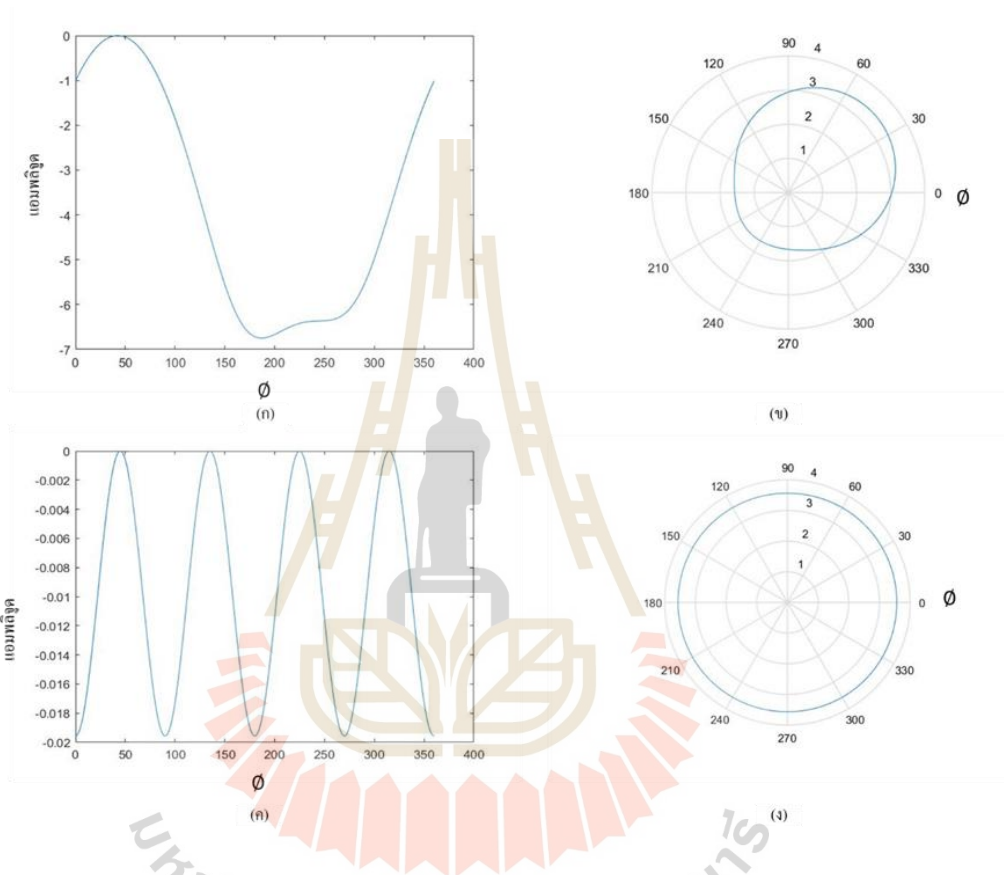
รูปที่ 3.3 การทำงานของวงจรต้นแบบที่ใช้เซอรัลเตอร์

การทำงานของวงจรประกอบไปด้วยชุดอุปกรณ์เซอรัลเตอร์ จำนวน 8 อุปกรณ์ อุปกรณ์ถ่วงน้ำหนักจำนวน 4 ถึง 8 อุปกรณ์ดังรูปที่ 3.3 เส้นประยาวสี่ฟาคือ สัญญาณภาครับ อุปกรณ์จะรับสัญญาณที่ถูกส่งมาจากโนดอื่นผ่านสายอากาศจำนวน 4 ต้น สัญญาณภาครับในแต่ละเส้นทางจะผ่านเซอรัลเตอร์ที่ทำหน้าที่แยกเส้นทาง ดังนั้นในส่วนนี้สัญญาณภาครับจะไม่ปนกับสัญญาณภาคส่ง สัญญาณภาครับจะถูกนำไปปรับแต่งสัญญาณด้วยตัวถ่วงน้ำหนักและถูกส่งไปยังอุปกรณ์รวมสัญญาณ เส้นประสั้นสีแดงคือ สัญญาณภาคส่ง เครื่องส่งจะส่งสัญญาณผ่านอุปกรณ์รวมสัญญาณ ซึ่งจะถูกส่งไปยังกิ่งวงจรทั้ง 4 เส้นทาง โดยแต่ละกิ่งจะมีอุปกรณ์ถ่วงน้ำหนักเพื่อปรับแต่งเฟสก่อนที่จะส่งไปออกอากาศที่สายอากาศแต่ละต้น ดังนั้น เฟสที่เครื่องส่งได้ส่งออกและเฟสที่เครื่องส่งรับได้รับจะแตกต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดแบบรูปการแผ่พลังงานได้ที่แตกต่างกัน

3.3 การหาค่าถ่วงน้ำหนัก

งานวิจัยนี้ค่าถ่วงน้ำหนักใช้การจำลองด้วยโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 3.4 การจำลองประกอบไปด้วยสายอากาศไดโพลจำนวน 4 ต้น ค่าถ่วงน้ำหนักจะถูกคำนวณแยกกันระหว่าง

แบบรูปการแผ่พลังงานภาครับและภาคส่ง กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับ ครึ่งความยาวคลื่นค่าถ่วงน้ำหนักของสายอากาศประเภทแถวลำดับแบบ $N \times M$ ต้น N และ M คือ จำนวนสายอากาศแถวลำดับในระนาบแกน x และระนาบแกน y โดยสมการสัญญาณที่ปลายสายอากาศสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.4 ภาพการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานเพื่อหาค่าถ่วงน้ำหนัก (ก) กราฟแอมพลิจูดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง (ข) ภาพทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางที่ควรจะเป็นจากการถ่วงค่าน้ำหนัก (ค) กราฟแอมพลิจูดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (ง) ภาพทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางที่ควรจะเป็นจากการถ่วงค่าน้ำหนัก

$$\mathbf{X} = e^{jm\pi d \cos(\theta)} e^{jn\pi d \sin(\theta)} \quad (3.1)$$

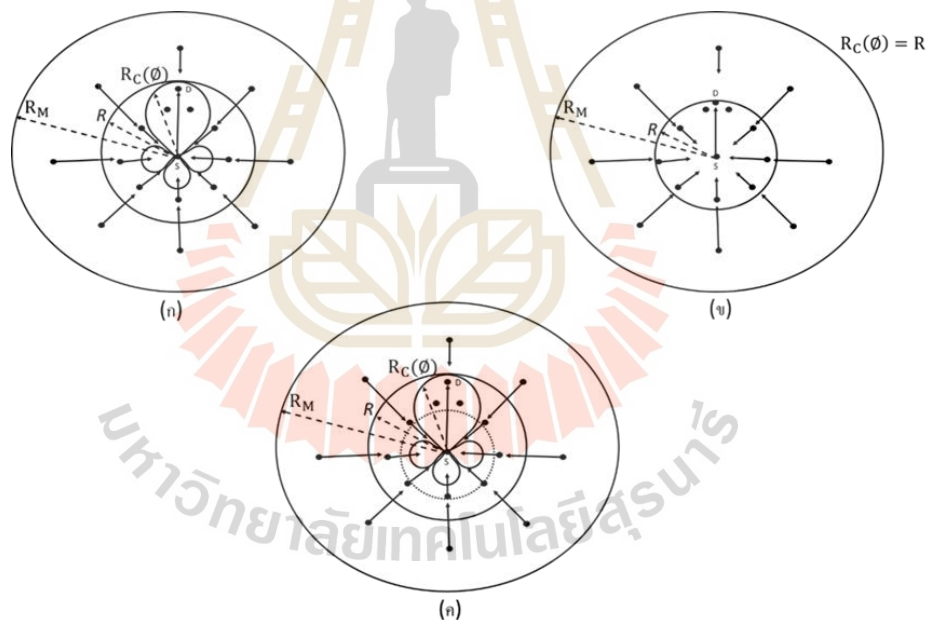
โดยที่ n คือ ลำดับสายอากาศแถวลำดับในระนาบแกน x
 m คือ ลำดับสายอากาศแถวลำดับในระนาบแกน y

- X คือ สัญญาณที่มากระทบที่สายอากาศ
 Y คือ สัญญาณที่เครื่องส่งรับได้
 W คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก

ดังนั้น สมการของการรวมสัญญาณที่เครื่องรับสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Y = WX \quad (3.2)$$

ในการถ่วงน้ำหนักให้สายอากาศสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง เราใช้เทคนิคการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักให้เท่ากับ X' เพื่อให้สัญญาณที่รับมาได้นั้นมีอัตราขยายสูงที่สุดในทิศทางที่ต้องการ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเก็บค่าถ่วงน้ำหนักไปใช้สำหรับการปรับเฟสที่อุปกรณ์ต้นแบบ



รูปที่ 3.5 สถานการณ์ของเครื่องข่ายไร้สาย (ก) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง (ข) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (ค) แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางในภาคส่งและแบบรอบทิศทางในภาครับ

3.4 แบบจำลองเครือข่ายไร้สาย

งานวิจัยนี้เลือกใช้การประเมินผลกระทบของวงจรต้นแบบ โดยกำหนดให้โนดติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบให้กับโนดในเครือข่ายไร้สายทั้งหมด เนื่องจากการวัดผลกระทบในเครือข่ายไร้สายจริงมีต้นทุนที่สูงและมีข้อจำกัด ในหัวข้อนี้จะอภิปรายถึงการหาคุโนดในเครือข่ายไร้สายที่ทำงานพร้อมกัน การหาค่าวิสัยสามารถ และการหาความหน่วงในเครือข่ายไร้สาย การประเมินในขั้นตอนนี้จะช่วยให้สามารถเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบระหว่างวงจรต้นแบบกับวงจรทั่วไป

3.4.1 การหาคุโนดในเครือข่ายไร้สาย

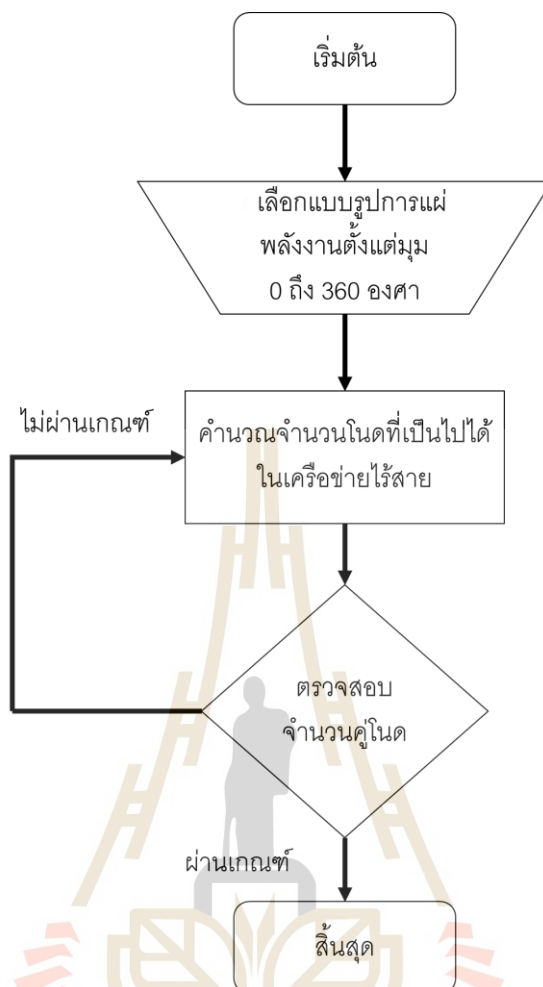
งานวิจัยนี้กำหนดเครือข่ายไร้สายดังรูปที่ 3.5 เมื่อโนด S คือ โหนดที่มีข้อมูลสำหรับส่ง โหนด D คือ โหนดเป้าหมายในการรับข้อมูล จากรูป 3.5(ก) ในเครือข่ายไร้สายโนดติดตั้งสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางในการรับและในการส่ง เมื่อโนด S และโนด D ผ่านการแลกเปลี่ยนเฟรม RTS/CTS เรียบร้อยแล้ว สถานะการณ์ของเครือข่ายไร้สายนี้อยู่ในกระบวนการส่งเฟรม DATA การแทรกสอดที่เกิดขึ้นกับการสื่อสารของโนด S และโนด D นั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 3 พื้นที่ (Babich, Fulvio, and Massimiliano Comisso, 2009) พื้นที่แทรกสอดที่ 1 มีรัศมีตั้งแต่ R ถึง R_M ในพื้นที่นี้โนดที่อยู่ในเครือข่ายไร้สายจะไม่สามารถรับเฟรม CTS ได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากระยะทางสูงสุดที่โนด S สามารถส่งข้อมูลได้ ดังนั้น เป็นไปไม่ได้เลยที่จะบอกถึงทิศทางและกำลังงานในการส่งของโนดที่ส่งมาแทรกสอด กรณีที่แย่มากที่สุดคือ ทุกโนดใช้ทิศทางที่มีกำลังงานสูงสุดชี้เข้ามาแทรกสอด อัตราขยายของสายอากาศจึงคิดจากกำลังที่มากที่สุดที่ตกกระทบการส่ง ในพื้นที่แทรกสอดที่ 2 รัศมีตั้งแต่ $R_C(\emptyset)$ ถึง R โหนดทุกโนดในพื้นที่นี้ได้รับเฟรม CTS อย่างถูกต้อง ดังนั้นในกรณีนี้แย่มากที่สุดแบบรูปการแผ่พลังงานที่จะแทรกสอดการสื่อสารนี้ได้คือ ส่วนของพูข้างและพูหลังของแบบรูปการแผ่พลังงาน โดยใช้พื้นที่นอกมุม HPBW เป็นเกณฑ์ ซึ่งมุม HPBW คือ มุมที่กำลังงานของสัญญาณลดลงครึ่งหนึ่ง พื้นที่ที่ 3 รัศมีตั้งแต่ 0 ถึง $R_C(\emptyset)$ โหนดในบริเวณนี้จะอยู่ภายใต้แบบรูปการแผ่พลังงานของโนด S ดังนั้นโนดในพื้นที่เหล่านี้จะได้รับเฟรม CTS ที่ถูกต้อง รวมถึงช่องสัญญาณในบริเวณนี้จะอยู่ในสถานะไม่ว่าง เนื่องจากการใช้งานของโนด S และ D พื้นที่บริเวณนี้จะไม่เกิดการแทรกสอดจากโนดอื่น สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในพื้นที่การแทรกสอดที่ 2 และพื้นที่การแทรกสอดที่ 3 จะมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นพื้นที่การแทรกสอดที่เกิดจากแบบรูปการแผ่พลังงานนี้จะมีเพียงพื้นที่เดียว สถานะการณ์จากแบบจำลองที่กล่าวมานั้นใช้ร่วมกับแบบรูปการแผ่พลังงานในภาครับและภาคส่งที่เหมือนกัน เนื่องจากขณะที่โนด S ส่งข้อมูลอยู่นั้น โหนด S จะไม่สามารถรับข้อมูลจากโนดอื่นได้ สำหรับการทำงานของวงจรที่งานวิจัยนี้นำเสนอ ขณะที่โนด S ส่งเฟรม DATA อยู่นั้น โหนด S ใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางและโนด S จะเปิดรับข้อมูลจากโนดอื่นโดยใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ดังนั้นพื้นที่การแทรกสอดที่ 2 และพื้นที่การแทรกสอดที่ 3 จะสัมพันธ์กับ $R_C(\emptyset)$ ที่สูงที่สุดในแต่ละมุม

จากสถานการณ์ของเครือข่ายไร้สายที่มีโนดจำนวนมาก กระบวนการวิเคราะห์จำนวนคู่โนดจากเครือข่ายไร้สายดังกล่าวจะเป็นดังรูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเลือกแบบรูปการแผ่พลังงานมาจาก 2 ที่คือ เลือกจากแบบจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานและเลือกจากการวัดผลจากสายอากาศจริง ตัวแปรที่ถูกเก็บมาคือ อัตราขยายในแต่ละมุมตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา โดยสุ่มทีละ 1 องศา ขั้นตอนที่ 2 คือ การคำนวณจำนวนคู่โนดที่เป็นไปได้ในเครือข่ายไร้สาย ในขั้นตอนนี้มีความเป็นไปได้ที่แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางจะมีผลกระทบที่ดีกว่าแบบมีทิศทาง ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงที่สายอากาศแบบมีทิศทางจะมีคู่โนดจำนวนมากว่า ดังนั้นจึงมีการใช้ขั้นตอนในการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลคู่โนด

จากพื้นที่การแทรกสอดที่ 1 ในกรณีของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางมีการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจากโนดหนึ่งโนด โดยวิเคราะห์จากกำลังงานรับที่โนด S ได้ดังนี้

$$P_{I1} = \frac{P_T H_\alpha G_T G_R(\theta)}{r^\alpha} \quad (3.3)$$

โดยที่	P_{I1}	คือ	กำลังงานจากสัญญาณแทรกสอดในพื้นที่ที่ 1
	P_T	คือ	กำลังงานส่งของโนดที่เข้ามาแทรกสอด
	G_T	คือ	อัตราขยายของสายอากาศที่ส่งสัญญาณมาแทรกสอด
	$G_R(\theta)$	คือ	อัตราขยายของสายอากาศโนด S



รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมการหาคุโนดในเครือข่ายไร้สาย

การหาผลรวมกำลังงานแทรกสอดที่โนด S รับได้จากพื้นที่แทรกสอดจากพื้นที่ 1 จะเขียนได้ดังสมการที่ 2.22 อัตราขยายภาคส่งใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง ซึ่งใช้ค่าของอัตราขยายด้วยเงื่อนไขการแทรกสอดที่สูงที่สุด สำหรับการแทรกสอดของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางนั้น อัตราขยายของสายอากาศที่จำลองใช้การเฉลี่ยดังสมการที่ 2.17 (แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในอุดมคติ) ทุกทิศทางอัตราขยายจะมีขนาดที่เท่ากัน แต่ในกรณีวัดผลไม่สามารถจำลองทุกโนดในเครือข่ายไร้สายได้ ดังนั้น การประมาณค่าอัตราขยายจึงถูกกำหนดดังสมการที่ 2.17) สำหรับกำลังงานแทรกสอดพื้นที่ 2 โหนดได้รับข้อมูลตำแหน่งและข้อมูลทิศทางของการส่งข้อมูลของโนด S ถูกต้อง ดังนั้น อัตราขยายของสายอากาศในภาคส่งจึงคำนวณเฉพาะพหุคูณและพหุคูณดังสมการที่ 2.18 พื้นที่ที่ 3 ของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางนั้น กำลังงานแทรกสอดจะเท่ากับ 0 เนื่องจากอยู่ในขอบเขตการส่งข้อมูลของโนด S สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงาน

แบบมีทิศทางและแบบที่งานวิจัยนี้เสนอจะเป็นดังสมการที่ 2.23 เพื่อที่จะประเมิน $R_C(\emptyset)$ เราจะประเมินจากจำนวนโนดที่ใช้งาน $R_C(\emptyset)$ สามารถประเมินได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_C(\emptyset) = R[G_T G_R(\emptyset)]^\alpha \quad (3.4)$$

นอกจากนี้สำหรับกำลังงานของโนดเป้าหมายที่รับข้อมูลกับโนด S จะเท่ากับสมการต่อไปนี้

$$P_D = \frac{P_{TS} H_\alpha G_{tx} G_{rx}}{D^\alpha} \quad (3.5)$$

โดยที่	P_D	คือ	กำลังงานที่รับได้ของโนด S กับโนดเป้าหมาย
	P_{TS}	คือ	กำลังงานส่งจากโนดเป้าหมาย
	G_{tx}	คือ	อัตราขยายของสายอากาศที่โนด S
	G_{rx}	คือ	อัตราขยายของสายอากาศที่โนดส่ง
	D	คือ	ระยะทางระหว่างโนด S และโนดส่ง

ในงานวิจัยนี้โนด S จะสุ่มเลือกคุโนดภายในพื้นที่ที่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นระยะทางระหว่างโนดจะถูกอธิบายด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$D = \int_0^R \left(\int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi R_c r} r d\emptyset \right) dr \quad (3.6)$$

ที่ปลายสายอากาศแถวลำดับของโนดภาครับ นั้น อัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอด ($SINR$) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$SINR = \frac{P_D}{P_{I1} + P_{I2} + P_{I3} + P_N} \quad (3.7)$$

โดยที่	P_{I1}	คือ	กำลังงานแทรกสอดจากพื้นที่ที่ 1
	P_{I2}	คือ	กำลังงานแทรกสอดจากพื้นที่ที่ 2
	P_{I3}	คือ	กำลังงานแทรกสอดจากพื้นที่ที่ 3

อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งและภาครับสามารถประมาณได้จากกำลังงานที่อยู่ในครึ่งคลื่น ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางประมาณอัตราขยายของสายอากาศได้ดังนี้

$$G_{tx} = G_{rx} = G_A = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\phi_{3db}}{2}}^{\frac{\phi_{3db}}{2}} G(\phi) d\phi \quad (3.8)$$

โดยที่ G_A คือ อัตราขยายของสายอากาศ

$G(\phi)$ คือ อัตราขยายของสายอากาศในแต่ละมุม

กำหนดให้อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งและภาครับคือ G_{AT} และ G_{AR} เมื่อรวมสมการที่ (2.22) (2.23) และ (3.4-3.8) แล้วคุณิโคนที่สามารถทำงานที่พร้อมกันในเครือข่ายไร้สาย เขียนได้ดังสมการสมการที่ 3.9

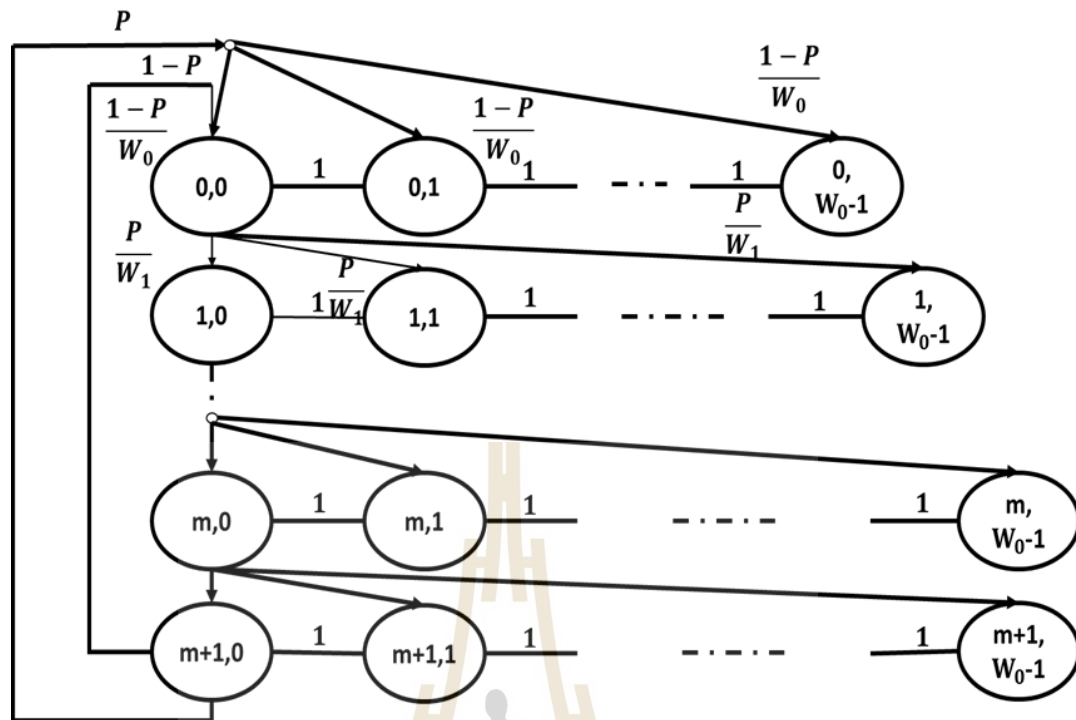
$$C_L = \frac{(2^\alpha G_{AT} G_{AR} - 1)}{SINR_{TH} R_c^\alpha (A+B)} \quad (3.9)$$

โดยที่ $SINR_{TH}$ คือ ค่าขีดแบ่งที่เครื่องส่ง นอกจากนี้ A และ B มีค่าดังต่อไปนี้

$$A = \frac{G_{TX} R_m}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_R^{R_m} G_F(\phi) r^{-\alpha} dr d\phi \quad (3.10)$$

$$B = \frac{\bar{G}_{TX} R_m}{\pi} \int_{\frac{\phi_{3db}}{2}}^{\frac{2\pi - \phi_{3db}}{2}} \int_{R_c(\phi)}^R \frac{G_F(\phi) r^{-\alpha}}{R_c^2(\phi)} dr d\phi \quad (3.11)$$

คุณิโคนที่สามารถส่งข้อมูลพร้อมกันได้ในงานวิจัยบทนี้จะบ่งบอกสมรรถนะของเครือข่ายไร้สายตามจำนวนของคุณิโคน แต่เพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต่างกันเทียบกับแบบอื่นนั้น ในหัวข้อถัดไปเราจะอภิปรายถึงพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์เครือข่ายไร้สายในภาพรวม



รูปที่ 3.7 แบบจำลอง Markov

3.4.2 ค่าวิสัยสามารถและความหน่วงของเครือข่ายไร้สาย

สำหรับเครือข่ายไร้สายค่าวิสัยสามารถคือ ปริมาณของข้อมูลที่สามารถส่งได้ในหนึ่งหน่วยเวลา ปริมาณข้อมูลเหล่านี้มาจากโนดใดก็ได้ ซึ่งขนาดของค่าวิสัยสามารถจะเป็นตัวบ่งบอกความสามารถของเครือข่ายไร้สาย ค่าวิสัยสามารถนั้นสามารถดูระหว่างอุปกรณ์หนึ่งคู่เพื่อวัดผลสำหรับเครือข่ายไร้สายขนาดใหญ่จำนวนโนดและทอโพลีมีจำนวนมาก ซึ่งมีความหลากหลายในการใช้งาน ดังนั้นการวัดโดยติดตั้งอุปกรณ์จึงเป็นไปได้ยากและมีความซับซ้อนในการกำหนดให้เกิดการส่งของโนดอย่างอิสระ ทำให้งานวิจัยนี้เลือกที่จะสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์เครือข่ายไร้สายด้วยจำนวนโนด ซึ่งยังคงรักษาผลกระทบจากแบบรูปการแผ่พลังงานไว้

ผลลัพธ์ที่ได้จากการหาโนดที่สามารถทำงานได้พร้อมกันในหัวข้อก่อนหน้านี้ โคนิดใช้เพื่อหาผลรวมของค่าวิสัยสามารถและความหน่วงของเครือข่ายไร้สายในสภาพแวดล้อมการส่งหลายช่วง ซึ่งเทคนิคการเข้าถึงเครือข่ายไร้สายด้วยโนดจำเป็นต้องใช้เฟรมที่สอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE 802.11 DCF ซึ่งใช้เฟรม RTS และเฟรม CTS ดังนั้นเฟรมดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในแบบจำลองนี้ แบบจำลองนี้จะมองข้ามการนับถอยหลังของตัวจับเวลาที่โนดต้นทาง โดยกำหนดให้ $s(t)$ และ $b(t)$ เป็นกระบวนการสุ่มของตัวจับเวลาและตัวนับถอยหลังที่เวลา t ดังนั้น เราสามารถเขียนกระบวนการสุ่มให้อยู่ในรูปของลำดับ 2 มิติได้ดังนี้คือ $\{s(t), b(t)\}$ ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลอง Markov เพื่ออธิบายการทำงานดังรูปที่ 3.7 กำหนดให้ m คือจำนวนมากที่สุดที่โนดจะส่งซ้ำ โดยใช้สำหรับกรณีที่

การส่งเดิมเกิดความผิดพลาด p คือ ความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของโนดในการส่งแล้วเกิดการชนกัน W_i คือ ขนาดของค่าการส่งซ้ำ ซึ่งจะเพิ่มขึ้น 2 เท่าทุกครั้งที่มีการส่งผิดพลาด ตัวจับเวลาจะเริ่มต้นนับตั้งแต่ 0 ถึง $2^m(W_0 - 1)$ ซึ่งสามารถเขียนความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลง (Transition Probability) ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{cases} P\{j, k | j, k + 1\} = 1, k \in (0, W_i - 2) j \in (0, m + 1) \\ P\{0, k | j, 0\} = \frac{1-p}{W_0}, k \in (0, W_0 - 1) j \in (0, m + 1) \\ P\{j, k | j - 1, 0\} = \frac{p}{W_i}, k \in (0, W_i - 1) j \in (1, m + 1) \\ P\{0, k | m + 1, 0\} = \frac{p}{W_0}, k \in (0, W_m - 1) \end{cases} \quad (3.12)$$

สำหรับเงื่อนไขการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของแบบจำลอง Markov สามารถเขียนเงื่อนไขได้ดังต่อไปนี้

$$b_{j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = j, b(t) = k\}, j \in (0, m + 1), k \in (0, W_i - 1) \quad (3.13)$$

สถานะของความน่าจะเป็นจะเขียนได้ดังสมการที่ 3.14

$$\begin{cases} b_{j,0} = P b_{j,-1,0}, & 0 < j \leq m + 1 \\ b_{j,0} = P^j b_{0,0}, & 0 \leq j \leq m + 1 \\ b_{0,0} = P b_{m+1,0} + (1 - P) \sum_{j=0}^{m+1} b_{j,0} \end{cases} \quad (3.14)$$

สามารถรวมเงื่อนไขและเขียนสมการใหม่ได้เป็นดังสมการที่ 3.15

$$\sum_{j=0}^{m+1} b_{j,0} = \left(\frac{1-p^{m+2}}{1-p} \right) b_{0,0} \quad (3.15)$$

สำหรับเงื่อนไขการส่งใหม่สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.16

$$b_{j,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{j,0}, 0 \leq j \leq m + 1, 0 \leq k < W_i - 1 \quad (3.16)$$

$b_{0,0}$ เขียนได้ดังสมการที่ 3.17

$$b_{0,0} = \frac{\frac{2}{W_0}}{\frac{(1-2P)^{m+1}}{(1-2P)} + \frac{2^m(p^{m+1}-p^{m+2})}{(1-P)} + \frac{1-p^{m+2}}{W_0(1-P)}} \quad (3.17)$$

กำหนดให้ τ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลของโนด เมื่อการรวมความน่าจะเป็นทั้งหมดตั้งแต่สมการที่ 3.12 ถึง 3.17 ทำให้สามารถเขียนความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลของโนดได้ดังสมการที่ 3.18

$$\tau = \frac{2((1-2p)(1-p^{m+2}))}{W_0(1-(2p)^{m+1})(1-p) + W_0 2^m (p^{m+1}-p^{m+2})(1-2p) + (1-2p)(1-p^{m+2})} \quad (3.18)$$

โดยที่ τ คือ ความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลของโนด

แบบจำลองนี้กำหนดเงื่อนไขของจำนวนโนดในเครือข่ายไร้สาย โดยจำนวนโนดในเครือข่ายไร้สายต้องมากกว่าจำนวนคุโนดที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายไร้สายอย่างน้อยสองเท่า ซึ่งความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลที่โนดอย่างน้อยหนึ่งครั้ง ความน่าจะเป็นที่การส่งข้อมูลประสบความสำเร็จ และความน่าจะเป็นที่ข้อมูลเกิดการชนกันรวมถึงข้อผิดพลาดอื่นที่ทำให้ข้อมูลที่ส่งไม่ประสบความสำเร็จสามารถเขียนได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$p_{TR} = \binom{n}{1} (1 - (1 - \tau)^n) \quad (3.19)$$

$$p_S = \frac{\sum_{j=1}^{C_L} \binom{n}{j} \tau^j (1-\tau)^{n-j}}{p_{TR}} \quad (3.20)$$

$$p_C = \frac{\sum_{j=C_L+1}^n \binom{n}{j} \tau^j (1-\tau)^{n-j}}{p_{TR}} \quad (3.21)$$

โดยที่ p_{TR} คือ ความน่าจะเป็นที่จะมีการส่งข้อมูลอย่างน้อยหนึ่งครั้ง
 p_S คือ ความน่าจะเป็นที่การส่งข้อมูลประสบความสำเร็จ
 p_C คือ ความน่าจะเป็นที่การส่งข้อมูลประสบความสำเร็จ
 n คือ จำนวนโนดทั้งหมดในเครือข่ายไร้สาย

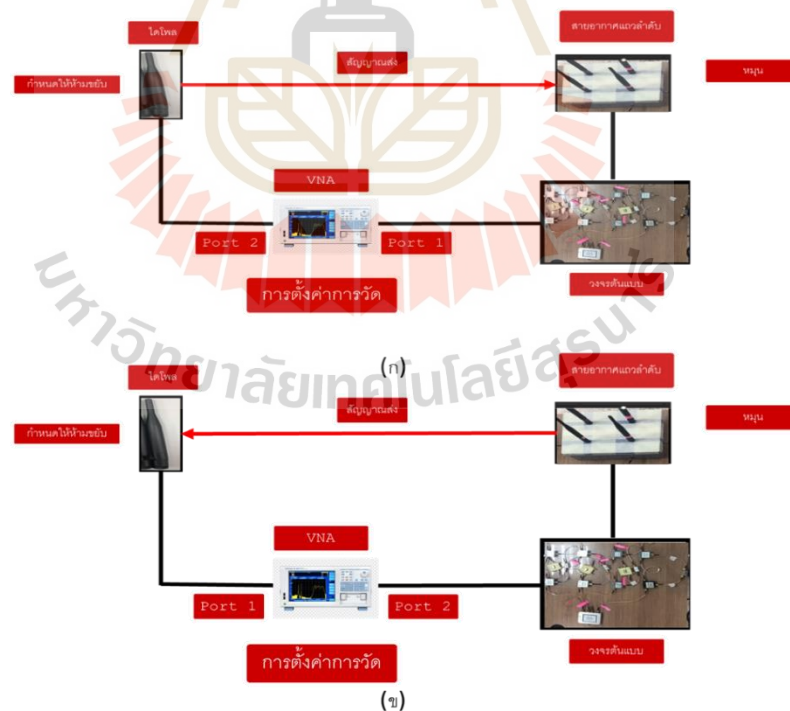
เราสามารถเขียนค่าวิสัยสามารถและความหน่วงของเครือข่ายไร้สายได้ดังสมการที่ 3.22 และ 3.23

$$T = \frac{p_{TR} p_S P_{size} B_r}{(1-p_{TR})\sigma + p_{TR} p_S T_S + p_{TR} p_C T_C} \quad (3.22)$$

$$D = \frac{\left(\frac{1}{p_{TR}} - 1\right)\sigma + p_S T_S + p_C T_C}{P_{size}} \quad (3.23)$$

โดยที่	T	คือ	ค่าวิสัยสามารถของเครือข่ายไร้สาย
	D	คือ	ความหน่วงของเครือข่ายไร้สาย
	P_{size}	คือ	ขนาดของข้อมูลสำหรับส่ง
	B_r	คือ	อัตราเร็วการส่งข้อมูล
	T_S	คือ	ระยะเวลาที่ส่งข้อมูลสำเร็จ
	T_C	คือ	ระยะเวลาที่ส่งข้อมูลล้มเหลว

ค่าวิสัยสามารถและความหน่วงนี้เป็นการพิจารณาภาพรวมของเครือข่ายไร้สายในการใช้งานพร้อมกัน ซึ่งมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของสายอากาศที่นำไปใช้ในเครือข่ายไร้สาย



รูปที่ 3.8 ไดอะแกรมการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน (ก) ภาคส่ง (ข) ภาครับ



รูปที่ 3.9 การทดสอบตัวต้นแบบในห้องปฏิบัติการ

3.5 การทดสอบอุปกรณ์

ในหัวข้อนี้เราจะอภิปรายการวัดผลของอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การวัดผลแบบรูปการแผ่พลังงานและการวัดผลค่าวิสัยสามารถจากสถานะการณที่กำหนด ในส่วนแรก คือ การวัดการส่งผ่านในห้องปฏิบัติ โดยการเก็บค่า S พารามิเตอร์เพื่อเก็บผลของแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานถูกวัดในระนาบสนามไฟฟ้า หลังจากนั้น จึงนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองในบทที่ 4 ในส่วนที่สองคือ การเก็บผลการส่งข้อมูลด้วยการติดตั้งตัวดักจับข้อมูลในการส่งระหว่างอุปกรณ์ โดยติดตั้งวงจรต้นแบบให้กับโนดกลาง

3.5.1 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรับและแบบส่ง

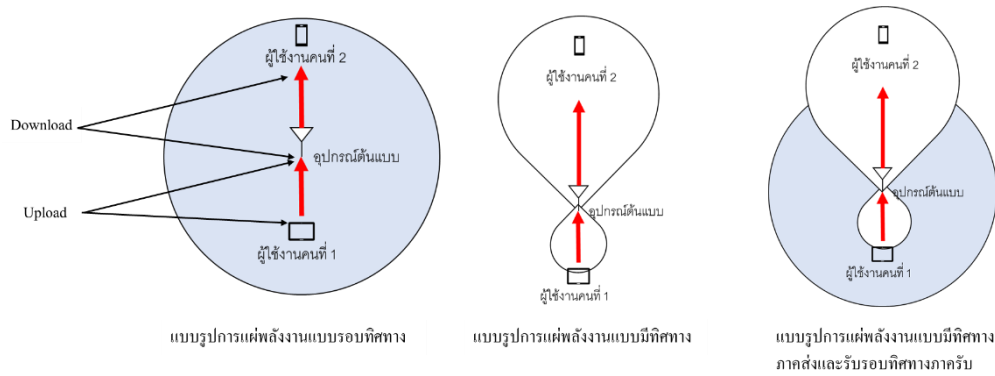
ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดวิธีการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรับและแบบส่ง โดยใช้สายอากาศแบบไดโพลจำนวน 1 ต้นเพื่อรอรับสัญญาณ ในการวัดเราหมุนสายอากาศที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อต้องการรับค่าในการส่ง ซึ่งถูกถ่วงน้ำหนักให้เป็นแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง ในขณะเดียวกันเพื่อวัดความสามารถในการรับของตัวต้นแบบ งานวิจัยนี้ยึดสายอากาศไดโพลให้อยู่กับที่ นอกจากนี้ ยังให้สายอากาศไดโพลส่งสัญญาณไปยังตัวต้นแบบ ซึ่งตัวต้นแบบทำการหมุนดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 การวัดผลแบบนี้จะทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานทั้ง 2 ภาค คือ ภาคการรับข้อมูลและภาคการส่งข้อมูล ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานทำงานได้พร้อมกัน หลังจากนั้น ผลการทดสอบจะถูกนำไปวิเคราะห์ในบทที่ 4

3.5.2 การวัดค่าวิสัยสามารถ

เพื่อทดสอบการทำงานของตัวต้นแบบในสภาพแวดล้อมจริง งานวิจัยนี้จึงได้เก็บข้อมูลค่าวิสัยสามารถ โดยมีการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 3.10 กำหนดให้สายอากาศเชื่อมต่อกับวงจรต้นแบบ ซึ่งวงจรต้นแบบทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับและส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานจำนวน 2 ผู้ใช้งาน ผู้ใช้งานถูกกำหนดให้มีการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายเดียวกันและส่งข้อมูลหากัน กำหนดให้ผู้ใช้งานคนที่ 1 เป็นผู้ส่งและผู้ใช้งานคนที่ 2 เป็นผู้รับ ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบผลการทดลองกับวงจรที่เชื่อมต่อกับสายอากาศแบบมีทิศทางและรอบทิศทางดังรูปที่ 3.11 จากรูปดังกล่าวการเก็บผลการทดลองแบ่งเป็น 3 กรณีคือ การเก็บผลการทดลองของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง กรณีนี้จะมีการใช้งานสายอากาศชุดเดียวกัน ซึ่งเป็นสายอากาศแบบแอมป์ดับ เมื่อผู้ใช้งานคนที่ 1 ส่งข้อมูลไปยังสายอากาศที่เชื่อมต่อกับวงจรต้นแบบ วงจรต้นแบบจะส่งข้อมูลต่อไปยังผู้ใช้งานคนที่ 2 ที่เป็นผู้รับ ซึ่งเราจะรู้ถึงค่าวิสัยสามารถที่ผู้ใช้คนที่ 1 ส่งในขณะเดียวกัน เราจะรู้ค่าวิสัยสามารถที่ผู้ใช้งานคนที่ 2 เป็นคนรับ ในกรณีที่ 2 คือ การทดสอบค่าวิสัยสามารถของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง การทดสอบจะใช้ลักษณะเหมือนกันกับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง แต่ผู้ส่งและผู้รับจะอยู่ในทิศทางพหุหลังและพหุหน้า สำหรับตัวต้นแบบที่ใช้แบบรูปการแผ่พลังงานทั้งสองแบบนี้ ผู้ใช้คนที่ 1 ส่งข้อมูลไปยังสายอากาศที่ต่อกับวงจรต้นแบบที่จะถูกรับด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง หลังจากนั้นวงจรต้นแบบจะใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางในการส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งานคนที่ 2 ด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง ซึ่งผลการทดสอบนี้จะถูกนำไปอภิปรายในบทที่ 4



รูปที่ 3.10 สถานการณ์ของการเก็บผลการทดลองของเครือข่ายไร้สาย



รูปที่ 3.11 ลักษณะการเก็บผลการทดลองตามแบบรูปการแบ่งพลังงาน (ก) แบบรอบทิศทาง (ข) แบบมีทิศทาง (ค) แบบรอบทิศทางในภาครับและมีทิศทางในภาคส่ง

3.6 สรุป

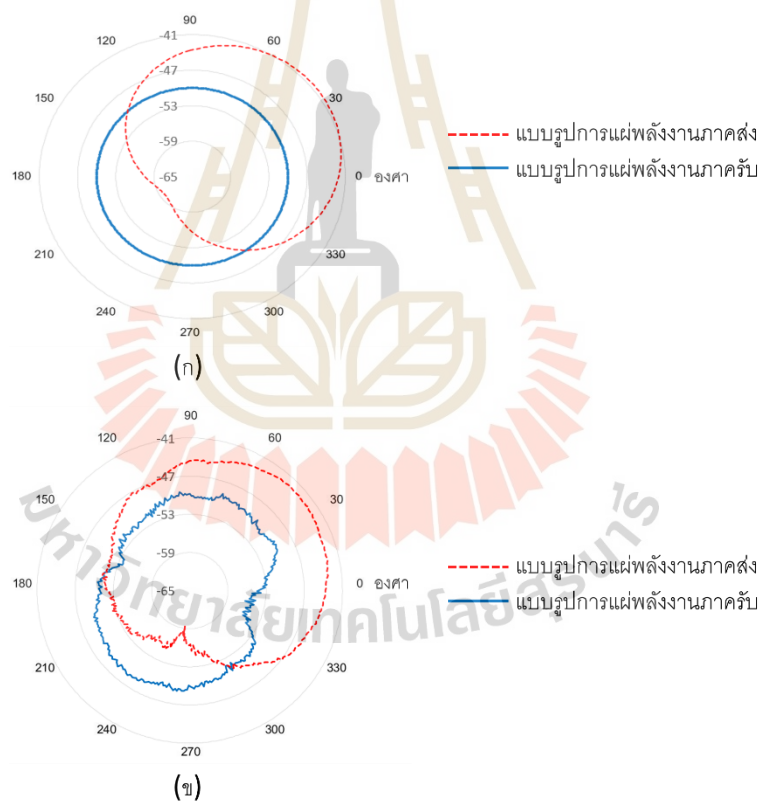
เนื้อหาในบทนี้นำเสนอวงจรต้นแบบสำหรับสร้างแบบรูปการแบ่งพลังงานที่มีความแตกต่างกันในภาครับและภาคส่ง ทั้งนี้ การรับและการส่งข้อมูลสามารถทำงานได้พร้อมกัน นอกจากนี้ เพื่อแสดงถึงความเป็นไปได้และแสดงถึงข้อดีของการใช้แบบรูปการแบ่งพลังงานที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ได้จำลองการทำงานของวงจรต้นแบบ จำลองการทำงานของวงจรที่มีแบบรูปการแบ่งพลังงานแบบที่ต่างกัน ซึ่งถูกใช้งานในเครือข่ายไร้สาย ตัวแปรที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้คือ จำนวนคิวโนดที่สามารถใช้งานได้พร้อมกันและค่าวิสัยสามารถที่เกิดจากแบบรูปการแบ่งพลังงานแต่ละแบบ ซึ่งช่วยในการประเมินเครือข่ายไร้สาย นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทดสอบการสร้างแบบรูปการแบ่งพลังงานที่แตกต่างกันจากอุปกรณ์ต้นแบบและเก็บผลการทดลองของแบบรูปการแบ่งพลังงานในภาครับและภาคส่ง ในงานวิจัยนี้ยังทดสอบการใช้งานจริง การทดสอบนี้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานแบบรูปการแบ่งพลังงานที่พร้อมกัน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 บทนำ

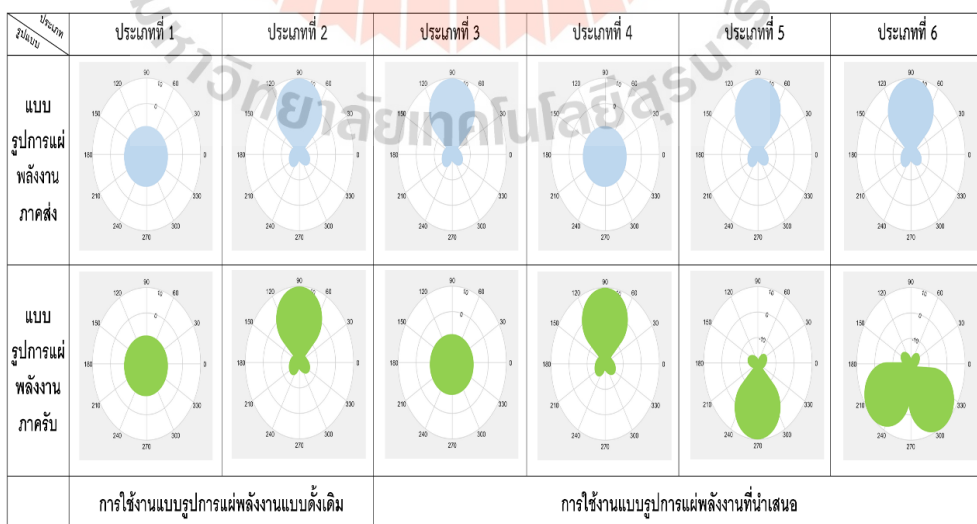
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองค่าถ่วงน้ำหนัก คูโนดในเครือข่ายไร้สาย ค่าวิสัยสามารถ ความหน่วง รวมผลจากการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ พร้อมทั้งอภิปรายผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในการรับและแบบมีทิศทางในการส่งในเวลาเดียวกัน ซึ่งนำไปสู่กระบวนการเพิ่มขีดจำกัดของเครือข่ายไร้สายโดยไม่จำเป็นต้องใช้ความถี่เพิ่มเติม



รูปที่ 4.1 แบบรูปการแผ่พลังงานตัวต้นแบบ ก) จากการจำลอง ข) จากการวัด

4.2 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานและผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน

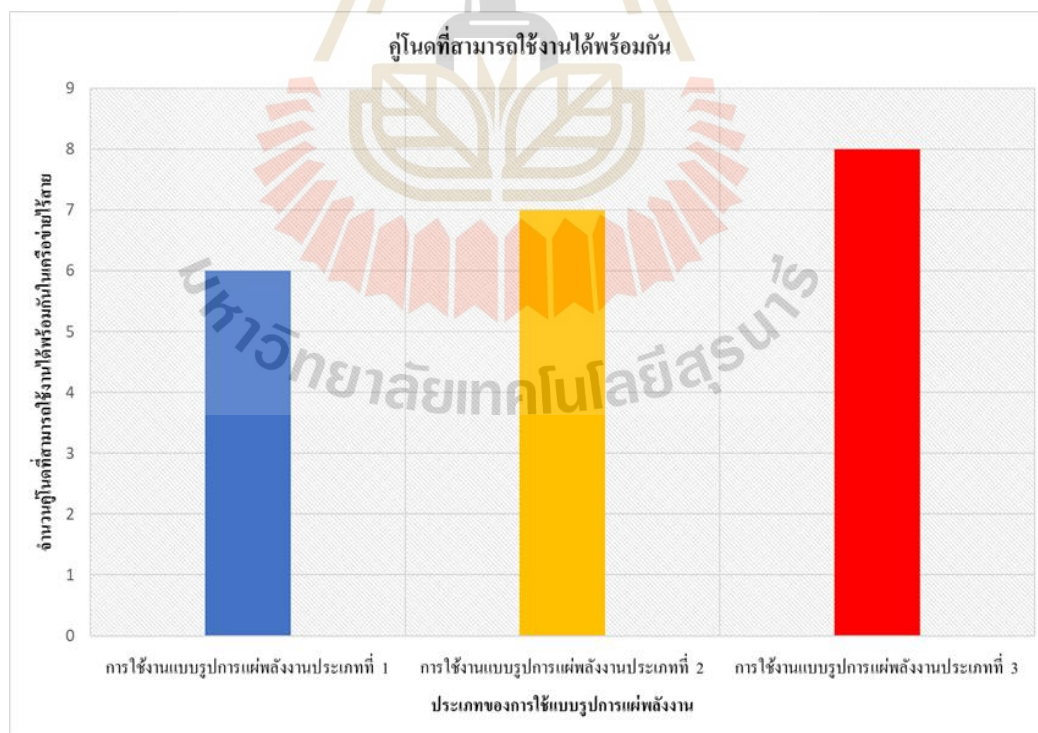
จากแบบจำลองค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้ทดสอบในบทที่ 3.3 เราได้จำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสำหรับภาครับและภาคส่ง โดยการใช้แอมพลิจูดในแต่ละทิศทางของการวัดผลจริงเข้ามาช่วยในการจำลอง ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จะถูกเปรียบเทียบการวัดผลจริง โดยรูปที่ 4.1 (ก) คือแบบรูปการแผ่พลังงานที่จำลองขึ้น รูปที่ 4.2 คือแบบรูปการแผ่พลังงานที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับแบบจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานในภาคส่ง (เส้นประสีแดง) มีลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง ซึ่งชี้ทิศไปยังมุม 45 องศา แบบรูปการแผ่พลังงานในภาครับ (เส้นสีน้ำเงินทึบ) มีลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง การจำลองและการทดสอบดังกล่าวพบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานในภาครับและภาคส่งค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ความแตกต่างระหว่างแบบรูปการแผ่พลังงานยังคงถูกแยกกันอย่างชัดเจน โดยการคำนวณกำลังงานสูงสุดในมุม 45 องศา สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางและกำลังงานสูงสุดจากทุกมุมสำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานเทียบกับมุมที่กำลังงานต่ำที่สุด สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางในภาครับมีขนาดของครึ่งลำคลื่นที่กว้างอยู่ที่ 117 องศา ความต่างของกำลังงานของภาคส่งอยู่ที่ 17 dB สำหรับภาครับแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทาง ความต่างกำลังงานของภาครับในแต่ละทิศทางไม่เกิน 6 dB ซึ่งเพียงพอสำหรับการแยกแบบรูปการแผ่พลังงานทั้ง 2 แบบ ผลการจำลองและการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากรณีที่ใช้ความถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานจะแตกต่างกันอย่างแน่นอน นอกจากนี้ แบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกันสามารถใช้งานแยกกันได้ ในกรณีที่พื้นที่การแผ่พลังงานไม่ซ้อนทับกัน เนื่องจากขณะที่ทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ ผู้วิจัยไม่ได้ปิดกั้นการส่งและรับสัญญาณแต่อย่างใด



รูปที่ 4.2 การใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบดั้งเดิมและแบบที่เสนอ

4.3 ผลการจำลองคิวโนด

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.2 เป็นการแสดงถึงความเป็นไปได้ที่เครือข่ายไร้สายสามารถใช้แบบรูปการแผ่พลังงานพร้อมกัน 2 แบบ สำหรับการส่งสัญญาณและรับสัญญาณ จากความเป็นไปได้ดังกล่าวงานวิจัยนี้ได้เสนอความเป็นไปได้ของแบบรูปการแผ่พลังงานไว้ดังรูปที่ 4.2 ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 คือ การใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบสื่อสารกันแบบดั้งเดิม ซึ่งสายอากาศที่ใช้จะเป็นสายอากาศแบบดั้งเดิมหรือแบบแถวลำดับ ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานจะเหมือนกันทั้งแบบรอบทิศทางและแบบมีทิศทาง ในขณะที่เดียวกันเมื่อทั้งสองประเภทนี้มีการใช้งานการรับสัญญาณอยู่นอดจะไม่สามารถใช้งานการส่งได้ เนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานมีลักษณะการซ้อนทับกัน ซึ่งเกิดจากการใช้สายอากาศตัวเดียวกัน การซ้อนทับกันของแบบรูปการแผ่พลังงานส่งผลกระทบต่อเกี่ยวกับการแทรกสอดกัน เนื่องจากความถี่ (ในกรณีที่ใช้ความถี่เดียวกัน) ดังนั้น การใช้งานจึงถูกกำหนดให้ใช้การสื่อสารใช้แบบ สลับเวลาใช้งาน ใช้งานหลายความถี่ การเข้ารหัส เป็นต้น จากผลการทดสอบและสิ่งทีงานวิจัยนี้ได้เสนอดังรูปที่ 4.2 โหนดสามารถใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกัน ในสำหรับภาครับและภาคส่งได้ ไม่ว่าจะเป็นในเวลาเดียวกันและความถี่เดียวกันก็ตาม การใช้งาน แบบรูปการแผ่พลังงานที่น่าเสนอนี้ยังเป็นตัวเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารไร้สาย

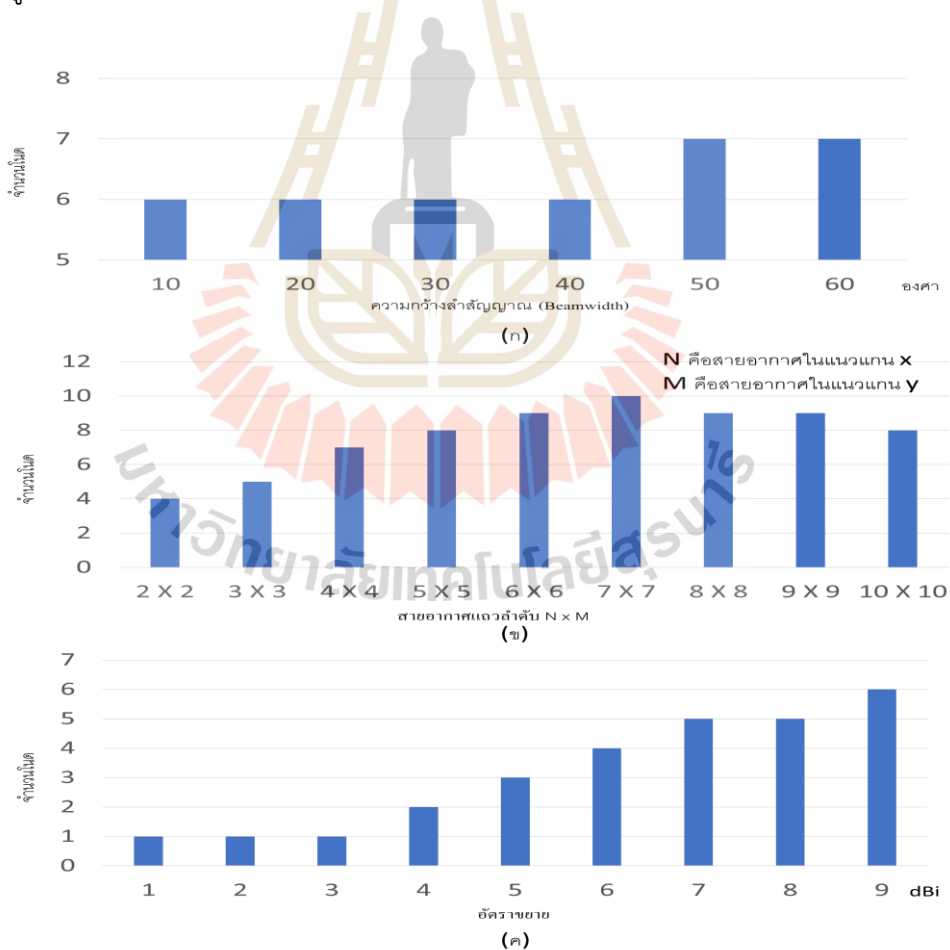


รูปที่ 4.3 จำนวนคิวโนดของแบบรูปการแผ่พลังงานที่สามารถใช้งานได้พร้อมกันในเครือข่ายไร้สาย

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองคุโนดที่สามารถทำงานได้พร้อมในเครือข่ายไร้สาย โดยอาศัยสมมุติฐานตามหัวข้อที่ 3.4.1 ทั้งนี้ เราได้จำลองคุโนดจาก 3 ประเภทการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานคือประเภทที่ 1 ประเภทที่ 2 ที่เป็นการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบดั้งเดิมและประเภทที่ 3 ซึ่งเป็นการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานที่งานวิจัยนี้นำเสนอ โดยงานวิจัยนี้นำผลวัดจากหัวข้อที่ 4.2 มาช่วยในการจำลอง จากรูปที่ 4.3 คือ คุโนดที่สามารถทำงานได้พร้อมกันในเครือข่ายไร้สายตามประเภทดังนี้ สำหรับการใช้งานประเภทที่ 1 มีจำนวน 6 คุโนด คุโนดเหล่านี้ถูกจำลองโดยอ้างอิงจากการสุ่มโครงสร้างการสื่อสาร ในขณะที่ 6 คุโนดนี้ทำงานอยู่นั้นคุโนดอื่นจะไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป (ในกรณีที่ทำงานต่อประสิทธิภาพโดยรวมจะลดลง) การจำลองนี้คือ ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้สำหรับการใช้งานเพื่อการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพที่สุดสำหรับประเภทที่ 1 แล้ว (จำนวนโนดในเครือข่ายไร้สายขนาดของระยะทางการสื่อสารและค่าที่เกี่ยวข้องจะถูกกำหนดในการจำลอง) สำหรับการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 2 มีจำนวนคุโนดที่สามารถใช้งานได้พร้อมกันเท่ากับ 7 คุโนดถึงแม้ว่าอัตราขยายของสายอากาศในทิศทางเป้าหมายของโนดจะสูงกว่าการใช้งานแบบประเภทที่ 1 ก็ตาม แต่พื้นที่การใช้งานของโนดมีขนาดลดลง ทำให้โนดข้างเคียงอาจพลาดโอกาสในการติดต่อสื่อสารกับโนดเป้าหมายและเสียเวลาในการติดต่อกับโนดอื่นต่อไป ปกติแล้วการส่งข้อมูลมีโอกาที่จะเกิดข้อผิดพลาดในการส่งอยู่แล้ว อย่างไรก็ตาม โหนดข้างเคียงที่ควรจะได้ส่งข้อมูลไปยังโนดเป้าหมายที่มีระยะทางที่ใกล้ที่สุด ต้องส่งข้อมูลไปยังโนดที่ระยะทางที่ไกลขึ้น เนื่องจากโนดใกล้ไม่อยู่ในสถานะว่าง ทำให้การส่งข้อมูลมีโอกาสผิดพลาดเพิ่มมากขึ้นและโนดข้างเคียงอาจจะกลายเป็นตัวหน่วงประสิทธิภาพของการสื่อสารในเครือข่ายไร้สายจากข้อผิดพลาดข้างต้น คุโนดที่ทำงานได้พร้อมกันในประเภทที่ 3 มีขนาดเท่ากับ 8 คุโนด ซึ่งมีขนาดที่สูงกว่าประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 เนื่องจากความยืดหยุ่นของการใช้งาน ลักษณะของการใช้งานประเภทที่ 3 เป็นการดึงข้อดีของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบทิศทางเพื่อใช้ในการส่ง ในขณะเดียวกันโนดยังเปิดรับผู้ใช้งานหรือโนดอื่นเข้ามาในเครือข่ายไร้สายด้วย ซึ่งเป็นข้อดีของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในด้านพื้นที่ให้บริการ

งานวิจัยนี้ได้จำลองพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศและศึกษาผลกระทบดังนี้ คือ ความกว้างลำสัญญาณ (Beam width) จำนวนสายอากาศแถวลำดับที่ช่วยในการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงาน และอัตราขยายของสายอากาศดังรูปที่ 4.4 ในรูปที่ 4.4 (ก) เป็นการจำลองความกว้างลำสัญญาณ ตั้งแต่ 10 องศาถึง 60 องศา ที่ความกว้างลำสัญญาณ 10 องศา ถึง 40 องศา จำนวนโนดในเครือข่ายไร้สายสามารถทำงานได้พร้อมกัน 6 คุโนด ซึ่งเพิ่มขึ้นมาเป็น 7 คุโนดที่ 50 องศา ถึง 60 องศา ผลการจำลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าขนาดของความกว้างลำสัญญาณส่งผลให้โนดในเครือข่ายไร้สายสามารถรองรับผู้ใช้งานได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่การให้บริการเพิ่มขึ้น ในรูปที่ 4.4 (ข) เป็นการจำลองจำนวนสายอากาศแบบแถวลำดับที่เพิ่มจำนวนสายอากาศขึ้น จากการจำลองแสดงให้เห็น

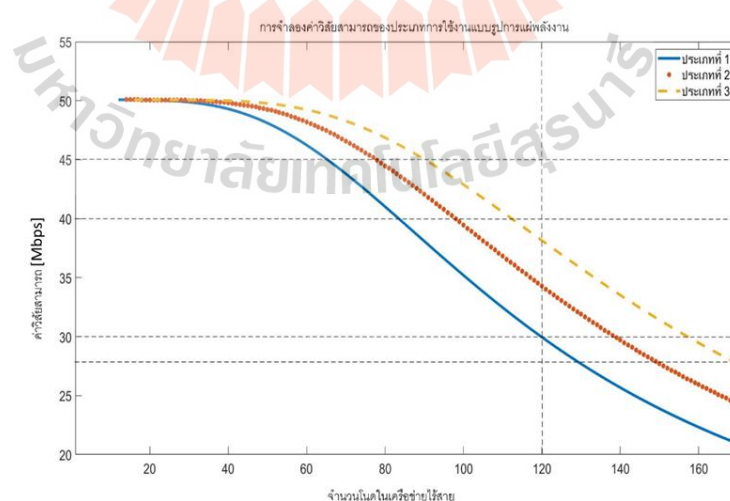
เห็นว่าขนาดของสายอากาศแถวลำดับที่เพิ่มจำนวนขึ้นส่งผลให้โนดในเครือข่ายสามารถรองรับผู้ใช้งานได้เพิ่มขึ้น แต่ที่จำนวนสายอากาศแถวลำดับ 8×8 และมากกว่านี้กลับถูกลดทอนจำนวนโนดที่สามารถรองรับได้ลง เนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานจะมีลักษณะของพื้นที่การทำงานที่มากขึ้นและทำให้เกิดพูล้างมากขึ้น ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับนี้จะกลายเป็นสัญญาณแทรกสอดโนดอื่น โดยจะสอดคล้องกับรูปที่ 4.4 (ก) ในกรณีที่แบบรูปการแผ่พลังงานมีความกว้างลำสัญญาณมากขึ้นจะเป็นการแลกเปลี่ยนข้อดีของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางกับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง ซึ่งอาจเกิดเป็นสัญญาณแทรกสอดที่รุนแรงต่อโนดข้างเคียง ในรูปที่ 4.4 (ค) คือ การจำลองอัตราขยายของสายอากาศในคู่การสื่อสาร จากการจำลองแสดงให้เห็นว่ายิ่งอัตราขยายมีขนาดที่สูงขึ้นจำนวนโนดที่เครือข่ายไร้สายสามารถรองรับได้ก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยจะคล้ายกับอัตราส่วนพูนหน้าและพูล้าง เช่น การที่อัตราขยายของสายอากาศในทิศทางที่ต้องการเพิ่มขึ้น ทำให้สัญญาณส่งหรือสัญญาณรับในมุมเป้าหมายมีคุณภาพที่ดีขึ้น ซึ่งมุมโดยรอบมีขนาดของอัตราขยายเท่าเดิม ดังนั้นจำนวนโนดในเครือข่ายไร้สายจึงเพิ่มขึ้น



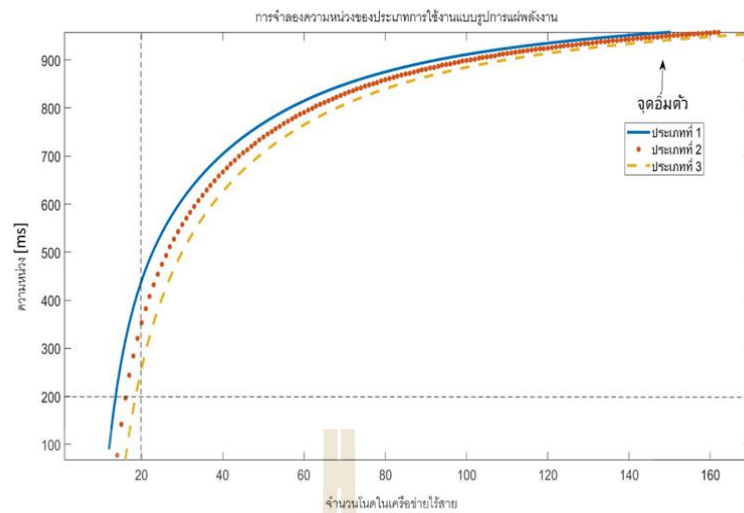
รูปที่ 4.4 การจำลองโนดกับ (ก) ความกว้างลำสัญญาณ (ข) จำนวนสายอากาศแถวลำดับ (ค) อัตราขยาย

4.4 ผลการจำลองค่าวิสัยสามารถและความหน่วง

สำหรับเครือข่ายไร้สายการประเมินเครือข่ายที่นิยมที่สุดมักจะใช้แบบจำลอง นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่มักจะถูกประเมินคือ ค่าวิสัยสามารถและความหน่วง ซึ่งหัวข้อนี้จำลองค่าวิสัยสามารถและความหน่วงของเครือข่ายไร้สายจากแบบจำลองบทที่ 3.4.2 แบบจำลองได้กำหนดค่าวิสัยสามารถสูงสุดที่สามารถใช้งานได้อยู่ที่ 54 Mbps ซึ่งเป็นการกำหนดของชั้นกายภาพ โดยถือว่าเป็นความเร็วที่สายอากาศสามารถส่งข้อมูลได้สูงสุดในแบบจำลอง แนวนวมของค่าวิสัยสามารถจะมีขนาดที่ลดลงเมื่อคูนอดมีขนาดมากเกินกว่าคูนอดที่เหมาะสมสำหรับสื่อสารพร้อมกันอย่างมีประสิทธิภาพจากบทที่ 4.3 การใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 1 ประเภทที่ 2 และประเภทที่ 3 จะมีขนาดค่าวิสัยสามารถเริ่มต้นที่เท่ากัน ประเภทที่ 1 จะมีขนาดค่าวิสัยสามารถที่น้อยที่สุดและรองรับโหนดได้น้อยที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่าวิสัยสามารถที่เท่ากันกับประเภทอื่น สำหรับประเภทที่ 3 จะมีค่าวิสัยสามารถที่มากที่สุดและสามารถรองรับจำนวนโหนดในเครือข่ายไร้สายได้มากที่สุด นอกจากนี้ความสามารถในการส่งข้อมูลของการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแต่ละประเภทนี้ สรุปได้ว่าการหันมาใช้แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3 จะดีกว่าประเภทที่ 1 ที่ 27.379 % และดีกว่าประเภทที่ 2 อยู่ที่ 11.377 % เมื่อเทียบจำนวนโหนดที่ 120 โหนด ในรูปที่ 4.4 ความหน่วงที่เกิดขึ้นในเครือข่ายไร้สายถูกจำลองเทียบกับจำนวนโหนด ความหน่วงที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นเท่ากันที่ 0 วินาทีและจะเพิ่มไปจนถึงจุดอิมพัท ซึ่งจะเป็นจุดที่การส่งข้อมูลในเครือข่ายไร้สายโดยรวมต่ำมาก สำหรับการันใช้แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3 ดีกว่าประเภทที่ 1 ที่ 70.313 % และดีกว่าประเภทที่ 2 ที่ 36.49 % ที่จำนวนโหนดเท่ากับ 20 โหนด อย่างไรก็ตาม ในกรณีจำนวนโหนดมากขึ้นความแตกต่างของความหน่วงจะลดลง

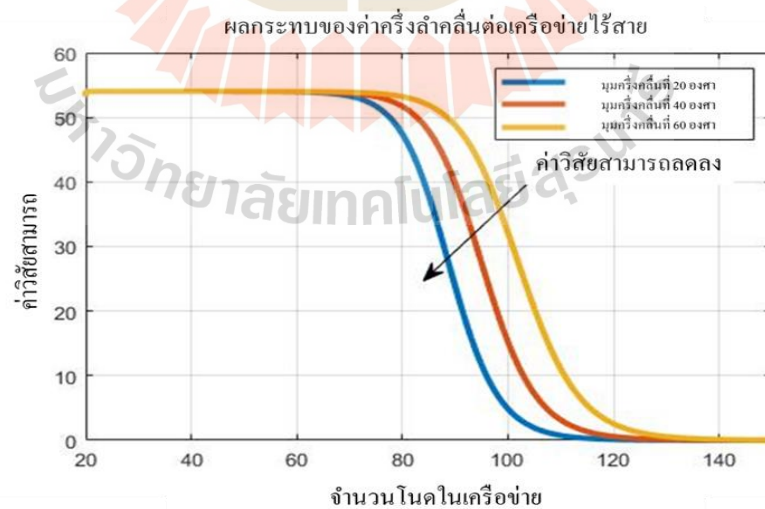


รูปที่ 4.5 ผลจำลองค่าวิสัยสามารถในเครือข่ายไร้สาย



รูปที่ 4.6 ผลจำลองความหน่วงในเครือข่ายไร้สาย

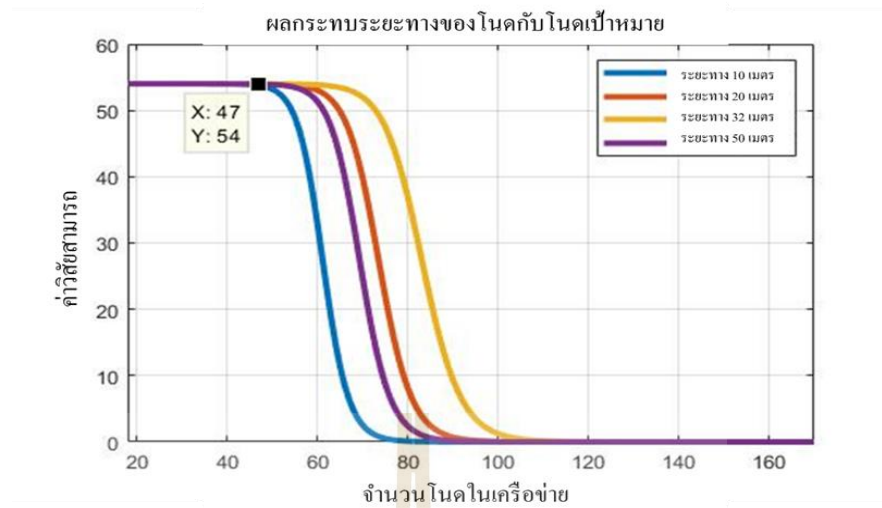
ผลจากการจำลองในหัวข้อนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3 ช่วยทำให้เครือข่ายไร้สายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 เนื่องจากความยืดหยุ่นในการใช้งานของประเภทที่ 3 อย่างไรก็ตาม งานวิจัยชิ้นนี้เป็น การช่วยให้เครือข่ายไร้สายมีตัวเลือกสำหรับใช้งานที่มากขึ้น เพราะในบางสถานการณ์แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ก็เพียงพอต่อความต้องการของเครือข่ายไร้สาย



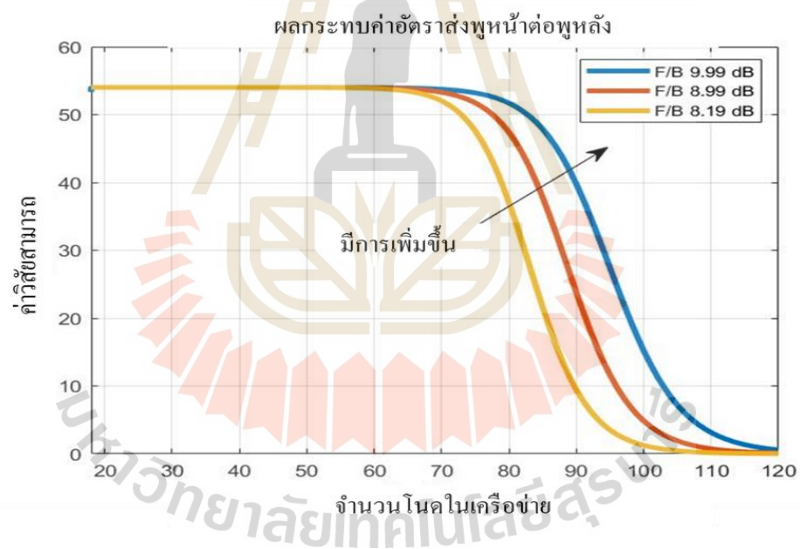
รูปที่ 4.7 ผลกระทบจากค่าครึ่งลำคลื่นต่อเครือข่ายไร้สาย

4.5 ผลกระทบของแบบรูปการแผ่พลังงานต่อเครือข่ายไร้สาย

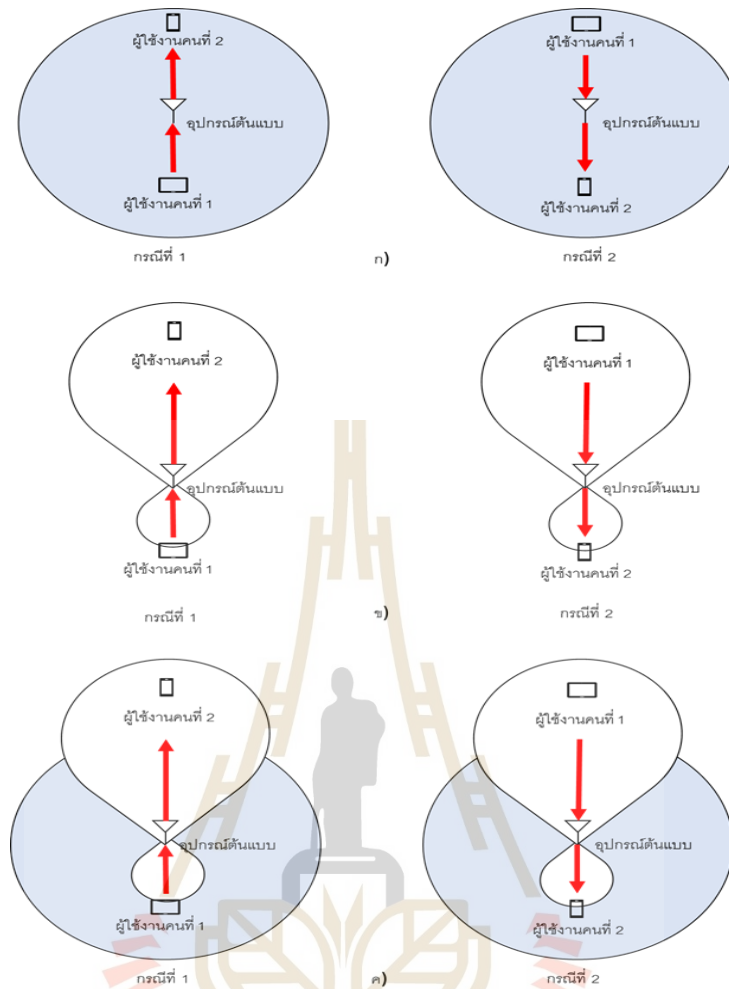
แบบรูปการแผ่พลังงานนอกจากจะเป็นสิ่งเปรียบเทียบความสามารถของสายอากาศ ยังมีผลกระทบที่สามารถนำไปเปรียบเทียบแนวทางการพัฒนาสายอากาศได้อีกด้วย ในหัวข้อนี้เราได้จำลองผลกระทบของแบบรูปการแผ่พลังงานจากแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ช่วยให้เครือข่ายไร้สายมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่ามุมครึ่งลำคลื่นที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลดีต่อเครือข่ายไร้สาย เนื่องจากจำนวนโนดที่มุมครึ่งลำคลื่น 60 องศารองรับโนดได้มากกว่ามุมที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ยิ่งมุมครึ่งลำคลื่นกว้างเท่าไรก็จะไปเป็นสัญญาณแทรกสอดกับโนดอื่นมากขึ้นตาม จากรูปที่ 4.8 เป็นผลที่ยืนยันว่าการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานมีจุดอิมพัลส์ งานวิจัยนี้ได้ใช้ระยะทาง 3 ระยะทางคือ 10 เมตร 20 เมตร 32 เมตร และ 50 เมตร ในการจำลองที่ระยะทาง 10 เมตร 20 เมตร โดยโนดมีช่วงของการสื่อสารที่ค่อนข้างสั้น ดังนั้นจำนวนโนดที่สามารถใช้งานทอพอโลยีได้มีน้อยจึงทำให้ค่าวิสัยความสามารถของเครือข่ายมีขนาดที่ต่ำ ในขณะที่ระยะทางที่ระยะทางที่โนดสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ที่ 50 เมตรโนดมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารกันได้หลากหลายยิ่งขึ้น ความยืดหยุ่นในการเลือกใช้งานโนดเชื่อมต่อก็มากขึ้นตาม อย่างไรก็ตาม การแทรกสอดที่เกิดขึ้นก็เพิ่มขึ้นตามด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพของเครือข่ายไร้สายจึงลดลง ที่ระยะทางที่ 32 เมตร เครือข่ายไร้สายมีสามารถรองรับโนดในเครือข่ายได้มากที่สุด ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนระหว่างขนาดความครอบคลุมของแบบรูปการแผ่พลังงานและสัญญาณแทรกสอดจากโนดอื่น พารามิเตอร์สุดท้ายในการจำลองคืออัตราส่วนพู่หน้าต่อพู่หลัง ซึ่งปกติแล้วเป็นตัวบอกประสิทธิภาพของสายอากาศแบบมีทิศทางว่าจะมีอัตราขยายในมุมเป้าหมายดีหรือไม่ จากรูปที่ 4.9 เราพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนพู่หน้าต่อพู่หลังให้กับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางนั้นส่งผลในทางบวกต่อเครือข่ายไร้สาย ความสามารถในการรองรับโนดในเครือข่ายไร้สายจะดีขึ้นและรองรับโนดได้มากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.8 ผลกระทบของระยะทางระหว่างโน้ตต่อเครื่องข่ายไร้สาย



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของอัตราส่วนพหูหน้าต่อพหูหลัง



รูปที่ 4.10 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ก) ประเภทที่ 1 ข) ประเภทที่ 2 ค) ประเภทที่ 3

4.6 การวัดผลแบบโนดต่อโนด

เพื่อสร้างความมั่นใจว่าการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3 มีความสามารถในการทำงานที่ดีกว่าประเภทอื่น งานวิจัยนี้จึงทดสอบค่าวิสัยสามารถจากการจำลองสถานการณ์ โดยอุปกรณ์ต้นแบบได้ถูกจำลองตามบทที่ 3.5.2 การวัดแต่ละประเภทของการใช้งานสายอากาศจะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ การวัดแยกกรณีและการวัดพารามิเตอร์ พารามิเตอร์ที่วัดมี 2 พารามิเตอร์คือ ค่าดาวน์โหลด (Download) และค่าอัปโหลด (Upload) รูปที่ 4.10 (ก) แสดงกรณีวัดพารามิเตอร์ของการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 1 การดาวน์โหลดวัดจากผู้ที่ทำการรับข้อมูลและการอัปโหลดวัดจากผู้ที่ทำการส่งข้อมูล ซึ่งใช้อุปกรณ์จับสัญญาณในการระบุว่ามีปริมาณของค่าวิสัยสามารถ ผลของการวัดการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทนี้ได้แสดงในตารางที่ 4.1 การดาวน์โหลดและการอัปโหลดจากทั้ง 2 กรณีนั้นมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากแบบรูป

การแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางนั้นทุกทิศทางมีขนาดของอัตราขยายใกล้เคียงกัน ค่าเฉลี่ยการดาวน์โหลดและอัปโหลดของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 อยู่ที่ 2.0463 Mbps และ 1.8245 Mbps

ในขณะเดียวกัน การทดสอบของประเภทที่ 2 ใช้มุมที่อยู่ในพูหน้าและพูลังของแบบรูปการแผ่พลังงาน เพื่อทดสอบว่าการใช้งานประเภทที่ 2 จะดีกว่าประเภทที่ 1 หรือไม่ หากผู้รับหรือผู้ส่งอยู่ในพูที่มีอัตราขยายที่แ่ดงรูปที่ 4.10 (ข) ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบประเภทที่ 2 มีค่าวิสัยสมารถที่มีความใกล้เคียงกับประเภทที่ 1 และยังคงมากกว่าเล็กน้อย ซึ่งตรงกับผลการจำลองคูนดที่แบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทางนั้นจะช่วยให้เครือข่ายไร้สายสามารถรองรับโนดดีกว่าเพียงเล็กน้อย สำหรับกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ผลการทดลองในด้านของความเร็วจะอยู่ที่ 2.0311 Mbps และ 2.0572 Mbps (ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 ใช้สายอากาศแบบแถวลำดับ ดังนั้น ผลของอัตราขยายจะมีความใกล้เคียงกัน) สำหรับการใชแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3 วัดในลักษณะเดียวกันกับลักษณะที่ 2 อย่างไรก็ตาม ในภาครับแบบรูปการแผ่พลังงานที่อุปกรณ์ต้นแบบใช้จะมีลักษณะแบบรอบทิศทางดังรูปที่ 4.10 (ค) ซึ่งจากผลการทดสอบผลรวมของความเร็วในการส่งข้อมูลของทั้ง 2 กรณีนั้นอยู่ที่ 2.6218 Mbps และ 2.5084 Mbps ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งดีกว่าประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการใช้งานอุปกรณ์ต้นแบบสามารถทำงานได้จริงและยังมีส่วนช่วยในการส่งข้อมูลแบบโนดต่อโนดอีกด้วย ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกให้การพัฒนาเครือข่ายไร้สายได้ สาเหตุที่การใช้แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3 มีการอัปโหลดและดาวน์โหลดที่ดีกว่านั้น เนื่องมาจากอัตราขยายที่ดีกว่าในการรับและส่งข้อมูล ผลรวมภาครับและภาคส่งสำหรับกรณีที่ 1 นั้น ประเภทที่ 3 จะดีกว่าประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 อยู่ที่ 28.124% และ 29.83% กรณีที่ 2 อยู่ที่ 37.484% และ 21.933%

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 1

เวลา	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2	
	ดาวน์โหลด (Mbps)	อัปโหลด (Mbps)	ดาวน์โหลด (Mbps)	อัปโหลด (Mbps)
1	1.115	1.125	1.013	0.887
2	1.292	0.925	0.951	0.936
3	1.144	0.895	0.949	0.885
4	1.115	0.795	0.995	0.776
5	1.061	0.958	0.914	1.008
6	1.197	0.966	0.993	0.821
7	1.078	0.808	0.916	0.785
8	1.188	0.964	0.925	0.963
9	0.914	0.848	0.994	0.815
10	1.121	0.954	0.996	0.723
	11.225	9.238	9.646	8.599
ค่าเฉลี่ย	1.1225	0.9238	0.9646	0.8599
ผลรวมความเร็ว	2.0463		1.8245	

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 2

เวลา	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2	
	ดาวน์โหลด (Mbps)	อัปโหลด (Mbps)	ดาวน์โหลด (Mbps)	อัปโหลด (Mbps)
1	1.339	1.255	1.441	1.387
2	1.318	1.136	1.592	1.451
3	1.318	1.165	1.345	1.229
4	1.492	1.333	1.323	1.598
5	1.502	1.102	1.3	1.19
6	1.509	1.008	1.334	1.173
7	1.573	1.064	1.258	1.103
8	1.493	1.118	1.118	1.102
9	1.547	1.31	0.986	0.934
10	1.534	1.102	1.188	1.032
	14.625	11.593	12.885	12.199
ค่าเฉลี่ย	1.4625	1.1593	1.2885	1.2199
ผลรวมความเร็ว	2.6218		2.5084	

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3

เวลา	กรณีที่ 1		กรณีที่ 2	
	ดาวน์โหลด (Mbps)	อัปโหลด (Mbps)	ดาวน์โหลด (Mbps)	อัปโหลด (Mbps)
1	0.998	0.688	0.988	0.723
2	1.143	0.831	1.11	0.831
3	1.141	0.954	1.103	1.05
4	1.005	0.881	1.005	0.935
5	1.07	1.009	1.042	1.009
6	1.107	1.1	1.126	1.16
7	1.074	1.132	1.274	1.03
8	0.938	0.973	1.012	0.992
9	1.064	0.979	0.991	0.979
10	0.991	1.268	0.989	1.15
	10.496	9.815	10.496	9.815
ค่าเฉลี่ย	1.0496	0.9815	1.0496	0.9932
ผลรวมความเร็ว	2.0311		2.0572	

4.7 สรุป

จากผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างแบบรูปการแผ่พลังงานพร้อมกันนั้น ส่วนของการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์สามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานได้พร้อมกัน ในส่วนของการประเมินเครือข่ายไร้สายเมื่อใช้แบบรูปการแผ่พลังงานในลักษณะ 2 แบบพร้อมกันจะส่งผลให้ค่าวิสัยสามารถดีกว่าการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบเดียว และดีกว่าแบบรูปการแผ่พลังงานรอบทิศทางและมีทิศทางอยู่ที่ 27.379 % และ 11.377 % สำหรับการจำลองปริมาณความหน่วงในเครือข่ายไร้สายที่มีจำนวนโหนดน้อยแสดงผลที่ชัดกว่าจำนวนโหนดที่มีจำนวนมาก เนื่องจากเมื่อปริมาณของจำนวนโหนดในเครือข่ายไร้สายเพิ่มขึ้นจนเกินขีดจำกัด โหนดจึง

ไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้นได้อีกต่อไป ซึ่งเรียกว่าจุดอิ่มตัว ที่ปริมาณโหลดที่ 20 โหนดนั้น การใช้แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 3 จะดีกว่าประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 อยู่ที่ 70.313 % และ 36.49% เพื่อเน้นย้ำถึงความเป็นไปได้ในการใช้งาน งานวิจัยนี้ได้สร้างสภาวะแวดล้อมในการวัดค่าวิสัยสามารถแบบโหนดต่อโหนด ผลการทดสอบพบว่าการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 มีความใกล้เคียงกัน แต่ประเภทที่ 2 จะดีกว่าเล็กน้อย สำหรับประเภทที่ 3 เป็นการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานพร้อมกัน ซึ่งมีค่าวิสัยสามารถที่ดีกว่าทั้ง 2 ประเภท โดยนำไปสู่การพัฒนาขีดจำกัดและเป็นทางเลือกสำหรับใช้งานในเครือข่ายไร้สาย

นอกจากผลลัพธ์ในแง่ความเป็นไปได้ที่โหนดสามารถใช้แบบรูปการแผ่พลังงานพร้อมกันแล้ว งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบที่พ่วงมากับแบบรูปการแผ่พลังงานที่กระทบต่อเครือข่ายไร้สาย ซึ่งสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดจาก 3 พารามิเตอร์ที่ได้ทดสอบคือ อัตราส่วนพู่หน้าต่อพู่หลัง ซึ่งส่งผลในการเพิ่มค่าวิสัยสามารถและจำนวนโหนดในเครือข่ายไร้สายโดยรวม นอกจากนี้ จากการจำลองผลกระทบของความกว้างลำสัญญาณ จำนวนสายอากาศแถวลำดับที่เพิ่มขึ้น และอัตราขยาย พบว่าในกรณีที่ความกว้างลำสัญญาณไม่กว้างจนทำให้การใช้งานเชิงพื้นที่ลดลงจะทำให้เครือข่ายไร้สายสามารถรองรับผู้ใช้งานได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าอัตราขยายที่พู่หลังของแบบรูปการแผ่พลังงานเติบโตมากกว่าพู่หน้าจะทำให้โหนดสร้างสัญญาณแทรกสอดไปยังโหนดข้างเคียงและเป็นการลดสมรรถนะของเครือข่ายไร้สาย นอกจากนี้ประโยชน์ในการเพิ่มสมรรถนะของเครือข่ายไร้สายที่งานวิจัยนี้เสนอแล้ว ข้อได้เปรียบที่สำคัญของงานวิจัยนี้คือ อุปกรณ์ที่ผ่านการทดสอบสามารถติดตั้งที่โหนดของเครือข่ายไร้สายได้ โดยไม่ต้องปรับปรุงโปรโตคอล ไม่ต้องปรับปรุงขั้นตอนการเข้าถึงเครือข่ายไร้สาย และไม่ต้องปรับปรุงอุปกรณ์เดิมที่ติดตั้งไว้แล้ว ดังนั้นการใช้งานอุปกรณ์ต้นแบบในงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มสมรรถนะของเครือข่ายไร้สายจึงง่าย ไม่ซับซ้อน และทำงานได้จริง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสื่อสารไร้สายเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญสำหรับมนุษย์ เนื่องจากทำหน้าที่เป็นตัวกลางการแลกเปลี่ยนข้อมูล ถ้าหากการสื่อสารไร้สายไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานในเครือข่ายได้เพียงพอต่อความต้องการอาจส่งผลให้ภาคธุรกิจเกิดความเสียหาย นอกจากนี้ เครือข่ายที่รองรับผู้ใช้งานได้ไม่เพียงพอยังส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการจัดการปัญหาเกี่ยวกับจำนวนอุปกรณ์ที่สามารถเข้าใช้งานที่จะเพิ่มสูงขึ้น อุปกรณ์ที่เข้าใช้งานพร้อมกันในเครือข่ายไร้สายมักจะประสบปัญหาการส่งข้อมูลที่ผิดพลาด ซึ่งเกิดจากโหนดไม่สามารถรับรู้เฟรมการสื่อสารที่ถูกต้อง ทำให้ผู้ส่งกลายเป็นสัญญาณแทรกสอดต่อเครือข่ายไร้สาย หนึ่งในพารามิเตอร์ของการสื่อสารที่จำเป็นคือ แบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งแบ่งออก 2 แบบหลักได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางและแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง อย่างไรก็ตาม วิธีการการส่งข้อมูลและรับข้อมูลมักใช้เวลาที่ต่างกัน ความถี่ที่ต่างกัน ขนาดของความกว้างแถบความถี่ที่มากขึ้น และประเภทการเข้ารหัสที่ซับซ้อน ทั้งนี้เพื่อป้องกันการปนกันและป้องกันการแทรกสอดของสัญญาณระหว่างภาครับและภาคส่ง ถึงแม้ในปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่พัฒนาระบบการสื่อสารไร้สายด้วยการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานที่แตกต่างกัน แต่ระบบสื่อสารเหล่านั้นยังคงต้องมีการใช้งานเทคนิคเข้าถึงเครือข่ายไร้สาย ซึ่งเป็นการดึงทรัพยากรด้านความกว้างแถบความถี่ ด้านความความซับซ้อนในการเข้ารหัส และด้านการแบ่งชิงเวลามาใช้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางสำหรับเป็นตัวเลือกในการพัฒนาเครือข่ายไร้สาย ซึ่งแนวทางนี้ไม่จำเป็นต้องปรับปรุงเทคนิคการเข้าถึงเครือข่ายไร้สาย แต่เป็นการมุ่งเน้นการพัฒนาไปที่แบบรูปการแผ่พลังงานโดยตรง ส่วนแรกของงานวิจัยนี้คือ การวิเคราะห์ความเป็นไปได้สำหรับการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานจากแบบจำลอง พบว่าเมื่อเปรียบเทียบการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบเดียวกับการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบพร้อมกันนั้น การใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบพร้อมกันสามารถรองรับจำนวนโหนดในเครือข่ายไร้สายได้มากกว่า ในส่วนที่สองของงานวิจัยคือ การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ ซึ่งเป็นการออกแบบจากการไหลของสัญญาณในช่วงของวงจรสายส่ง ผลการวิจัยพบว่าแบบรูปการแผ่พลังงานที่เกิดจากการใช้งานอุปกรณ์ต้นแบบนั้น สามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานแบบชี้ทิศทางในภาคส่งและแบบรอบทิศทางในภาครับได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเครือข่ายไร้สาย โดยเพิ่มค่าวิสัยสามารถโดยรวมของเครือข่ายไร้สายและลดความหน่วงที่เกิดขึ้นในเครือข่ายไร้สายลง นอกจากนี้ การใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ

พร้อมกันช่วยให้ค่าวิสัยสามารถดีกว่าการใช้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบเดี่ยวอยู่ 27.379% สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง และ 11.377% สำหรับแบบรูปการแผ่พลังงานแบบมีทิศทาง นอกจากการจำลองผลกระทบต่อเครือข่ายไร้สายแล้ว งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ต้นแบบให้ค่าวิสัยสามารถที่ดีกว่าการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบเดี่ยว โดยใช้สถานการณ์จำลองการสื่อสารไร้สายแบบโนตต่อโนต พบว่าการดาวน์โหลดและการอัปโหลดอยู่ที่ 2.6218 Mbps และ 2.508 Mbps ซึ่งมากกว่าการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางและแบบมีทิศทาง นอกจากนี้ในการศึกษาเพิ่มเติมเรายังพบว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการพัฒนาเครือข่ายไร้สายของสายอากาศคือ อัตราส่วนพหุหน้าต่อพหุหลัง ซึ่งเพิ่มค่าวิสัยสามารถต่อเครือข่ายไร้สาย

ข้อได้เปรียบของงานวิจัยนี้คือ อุปกรณ์สามารถติดตั้งได้ง่ายและไม่กระทบต่อเทคโนโลยีเดิมที่ใช้งานอยู่ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นดังตารางที่ 5.1 พบว่า งานวิจัยนี้ใช้ช่องสัญญาณเพียง 1 ช่องสัญญาณและใช้ชุดสายอากาศเพียง 1 ชุด เพื่อรับข้อมูลและส่งข้อมูลในเวลาเดียวกัน ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ยังสามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานได้ 2 แบบ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในเครือข่ายไร้สายปัจจุบันได้โดยตรง

ตารางที่ 5.1 สรุปข้อเปรียบเทียบของงานวิจัยเทียบกับงานวิจัยอื่น

งานวิจัย	จำนวนช่องสัญญาณ	จำนวนของสายอากาศที่ต้องใช้ (ชุด)	แบบรูปการแผ่พลังงาน		การรับข้อมูลและส่งข้อมูลในเวลาเดียวกัน
			รอบทิศทาง	มีทิศทาง	
(Cali, Federico, Marco Conti, and Enrico Gregori, 2000)	1	1	✓	✓	×
(Nasipuri, Asis, et al, 2000)	1	1	×	✓	×
(Fahmy, Nader S., and Terence D. Todd 2004)	1	1	×	✓	×
(Mundarath, J.C, Parameswaran Ramanathan, and Barry D. Van Veen, 2004)	1	1	×	✓	×
(Huang, Zhuochuan, et al, 2005)	1	1	✓	✓	×

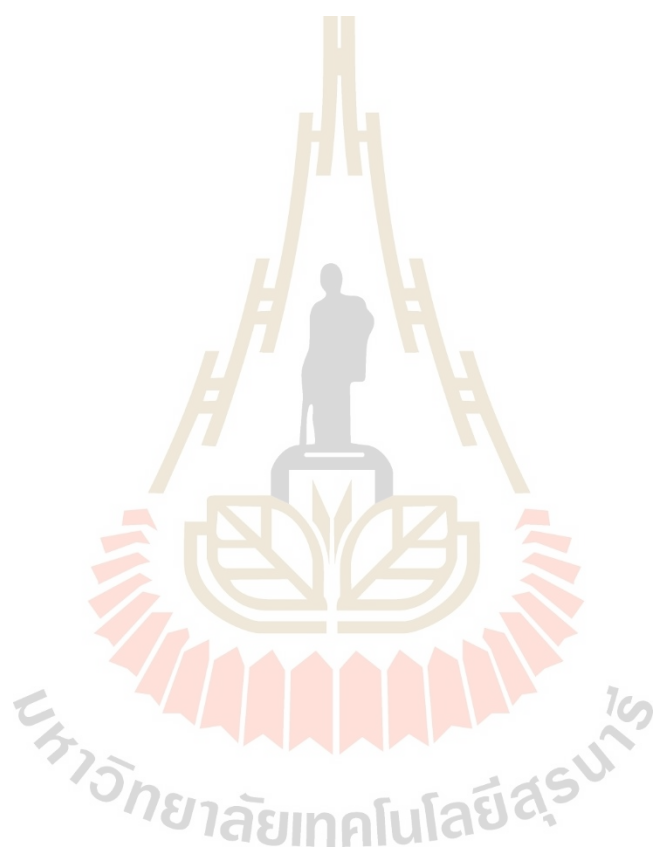
ตารางที่ 5.1 สรุปข้อเปรียบเทียบของงานวิจัยเทียบกับงานวิจัยอื่น (ต่อ)

งานวิจัย	จำนวน ช่องสัญญาณ	จำนวนของ สายอากาศ ที่ต้องใช้ (ชุด)	แบบรูปการแผ่พลังงาน		การรับ ข้อมูลและ ส่งข้อมูล เวลา เดียวกัน
			รอบทิศทาง	มีทิศทาง	
(Korakis, Thanasis, Gentian Jakllari, and Leandros Tassiulas, 2007)	1	1	×	✓	×
(Chang, J-J., Wanjiun Liao, and T-C. Hou, 2009)	1	1	✓	✓	×
(Shen, Jian, Sangman Moh, and Ilyong Chung, 2012)	1	1	✓	✓	×
(Kim, J. D., David I. Laurenson, and John S. Thompson, 2017)	2	≥2	✓	✓	✓
(Alam, Md Nasre, et al, 2021)	1	1	×	✓	×
(Rukaiya, Rukaiya, et al, 2021)	2	≥2	×	✓	✓
งานวิจัยที่นำเสนอ	1	1	✓	✓	✓

5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพิสูจน์การใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานที่สร้างจากสายอากาศชุดเดียวกันและใช้งานเวลาเดียวกัน ซึ่งนอกจากการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานแล้วยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเครือข่ายไร้สาย เช่น ความต่างกันของการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งทุกโหนดส่งติดตั้งสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต่างกัน ดังนั้น การพัฒนาต่อยอดในอนาคตจำเป็นต้องศึกษากระบวนการส่งการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานเพื่อตอบสนองต่อเครือข่ายไร้สายที่ยืดหยุ่น นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบยังถือว่าเป็นอุปกรณ์ต้นแบบ ซึ่งเป็นการพิสูจน์ความเป็นไปได้ของแนวคิดในงานวิจัยนี้ ดังนั้นขนาดของอุปกรณ์จะไม่สามารถรองรับการติดตั้งในทุกอุปกรณ์ได้ แนวทางพัฒนาคือ ย่อขนาดของอุปกรณ์ลงเพื่อทำให้สามารถใช้กับอุปกรณ์

ที่มีขนาดเล็กได้ ผู้วิจัยหวังว่าแนวคิดเกี่ยวกับการใช้งานแบบรูปการแผ่พลังงานพร้อมกัน 2 แบบ โดยใช้สายอากาศชุดเดียวกันจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากก็น้อย



รายการอ้างอิง

- Frodigh, M., Johansson, P., & Larsson, P. (2000). **Wireless ad hoc networking: the art of networking without a network**. Ericsson review, 4(4), 249.
- Li, X. (2006). Multipath routing and QoS provisioning in mobile ad hoc networks (Doctoral dissertation, University of London).
- Choudhury, R. R., & Vaidya, N. H. (2004, October). **Deafness: A MAC problem in ad hoc networks when using directional antennas**. In Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Network Protocols, 2004. ICNP 2004. (pp. 283-292). IEEE.
- Takatsuka, Y., Takata, M., Bandai, M., & Watanabe, T. (2008, April). **A MAC protocol for directional hidden terminal and minor lobe problems**. In 2008 Wireless Telecommunications Symposium (pp. 210-219). IEEE.
- Huang, Z., Shen, C. C., Srisathapornphat, C., & Jaikaeo, C. (2002, October). **A busy-tone based directional MAC protocol for ad hoc networks**. In MILCOM 2002. Proceedings (Vol. 2, pp. 1233-1238). IEEE.
- Korakis, T., Jakllari, G., & Tassiulas, L. (2007). **CDR-MAC: A protocol for full exploitation of directional antennas in ad hoc wireless networks**. IEEE Transactions on Mobile Computing, 7(2), 145-155.
- Shen, J., Moh, S., & Chung, I. (2012). **Identity-based key agreement protocol employing a symmetric balanced incomplete block design**. Journal of communications and networks, 14(6), 682-691.
- Wang, J., Fang, Y., & Wu, D. (2005, October). **SYN-DMAC: A directional MAC protocol for ad hoc networks with synchronization**. In MILCOM 2005-2005 IEEE Military Communications Conference (pp. 2258-2263). IEEE.
- Duan, Z., Xu, H., Gao, S. S., & Geyi, W. (2020). **A circularly polarized omnidirectional antenna for wireless capsule endoscope system**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 69(4), 1896-1907.

- Cai, X., & Sarabandi, K. (2020). **Broadband omnidirectional circularly polarized antenna with asymmetric power divider**. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(7), 5171-5181.
- Zhao, L., Chen, Z. M., & Wang, J. (2019). **A wideband dual-polarized omnidirectional antenna for 5G/WLAN**. *IEEE Access*, 7, 14266-14272.
- Klemm, M., Kovcs, I. Z., Pedersen, G. F., & Troster, G. (2005). **Novel small-size directional antenna for UWB WBAN/WPAN applications**. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(12), 3884-3896.
- Emokpae, L. E., & Younis, M. (2012). **Throughput analysis for shallow water communication utilizing directional antennas**. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(5), 1006-1018.
- Xi, B., Liang, X., Chen, Q., Wang, K., Geng, J., & Jin, R. (2020). **Optical transparent antenna array integrated with solar cell**. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(3), 457-461.
- Shams, S. I., Sifat, S. M., Elsaadany, M., Gagnon, G., & Kishk, A. A. (2021). **Systematic design procedure for y-junction circulator based on ridge gap waveguide technology**. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 69(4), 2165-2177.
- Bianchi, G. (1998). **IEEE 802.11-saturation throughput analysis**. *IEEE communications letters*, 2(12), 318-320.
- Wu, H., Peng, Y., Long, K., Cheng, S., & Ma, J. (2002, June). **Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement**. In *Proceedings. Twenty-first annual joint conference of the IEEE computer and communications societies (Vol. 2, pp. 599-607)*. IEEE.
- Ziouva, E., & Antonakopoulos, T. (2002). **CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis**. *Computer communications*, 25(3), 313-321.
- Yazid, M., Aïssani, D., Bouallouche-Medjkoune, L., Amrouche, N., & Bakli, K. (2015). **Modeling and enhancement of the IEEE 802.11 RTS/CTS scheme in an error-prone channel**. *Formal Aspects of Computing*, 27(1), 33-52.

- Cali, F., Conti, M., & Gregori, E. (2000). **IEEE 802.11 protocol: design and performance evaluation of an adaptive backoff mechanism.** IEEE journal on selected areas in communications, 18(9), 1774-1786.
- Nasipuri, A., Ye, S., You, J., & Hiromoto, R. E. (2000, September). **A MAC protocol for mobile ad hoc networks using directional antennas.** In 2000 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Conference Record (Cat. No. 00TH8540) (Vol. 3, pp. 1214-1219). IEEE.
- Fahmy, N. S., & Todd, T. D. (2004, March). **A selective CSMA protocol with cooperative nulling for ad hoc networks with smart antennas.** In 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat. No. 04TH8733) (Vol. 1, pp. 387-392). IEEE.
- Mundarath, J. C., Ramanathan, P., & Van Veen, B. D. (2004, November). **NULLHOC: a MAC protocol for adaptive antenna array based wireless ad hoc networks in multipath environments.** In IEEE Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM'04. (Vol. 5, pp. 2765-2769). IEEE.
- Shen, C. C., Koc, O., Jaikao, C., & Huang, Z. (2005). **Trajectory control of mobile access points in MANET.** In GLOBECOM'05. IEEE Global Telecommunications Conference, 2005. (Vol. 5, pp. 6-pp). IEEE.
- Korakis, T., Jakllari, G., & Tassiulas, L. (2007). **CDR-MAC: A protocol for full exploitation of directional antennas in ad hoc wireless networks.** IEEE Transactions on Mobile Computing, 7(2), 145-155.
- Chang, J. J., Liao, W., & Hou, T. C. (2009, June). **Reservation-based directional medium access control (RDMAC) protocol for multi-hop wireless networks with directional antennas.** In 2009 IEEE International Conference on Communications (pp. 1-5). IEEE.
- Shen, J., Moh, S., & Chung, I. (2012). **Identity-based key agreement protocol employing a symmetric balanced incomplete block design.** Journal of communications and networks, 14(6), 682-691.
- Kim, J. D., Laurenson, D. I., & Thompson, J. S. (2017). **Centralized random backoff for collision resolution in Wi-Fi networks.** IEEE Transactions on Wireless Communications, 16(9), 5838-5852.

- Croft, J., Alam, M. N., Machakaire, N., Srinivasan, B., Srinivasan, R., & Majozi, T. (2021). **Synthesis of an optimal schedule and water network for a multipurpose multiproduct textile industry through a sequential MILP-NLP technique.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(45), 16363-16377.
- Rukaiya, R., Farooq, M. U., Khan, S. A., Hussain, F., & Akhunzada, A. (2021). **CFFD-MAC: A hybrid MAC for collision free full-duplex communication in wireless ad-hoc networks.** *IEEE Access*, 9, 35584-35598.
- Babich, F., & Comisso, M. (2009). **Throughput and delay analysis of 802.11-based wireless networks using smart and directional antennas.** *IEEE Transactions on Communications*, 57(5), 1413-1423.





ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

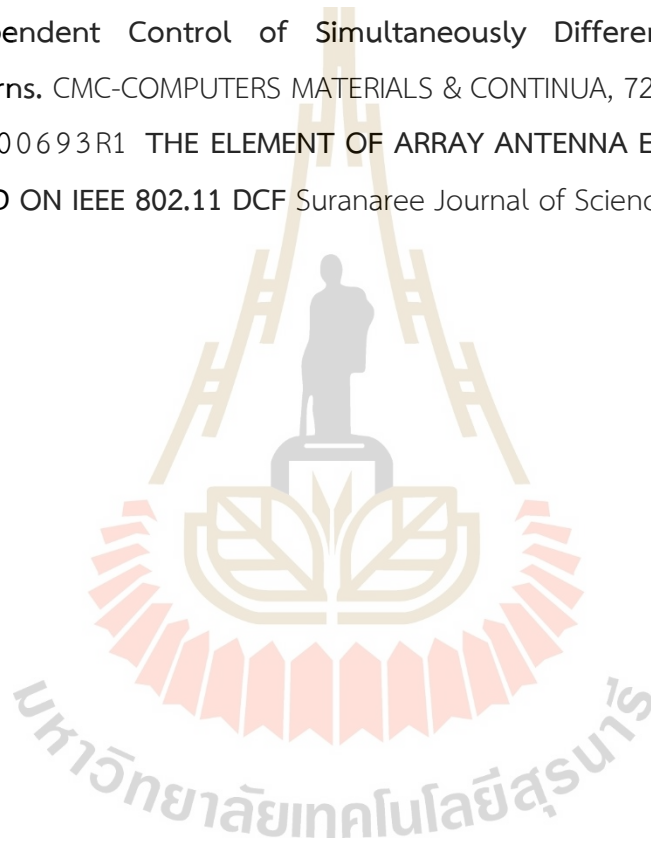
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างการศึกษา

Inthanil, A., & Uthansakul, M. (2019, April). **Effect of Specified Radiation Pattern on Wi-Fi Networks.** In Proceedings of the 7th International Conference on Communications and Broadband Networking (pp. 33-36).

Inthanil, A., Uthansakul, M., & Uthansakul, P. (2022). **Feedline Separation for Independent Control of Simultaneously Different Tx/Rx Radiation Patterns.** CMC-COMPUTERS MATERIALS & CONTINUA, 72(2), 2221-2241.

SUJST-D-21-00693R1 THE ELEMENT OF ARRAY ANTENNA EFFECT TO NETWORK BASED ON IEEE 802.11 DCF Suranaree Journal of Science and Technology



Effect of Specified Radiation Pattern on Wi-Fi Networks

Akarachai Inthanil
School of Telecommunication Engineering, Suranaree
University of Technology
NakhonRatchasima, Thailand
+66890793250
d5940011@g.sut.ac.th

Monthippa Uthansakul
School of Telecommunication Engineering, Suranaree
University of Technology
NakhonRatchasima, Thailand
+6644224361
mtp@sut.ac.th

ABSTRACT

The requirement of end-users to access the Wi-Fi networks greatly increase so far. Thus, most of researcher aim to improve the Wi-Fi network. The important factor is an antenna performance. In this paper, we propose the possible effect antenna to the Wi-Fi network. In this propose, we focus on the radiation pattern of a directional antenna. The CSMA/CA are considered in the frame transmission. The result shows that the suitable HPBW, F/B ration and distance have effect on the number of end-users.

CCS Concepts

Networks → Network performance evaluation → Network performance analysis

Keywords

Wi-Fi; Antenna; Radiation pattern; Throughput.

1. INTRODUCTION

The aim of Wi-Fi network providers is to provide high throughput, low delay, low latency and high data rate transmission to their users. These desires can be achieved in two effective ways. Firstly, the providers focus on the operating software such as algorithm, protocol, and modulation techniques. Secondly, in terms of hardware, they develop the circuit and antenna designs to meet the users' requirements. So far, many researchers have focused on antenna design in term of radiation pattern shape [1]-[4] or coverage area to improve the performance of Wi-Fi communications [5,6].

The network communication is controlled by a potocol named Medium Access Control (MAC). The MAC potocol is to provide a priority of each Access Point (AP) assigned to the end-user with an algorithm that relates to physical layer parameters such as the distance between AP and end-user, the number of AP and end-user in the active Wi-Fi networks. Each AP or end-users always try to check the transmission with time duration Distributed Coordination Function (DCF) interframe which consists of Distributed Interframe Space (DIFS) and Short Interframe Space (SIFS). The duration in data packet frame consists of MAC header, and data priority such as Request To Send/ Clear To Send and

© 2019 Association for Computing Machinery. ACM acknowledges that this contribution was authored or co-authored by an employee, contractor or affiliate of a national government. As such, the Government retains a nonexclusive, royalty-free right to publish or reproduce this article, or to allow others to do so, for Government purposes only.

ICCBN 2019, April 12–15, 2019, Nagoya, Japan

© 2019 Association for Computing Machinery.

ACM ISBN 978-1-4503-6247-4/19/04...\$15.00

<https://doi.org/10.1145/3330180.3330187>

Acknowledgement (RTS/CTS/ACK) [7]. So far, there have been the proposed algorithm, so called a spatial reuse [8], which utilizes the antenna gain and radiation pattern. The antenna gain, interference signal and SINR level have been taken into account for the analysis. However, some important parameters such as Front-to-Back (F/B) ratio, distance and beamwidth have been ignored for the analysis so far.

In terms of network analysis, most of the research have adopted the Bianchi's model which focuses on the throughput and delay in Wi-Fi system [9]-[15]. This model takes into account the relationship between the number of nodes and radiation pattern for the system analysis. Therefore, this model is also adapted in this paper. The important factor which is commonly used to compare the Wi-Fi network performance is saturation throughput. This also considers the state of retransmission, the structure of frame transmission length, the back-off state etc.

In PHY layer, a spatial probability can reflect the radiation pattern aspect. Thus, the radiation pattern size or shape has an effect to the Wi-Fi system's usage in a specific area. So far, an omni-directional antenna has been utilized to avoid interference between APs.

In this paper, we focus on the effects of F/B ratio, distance, and half power beamwidth, when a directional antenna is employed, on the saturation throughput of Wi-Fi networks. As mentioned earlier, the channel model proposed in [8] is adopted for this paper.

This paper contains six sections as follows. After giving brief background in Section 1, Section 2 presents the antenna and channel model utilized in this paper, including the noise and gain assumed in the computer simulation. Then, Section 3 is the hypothesis modeling including interference and signal to noise plus interference ratio threshold. Also, Section 4 presents the Wi-Fi analysis for the Wi-Fi systems. Section 5 is the result and discussion. Finally, Section 6 concludes the paper.

2. ANTENNA AND CHANNEL MODEL

2.1 Noise

In the analysis, we consider the path loss, noise, power, interference, distance, and gain. The assumption of spatial reuse presented in [8] is adopted in this paper. The SINR threshold ($SINR_{Th}$) is in focus as follows.

$$P_n = \frac{P_T H_d G_T G_R}{SINR_{Th} D^\alpha} \quad (1)$$

- Path loss exponent (α) is 4 [16]. This is based on the two-ray model. This path loss in the Fresnel zone is considered
- Noise power (P_n) is determined with the threshold to detect and classify between signal and noise.

- The same level of transmitted power (P_T) is assumed for all APs and End-Users.
- Distances (D_p) are randomly generated in the area of interest.
- The relation of high (H_u) between interference signal and radiation pattern is taken into account.
- G_T is transmission gain of primary AP.
- G_R is receive gain of primary AP.

2.2 Gain

The antenna gain for his paper is considered relating to the Directional Of Arrival (DOA) [8] and also classified by the area as follows.

$$G_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} G_a(\varphi) d\varphi \quad (2)$$

$$G_2 = \frac{1}{2\pi - \varphi_{3db}} \int_{\frac{\varphi_{3db}}{2}}^{2\pi - \frac{\varphi_{3db}}{2}} G_a(\varphi) d\varphi \quad (3)$$

When G_1 is the gain in area 1 and G_2 is the gain in area 2. $G_a(\varphi)$ is real gain of antenna. φ_{3db} is degree of primary AP which sends data packet to primary end-user.

3. HYPOTHESIS MODELLING

The area is divided into 3 areas as shown in Figure 1. This primary AP considers the distance by the radiation pattern of employed antenna. In area 1, the secondary AP and end-user are outside the region of primary AP's coverage. Thus the secondary AP or end-user can't correctly receive the CTS frame, resulting in the error of a received frame. The range of distance in the area is D_p to D_M . In area 2, the end-users are inside the radiation pattern of antenna coverage.

In this area, end-user priority will decrease the power and the direction to protect the link of primary AP and end-user. For this case, the range of distance in an area is $D_A(\varphi)$ to D_p . In area 3, the end-users staying inside will be forced to be nonactive. Hence the interference signal is absent in this area as shown in Figure 2.

The calculation of interference presented in [8] is adopted. The interference in area 1 and area 2 is P_{IA1} and P_{IA2} , which can be expressed as follows.

$$P_{IA1} = \int_0^{2\pi} \int_{D_p}^{D_M} \frac{P_T H_u G_T G_a(\varphi)}{r^\alpha} A(r, \varphi) r dr d\varphi \quad (4)$$

$$P_{IA2} = \int_{\frac{\varphi_{3db}}{2}}^{2\pi - \frac{\varphi_{3db}}{2}} \int_{D_A(\varphi)}^{D_p} \frac{P_T H_u G_T G_a(\varphi)}{r^\alpha} A(r, \varphi) r dr d\varphi \quad (5)$$

Where $A(r, \varphi)$ is the active node density which contains the total active node A_C and the spatial distribution of node with random topology $\gamma(r, \varphi)$. r is distance primary AP to each secondary end-user.

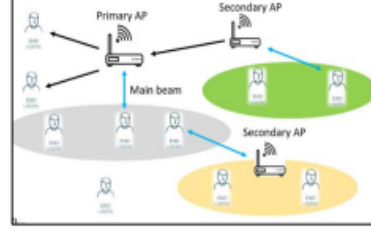


Figure 1. Configuration of Wi-Fi networks

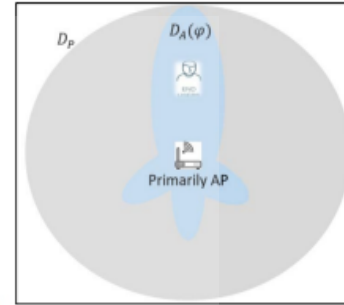


Figure 2. Configuration of primary AP in azimuth.

The active node density can be expressed as:

$$A(r, \varphi) = A_C \gamma(r, \varphi) \quad (6)$$

Total active node can be expressed as:

$$A_C = \frac{\pi D_M^2}{\pi D_p^2} 2A_L \quad (7)$$

Where A_L is the link of primary AP. The spatial distribution of node with random topology can be expressed as:

$$\gamma(r, \varphi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi D_M r} \\ 0 \end{cases} \quad (8)$$

3.1 Signal to Noise Plus Interference Ratio Threshold

The $SINR_{Th}$ consists of received signal, noise signal and interference signal for three areas. The the received signal is the signal from the link of primary AP and end-user, which can be expressed as:

$$P_R = \frac{P_T H_u G_{TU} G_{RAP}}{D_{UAP}^\alpha} \quad (9)$$

Where D_{UAP} is the distance between primary AP and end-user. G_{TU} is gain of end-user. G_{RAP} is gain of AP. P_R is receive power. $SINR_{Th}$ as $SINR$ can be expressed as:

$$SINR = \frac{P_R}{P_{IA1} + P_{IA2} + P_{IA3} + P_N} \quad (10)$$

We can analyze the link of primary AP and end-user (A_L) as:

$$A_L = \frac{P_T H_u (2^\alpha G_{TU} G_{RAP} - 1)}{SINR_{Th} D_p^\alpha (A + B)} \quad (11)$$

Where A and B can be defined as:

$$A = \frac{P_T H_a G_1 D_M}{\pi D_p^2} \int_0^{2\pi} \int_{D_p}^{D_M} G_{RX}(\varphi) r^{-\alpha} dr d\varphi \quad (12)$$

$$B = \frac{P_T H_a G_2 D_M}{\pi} \int_{\frac{\theta_{min}}{2}}^{\frac{\theta_{max}}{2}} \int_{D_p(\varphi)}^{D_M} \frac{G_{RX}(\varphi) r^{-\alpha}}{D_p^2(\varphi)} dr d\varphi \quad (13)$$

4. Wi-Fi SYSTEM ANALYSIS

4.1 Throughput

The throughput in this paper is analyzed by the Wi-Fi model presented in [9]. This analysis defines throughput based on Markov model of Bianchi's model series. The analysis contains the link of primary AP and end-user technical, which can be expressed as:

$$P_{TR} = \tau^n (1 - (1 - \tau)^n) \quad (14)$$

Where n is the number of APs and end-users in the Wi-Fi networks. The τ is AP transmission probability in the slot time. The P_{TR} is the transmission probability from the least one of n AP transmission the data packet. The success probability of the transmission (P_S) is:

$$P_S = \frac{\sum_{j=1}^n \binom{n}{j} \tau^j (1 - \tau)^{n-j}}{P_{TR}} \quad (15)$$

The collision probability of the transmission (P_C) is:

$$P_C = \frac{\sum_{j=2}^n \binom{n}{j} \tau^j (1 - \tau)^{n-j}}{P_{TR}} \quad (16)$$

And we can write the saturation throughput with each probability as:

$$T_p = \frac{P_{TR} P_S P_{size} B_r}{(1 - P_{TR})\sigma + P_{TR} P_S T_S + P_{TR} P_C T_C} \quad (17)$$

Where T_p is saturation throughput. T_S is the success transmission of time duration. T_C is the collision transmission of time duration and B_r is the PHY layer data rate of antenna performance. $MACH$ is time duration of MAC header. $PhyH$ is time duration of PHY header. P_{size} is Wi-Fi data portion duration. δ is Wi-Fi slot time. T_S and T_C can be expressed as:

$$T_S = MACH + PhyH + P_{size} + DIFS + 2\delta \quad (18)$$

$$T_C = MACH + PhyH + P_{size} + SIFS + \delta \quad (19)$$

5. RESULT AND DISCUSSION

In the experiment, we consider the HPBW and front-to-back ratio of the antenna. we focus on the distance in each area of AP and end-user.

Table 1. The parameter of Wi-Fi networks

Wi-Fi Parameter	Value
B_r	54 Mbit/s
P_{size}	8184 bits
$MACH$	34 (B_r)

Wi-Fi Parameter	Value
$PhyH$	20 μ s
σ	9 μ s
D_p	100 m
D_M	50 m
D_{UAP}	$\frac{D_p}{2}$
δ	1 μ s

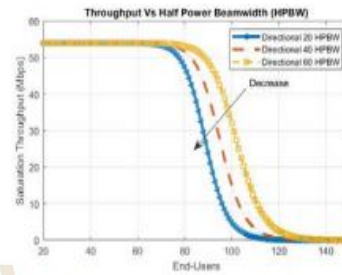


Figure 3. Saturation throughput vs. HPBW of directional antenna with SINR -10 dB.

The results shown in Figure 3 present that the saturated throughput at HPBW of 60 degree supports 56 end-users, HPBW of 40 degree supports 53 end-users and HPBW of 20 degree supports 50 end-users. After the saturated throughput the Wi-Fi networks cannot support all end-users. Thus an end-users will receive the less throughput from the maximum throughput. Thus, we can adjust HPBW according to the desire of saturated throughput and the number of end-users.

The results shown in Figure 4 show the distance between primary AP and end-user with SINR of -5 dB. As we can, the distance of 10 m supports 37 end-users, 20 m supports 43 end-users, 32 m supports 47 end-users, and 50 m supports 41 end-users. The suitable maximum distance is 32 m and the number of suitable end-users is 47.

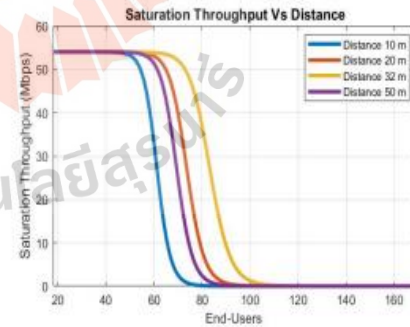


Figure 4. Throughput vs. distance between AP and end-user

The results shown in Figure 5 show the F/B ratio with -15 dB. The F/B of 9.99 dB supports 53 end-users, 8.99 dB supports 50 end-users and 8.19 supports 47 end-users. The F/B tender shows the possibility of an increased main beam and decreased back lobe and also side lobe supports higher number of end-users

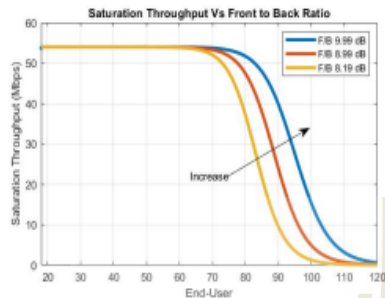


Figure 5. Throughput vs. F/B ratio

6. CONCLUSION

In this paper, we consider the effect of an antenna at the PHY layer for Wi-Fi networks on HPBW, F/B, the distance between primary AP with end-user. The results have shown that the HPBW has an effect to the number of end-users in Wi-Fi networks. The HPBW of 60 degree is suitable for the systems. Also, the high value of F/B supports many end-users. The distance of radiation pattern antenna represents the performance of an antenna to support end-users in the coverage area. Also, the tender of improved networks has been proposed.

7. ACKNOWLEDGMENT

This work is financially supported from the Thailand research fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D. program (Grant No. PGD/0118/2558)

8. REFERENCES

- [1] Bhatia, Sumet Singh, Harpreet Kaur, and Shashi B. Rana. "Design of Hexagonal Antenna using Meander Fractal Geometry for Wideband Applications." *i-Manager's Journal on Wireless Communication Networks* 7.1 (2018): 29.
- [2] Bansal, Aarti, Surbhi Sharma, and Rajesh Khanna. "Compact meandered RFID tag antenna with high read range for UHF band applications." *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*: e21695.
- [3] Sun, Li, et al. "A single patch antenna with broadside and conical radiation patterns for 3G/4G pattern diversity." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 15 (2016): 433-436.
- [4] Jackson, Brad R., and Stephen J. Boyes. "Radiation Pattern-Agile Dual Planar Inverted-F Antenna." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 16 (2017): 2090-2093.
- [5] Bianchi, Giuseppe, et al. "A space-division time-division multiple access scheme for high throughput provisioning in WLANs." *Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on*. Vol. 4. IEEE, 2005.
- [6] Chang, Chao-Tsun, et al. "Throughput enhancement by exploiting spatial reuse opportunities with smart antenna systems in wireless ad hoc networks." *Computer Networks* 57.13 (2013): 2483-2498.
- [7] Cheng, Maggie X., Yi Ling, and Wei Biao Wu. "MAC Layer Misbehavior Detection Using Time Series Analysis." 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018.
- [8] Babich, Fulvio, and Massimiliano Comisso. "Throughput and delay analysis of 802.11-based wireless networks using smart and directional antennas." *IEEE Transactions on Communications* 57.5 (2009).
- [9] Mehrnosh, Morteza, et al. "Analytical Modeling of Wi-Fi and LTE-LAA Coexistence: Throughput and Impact of Energy Detection Threshold." *arXiv preprint arXiv:1803.02444* (2018).
- [10] Yin, Rui, Geoffrey Ye Li, and Amine Maaref. "Spatial Reuse for Coexisting LTE and Wi-Fi Systems in Unlicensed Spectrum." *IEEE Transactions on Wireless Communications* 17.2 (2018): 1187-1198.
- [11] TANG12, Z. H. E. N. Z. H. O. U., et al. "Throughput Analysis of LAA and Wi-Fi Coexistence Network With Asynchronous Channel Access." (2018).
- [12] Lee, Jin-Shyan, Yu-Wei Su, and Chung-Chou Shen. "A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi." *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE. Ieee, 2007.*
- [13] Kai, Caihong, Shengli Zhang, and Lusheng Wang. "Impacts of Packet Collisions on Link Throughput in CSMA Wireless Networks." *China Communications* 15.3 (2018): 1-14.
- [14] Ashrafuzzaman, Kazi. "Energy and throughput optimal operating region in slotted CSMA/CA based WSN." *IEEE Communications Letters* 16.9 (2012): 1524-1527.
- [15] Koseoglu, Mehmet, and Ezhan Karasan. "Spatio-temporal analysis of throughput for single-hop CSMA networks." *IEEE Communications Letters* 18.4 (2014): 564-567.
- [16] He, Ruisi, et al. "Analysis of the relation between Fresnel zone and path loss exponent based on two-ray model." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 11 (2012): 208-211.

Feedline Separation for Independent Control of Simultaneously different Tx/Rx Radiation Patterns

Akarachai Inthanil¹, Monthippa Uthansakul^{1,*} and Peerapong Uthansakul¹

¹School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

*Corresponding Author: Monthippa Uthansakul. Email: mtp@sut.ac.th

Received: XX Month 202X; Accepted: XX Month 202X

Abstract: The shortcoming of Wi-Fi networks is that one user can access the router at a time. This drawback limits the system throughput and delay. This paper proposes a concept of Simultaneously Different Tx/Rx (SDTR) radiation patterns with only one antenna set at the router. Furthermore, these two patterns have to be simultaneously operated at the same time so that the system delay can be eased. An omni-directional pattern is employed at router for receiving mode so that the router can sense carrier signal from all directions. At the same time, the router launches a directional beam pointed to another user. A proposed circuit allows these two modes to be able to operate the same time. To evaluate the SDTR concept, a prototype is constructed for testing in real circumstance comparing to computer simulation. As a result, the SDTR concept can improve the system throughput while decreasing the system delay comparing to conventional system.

Keywords: Wireless networks; Wi-Fi; Throughput; Delay; Radiation pattern

1 Introduction

As we all know, antennas are an essential element used in transmitting and receiving signals for wireless communications. Two well-known types of antennas are omni-directional and directional antenna. The omni-directional antenna is suitable for equally radiating power in all directions. For this case, a Whip antenna has been introduced for the use in VHF and UHF bands with the gain of 6.8 dB [1]. The authors of [2] have investigated the use of monopole antenna for radio-frequency heating and microwave communications at 1.8, 2.4, and 2.56-GHz bands. In addition, the works presented in [3] have revealed the single circular patch antenna for Global Positioning System (GPS) application at 2.28-2.40 and 3.30-3.60 GHz. However, this kind of antenna faces the problems of low-gain radiation, low capacity and also high interference signal. One way to deal with the mentioned problem is to limit the radiation in one specific area, so called directional antenna. The higher radiation gain can be specifically pointed to one direction while having low gain in other undesired directions to avoid the interference signal. So far, directional antenna can be classified into two major categories: traditional directive antenna and smart antenna. The traditional directive antenna is a single antenna element in which its construction allows the radiation to be focused in one specific direction. Some examples of this kind of antenna are shown as follows. A horn antenna has been investigated for the use in radar communication [4]. Also, a specific reflector antenna has been designed for full-duplex application as presented in [5]. For having more degrees of freedom, a smart antenna has been developed employing an array antenna cooperating with some signal processing units. The smartness of this system is reflected by the allowance of controllable beam formation. There are three categories of smart antenna: switched beam, steerable beam and adaptive antennas. The switched beam antenna radiates the maximum power in a pre-defined direction while providing a low gain in other directions. However, when the users move away from the main beam, they will receive a weak signal. For this case, other pre-defined beams can be applied to the system in order to provide a high radiation gain to



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

the users. One good example of this antenna has been shown in [6] which is a switched beam antenna for 5G wireless communication systems supporting a large number of users at 60-GHz band. In addition, the steerable single beam antenna has a similar performance of switched-beam antenna but it has higher advantage in an interference cancellation as it can steer nulls to interference directions. One interesting example has been introduced in [7] which is a steerable beam antenna using dielectric lens to control the directions of nulls and beams for wireless network communications. The most powerful smart antenna is the adaptive antenna as it can automatically steer its main beam and nulls to directions of desired and undesired directions, respectively. This can be accomplished by many effective algorithms proposed in literatures [8].

As far as we know, the antenna has a reciprocal property which allows the similarity of receiving and transmitting radiation patterns. However, the works presented in [9-10] have revealed that a difference between transmitting and receiving radiation patterns provides an improved performance for wireless communications. One application employs different transmitting and receiving radiation patterns is Wireless Networks With Directional Antennas (DAWNs). The mentioned difference is to increase the accuracy of users' location positioning and also decrease the interference from adjacent users. However, in order to achieve the benefits of having different radiation patterns in transmitting and receiving modes, we need to have at least two sets of antennas e.g. one array antennas for transmitting mode and another one for receiving mode. This concept might result in high complexity and cost.

From the above drawbacks, we are interested in the utilization of different radiation patterns in transmitting and receiving modes. We use the feedline separation for control the Simultaneously Different Tx/Rx (SDTR) radiation patterns. The possible concept can be categorized into four radiation schemes (types C, D, E and F) as shown in Fig. 1. For type C, one set of array antennas is employed to generate two different radiation patterns for receiving and transmitting modes. This type is suitable for Wi-Fi system as the base station is able to communicate to a desired user with maximum gain when the directional pattern is employed for transmitting mode. At the same time, an omni-directional pattern is active when the base station works in receiving mode. This helps the base station is able to sense the users in all directions. According to this, the user accessibility and capacity are more efficient comparing to the traditional system which employs the same pattern for both transmitting and receiving modes. For type D, the radiation patterns in receiving and transmitting modes are directional and omni-directional, respectively. This type is suitable for broadcast communications when the center station needs to send the same information with high gain to all directions. For type E, two directional patterns are employed for both transmitting and receiving modes but they are pointed in two different directions. This type is suitable to be installed in the

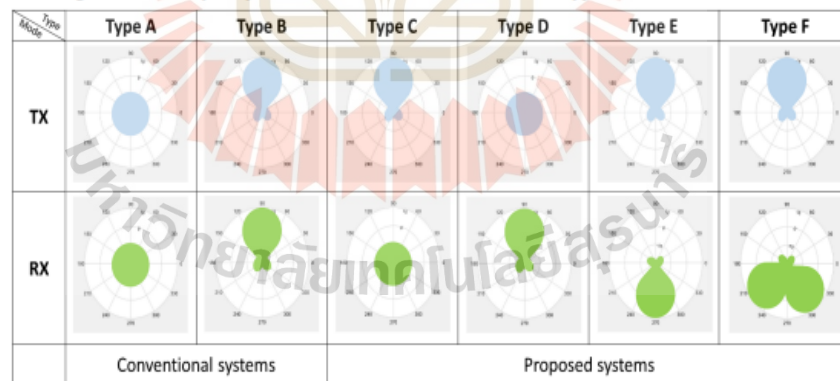


Figure 1: Type of SDTR radiation patterns.

signal repeater. The main beams for this case do not need to be switched as the directions are fixed. However, in some applications, the base station needs to transmit signal to more than one direction so type F is considered. However, the concept of using different radiation patterns at the base station needs to use the array antenna more than one set. This concept introduces a high cost for investment. Another important issue is a suitable protocol for wireless networks to support the user accessibility in space domain. To achieve the utilization in space domain for wireless networks, a Media Access Control (MAC) protocol needs to be modified [11-14]. Still, the user accessibility is not fully efficient as one beam pattern can be occupied by a single user at a time while the others have to wait.

From the impairments mentioned earlier, the research work in this paper focuses on a further investigation on the SDTR type C which is the most suitable one for wireless networks as the nodes' positions are fixed. This concept reduces the users' waiting time to access the router and decreases the number of hidden nodes. Most importantly, the SDTR antenna is able to serve two different patterns in transmitting and receiving modes using only one antenna set. According to this, the router is able to perform signal transmission and reception at the same time and the same frequency. Furthermore, the SDTR systems do not need a new complex protocol to support the user accessibility in space domain. Therefore, the SDTR systems can be promptly applied to a current wireless network. However, the challenge for this SDTR concept is its feasibility. One important circuit that allows the transmitting and receiving signal to be sent and received from the system at the same time is shown in Fig. 2. The input signal flows through the solid line while the output signal simultaneously flows through the dash line. The system performance in terms of isolation depends on the efficiency of isolators [15]. The phase shifters appeared in the figure is used to adjust the signal phase for two reasons as follows. For the output line, the pre-defined phase shifter allows the signal to be shifted in phase. When all the phase-shifted signals from every element of the array are combined, the downlink beam formation in a given direction can be performed. For the input line, zero-phase shifting is needed when the omni-directional pattern is required for the receiving mode. Another reason of using phase shifters in both lines is to balance the power level between input and output signals. So, this feedline separation in Fig. 2 can independently control the Tx/Rx radiation patterns.

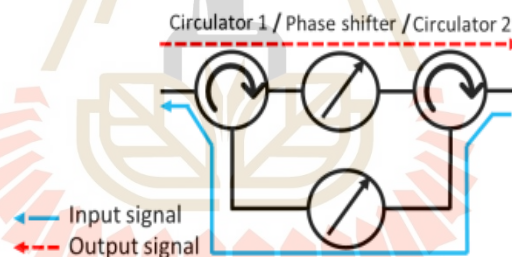


Figure 2: SDTR circuit

From the past, a conventional beamforming system has been proposed as shown in Fig. 3. The phase shifters are employed to deal with the beam formation for both downlink (dash line) and uplink (solid line). Lots of research have been proposed to develop many parts in the system such as beamforming algorithms and antennas. The works presented in [16-17] have been proposed for a design of multiplexers having a 79% higher performance with low power consumption. So far, the downlink and uplink can be operated at different time and frequency to avoid the signal distortion. This results in the limitation of throughput and capacity of the system as multiple users cannot access the base station at the same time. Moreover, the frequency resource is not sufficiently employed.

From the impairments mentioned above, Fig. 4 shows a new beamforming concept for this paper in which the SDTR circuit shown in Fig. 2 is equipped at individual antenna elements. This SDTR

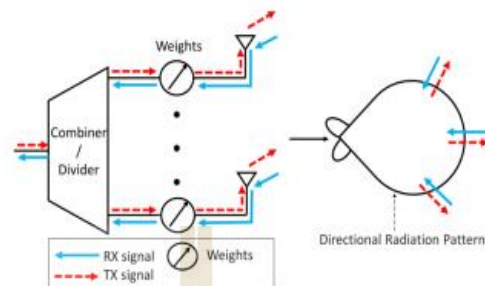


Figure 3: Conventional beamforming systems

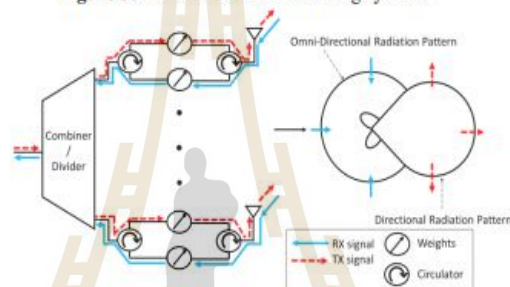


Figure 4: SDTR beamforming systems

concept allows the difference in radiation patterns for transmitting and receiving modes. Moreover, with the help of SDTR circuit, two different patterns can be operated at the same time and frequency. The shapes of radiation patterns for both modes can be controlled by adjusting the phase shifters, for both uplink (solid line) and downlink (dash line). Furthermore, this SDTR concept does not need any new MAC protocol because only physical layer is modified. This paper is an alternative approach to enhance throughput in Wi-Fi networks. The gain is less complex than resolving multiple access when using different formats.

The remainder of this paper is consequently organized as follows. After motivation and contribution are shown in Section 1, Section 2 related work, Section 3 introduces the SDTR system model. Afterwards, the performance of SDTR system is validated through the computer simulation and experiments in Section 4. Finally, the paper is concluded in Section 5.

2 Related Works

In the past few years The Wi-Fi communication business has grown exponentially. To support the exponential growth of users in the years to come, researchers need to develop even more Wi-Fi networks. So far in literature, the researchers have focused on two areas: antenna design and multiple access techniques. In antenna design, the main benefits are antenna gain, frequency, size, etc. The dipole array antenna in [18] provides an omnidirectional radiation pattern which is general for Wi-Fi network. The study in [19] presents a low-profile wideband antenna array which the size of antenna is small. So, it is suitable for working on Wi-Fi network. The work in [20] deploys the dual MIMO antenna with a minimal design. There is also space for other devices. This paper is aimed at radiation pattern targets. A typical antenna has two radiation patterns. The omnidirectional format is the preferred format for Wi-Fi networks. The shape of the dipole antenna radiates energy in all directions. So the advantage is that users around will be able to

radiate energy in all directions. The transmitter can receive signals in all directions. The second is the directional radiation pattern. This format differs from the omnidirectional version in relation to the antenna gain. Because the power is sent from the transmitter in one direction. The two common radiation patterns have different working areas. So these are the factors we consider due to the merits of each format used.

Today the network is accessed many times. Accessing multiple items of interest adds users to the network. Frequency Divided Multiple Access (FDMA) uses multiple frequencies to stream to users, and time-division multiple access (TDMA) uses different time intervals [21]. Additionally, FDMA and TDMA were studied to create a high-traffic TDMA algorithm when a user connects to a transmitter simultaneously. In FDMA, interference occurs and transmission stops because all users in the network share a frequency channel and use the same frequency. Code segment access (CDMA) uses the same carrier frequency. But there are different codes in [22]. The weakness of CDMA is that the number of users in the network deteriorates the overall service quality. A popular multiple access format is orthogonal frequency segment access (OFDMA) [23], improving network capacity and high data rates. However, OFDMA is complex for devices, and that sensitivity is for frequency compensation [24]. Another is non-orthogonal multiple access (NOMA) [25]. There is highly efficient and has better security for the user. The work in [26] proposed the novel NOMA with antenna number modulation (ANM) bits for the symbol to transmission. This still does not have a standard drive for this novel NOMA. So, it will be hard to implement to device and popular. The NOMA has a weakness in complexity because it uses ineffective receiver-side successive interference cancellation (SIC) [27]. Moreover, NOMA uses far and near users to calculate the transmission. So, it is not fair for other users. Although, the mentioned above are helpful to support networks both directly and indirectly. However, the alternative approach to support the number of users is still necessary.

This paper is an alternative way to help Wi-Fi networks. This article also focuses on radiation patterns that are part of the physical layer. This layer can be applied to a variety of accessibility techniques. The design is a passive device. So it doesn't fix the new multiple access technique for the complex.

3 System Model

Nowadays, the demand of Wi-Fi communications has been dramatically increased and also lots of updated gadgets have been lately launched to serve people's daily lives. Therefore, the development of Wi-Fi systems is currently one of the most research topics. In fact, antenna radiation pattern is also significant for the performance of Wi-Fi communications. In some cases, lots of hidden terminals occurs when the radiation pattern is not suitable [28-30]. Fig. 5 (a) shows a pair of router nodes which radiate equal power in all direction, having omni-direction patterns. Note that the system employs TDMA (Time Division Multiple Access) with the same operating frequency. The drawbacks of this network configuration are that the radiated power is relatively low, and the system delay occurs by the following reason. While the Router 2 is connecting with User 2, ORTS (Omi-directional Request to Send) sent from Router 1 is failed. At this point, Router 1 keeps sending ORTS to Router 2 for a given period. As a result, User 1 cannot access Router 1 which introduces a delay to the system. However, the system delay still occurs even when routers alternatively employ directional patterns instead as shown in Fig. 5 (b). For this case, the DRTS (Directional Request to Send) sent from User 3, which stays outside the pattern of Router 1, is also failed. The system delay for this case is worse comparing to the case shown in Fig. 5 (a). Also, Fig. 5 (c) shows the case of signal collision occurring from the moderate level of side lobes at routers. The signal from the communication between Router 1 and User 1 interferes the received signal at Users. Therefore, the data collision fails the communication between Router 2 and User 2. From the above impairments, this paper proposes the concept of having two different patterns between transmitting and receiving modes as shown in Fig. 5 (d). As seen in the figure, Router 1 can continually communicate with User 1 using directional pattern while it is able to simultaneously sense the request signal in all directions using omni-directional receiving capability (omni-directional pattern). Moreover, the array antennas are employed at router nodes so that low sidelobe levels can be controlled to avoid the signal collision at User 2. According to the SDTR systems, more users are able to access the router, hence not only the delay decreases and also the throughput of the system increases.

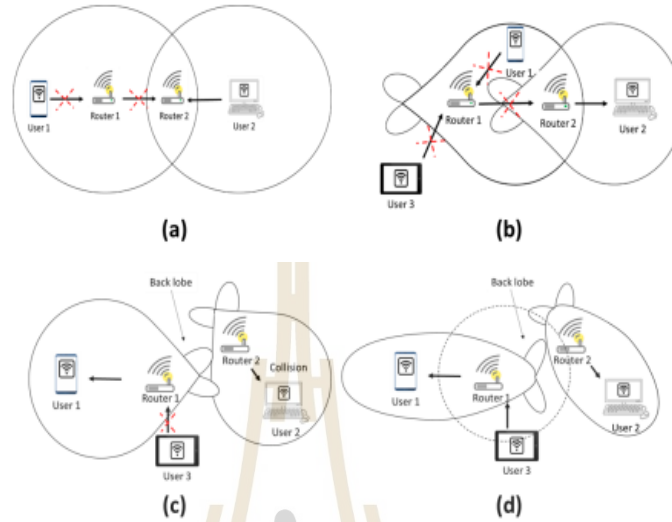


Figure 5: The problem scenarios in Wi-Fi networks: (a) hidden terminal problem with omnidirectional pattern; (b) hidden terminal problem with directional pattern; (c) signal collision with directional pattern; (d) SDTR systems

3.1 Signal Model

In this paper, $M \times N$ -element planar array is assumed for the SDTR systems. The output of the array can be expressed as:

$$\text{Output} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{m,n} (y_{m,n} + g_{m,n}) \quad (1)$$

Where $w_{m,n}$ is the weighting coefficient at individual antenna elements and $g_{m,n}$ is noise signal. The $y_{m,n}$ which is the signal at the front-end antenna sent from users is defined in Eqs. (2).

$$y_{m,n} = h_{m,n} A e^{j(\theta + \Delta\phi_{m,n})} \quad (2)$$

Where $h_{m,n}$ is propagation channel between users and router, θ is the signal phase, $\Delta\phi_{m,n}$ is the phase delay of the signal between adjacent elements. This delay depends on the array geometry related to the direction of incoming signal. Also, A stands for the signal amplitude which is assumed to be equal for all antenna elements. Furthermore, the receiving power threshold of the systems can be considered as follows.

$$P_{rth} = \frac{P_T H_\alpha G_T G_R}{SINR_{thr} R_B^\alpha} \quad (3)$$

Where P_T is the transmitted power, H_α stands for height, R_B is the maximum range of coverage area at the receiver, G_T is transmission gain, G_R is receive gain, $SINR_{thr}$ is receiving threshold and α is the path loss exponent. Moreover, P_{Noise} is noise power respect receiving power threshold following [31]. Also, the channel for incoming signal presented in [31] is adopted as expressed in Eqs. (4).

$$p(\phi') = \begin{cases} \frac{W_L}{\sqrt{2\theta_{\phi'}}} e^{-\frac{\sqrt{2|\phi'|}}{\theta_{\phi'}}} & |\phi'| \leq 2\pi \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (4)$$

Where ϕ' is the azimuth direction of incoming signal, $\theta_{\phi'}$ is angular spread of the channel and W_L is normalized constant. The multipath signal is also defined related to the antenna gain as follows.

$$G_F(\phi) = \int_0^{2\pi} G(\phi) p(\phi' - \phi) d\phi \quad (5)$$

Where $G(\phi)$ is an actual gain of the antenna and $G_F(\phi)$ is the gain after weighted using Eqs. (5). Also, the gain in the region within 3-dB beamwidth is defined in Eqs. (6). On the other hand, the gain in the region outside the 3-dB beamwidth is expressed in Eqs. (7).

$$G_{TX} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} G_F(\phi) d\phi \quad (6)$$

$$G_{TX} = \frac{1}{2\pi - \frac{\theta_{3dB}}{2}} \int_{\frac{\theta_{3dB}}{2}}^{\frac{2\pi - \theta_{3dB}}{2}} G_F(\phi) d\phi \quad (7)$$

Where θ_{3dB} is the half-power beamwidth angle. Actually, a Friis transmission formula can be used to calculate the actual gain as shown in Eqs. (8).

$$G_F(\phi) = P_{rec}(\phi) - P_{tra} - G_{ref}(\phi) - 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R_{ref}}\right) \quad (8)$$

Where $P_{rec}(\phi)$ is received power responding to direction of arrival of the signal, P_{tra} is transmitted power, $G_{ref}(\phi)$ is the gain of reference antenna, λ is wavelength and R_{ref} is the distance between transmitter and receiver.

3.2 Interference and Active Node Pair

This paper focuses on the scenario of active node pair in case of downlink communication. The area of communication is assumed as a circle as shown in Fig. 6. Also, the interference signal comes from three different areas. The first one is the area defined with the radius between R_B and R_C . This area contains the active node pair that stays out of the main router pattern. The active node cannot sense the main communication. So, the interference begins in the area. The second area is defined with the radius from $R_A(\phi)$ to R_B . In this area, other routers or users can sense the carrier of the communication between active node pair, then they avoid the strong interference to the current active node pair by decreasing antenna gain or form side lobes or nulls in interference directions. The third area is within 3-dB beamwidth where there is no interference in this region. Next, the number of successful users in three different cases: Types A, B and C as shown in Fig. 1 is discussed as follows.

Type A is the scenario in which the radiation patterns of transmitter and receiver are omni-directional. The interference signal power coming from many directions is defined in Eqs. (9).

$$P_{IA1} = \int_0^{2\pi} \int_{R_B}^{R_C} \frac{P_T H_{\phi} G_{TX} G_F(\phi)}{r^x} A_{ac}(r, \phi) r dr d\phi \quad (9)$$

Where G_{TX} is the average antenna gain in every direction from (1) and $A_{ac}(r, \phi)$ is the user density in the network which can be calculated using Eqs. (10).

$$A_{ac}(r, \phi) = N_{ac} \delta(r, \phi) \quad (10)$$

Where N_{ac} is the total number of users and router who are simultaneously communicating. This number can be calculated using the total number of active node pair (C_L) in the network with respect to the area as shown in Eqs. (11), and spatial distribution shown in Eqs. (12).

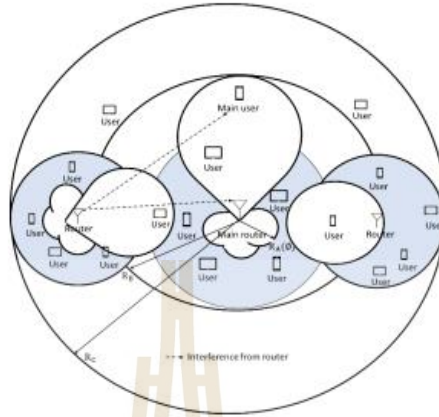


Figure 6: Network scenario for simulation

$$N_{ac} = \frac{2C_L \pi R_C^2}{\pi R_B^2} \quad (11)$$

$$\delta(r, \emptyset) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi R_C r} & r \in [0, R_C] \\ 0 & \text{Where else} \end{cases} \quad (12)$$

Where r is the range of the network. Referring to [31], the number of success users is defined with the margin of $\delta(r)$ which depends on the interference density and the distance between adjacent nodes. The proper margin in circle geometry is $\delta(r)$ which is equal to $\frac{1}{r}$ and the margin of $\delta(\emptyset)$ is equal to $\frac{1}{2\pi}$. The signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) of the system can be expressed in Eqs. (13). When the SINR of system equal the receiving threshold.

$$SINR = \frac{P_T H_\alpha G_{Router} G_{User}}{R_A^2(\emptyset)} \quad (13)$$

Where G_{Router} is the router gain and G_{User} is user gain. Then, $R_A(\emptyset)$ can be expressed as follows.

$$R_A(\emptyset) = R_B [G_{TX} G_F(\emptyset)]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (14)$$

For the directional pattern outside the 3-dB beamwidth, the $R_A(\emptyset)$ can be expressed in Eqs. (15).

$$R_A(\emptyset) = R_B [G_{TX} G_F(\emptyset)]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (15)$$

The SINR which is affected by interference and noise can be defined in Eqs. (16).

$$SINR = \frac{P_R}{P_{IA1} + P_{IA2} + P_{IA3} + P_{Noise}} \quad (16)$$

Where P_{IA1} , P_{IA2} , P_{IA3} is the interference power in each classified area. The received power according to path loss is expressed as follows.

$$P_R = \frac{P_T H_\alpha G_{Router} G_{User}}{R_s^2} \quad (17)$$

Where R_s is the distance between an active node pair which can be calculated by.

$$R_s = \int_0^{R_B} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi R_B r} r dr d\phi = \frac{R_B}{2} \quad (18)$$

The communication scenario specifies the access signal from the device as a user. So, authors define C_L as the minimum number of users who are active in the network. Then, the number of users can be found using Eqs. (19).

$$C_L = \frac{(2^\alpha G_{TXtypeA} G_{RXtypeA}^{-1})}{SINRR_s^\alpha(A+B)} \quad (19)$$

Where $G_{TXtypeA}$ is the average transmitting gain of Type A and $G_{RXtypeA}$ is the average receiving gain of Type A. The parameters A and B are defined as follows.

$$A = \frac{G_{TX} R_C}{\pi R_B^2} \int_0^{2\pi} \int_{R_B}^{R_C} G_F(\phi) r^{-\alpha} dr d\phi \quad (20)$$

$$B = 0 \quad (21)$$

For Type B, both transmitter and receiver employ directional antenna patterns. In this case, the interference signal comes from the area outside 3-dB beamwidth. The power of interference signal for this case is defined as follows.

$$P_{IA2} = \int_{\frac{\theta_{3dB}}{2}}^{2\pi - \frac{\theta_{3dB}}{2}} \int_{R_A(\phi)}^{R_B} \frac{P_{rH\alpha} G_{TX} G_F(\phi)}{r^\alpha} A_{ac}(r, \phi) r dr d\phi \quad (22)$$

Also, the number of active node pair for this case can be found using (23).

$$C_L = \frac{(2^\alpha G_{TXtypeB} G_{RXtypeB}^{-1})}{SINRR_s^\alpha(A+B)} \quad (23)$$

Where $G_{TXtypeB}$ is the average transmitting gain of Type B and $G_{RXtypeB}$ is the average receiving gain of Type B. The parameters of A and B can be found using the following equations.

$$A = \frac{G_{TX} R_C}{\pi R_B^2} \int_0^{2\pi} \int_{R_B}^{R_C} G_F(\phi) r^{-\alpha} dr d\phi \quad (24)$$

$$B = \frac{G_{TX} R_C}{\pi} \int_{\frac{\phi_{3dB}}{2}}^{2\pi - \frac{\phi_{3dB}}{2}} \int_{R_A(\phi)}^{R_B} \frac{G_F(\phi) r^{-\alpha}}{R_A^2(\phi)} dr d\phi \quad (25)$$

For Type C, a directional antenna pattern is employed for transmitting mode while omni-directional antenna pattern is employed for receiving mode. Note that both patterns are simultaneously operated at the same time. Then, the number of successful users for this case is defined in Eqs. (26).

$$C_L = \frac{(2^\alpha G_{TXtypeC} G_{RXtypeC}^{-1})}{SINRR_s^\alpha(A+B)} \quad (26)$$

Where $G_{TXtypeC}$ is the average transmitting gain of Type B and $G_{RXtypeC}$ is the average receiving gain of Type C. The parameters of A and B can be found using Eqs. (24), and Eqs. (25).

3.3 Radiation Pattern and MAC Protocol

This section presents the protocol mechanism of IEEE 802.11 DCF involving to Carrier-Sense Multiple Access (CSMA) [32-36]. From Fig. 7, the conventional system is defined as the router and user employ omni-directional antenna patterns. The communication between a user and router can be seen step-by-step as shown in Fig. 7 (a). Note that, for this case, two users cannot access the router at the same time. On the other hand, the SDTR systems shown in Fig. 7 (b) are defined as using different patterns between transmitting and receiving modes, directional and omni-directional patterns respectively. These modes are simultaneously operated at the same time, hence the system throughput increases. However, Fig. 7 (c) represents the case when data collision from two users occurs. For this case, both users simultaneously

retransmit the signal to router without further delay. This is considered as an advantage point over the conventional systems (Fig. 7 (a)).

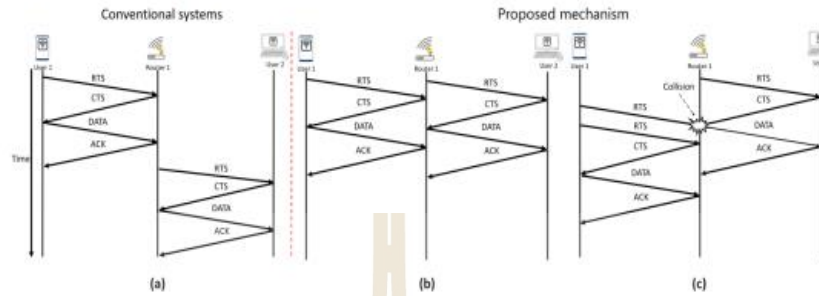


Figure 7: SDTR mechanism at router in: (a) conventional system; (b) SDTR system at the general status; (c) SDTR system with the collision situation

3.4 Throughput and Delay

So far, Markov chain model has been one popular model to evaluate the networks [32]. In this model, lots of parameters have to be given such as the condition of back-off and the number of active node pair. Also, the work presented in [31] has discussed the performance comparison among directional, switched-beam and adaptive antennas. However, the effect of radiation pattern has not been taken into account. Therefore, this paper considers the effects of active node pair, radiation pattern and MAC protocol employing Markov chain as shown in Fig. 8. In this figure, the counter starts counting from 0 to $2^m W_0 - 1$ when m is the maximum number of repeated data between user and router. The minimum size of contain windows for the condition of transition probabilities of the Markov chain is shown as follows.

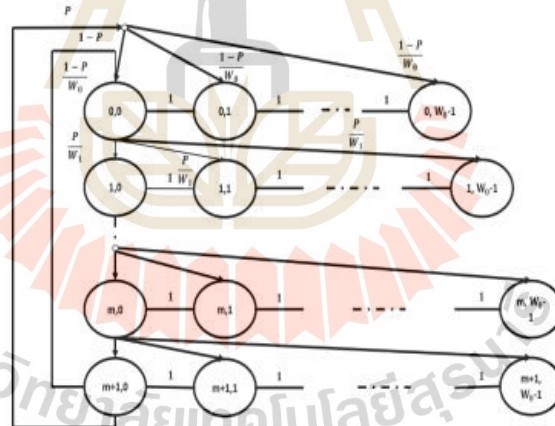


Figure 8: Markov chain model

$$\begin{cases}
 P\{j, k|j, k + 1\} = 1, k \in (0, W_j - 2) j \in (0, m + 1) \\
 P\{0, k|j, 0\} = \frac{1-p}{W_0}, k \in (0, W_0 - 1) j \in (0, m + 1) \\
 P\{j, k|j - 1, 0\} = \frac{p}{W_j}, k \in (0, W_j - 1) j \in (1, m + 1) \\
 P\{0, k|m + 1, 0\} = \frac{p}{W_0}, k \in (0, W_m - 1)
 \end{cases}
 \tag{27}$$

For stationary distribution, the Markov chain has a condition which is $b_{j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = j, b(t) = k\}$, $j \in (0, m + 1)$, $k \in (0, W_i - 1)$. This can be expressed as follows.

$$\begin{cases} b_{j,0} = P b_{j-1,0}, & 0 < j \leq m + 1 \\ b_{j,0} = P^j b_{0,0}, & 0 \leq j \leq m + 1 \\ b_{0,0} = P b_{m+1,0} + (1 - P) \sum_{j=0}^{m+1} b_{j,0} \end{cases} \quad (28)$$

Then, it can be rewritten as:

$$\sum_{j=0}^{m+1} b_{j,0} = \left(\frac{1 - P^{m+2}}{1 - P} \right) b_{0,0} \quad (29)$$

For the re-transmitting status, it can be expressed as:

$$b_{j,k} = \frac{W_i - k}{W_i} b_{j,0}, 0 \leq j \leq m + 1, 0 \leq k \leq W_i - 1 \quad (30)$$

When $b_{0,0}$ can be expressed as:

$$\sum_{j=0}^{m+1} \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{j,k} = 1 \quad (31)$$

$$b_{0,0} = \frac{\frac{2}{W_i}}{\frac{(1-2P)^{m+1}}{(1-2P)} + \frac{2^m(P^{m+1}-P^{m+2})}{(1-P)} + \frac{1-P^{m+2}}{W_i(1-P)}} \quad (32)$$

Therefore, the probability of time slot can be expressed as follows.

$$\tau = \sum_{j=0}^{m+1} b_{j,0} \quad (33)$$

$$\tau = \frac{2((1-2P)(1-P^{m+2}))}{W_i(1-(2P)^{m+1})(1-P) + W_i 2^m(P^{m+1}-P^{m+2})(1-2P) + (1-2P)(1-P^{m+2})} \quad (34)$$

When n represents the number of users with the condition of $n \geq 2C_L$. Therefore, the probability of one user sending signal to router is p_{TR} as shown in Eqs. (35). Also, the probability of successful sending is p_S as shown in Eqs. (36) and the probability of data collision is p_C shown in Eqs. (37).

$$p_{TR} = \binom{n}{1} (1 - (1 - \tau)^n) \quad (35)$$

$$p_S = \frac{\sum_{j=1}^{C_L} \binom{n}{j} \tau^j (1 - \tau)^{n-j}}{p_{TR}} \quad (36)$$

$$p_C = \frac{\sum_{j=C_L+1}^n \binom{n}{j} \tau^j (1 - \tau)^{n-j}}{p_{TR}} \quad (37)$$

The system throughput can be given as shown in Eqs. (38).

$$\text{Throughput} = \frac{p_{TR} p_S P_{size} B_r}{(1 - p_{TR})\sigma + p_{TR} p_S T_S + p_{TR} p_C T_C} \quad (38)$$

When T_S is the transmitting time and T_C is collision time.

$$T_S = MACH + PHY + P_{size} + SIFS + ACK + DIFS + 2\sigma \quad (39)$$

$$T_C = MACH + PHY + P_{size} + SIFS + \sigma \quad (40)$$

Also, the delay of the system can be expressed as:

$$\text{Delay} = \frac{\left(\frac{1}{p_{TR}} - 1 \right) \sigma + p_S T_S + p_C T_C}{P_{size}} \quad (41)$$

This section expresses the calculating method to evaluate the system performance which are system throughput and delay. Furthermore, the SDTR concept adopts the covering area of antenna to enhance network performance. In next section, we confirm the SDTR concept with the computer simulation and

measurement. The simulation parameters can be found in Tab. 1.

4 Simulation and Experiments

This section shows detail of complete circuits for the SDTR systems. Also, the throughput and delay are the parameters to evaluate the performance of SDTR system comparing to the conventional one.

4.1 Radiation Pattern

The SDTR concept of this research work is to utilize two different radiation patterns for transmitting and receiving modes at the router. The photograph of measurement in anechoic chamber is shown in Fig. 9. The most challenging point is that these two different patterns are simultaneously operated at the same time and frequency. The 2×2 -lattice antenna array is assumed. The system configuration is depicted in Fig. 3. The simulated and measured radiation patterns for both transmitting and receiving modes are shown in Fig. 10 (a) and Fig. 10 (b), respectively. As shown in the figures, the directional pattern is obtained in the transmitting mode while omni-directional pattern is obtained in receiving mode. Also, the simulated and measured ones are in a good agreement.



Figure 9: Radiation pattern measurement

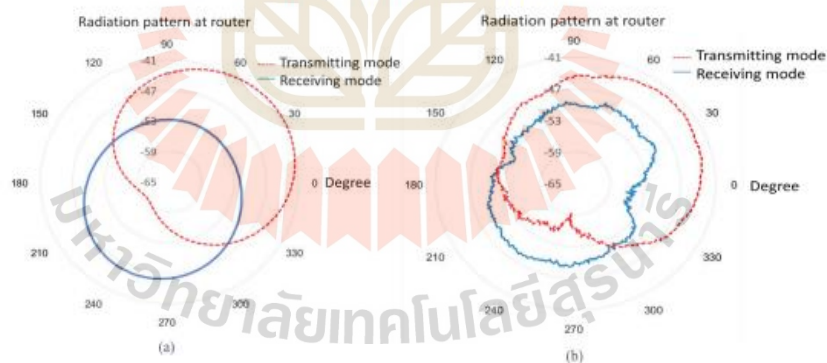


Figure 10: The radiation patterns of antenna for transmitting and receiving modes: (a) simulated; (b) measured

4.2 Full Circuit Structure

A prototype of SDTR system shown in Fig. 2 was constructed as shown in Fig. 11. The 2×2 monopole antennas are employed with the array spacing of 0.8 cm. For transmitting mode, the input signal is conveyed to multiplexer in order to separate the input signal into 4 equal-power signals. Then the signal is passed to the SDTR circuits as shown in Fig. 4. At this point, the phase of individual signal can be adjusted according to the pre-defined weighting scheme. This process allows the transmitting radiation pattern to be directional as the main beam can be directed to the desired user. For receiving mode, the received signal from the array is conveyed to the SDTR circuit as shown in Fig. 4. At this point, the signal will be weighted to form a pre-defined beam. Then, the weighted signal is passed to multiplexer and router, respectively.



Figure 11: Photograph of SDTR circuit

4.3 Network Performance

In this paper, some scenarios are assumed in computer simulation to evaluate the performance of SDTR systems (Type C) comparing to Types A and B shown in Fig. 1. Tab. 2 shows the number of active node pair when they can simultaneously operate at the same time. As we can see, only one user can access the router (successful node pair) at a given time duration. This is because the radiation pattern of router is omni-directional for both transmitting and receiving modes. So, the router allows the communication with one user at a time and the others are considered to be hidden nodes. In addition, Type B gives higher performance in terms of the number of active node pair. However, Type C provides the best number of active node pair among these three systems. This is because Type C can cure the impairments of deafness and hidden node as the systems allow a simultaneous communication for users. Fig. 12 shows the network throughput comparing among Types A, B and C. As we can see, at a given saturated throughput, Type C allows a higher number of active node pair comparing to Types A and B. Also, Fig. 13 shows the system delay for Types A, B and C. As expected, Type C provides the lowest delay comparing to Types A and B. The reason behind these achievements is that Type C allows many users to simultaneously access the router at same time.

4.4 Peer to Peer Measurement

To confirm the performance of SDTR system, the constructed prototype is tested in real circumstance. Types A, B and C are assumed as shown in Fig. 14. Two users and one router are assumed in the system. Type A employs omni-directional pattern for both transmitting and receiving modes as a conventional system. Type B employs directional pattern for both modes. Type C employs omni-directional pattern for receiving mode while directional pattern is employed for transmitting mode. The measurement is set up in indoor as shown in Fig. 15. The frequency is 2.45 GHz. The distance between user and router is 5 m. The User 1 starts sending the data to router and then router passes the data to User 2. The throughput is countered when the data transfer is completely finished at User 2 for all cases. The measured throughput for all types is shown in Fig. 16 to 18. As we can see, Types A and B provide a similar throughput as User 2 has to wait until the communication between User 1 and router finishes, hence the delay still remains. However, Type

xxxx

CMC, 2022, vol.xx, no.xx

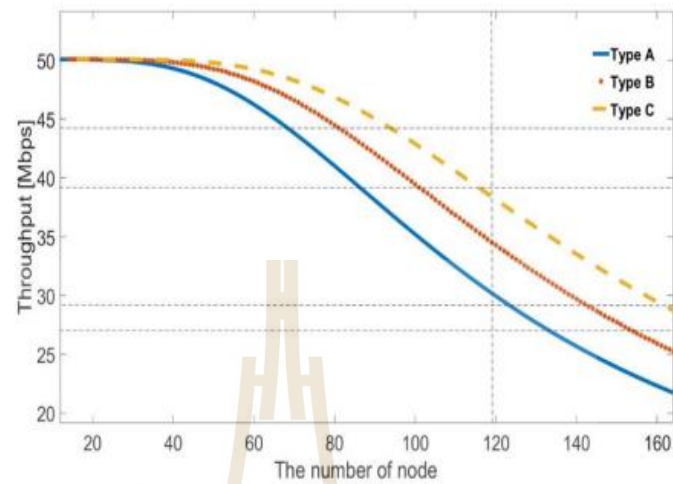


Figure 12: Simulated throughput of the network

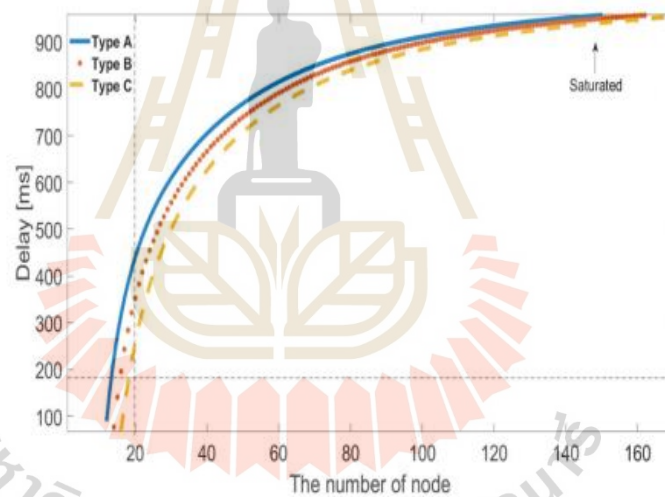


Figure 13: Trending of delay in network

C (SDTR system) provides the highest throughput over Types A and B. This is because the SDTR systems allow the router to communicate with Users 1 and 2 at the same time. Therefore, the system delay is relatively decreased. Also, this SDTR system can cure the problem of hidden terminal.

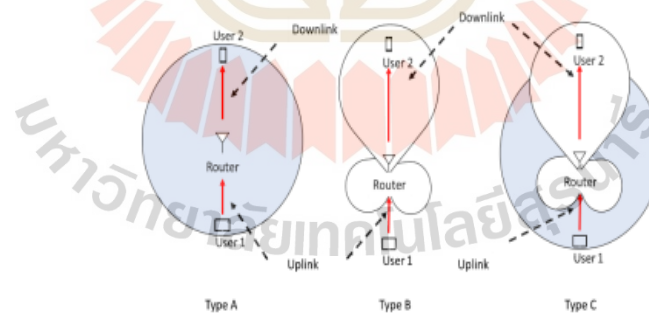
Table 1: Key parameter for simulation

Quantity	Value
packet payload (P_{size})	8184 bits
PHY header (PHY)	128 bits
MAC header (MACH)	272 bits
ACK	240 bits
data rate (B_r)	45 Mbps
propagation delay (σ)	1 μ s
maximum number of retransmission (m)	3
maximums contain windows size (W_0)	8
DIFS	34 μ s
SIFS	16 μ s
SINR	10 dB

Table 2: Active pair node in network

Antenna	Simulation	Measured
Type A	1	6
Type B	18	7
Type C	23	8

The active node is compared between simulation pattern and measured pattern. This comparing offers the trend of each type in section I.

**Figure 14:** Scenario for throughput evaluation for Type A, B and C

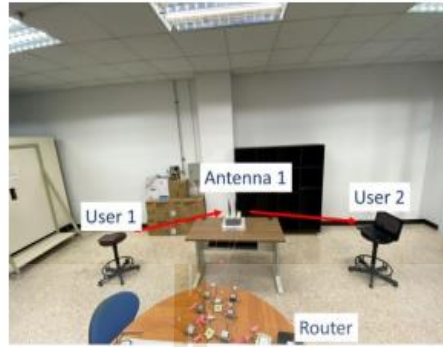


Figure 15: Photograph of peer-to-peer scenario

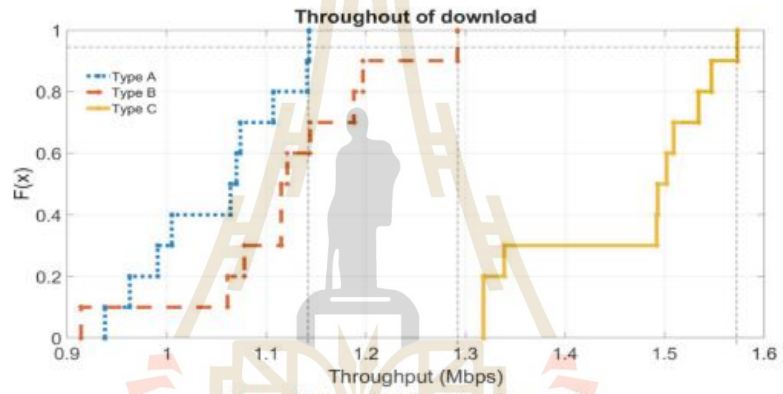


Figure 16: Download throughput in network

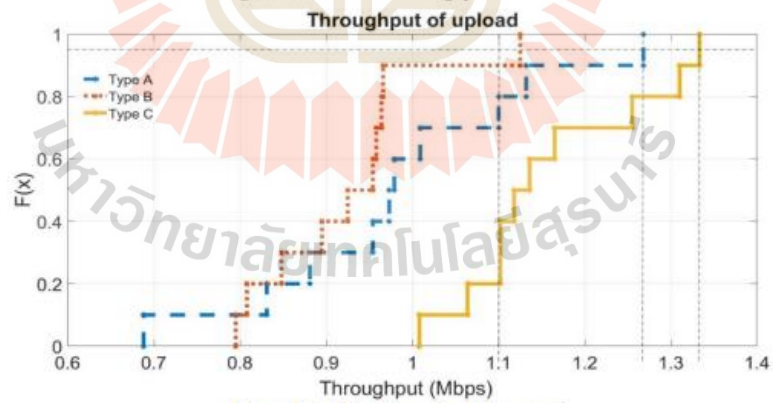


Figure 17: Upload throughput in network

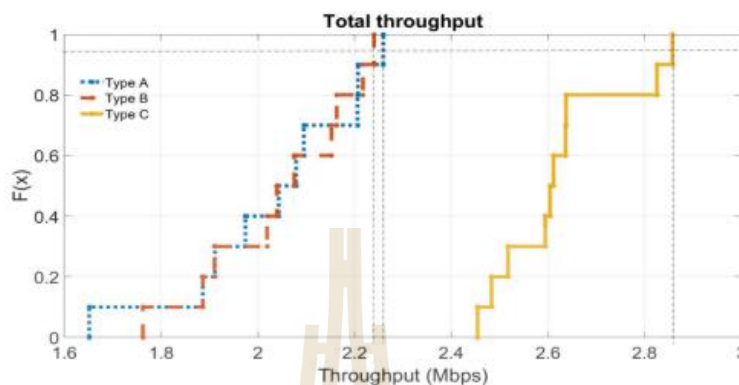


Figure 18: Total throughput in network

5 Conclusion

This paper has introduced the concept to enhance the wireless network performance. The SDTR concept is to employ two different radiation patterns at router, omni-directional for receiving mode and directional for transmitting mode. To decrease the system delay, these two modes are simultaneously operated at the same time. The SDTR concept is a modification on physical layer so that it can be applied for a current MAC protocol. A prototype of SDTR systems has been constructed and tested comparing to the simulation results. The throughput measurement was performed in real circumstances. The obtained results have revealed that the SDTR systems provide a higher throughput and a lower delay comparing to the conventional system. The increased throughput occurs as the systems can tackle the impairments of deafness and hidden terminals. Also, the lower delay is achieved as the SDTR system allows the router to communicate with more than one user at the same time. This paper is limited to one channel testing. Size is also a factor in usability. In the future, we should combine it with a smaller harness such as a Y-junction circulator.

Funding Statement: This work is financially supported from the Thailand Research Fund through the Royal Golden Jubilee Ph.D. program (Grant No.PHD/0118/2558)

Conflicts of Interest: The authors declared that there is no conflict of interest.

References

- [1] X. Ding, B. Wang, G. D. Ge and D. Wang, "A broadband VHF/UHF double-whip antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 2, pp. 719–724, 2012.
- [2] V. Deepu, R. K. Raj, M. Joseph, M. N. Suma and P. Mohanan, "Compact asymmetric coplanar strip fed monopole antenna for multiband applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 8, pp. 2351–2357, 2007.
- [3] D. L. Wu, G. Zhang, J. F. Li, Y. J. Wu and X. X. Tian, "A low-profile antenna with omnidirectional and unidirectional radiation patterns over two operation bands," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 182691–182700, 2019.
- [4] L. Gong, Y. Fu, K. Y. Chan, J. A. Nanzer and R. Ramer, "An SIW horn antenna fed by a coupled mode emulating pyramidal horn antennas," *IEEE Access*, vol. 68, no. 1, pp. 33–42, 2020.

- [5] P. Valale Prasannakumar, M. A. Elmansouri and D. S. Filipovic, "Broadband reflector antenna with high isolation feed for full-duplex applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 5, pp. 2281–2290, 2018.
- [6] A. Dadgarpour, B. Zarghooni, B. S. Virdee and T. A. Denidni, "One-and two-dimensional beam-switching antenna for millimeter-wave MIMO applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 2, pp. 564–573, 2016.
- [7] J. Costa, E. Lima and C. Fernandes "Compact beam-steerable lens antenna for 60-GHz wireless communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 10, pp. 2926– 2933, 2009.
- [8] N. Reza zadeh and L. Shafai, "Impact of element pattern symmetry on the effective degrees of freedom in dual-polarized gss adaptive antenna arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4669– 4677, 2018.
- [9] H. N. Dai, K. W. Ng, M. Li and M. Y. Wu, "An overview of using directional antennas in wireless networks," *International Journal of Communication Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 413– 448, 2011.
- [10] X. Cai and K. Sarabandi, "A compact broadband horizontally polarized omnidirectional antenna using planar folded dipole elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 2, pp. 414– 422, 2016.
- [11] G. Bianchi, D. Messina, L. Scalia and I. Tinnirello, "A space-division time-division multiple access scheme for high throughput provisioning in WLANs" *IEEE International Conference on Communications*, COEX convention center, Seoul Korea, vol. 4, pp. 2728– 2733, 2005.
- [12] B. Alawieh, Y. Zhang, C. Assi and H. Moutah, "Improving spatial reuse in multihop wireless networks-a survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 3, pp. 71– 91, 2009.
- [13] T. S. Kim, H. Lim and J. C. Hou, "Understanding and improving the spatial reuse in multihop wireless networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, no. 10, pp. 1200– 1212, 2008.
- [14] T. Y. Lin and J. C. Hou, "Interplay of spatial reuse and SINR-determined data rates in CSMA/CA-based, multi-hop, multi-rate wireless networks," *IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, IEEE Computer Society, USA, pp. 803– 811, 2007.
- [15] V. Dmitriev and W. Castro, "Dynamically controllable terahertz graphene Y-circulator," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 2, pp. 1– 12, 2019.
- [16] B. Avser, R. F. Frazita and G. M. Rebeiz, "Interwoven feeding networks with aperture sinc-distribution for limited-scan phased arrays and reduced number of phase shifters," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 5, pp. 2401– 2413, 2018.
- [17] R. Singh, A. Sharma and R. Singh, "Power efficient design of multiplexer based compressor using adiabatic logic," *International Journal of Computer Applications*, vol. 81, no. 10, pp. 45– 50, 2013.
- [18] R. Yazdani, H. Aliakbarian, A. Sahraei and G. A. Vandenbosch, "A compact triple-band dipole array antenna for selected sub 1 GHz, 5G and WiFi access point applications," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 15, no. 15, pp. 1866- 1876, 2021.
- [19] N. Nie, X. Yang, Z. N. Chen and B. Wang, "A low-profile wideband hybrid metasurface antenna array for 5G and WiFi Systems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 2, pp. 665-671, 2020.
- [20] P. Mathur, R. Augustine, M. Gopikrishna and S. Raman, "Dual MIMO antenna system for 5G mobile phones, 5.2 GHz WLAN, 5.5 GHz WiMAX and 5.8/6 GHz WIFI applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 106734-106742, 2021.
- [21] O. Singh, V. K. Verma and S. L. Tyagi, "Algorithm for frequency division multiple and time division multiple access schemes," *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, vol. 8, no. 1, pp. 1282-1288, 2021.
- [22] A. Sarin and A. Avestruz, "A framework for code division multiple access wireless power transfer," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 135079-135101, 2021.
- [23] P. M. Shah, S. S. Qureshi, R. A. Butt, S. Mahdaliza Idrus and J. Mirza, "Design and analysis of 5G network architecture with orthogonal frequency division multiple access based passive optical network," *Optical Fiber Technology*, vol. 67, pp. 102678, 2021.
- [24] H. Yin and S. Alamouti, "OFDMA: A broadband wireless access technology," 2006 *IEEE Sarnoff Symposium*, Princeton, NJ, USA, pp. 1-4, 2006

- [25] J. M. Hamamreh, M. Abewa and J. P. Lemayian, "New non-orthogonal transmission schemes for achieving highly efficient, reliable, and secure multi-user communications," *RS Open Journal on Innovative Communication Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 12, 2020.
- [26] S. Karatepe, M. Kirik and J. M. Hamamreh, "Novel nonorthogonal multi-access method for multi-user MIMO with antenna number modulation," *RS Open Journal on Innovative Communication Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 1-11, 2021.
- [27] B. Clerckx, Y. Mao, R. Schober, E. A. Jorswieck, D. J. Love *et al.*, "Is NOMA efficient in multi-antenna networks? a critical look at next generation multiple access techniques," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 1310-1343, 2021.
- [28] K. Kosek-Szott, "A survey of MAC layer solutions to the hidden node problem in ad-hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 10, no. 3, pp. 635-660, 2012.
- [29] A. P. Subramanian and S. R. Das, "Addressing deafness and hidden terminal problem in directional antenna based wireless multi-hop networks," *Wireless Networks*, vol. 16, no. 6, pp. 1557-1567, 2008.
- [30] S. Chakraborty, S. Nandi and S. Chattopadhyay, "Alleviating hidden and exposed nodes in high-throughput wireless mesh networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 2, pp. 928-937, 2016.
- [31] F. Babich and M. Comisso, "Throughput and delay analysis of 802.11-based wireless networks using smart and directional antennas," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 57, no. 5, pp. 1413-1423, 2009.
- [32] M. Mehrnough, V. Sathya, S. Roy and M. Ghosh, "Analytical modeling of Wi-Fi and LTE-LAA coexistence: throughput and impact of energy detection threshold," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, no. 4, pp. 1990-2003, 2018.
- [33] R. Yin, G. Y. Li and A. Maaref, "Spatial reuse for coexisting LTE and Wi-Fi systems in unlicensed spectrum," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 2, pp. 1187-1198, 2018.
- [34] Z. Tang, X. Zhou, Q. Hu and G. Yu, "Throughput analysis of LAA and Wi-Fi coexistence network with asynchronous channel access," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9218-9226, 2018.
- [35] L. Xiong and G. Mao, "Saturated throughput analysis of IEEE 802.11e EDCA," *Computer Networks*, vol. 51, no. 11, pp. 3047-3068, 2007.
- [36] J. Simo Reigadas, A. Martinez-Fernandez, J. Ramos-Lopez and J. Seoane-Pascual, "Modeling and optimizing IEEE 802.11 DCF for long-distance links," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, no. 6, pp. 881-896, 2010.



ประวัติผู้เขียน

นายอัครชัย อินทนิล เกิดเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม พุทธศักราช 2536 ที่จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนเมืองสุรินทร์ ระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสุรวิทยาคาร จังหวัดสุรินทร์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา จากนั้น ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและเอกในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับทุนการศึกษาจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 18

