

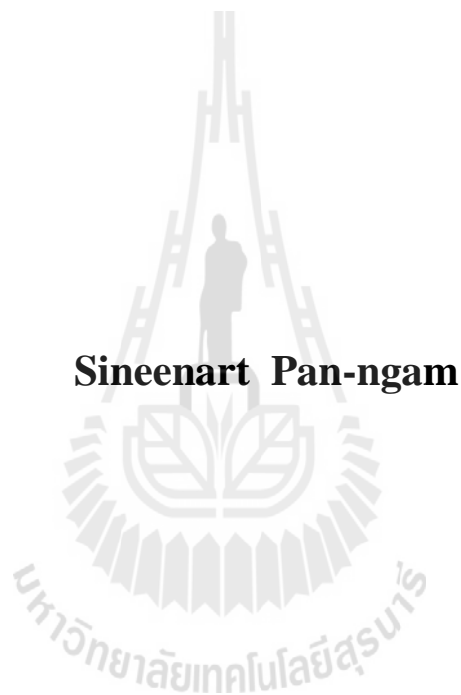
การศึกษาถึงผลกระทบของการแทรกสอดของสัญญาณร่วมที่มีต่อ
สมรรถนะของเครือข่ายเมชไร้สายที่ใช้สายอากาศแก่ง



นางสาวสินีนานา เป็นนาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**INVESTIGATION INTO THE EFFECT OF
CO-CHANNEL INTERFERENCE ON WMN
PERFORMANCE EMPLOYING SMART ANTENNAS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การศึกษาถึงผลกระทบของการแทรกสอดของสัญญาณร่วมที่มีต่อสมรรถนะ
ของเครือข่ายเมชไร้สายที่ใช้สายอากาศแก่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.วิภาวี หัตถกรรม)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ปิยาภรณ์ กระจงนอก)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ลิตินาฎ เป็นางาม : การศึกษาถึงผลกระทบของการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมที่มีต่อ
สมรรถนะของเครือข่ายเมฆไร้สายที่ใช้สายอากาศเก่ง (INVESTIGATION INTO THE
EFFECT OF CO-CHANNEL INTERFERENCE ON WMN PERFORMANCE
EMPLOYING SMART ANTENNAS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.
มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล, 150 หน้า

ระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย (Wireless Mesh Networks : WMNs) ถูกพัฒนามาจากระบบ
เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks : WLANs) ซึ่งเกิดจากความต้องการ
ที่จะแก้ปัญหาในเรื่องของการเดินสายเคเบิลเพื่อเชื่อมต่อจุดเข้าถึง (access point) ทุกตัว ระบบ
เครือข่ายเมฆไร้สายเป็นเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายที่ทำให้จุดเข้าถึงสามารถส่งผ่านข้อมูลได้
โดยตรงแบบไร้สาย ไม่ต้องผ่านสายเคเบิล ทำให้การสร้างและการจัดวางเครือข่ายเมฆไร้สาย
มีต้นทุนต่ำลง มีความยืดหยุ่นในระบบจึงสามารถขยายหรือปรับเปลี่ยนเครือข่ายได้ อุปกรณ์จัด
เส้นทาง (routers) ในเครือข่ายเมฆไร้สาย ใช้สายอากาศที่มีรูปแบบการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง
(omnidirectional pattern) เมื่อมีการส่งข้อมูลพร้อมกัน จะส่งผลให้คุณภาพของการติดต่อสื่อสาร
ในย่านความถี่นั้น ลดน้อยลง ซึ่งเกิดจากการที่สายอากาศที่ติดอยู่กับอุปกรณ์จัดเส้นทางมีการแผ่
พลังงานแบบรอบทิศทางส่งผลให้เกิดสัญญาณแทรกสอด (interference signal) ในช่องสัญญาณร่วม
ดังนั้นการใช้งานในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ความถี่เดียวกันให้เกิดประสิทธิภาพจำเป็นต้อง
คำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น ปัญหาหนึ่งที่ทำให้ระบบเกิดความเสียหายได้แก่ การเกิดการแทรก
สอดของช่องสัญญาณร่วม (co-channel interference) ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอวิธี
แก้ปัญหาดังกล่าวโดยการติดตั้งระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ไว้ที่อุปกรณ์
จัดเส้นทาง ซึ่งเป็นระบบที่ประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับ (array antennas) และระบบ
ประมวลผลสัญญาณ (signal processing unit) ด้วยการทำงานร่วมกันระหว่างสองส่วนหลักที่ได้
กล่าวมาแล้ว ทำให้ระบบสามารถก่อรูปลำคลื่นหลัก (main beam) ไปยังทิศทางของอุปกรณ์
จัดเส้นทางที่สนใจ กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การก่อรูปลำคลื่น (beamforming) ซึ่งกระบวนการ
นี้จะทำให้คุณภาพของสัญญาณที่ใช้สื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทางที่สนใจดีขึ้นและยัง
สามารถลดปัญหาของสัญญาณแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมได้

SINEENART PAN-NGAM : INVESTIGATION INTO THE EFFECT OF
CO-CHANNEL INTERFERENCE ON WMN PERFORMANCE
EMPLOYING SMART ANTENNAS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
MONTHIPPA UTHANSAKUL, Ph.D., 150 PP.

CIRCULAR ARRAY/ MICROSTRIP/ PHASE SHIFTER /SCR PROTOCOL/
SWITCHED-BEAM ANTENNA/WMN

Wireless Mesh Networks (WMNs) was developed from Wireless Local Area Networks in order to tackle the problem of using cable. As a result, the cost of wireless network implementation is low. Also, flexibility in term of system expansion can be achieved. So far, routers in WMNs employ omni-directional antenna. This can cause interference signals to neighbor routers when they need to communicate to each other simultaneously, so called co-channel interference. According to this phenomenon, the performance of WMNs is degraded. Therefore, this thesis proposes the idea of employing smart antennas at routers. In general, the smart antennas consist of array antennas and signal processing unit. These systems can point the main beam to desired router, so called beamforming process. This leads to an increase in signal quality and also eases of co-channel interference.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2011

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวิ หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจงนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณนางสาวปณิฎฐาท์ อาจหาญ ที่คอยช่วยเหลือทางด้านเอกสารและขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษาด้านวิชาการและคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอขอบคุณนายพีรพรรณ พิพตอย ที่คอยเป็นกำลังใจเสมอมา และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอน ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

สินีนานู เป็นงาม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	4
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	4
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	4
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล	5
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์	5
2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กล่าวนำ.....	6

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2	ทฤษฎีเครือข่ายเมฆไร้สาย	6
2.2.1	โครงสร้างของเครือข่ายเมฆไร้สาย	7
2.2.2	ทฤษฎีแถวคอย	9
2.2.3	โปรโตคอลที่ใช้ควบคุมการเข้าใช้งานสื่อกลาง	12
2.2.4	การแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม.....	12
2.2.5	ข้อดีข้อเสียของระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย	13
2.3	สายอากาศแถวลำดับ	15
2.3.1	สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น	15
2.3.2	สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ.....	17
2.3.3	สายอากาศแถวลำดับแบบวงกลม	20
2.4	ระบบสายอากาศแก่ง	22
2.4.1	สายอากาศแก่งแบบสวิทช์ลำดับ	26
2.4.2	สายอากาศแก่งแบบปรับลำดับ	28
2.5	ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	29
2.6	สรุป	33
3	การจำลองผลทางโปรแกรม	
3.1	กล่าวนำ	34
3.2	ระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย.....	34
3.3	สายอากาศแถวลำดับ	39
3.4	เครือข่ายก่อรูปลำดับ	51
3.5	วงจรเลื่อนเฟส	56
3.6	ผลการทดลอง.....	69
3.7	สรุป	73
4	การทดสอบและวิเคราะห์ผล	
4.1	กล่าวนำ	74

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	การทดสอบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นและวงจรเลื่อนเฟส.....	74
4.2.1	การทดสอบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นเพื่อหาค่า ความเหมาะสมของจำนวนสายอากาศ.....	74
4.2.2	การทดสอบวงจรเลื่อนเฟสสำหรับสายอากาศ สวิตช์ลำคลื่น	78
4.2.3	ผลการทดสอบวัดแบบรูปแม่พลังงานของสายอากาศ แถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น	86
4.3	ผลการวัดทดสอบอัตรายาย.....	92
4.4	การทดสอบสมรรถนะของระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย ที่ใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นแบบแถวลำดับ วงกลมขนาด 6 ต้น.....	100
4.5	สรุป.....	105
5	สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	106
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ	107
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต	107
	รายการอ้างอิง	108
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. Flow Chart ของโปรแกรม.....	111
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	144
	ประวัติผู้เขียน.....	150

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายเมซไร์สาย.....51
3.2	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักสำหรับระบบที่วางอุปกรณ์ สี่เหลี่ยมและใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$53
3.3	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักสำหรับระบบที่วางอุปกรณ์ หกเหลี่ยมและใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$54
3.4	ค่าเฟสที่ได้จากการจำลองผลสำหรับระบบที่วางอุปกรณ์ สี่เหลี่ยมและใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$58
3.5	ค่าเฟสที่ได้จากการจำลองผลสำหรับระบบที่วางอุปกรณ์ หกเหลี่ยมและใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$58
3.6	ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักที่ได้จาก โปรแกรม CST Microwave Studio.....68
4.1	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิตซ์ ลำดับขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น75
4.2	ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ วงจรเลื่อนเฟสสำหรับสายอากาศแถวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$86
4.3	ผลการคำนวณอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น จากการวัดทดสอบเปรียบเทียบ กับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมเมทแลบ96

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายแบบเมช	7
2.2	โครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมชไร้สาย	8
2.3	ลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งาน	9
2.4	โครงสร้างเครือข่ายเมชแบบไฮบริด.....	10
2.5	ระบบแฉวคอย.....	11
2.6	การวางตัวของสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น.....	17
2.7	การวางตัวของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ.....	19
2.8	เฟสที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละตัวสำหรับสายอากาศแถวลำดับ เชิงระนาบ 2×2 เทียบกับทิศทางการมาถึงของสัญญาณ.....	19
2.9	ระบบพิกัดของลำดับวงกลม	22
2.10	ระบบสายอากาศเก่ง.....	23
2.11	ระบบสายอากาศเก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการ และสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ	24
2.12	โครงสร้างและองค์ประกอบของสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำดับ.....	27
2.13	โครงสร้างและองค์ประกอบของสายอากาศเก่งแบบปรับลำดับ.....	28
2.14	ลักษณะโครงสร้างไมโครสตริป.....	30
2.15	รูปแบบการแพร่กระจายสนามของสายนำสัญญาณไมโครสตริป.....	31
2.16	วงจรเลื่อนเฟสที่ออกแบบบนไมโครสตริป	33
3.1	แบบการวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม.....	35
3.2	แบบการวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม	36
3.3	รูปแสดงสถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์ แบบสี่เหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 1	36
3.4	รูปแสดงสถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์ แบบสี่เหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 2	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	รูปแสดงสถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 337
3.6	รูปแสดงสถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 138
3.7	รูปแสดงสถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 238
3.8	รูปแสดงสถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 339
3.9	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$40
3.10	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบขนาด 3×3 ต้น และสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น41
3.11	การจัดวางสายอากาศแบบแฉวลำดับเชิงระนาบและแบบแฉวลำดับวงกลม42
3.12	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 3 ต้น ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกรอ่วงน้ำหนัก43
3.13	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 4 ต้น ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกรอ่วงน้ำหนัก43
3.14	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 5 ต้น ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกรอ่วงน้ำหนัก44
3.15	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกรอ่วงน้ำหนัก44
3.16	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 7 ต้น ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกรอ่วงน้ำหนัก45
3.17	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 8 ต้น ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกรอ่วงน้ำหนัก45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 3 ต้น ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก.....46
3.19	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 4 ต้น ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก..... 46
3.20	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 5 ต้น ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก..... 47
3.21	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก..... 47
3.22	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 7 ต้น ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก..... 48
3.23	การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 8 ต้น ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก..... 48
3.24	กราฟแสดงจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม..... 49
3.25	องค์ประกอบของสายอากาศที่ได้เสนอ 52
3.26	แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$ สำหรับระบบที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยม 55
3.27	แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$ สำหรับระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยม 56
3.28	ตัวเลื่อนเฟส 56
3.29	วงจรเลื่อนเฟส -55.11° 60
3.30	มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -55.11° 61
3.31	แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส -55.11° 61
3.32	วงจรเลื่อนเฟส -63.52° 61
3.33	มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -63.52° 62
3.34	แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส -63.52° 62
3.35	วงจรเลื่อนเฟส -31.82° 63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.36	มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -31.82°	63
3.37	แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส -31.82°	64
3.38	วงจรเลื่อนเฟส 31.82°	64
3.39	มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 31.82°	65
3.40	แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส 31.82°	65
3.41	วงจรเลื่อนเฟส 55.11°	65
3.42	มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 55.11°	66
3.43	แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส 55.11°	66
3.44	วงจรเลื่อนเฟส 63.52°	67
3.45	มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 63.52°	67
3.46	แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส 63.52°	68
3.47	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง SINR กับความน่าจะเป็น ของเวลาที่เกิดการชนกันของสถานการณ์ที่ 1 สถานการณ์ที่ 2 และ สถานการณ์ที่ 3 สำหรับเครือข่ายเมชไร้สายที่วางอุปกรณ์ แบบสี่เหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$	71
3.48	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง SINR กับความน่าจะเป็น ของเวลาที่เกิดการชนกันของสถานการณ์ที่ 1 สถานการณ์ที่ 2 และ สถานการณ์ที่ 3 สำหรับเครือข่ายเมชไร้สายที่วางอุปกรณ์ แบบสี่เหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$	71
3.49	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง SINR กับความน่าจะเป็น ของเวลาที่เกิดการชนกันของสถานการณ์ที่ 1 สถานการณ์ที่ 2 และ สถานการณ์ที่ 3 สำหรับเครือข่ายเมชไร้สายที่วางอุปกรณ์ แบบหกเหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.50	กราฟแสดงผลการวัดทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง SINR กับความน่าจะเป็นของเวลาที่เกิดการชนกันของสถานการณ์ที่ 1 สถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 3 สำหรับเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$	72
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสายอากาศกับค่าเฉลี่ย SINR สำหรับเครือข่ายเมฆไร้สายที่มีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม	77
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสายอากาศกับค่าเฉลี่ย SINR สำหรับเครือข่ายเมฆไร้สายที่มีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม	78
4.3	วงจรถัดเฟสที่สร้างขึ้นจริง	79
4.4	มุมเฟสของวงจรถัดเฟส -31.82°	80
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรถัดเฟส -31.82°	80
4.6	มุมเฟสของวงจรถัดเฟส 31.82°	81
4.7	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรถัดเฟส 31.82°	81
4.8	มุมเฟสของวงจรถัดเฟส -55.11°	82
4.9	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรถัดเฟส -55.11°	82
4.10	มุมเฟสของวงจรถัดเฟส 55.11°	83
4.11	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรถัดเฟส 55.11°	83
4.12	มุมเฟสของวงจรถัดเฟส -63.64°	84
4.13	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรถัดเฟส -63.64°	84
4.14	มุมเฟสของวงจรถัดเฟส 63.64°	85
4.15	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรถัดเฟส 63.64°	85
4.16	สายอากาศที่ใช้ในการทำการทดสอบจริง	87
4.17	การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 0^\circ$	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18	การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 60^\circ$ 88
4.19	การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 90^\circ$ 88
4.20	การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 120^\circ$ 89
4.21	การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 180^\circ$ 89
4.22	การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 240^\circ$ 90
4.23	การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 270^\circ$ 90
4.24	การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 300^\circ$ 91
4.25	วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศโมนิโพล 92
4.26	วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแฉวลำดับ 94
4.27	การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ แฉวลำดับวงกลมขนาด 3 ต้น 97
4.28	การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ แฉวลำดับวงกลมขนาด 4 ต้น 97
4.29	การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ แฉวลำดับวงกลมขนาด 5 ต้น 98
4.30	การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ แฉวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น 98
4.31	การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ แฉวลำดับวงกลมขนาด 7 ต้น 99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ แถวลำดับวงกลมขนาด 8 ต้น 99
4.33	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองผลที่ได้จากสายอากาศ ที่วัดจริงกับสายอากาศทางทฤษฎีของระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย ที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับ วงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$ 101
4.34	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของอัตราส่วนสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของระบบ เครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบ สี่เหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$ 102
4.35	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองผลที่ได้จากสายอากาศ ที่วัดจริงกับสายอากาศทางทฤษฎีของระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย ที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับ วงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$ 103
4.36	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของอัตราส่วนสัญญาณ ต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของระบบ เครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบ หกเหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$ 104

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบเครือข่ายเมชไร้สาย (Wireless Mesh Networks : WMNs) ถูกพัฒนามาจากระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks : WLANs) ซึ่งเกิดจากความต้องการที่จะแก้ปัญหาในเรื่องของการเดินสายเคเบิลเพื่อเชื่อมต่อจุดเข้าถึง (access point) ทุกตัว ระบบเครือข่ายเมชไร้สาย เป็นเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายที่ทำให้จุดเข้าถึงสามารถส่งผ่านข้อมูลได้โดยตรงแบบไร้สายที่ไม่ต้องผ่านสายเคเบิล ซึ่งเครือข่ายนี้ใช้คลื่นวิทยุในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายที่วางตัวในลักษณะเมช (mesh topology) ทำให้การสร้างและการจัดวางเครือข่ายเมชไร้สายมีต้นทุนต่ำลง มีความยืดหยุ่นในระบบจึงสามารถขยายหรือปรับเปลี่ยนเครือข่ายได้

จากในระบบเครือข่ายเมชไร้สายที่มีการใช้คลื่นวิทยุเป็นสื่อกลางในการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทาง (routers) ในปัจจุบันอุปกรณ์เหล่านี้ใช้สายอากาศที่มีรูปแบบการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง (omnidirectional pattern) เมื่อมีการส่งข้อมูลพร้อมกัน จะส่งผลให้คุณภาพของการติดต่อสื่อสารในย่านความถี่นี้ลดน้อยลง ดังนั้นการใช้งานในระบบเครือข่ายเมชไร้สายให้เกิดประสิทธิภาพจำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น ปัญหาหนึ่งที่ทำให้ระบบเกิดความเสียหายได้แก่ การเกิดการแทรกสอดของสัญญาณร่วม (co-channel interference) ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการติดตั้งระบบเสาอากาศเก่ง (smart antenna systems) ไว้ที่อุปกรณ์จัดเส้นทาง ซึ่งเป็นระบบที่ประกอบด้วยเสาอากาศแถวลำดับ (array antennas) และส่วนประมวลผลสัญญาณ (signal processing unit) ด้วยการทำงานร่วมกันระหว่างสองส่วนนี้ ทำให้ระบบสามารถก่อรูปลำคลื่นหลัก (main beam) ไปยังทิศทางของอุปกรณ์จัดเส้นทางที่สนใจ กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การก่อรูปลำคลื่น (beamforming) ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้คุณภาพของสัญญาณที่ใช้สื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทางที่สนใจดีขึ้น และยังสามารถลดปัญหาของสัญญาณแทรกสอดของช่องสัญญาณร่วมได้

สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น (switched-beam antennas) จัดอยู่ในเทคโนโลยีสายอากาศแก่ง ซึ่งเป็นระบบที่ประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับ (array antennas) และระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing unit) ซึ่งระบบนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้โดยการก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) ในทิศทางที่กำหนดไว้ก่อน จากนั้นลำคลื่นที่ให้ความแรงของสัญญาณสูงที่สุดจะถูกเลือกโดยตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) เนื่องจากการใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และไม่ซับซ้อน ระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นจึงได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องดังนี้ Muthaiah, S. N., Iyer, A., Karnik, A., and Rosenberg, C. (2007); Yong, Z., Fei, W. Y., Kun, Z. L., and De, S. J. (2007); Sato, N., and Fujii, T. (2007) พบว่างานวิจัยของ Muthaiah, S. N., Iyer, A., Karnik, A., and Rosenberg, C. (2007) ได้นำเทคโนโลยีสายอากาศแก่งมาติดตั้งที่อุปกรณ์จัดหาเส้นทางในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดหาเส้นทางให้ดีขึ้น ส่วนในงานวิจัยของ Yong, Z., Fei, W. Y., Kun, Z. L., and De, S. J. (2007) ได้มีการจำลองแบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของค่าวิสัยสามารถ (throughput) แสดงให้เห็นว่าระบบค่าวิสัยสามารถดีขึ้นเมื่อนำสายอากาศแก่งมาใช้ในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย และในงานวิจัยของ Sato, N., and Fujii, T. (2007) ได้มีการจำลองแบบพื้นที่ครอบคลุมเครือข่ายเมฆไร้สายโดยใช้ระบบสายอากาศแก่ง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของวิสัยสามารถและการคอยการส่งข้อมูล (waiting packet) จากปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้ศึกษามา ยังไม่มีการคำนึงถึงปัญหาในเรื่องการแทรกสอดของสัญญาณร่วม ซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลให้การติดต่อสื่อสารในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายมีประสิทธิภาพต่ำลง

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณร่วมในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายและเสนอวิธีที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการติดตั้งระบบสายอากาศแก่งไว้ที่อุปกรณ์จัดเส้นทาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Interference plus Noise Ratio : SINR) โดยใช้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น ออกแบบและสร้างแผงวงจรพิมพ์สำหรับส่วนประมวลผลสัญญาณ ทดสอบจริงด้วยการสร้างชุดทดสอบ โดยผลที่ได้จากชุดทดสอบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความเหมาะสมในการเลือกจำนวนสายอากาศที่ใช้ในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย เพื่อที่จะได้นำสายอากาศแก่งมาใช้งานในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและปัญหาของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย

1.2.2 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของระบบสายอากาศกึ่งแบบสวิตช์ลำดับ

1.2.3 เพื่อออกแบบและสร้างสายอากาศกึ่งแบบสวิตช์ลำดับในการใช้งานในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ระบบสายอากาศกึ่งแบบสวิตช์ลำดับสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ใช้โปรแกรมแมทแล็บ (Matlab) ในการจำลองโครงสร้างของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ได้นำเสนอ

1.4.2 ใช้โปรแกรมแมทแล็บ (Matlab) ในการจำลองผลประสิทธิภาพของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและความเป็นของเวลาที่เกิดการชนกันของข้อมูล

1.4.3 ออกแบบและสร้างสายอากาศกึ่งแบบสวิตช์ลำดับเพื่อนำไปทดสอบ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 นำสายอากาศกึ่งแบบสวิตช์ลำดับมาใช้ในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย

1.5.2 จำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทางกับระบบที่ใช้สายอากาศแบบสวิตช์ลำดับ

1.5.3 ออกแบบและสร้างสายอากาศแบบสวิตช์ลำดับเพื่อนำไปทดสอบจริง

1.5.4 วิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบกับผลของระบบที่ใช้สายอากาศแบบสวิตช์ลำดับกับระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบสายอากาศแก่ง
- 3) ใช้โปรแกรมแมทแลบในการจำลองผลของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด เปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่ใช้สายอากาศแบบสวิตซ์ลําคลื่นกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง
- 4) ออกแบบและสร้างสายอากาศแบบสวิตซ์เพื่อนำไปใช้ทดสอบจริง
- 5) วิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบผลของระบบที่ใช้สายอากาศแบบสวิตซ์ลําคลื่นกับระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาและเก็บข้อมูล โดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ใช้โปรแกรมแมทแลบในการจำลองแบบเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดเปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่ใช้สายอากาศแบบสวิตซ์ลําคลื่นกับระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง
- 3) สร้างลายวงจรพิมพ์สำหรับตัวถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแบบสวิตซ์ลําคลื่นเพื่อนำไปทดสอบจริง
- 4) วิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบผลของระบบระบบที่ใช้สายอากาศแก่งแบบสวิตซ์ลําคลื่นกับระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

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

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์
- 2) โปรแกรมแมทแลบ
- 3) เครื่องวิเคราะห์วงจรรข่าย (network analyzer)

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบระบบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น
- 2) เก็บผลจากการจำลองแบบของระบบที่ใช้สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นกับระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูลผลที่ได้จากการทดสอบสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นจะถูกนำมาวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดในโปรแกรมแมทแลบ

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นอย่างง่ายและมีต้นทุนต่ำ และสามารถปรับปรุงปัญหาเรื่องการแทรกสอดของสัญญาณร่วมได้

1.7.2 สามารถนำสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น ไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานได้กับเครือข่ายเมชไร้สาย เมื่อเทียบกับการใช้สายอากาศรอบทิศทาง

1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงเครือข่ายเมชไร้สาย สายอากาศแกลวลำดับแบบเชิงเส้น สายอากาศแกลวลำดับแบบเชิงระนาบ สายอากาศแกลวลำดับแบบวงกลม ระบบสายอากาศกึ่งซึ่งประกอบด้วยสายอากาศกึ่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นและสายอากาศกึ่งแบบปรับลำคลื่นเทคนิคการหาลำคลื่น

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของการแทรกสอดของสัญญาณร่วมที่มีผลต่อระบบเครือข่ายเมชไร้สาย เปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่ใช้สายอากาศรอบทิศทางกับระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น โดยการจำลองผลจากโปรแกรมแมทแลบ

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบอุปกรณ์ตัวเลื่อนเฟส การทดสอบระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นจากผลการทดลองกับระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นจากผลทางทฤษฎี

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไข ปัญหา และแนวทางการพัฒนาต่อในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

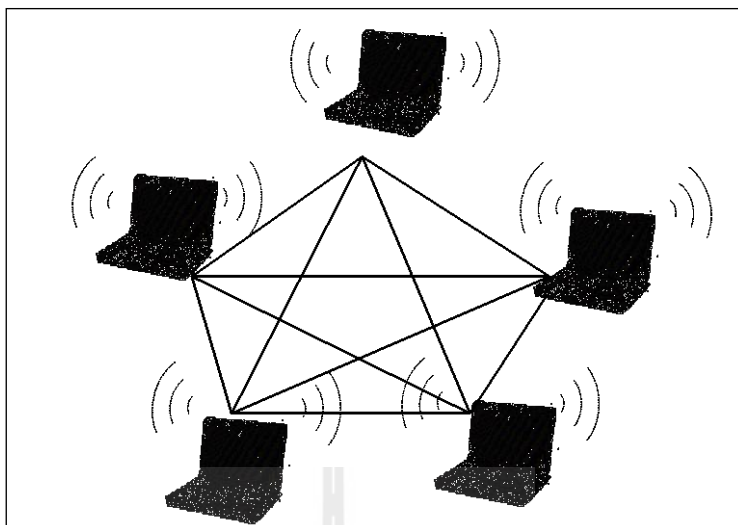
2.1 กล่าวนำ

ในการศึกษาถึงผลกระทบของการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมในระบบเครือข่ายเมชไร้สายที่ใช้สายอากาศเก่ง จำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นบทนี้เป็นกล่าวถึงทฤษฎีของระบบเครือข่ายเมชไร้สายซึ่งเป็นระบบที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับทั้งแบบเชิงเส้น แบบเชิงระนาบ และแบบวงกลม ซึ่งในส่วนของระบบสายอากาศเก่งประกอบด้วยระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นและระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น และสุดท้ายเป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทนี้

2.2 ทฤษฎีระบบเครือข่ายเมชไร้สาย

ระบบเครือข่ายเมชไร้สาย (Wireless Mesh Networks : WMNs) คือเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายที่ทำให้จุดเข้าถึงสัญญาณสามารถสื่อสารกันได้ เพื่อส่งผ่านข้อมูลกันได้โดยตรงแบบไร้สายไม่ต้องผ่านสายเคเบิล (cable) ซึ่งใช้คลื่นวิทยุ (radio wave) ในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สายแทน โดยมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายแบบเมช (mesh topology) รูปที่ 2.1 แสดงการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ไร้สาย โดยที่อุปกรณ์ไร้สายทุกเครื่องมีการเชื่อมต่อถึงกันหมดซึ่งวิธีการนี้จะสามารถสำรองเส้นทางข้อมูลได้เป็นอย่างดี ระบบเครือข่ายเมชไร้สายประกอบด้วย 2 ส่วนคือ เครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทาง (mesh routers) และเครือข่ายเมชของผู้ใช้สัญญาณ (mesh clients)

ในเครือข่ายเมชไร้สายนั้น จะมีการเพิ่มฟังก์ชันในการหาเส้นทางให้กับเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทาง จึงทำให้การสื่อสารไร้สายของอุปกรณ์จัดเส้นทางได้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการด้วยกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางนี้ มักจะถูกสร้างขึ้นมาให้มีรูปแบบคล้ายกัน เช่น อุปกรณ์จัดเส้นทาง (router) หรือ จุดเข้าถึงสัญญาณ เป็นต้น ในส่วนของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานนั้นจะมีการติดต่อกับเครือข่ายเพียงทีละหนึ่งช่องทางเท่านั้นจึงทำให้อุปกรณ์และซอฟต์แวร์ของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานนั้นง่ายและอุปกรณ์ที่ใช้ในเครือข่ายเมชของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานนั้นก็มีความหลากหลายกว่าอุปกรณ์ของเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทาง เช่น คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็ก (Personal Digital Assistant : PDA) RFID reader โทรศัพท์ไร้สาย เป็นต้น



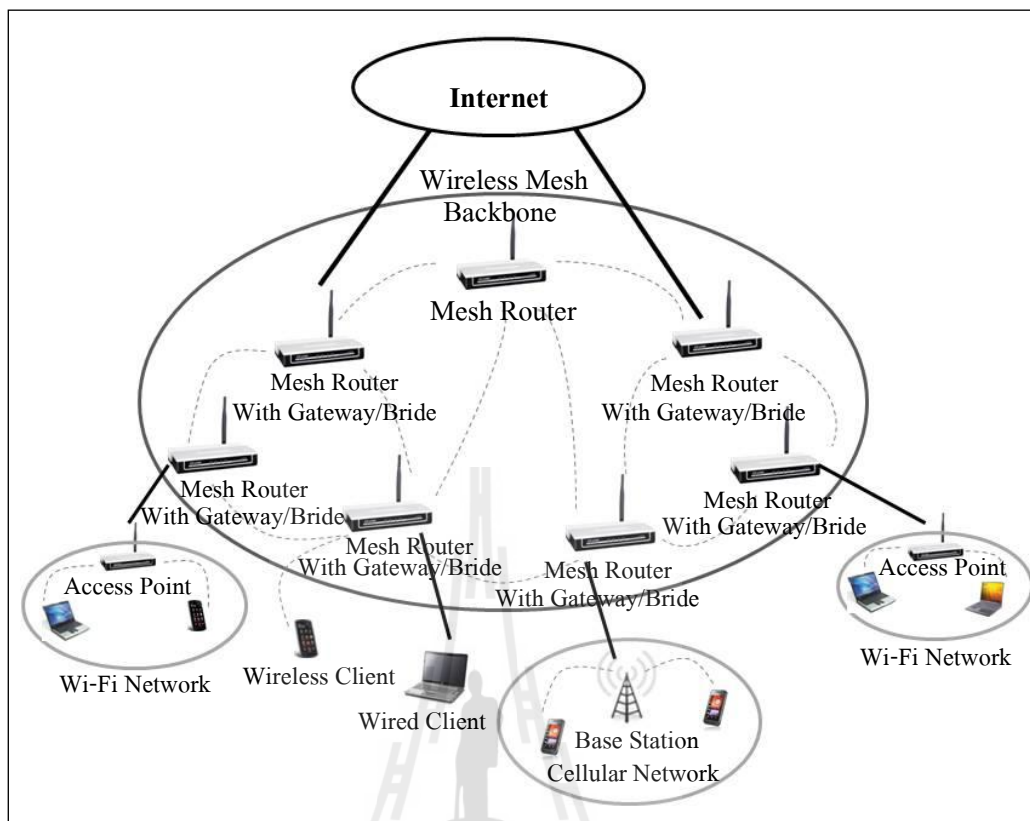
รูปที่ 2.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายแบบเมช

2.2.1 โครงสร้างของเครือข่ายเมชไร้สาย

จากการที่ได้ศึกษางานวิจัยของ Akyildiz and Wang (2005) ได้มีการนำเสนอโครงสร้างของเครือข่ายเมชไร้สาย โดยแบ่งได้ 3 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

2.2.1.1 โครงสร้างแบบโครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมชไร้สาย

โครงสร้างแบบโครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมชไร้สาย (infrastructure/backbone WMNs) มีรูปแบบโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 เมื่อเส้นทึบและเส้นประแสดงการเชื่อมต่อแบบใช้สายและการเชื่อมต่อแบบไร้สายตามลำดับ โครงสร้างแบบนี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางเพื่อไว้สำหรับลูกข่ายเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายและใช้บริการอินเทอร์เน็ตได้ ส่วนใหญ่จะภายใต้มาตรฐาน IEEE802.11 ซึ่งอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ในเครือข่ายเมชนี้สามารถทำการเชื่อมต่อและรักษาเสถียรภาพของระบบได้ด้วยตัวมันเองและเครือข่ายของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นสามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตด้วยวิธีที่เรียกว่า infrastructure meshing ก็จะมีเครือข่ายหลักให้ลูกข่ายแบบเก่าและเครือข่ายเมชไร้สายสามารถใช้งานรวมกันได้กับเครือข่ายไร้สายที่มีอยู่โดยผ่าน ฟังก์ชันการทำงานของเกตเวย์หรือ บริดจ์ (gateway/bridge) ในเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางเอง ซึ่งลูกข่ายแบบเก่านั้นจะสามารถเชื่อมต่อสื่อสารกับเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางด้วยระบบอินเทอร์เน็ต เช่น เมื่อเรามีการติดตั้ง



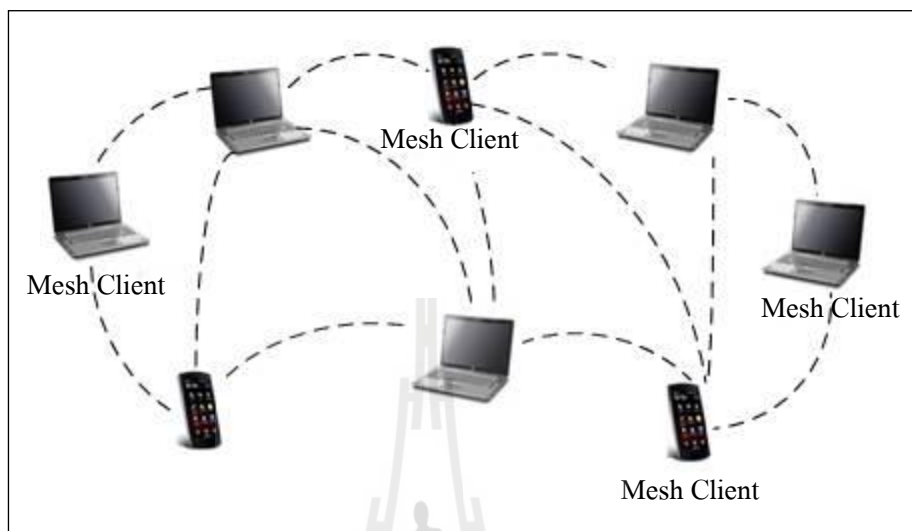
รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานหรือเครือข่ายหลักของเครือข่ายเมฆไร้สาย

เครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นไว้บนหลังคาของบ้านในละแวกใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเป็นจุดเชื่อมต่อสำหรับผู้ใช้งานภายในบ้านและผู้ที่ใช้ตามถนน ซึ่งการติดต่อสื่อสารกันระหว่างเมฆนั้นจะใช้เทคนิคการสื่อสารระยะไกลรวมกับสายอากาศแบบมีทิศทาง

2.2.1.2 โครงสร้างของเครือข่ายผู้ใช้งานเครือข่ายเมฆไร้สาย

โครงสร้างของเครือข่ายผู้ใช้งานเครือข่ายเมฆไร้สาย (client WMNs) นั้น จะใช้การเชื่อมต่อกันแบบกลุ่มส่วนตัวในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน ในโครงสร้างชนิดนี้ โหนดของผู้ใช้งานจะทำหน้าที่จัดเส้นทางและจัดการระบบที่ดีที่สุดให้กับกลุ่มผู้ใช้งาน ดังนั้นเครือข่ายเมฆของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นจึงไม่มีความจำเป็นสำหรับเครือข่ายแบบนี้ รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งาน ซึ่งข้อมูลหรือข่าวสารที่จะส่งไปยังโหนดปลายทางนั้นก็จะมีการส่งผ่านจากโหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่งซึ่งจะทำการส่งกันไปเรื่อย ๆ จนถึงปลายทางที่เราต้องการ โดยปรกติแล้วเครือข่ายเมฆของผู้ใช้งานนั้นจะใช้เพียงคลื่นวิทยุในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์เท่านั้นนอกจากนี้ ความต้องการของผู้ใช้งานระบบมี

เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับ โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายเมชไร้สาย ดังนั้นในเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานนั้น



รูปที่ 2.3 ลักษณะพื้นฐานของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งาน

จะต้องมีการเพิ่มฟังก์ชันการจัดการเส้นทางและต้องสามารถจัดการระบบได้ด้วยตัวของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานเอง

2.2.1.3 โครงสร้างเครือข่ายเมชไร้สายแบบไฮบริด

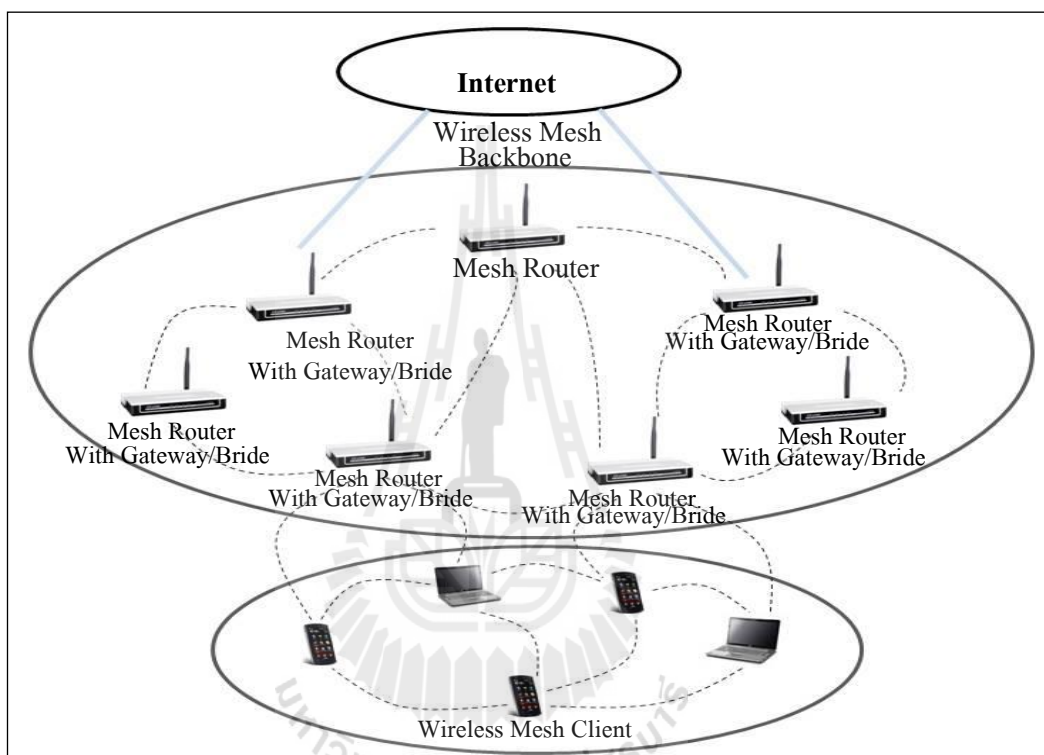
โครงสร้างเครือข่ายเมชไร้สายแบบไฮบริด (Hybrid WMNs) นี้จะเป็นการรวมกันของโครงสร้างพื้นฐานและโครงสร้างของเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 โดยที่เครือข่ายเมชของผู้ใช้งานระบบนั้นสามารถติดต่อสื่อสารกับเครือข่ายได้โดยผ่านเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางในการเชื่อมต่อกันระหว่างเครือข่ายเมชของผู้ใช้งานกับเครือข่ายเมชของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นเราจะใช้สัญญาณ Wi-Fi WiMAX สัญญาณโทรศัพท์ (cellular) และเครือข่ายเซ็นเซอร์ (sensor networks) เป็นต้น ดังนั้นอุปกรณ์จัดเส้นทางเหล่านี้จะสามารถให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อเครือข่ายดีขึ้นและครอบคลุมพื้นที่การให้บริการของเครือข่ายเมชไร้สายได้

2.2.2 ทฤษฎีแถวคอย

เนื่องจากในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครือข่ายเมชไร้สายส่วนใหญ่แล้วจะเกี่ยวข้องกับระบบทฤษฎีแถวคอย (queue theory) เป็นส่วนมาก จึงจะขอกล่าวถึงทฤษฎีแถวคอยที่ได้ศึกษา

จากงานวิจัยของ Garcia, A. L. (1994); Giambene, G. (2005) ได้มีการนำเสนอทฤษฎีแถวคอย ดังจะได้กล่าวต่อไป

ทฤษฎีแถวคอยเป็นทฤษฎีที่พัฒนาขึ้นด้วยรูปแบบการจำลองปัญหาทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้วิเคราะห์สภาวะของแถวคอยได้อย่างมีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งที่ไม่ซับซ้อนสูงนัก โดยการศึกษาลักษณะรูปแบบทางทฤษฎีความเป็นไปได้ของหน่วยเข้ารับบริการและการให้บริการ



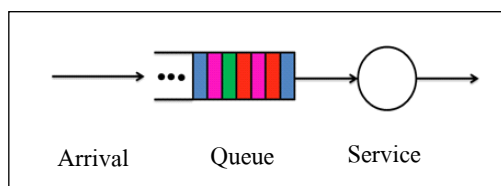
รูปที่ 2.4 โครงสร้างเครือข่ายเมชแบบไฮบริด

แล้วหาผลลัพธ์เป็นค่าต่าง ๆ แสดงสภาวะแถวคอย ผลลัพธ์ดังกล่าวจะช่วยในการตัดสินใจดำเนินการเกี่ยวกับการให้บริการที่ดีขึ้น องค์ประกอบพื้นฐานในระบบแถวคอยสามารถแสดงได้ ดังรูป 2.5

2.2.2.1 องค์ประกอบพื้นฐานในระบบแถวคอย

ประกอบด้วย 3 ส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 คือ

- 1) ผู้ใช้บริการ (customer)
- 2) แถวคอย (queue)
- 3) หน่วยบริการ (server) ซึ่งอาจมี 1 หน่วยหรือมากกว่าก็ได้



รูปที่ 2.5 ระบบแถวคอย

2.2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบแถวคอย

ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบแถวคอยมีดังนี้

1) กระบวนการเข้าใช้ระบบ (Arrival process) เป็นการเข้าใช้บริการของผู้ใช้บริการ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกหลายอย่าง ทำให้ช่วงเวลาเข้าใช้งาน (interarrival time) แตกต่างกันไป ซึ่งการแจกแจงการเข้าใช้บริการอาจเป็นแบบพัวซอง (Poisson) แบบเออร์แลงก์ (Erlang) แบบสม่ำเสมอ (Uniform) หรือรูปแบบอื่นๆ ซึ่งกระบวนการเข้าใช้ระบบที่ใช้ระบบที่ใช้มากที่สุด คือแบบพัวซองที่เป็นลำดับของตัวแปรสุ่มที่ไม่ขึ้นต่อกัน มีการกระจายเหมือนกัน (Independent and Identically Distributed : IID) และมีการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential)

2) การกระจายของเวลาบริการ (service time distribution) เป็นเวลาที่ผู้ใช้บริการเข้าใช้งานในระบบแถวคอย ช่วงเวลาดังกล่าวเรียกว่าเวลาบริการ (service time) ซึ่งจะมีการแจกแจงที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปเวลาบริการจะสมมติให้เป็นตัวแปรสุ่มที่เป็น IID และมักใช้การกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

3) จำนวนหน่วยบริการ (number of servers) เป็นส่วนประกอบของระบบแถวคอยซึ่งอาจมีจำนวนบริการ 1 หน่วยหรือมากกว่า 1 หน่วยก็ได้ หน่วยบริการ

4) ขนาดของระบบ (system capacity) จะเป็นจำนวนที่มากที่สุดของผู้ใช้บริการที่สามารถเข้ามาอยู่ในระบบจะรวมถึงผู้ใช้บริการที่กำลังใช้บริการอยู่ และผู้ใช้บริการที่รอการใช้งานอยู่ โดยทั่วไประบบจะมีขนาดที่จำกัดแต่อย่างไรก็ตามถ้าระบบมีขนาดใหญ่ประมาณค่าหนึ่ง เรามักจะสมมุติว่ามีขนาดอนันต์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

5) รูปแบบการบริการ (service discipline) คือ การเลือกลำดับของผู้ใช้บริการที่เข้ามาใช้บริการในระบบ เช่น มาก่อนรับบริการก่อน (First Come First Served : FCFS) มาทีหลังรับบริการก่อน (Last Come First Served : LCFS) การให้บริการแบบทั่วไป (General Service Discipline : GD) และการให้บริการแบบสุ่ม (Random Selection for Service : RSS)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของการแทรกสอดของช่องสัญญาณร่วมในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย ซึ่งเครือข่ายเมฆไร้สายเป็นเครือข่ายที่สามารถใช้งานได้ในอาคารและนอกอาคาร และสามารถขยายเครือข่ายจากขนาดเล็กให้เป็นขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ระบบแถวคอยชนิด M/M/1/∞ (M/M/1/∞ queueing system)

2.2.3 โพรโทคอลที่ใช้ควบคุมการเข้าใช้งานสื่อกลาง

จากงานวิจัยของ Stine, J.A. (2006) ได้มีการนำเสนอโปรโตคอลที่สามารถใช้งานกับสายอากาศเก่ง เพื่อนำมาใช้ร่วมกับเครือข่ายเมฆไร้สายได้อย่างเหมาะสม ซึ่งโปรโตคอลที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นโปรโตคอลที่สามารถทำงานร่วมกับระบบสายอากาศเก่งก็คือ (Synchronous Collision Resolution MAC Protocol : SCR MAC Protocol) ซึ่งโปรโตคอล SCR นี้ จะมีการควบคุมการส่งข้อมูลที่จะส่งก่อนหลังตามลำดับ แล้วถึงจะทำการหันลำดับหลักไปยังทิศทางของอุปกรณ์จัดเส้นทางที่ต้องการตามลำดับที่ SCR กำหนดไว้ โดยมีหลักการในการทำงานดังนี้

- 1) มีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นสล็อต (slotted)
- 2) ในการส่งข้อมูลนั้นทุก โหนดจะพยายามส่งข้อมูลเข้าถึงทุก ๆ ช่องสล็อต
- 3) โดยที่แต่ละ โหนดจะทำการส่งสัญญาณเพื่อเป็นการจองการเข้าใช้เครือข่าย
- 4) การส่งข้อมูลทั้งหมดจะเกิดขึ้นพร้อมการส่งสัญญาณเพื่อจองการเข้าใช้เครือข่ายแล้ว

ซึ่งนั่นหมายความว่าระบบจะทำงาน โดยการจองช่องสัญญาณเพื่อทำการรอคิวในการติดต่อสื่อสารเครือข่ายหรือทำการส่งข้อมูลนั่นเอง

2.2.4 การแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม (Co-channel Interference)

งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม (Co-channel Interference) ที่มีในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย เนื่องจากระบบเครือข่ายเมฆไร้สายใช้คลื่นวิทยุในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทางที่ความถี่เดียวกันจะกวนกันเองและจะทำให้อุปกรณ์จัดเส้นทางไม่สามารถแยกสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่มารบกวนออกจากกันได้ เพราะยังมีสัญญาณที่รบกวนในลักษณะเดียวกันจากอุปกรณ์จัดเส้นทางอื่น ๆ ที่อยู่รอบข้างด้วย ดังนั้นค่าของอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่ต้องการกับผลรวมของกำลังสัญญาณจากอุปกรณ์จัดเส้นทางอื่น ๆ ที่ค่าความถี่เดียวกันที่เป็นสัญญาณรบกวน ค่านี้เรียกว่า การแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม (Co-channel Interference : C/I) โดย C คือกำลังของสัญญาณที่ต้องการและ I คือกำลังของสัญญาณที่รบกวน

การรับส่งข้อมูลในรูปแบบคลื่นวิทยุ มีหลายสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล สัญญาณรบกวนที่เกิดจากปัจจัยหรือสภาวะแวดล้อมต่างๆ ก็มีผลทำให้เกิดการ

สูญเสียกำลังของสัญญาณในการรับส่งข้อมูลได้ ในบางครั้งการใช้แบบจำลองการสูญเสียแบบเบื้องต้นก็เป็นวิธีที่ดีที่สุดที่จะใช้แสดงการแพร่กระจายสัญญาณ โดยเข้าใจง่ายและไม่ซับซ้อน ดังนั้นแบบจำลองการสูญเสียของกำลังของสัญญาณซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางที่นิยมใช้ในการออกแบบระบบคือแบบจำลองการสูญเสียเบื้องต้น (simplified path loss model)

$$P_r = P_t K \left[\frac{d_0}{d} \right]^\gamma \quad (2.1)$$

และมีค่าการลดทอนเป็นเดซิเบล

$$P_r \text{ dBm} = P_t \text{ dBm} + K \text{ dBm} - 10 \log_{10} \left[\frac{d}{d_0} \right] \quad (2.2)$$

โดย P_r คือค่ากำลังรับสัญญาณ P_t คือค่ากำลังส่งสัญญาณ โดยจะกำหนดระยะทางของเครื่องรับและเครื่องส่งที่ระยะ d ส่วนค่า K นี้คือค่าคงตัวที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสายอากาศและกำลังเฉลี่ยของการลดทอนในช่องสัญญาณ d_0 คือ ระยะของสนามระยะไกลของสายอากาศ และ γ คือตัวยกกำลังการสูญเสีย ค่าของ γ ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการแพร่กระจายสัญญาณ สำหรับวิธีการลากเส้นทางเดินของสัญญาณหรือวิธีในอวกาศว่างนี้ ค่า γ จะถูกกำหนดเป็น 2 หรือ 4 ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่า γ เท่ากับ 4

2.2.5 ข้อดีข้อเสียของเครือข่ายเมชไร้สาย

ข้อดีของเครือข่ายเมชไร้สาย

- 1) สามารถขยายเครือข่ายหรือปรับเปลี่ยนตำแหน่งของอุปกรณ์จัดเส้นทางได้ จึงรองรับเครือข่ายขนาดใหญ่ได้
- 2) เพิ่มความน่าเชื่อถือและความสามารถของอุปกรณ์ โดยระบบจะสามารถทำงานได้ตามฟังก์ชันที่ต้องการในสภาพแวดล้อมและช่วงเวลาที่กำหนด
- 3) เนื่องจากไม่มีการใช้สายในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณ ทำให้พื้นที่ที่ยากต่อการติดตั้งเครือข่ายไร้สายแบบที่ต้องใช้สายในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณสามารถใช้งานเครือข่ายได้ด้วยการติดตั้งเครือข่ายเมชไร้สาย
- 4) ประหยัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบเนื่องจากไม่ต้องใช้สายในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดเข้าถึงสัญญาณ

ข้อเสียของเครือข่ายเมฆไร้สาย

1) เนื่องจากระบบเครือข่ายเมฆไร้สายใช้คลื่นวิทยุในการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทาง ดังนั้นการใช้งานในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่มีความถี่เดียวกันจะมีผลกระทบในเรื่องของการเกิดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม (Co-channel Interference) จึงทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดจากอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ใกล้เคียงกัน

จากข้อเสียที่เกิดขึ้นในเครือข่ายเมฆไร้สายที่กล่าวมานั้น ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาถึงผลกระทบของเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยมีแนวคิดที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการติดตั้งระบบสายอากาศแก่งไว้อุปกรณ์จัดเส้นทาง และยังได้ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมเพิ่มเติม โดยงานวิจัยของ Muthaiah, S. N., et al. (2007) เป็นการนำเทคโนโลยีสายอากาศแก่งมาติดตั้งที่อุปกรณ์จัดเส้นทางในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเส้นทางให้ดีขึ้น ส่วนในงานวิจัยของ Yong, Z., et al. (2007) ได้นำเสนอการจำลองแบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของค่าวิสัยสามารถ (throughput) ผลที่ได้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของค่าวิสัยสามารถให้ดีขึ้น เมื่อนำสายอากาศแก่งมาใช้ในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย และในงานวิจัยของ Sato and Fujii (2007) ได้นำเสนอการจำลองแบบพื้นที่ครอบคลุมเครือข่ายเมฆไร้สายโดยใช้ระบบสายอากาศแก่ง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของวิสัยสามารถและการคอยการส่งข้อมูล (waiting packet) จากปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้ศึกษามา ยังไม่มีการคำนึงถึงปัญหาในเรื่องการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม ซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลให้การติดต่อสื่อสารในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายมีประสิทธิภาพที่ต่ำ

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาปัญหาการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายและเสนอวิธีแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการติดตั้งระบบสายอากาศแก่งไว้อุปกรณ์จัดเส้นทาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรก โดยใช้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น ออกแบบและสร้างแผงวงจรพิมพ์สำหรับส่วนประมวลสัญญาณ ทำการทดสอบจริงด้วยการสร้างชุดทดสอบ โดยผลที่ได้จากชุดทดสอบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองแบบทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในทางปฏิบัติ ต่อมาจากการศึกษาเบื้องต้นนั้นระบบเครือข่ายเมฆไร้สายเป็นระบบที่สามารถปรับเปลี่ยนหรือขายเครือข่ายได้ งานวิจัยฉบับนี้จึงได้กำหนดแบบการวางอุปกรณ์จัดเส้นทางไว้ 2 แบบคือแบบที่ 1 กำหนดให้ระบบเครือข่ายเมฆไร้สายมีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางเป็นสี่เหลี่ยม และแบบที่ 2 มีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางเป็นหกเหลี่ยม นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความเหมาะสมในการเลือกจำนวนสายอากาศที่ใช้ในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะจำลองแบบระบบ

เครือข่ายเมฆไร้สายโดยใช้โปรโตคอลเอชซีอาร์ (SCR protocol) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้เครือข่ายเมฆไร้สายสามารถทำงานร่วมกับระบบสายอากาศเก่งได้

2.3 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับ (array antenna) เป็นการนำสายอากาศมาเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละตัวมีเท่ากันหรือไม่ก็ได้ ซึ่งสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น จะเรียกว่า องค์ประกอบ (element) ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้น ทำได้โดยการใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลาย ๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดียว จะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาวะเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ สายอากาศแถวลำดับจึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญต่อระบบสายอากาศเก่งที่ทำให้สามารถหันลำคลื่นหลัก (main lobes) ไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ และสามารถหันพวยพุ่ง หรือจุดศูนย์ ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น โดยทั่วไปการวางตัวของสายอากาศแถวลำดับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น คือ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นและสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังต่อไปนี้

2.3.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบพื้นฐานและมีโครงสร้างที่ง่าย ซึ่งมีการจัดวางตัวกันเป็นแบบเส้นตรง สายอากาศแถวลำดับจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างสายอากาศ d ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยปรกติแล้วระยะห่างของสายอากาศที่ใช้จะมีการวางตัวห่างกันเป็นระยะความยาวครึ่งความยาวคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น ดังนี้

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.3)$$

รูปที่ 2.6 แสดงถึงสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน N ต้น หรือ $N \times 1$ ต้น โดยที่ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้น และมีแอมพลิจูดเท่ากัน รูปแบบดังกล่าวถูกเรียกว่า แถวลำดับสม่ำเสมอ (uniform array) ซึ่งจะมีองค์ประกอบแถวลำดับที่เหมือนกัน มีการป้อนกระแสให้กับทุก ๆ องค์ประกอบเท่ากัน และจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกัน

ไปอย่างเท่า ๆ กัน โดยจะมีองค์ประกอบตัวแรกเป็นจุดอ้างอิงในการหาตัวประกอบแถว
ลำดับ (Array Factor : AF) ดังสมการที่ 2.4

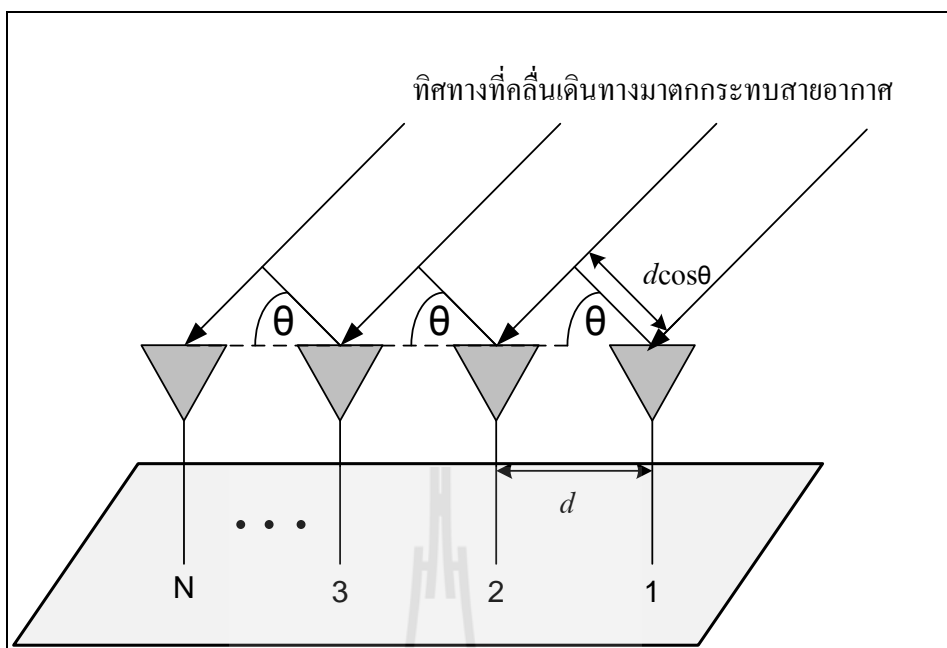
$$AF = 1 + e^{+j(kd \cos \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \cos \theta + \beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd \cos \theta + \beta)} \quad (2.4)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta)} \quad (2.5)$$

ซึ่งสามารถเขียนอีกรูปหนึ่งได้ดังสมการที่ (2.6)

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.6)$$

เมื่อ $\psi = kd \cos \theta + \beta$ โดยที่ k หมายถึงเลขคลื่น (wave number) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2\pi / \lambda$
 θ คือ ทิศทางของคลื่นที่เดินทางมาตกกระทบสายอากาศแต่ละต้น และ β
คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น ในกรณีที่เป็นแถวลำดับไม่สม่ำเสมอสม่ำเสมอ
(nonuniform array) นั้น ก็ยังสามารถใช้สมการหาตัวประกอบแถวลำดับที่กล่าวมาข้างต้นได้เช่นกัน



รูปที่ 2.6 การวางตัวของสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น

2.3.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ คือสายอากาศที่มีการจัดเรียงตัวกันเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งมีแนวคิดมาจากสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น การจัดเรียงตัวของสายอากาศแบบนี้จะสามารถควบคุมทิศทางของแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ได้ นอกจากนี้ระบบยังมีระดับพูซังที่ต่ำอีกด้วย ดังนั้นสายอากาศที่มีการเรียงตัวแบบเชิงระนาบนี้ จึงเป็นสายอากาศที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างมาก เช่น การนำไปใช้งานเรดาร์ (radar) การชี้ทิศทางระยะไกล (remote sensing) รวมไปถึงการสื่อสารไร้สายอื่น ๆ เช่น ระบบสายอากาศแก่ง ซึ่งจะถูกรอชบายในส่วนถัดไป

รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการวางตัวของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมบนระนาบ $x-y$ โดยที่สายอากาศ M ต้นจะวางอยู่ในทิศทางของแกน x ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายอากาศคือ d_x และสายอากาศ N ต้นจะวางตัวอยู่ในทิศทางของแกน y ที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศคือ d_y ดังนั้นเราจะได้นิยามของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยม $M \times N$ ต้น และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณทั้งระบบคือ w_{mn} ที่สายอากาศต้น (m,n) ที่จากที่เราได้กล่าวมาข้างต้นว่าสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบนั้น ได้มีพื้นฐานและแนวคิดมาจากสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ดังนั้นในสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบเราสามารถมองว่า ที่สายอากาศ M ต้น ในแต่ละต้นจะมีสายอากาศ N ที่มีการเรียงตัวแบบแถวลำดับ

เชิงเส้นเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย หรือในทางเดียวกันสายอากาศ N ต้น ในแต่ละต้นจะมีสายอากาศ M ที่มีการเรียงตัวแบบแถวลำดับเชิงเส้นเป็นองค์ประกอบเช่นกัน ดังนั้นเราสามารถหาตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศ $M \times N$ ได้ดังสมการที่ (2.7) โดยอ้างอิงจากหนังสือของ Gross, F. B. (2005)

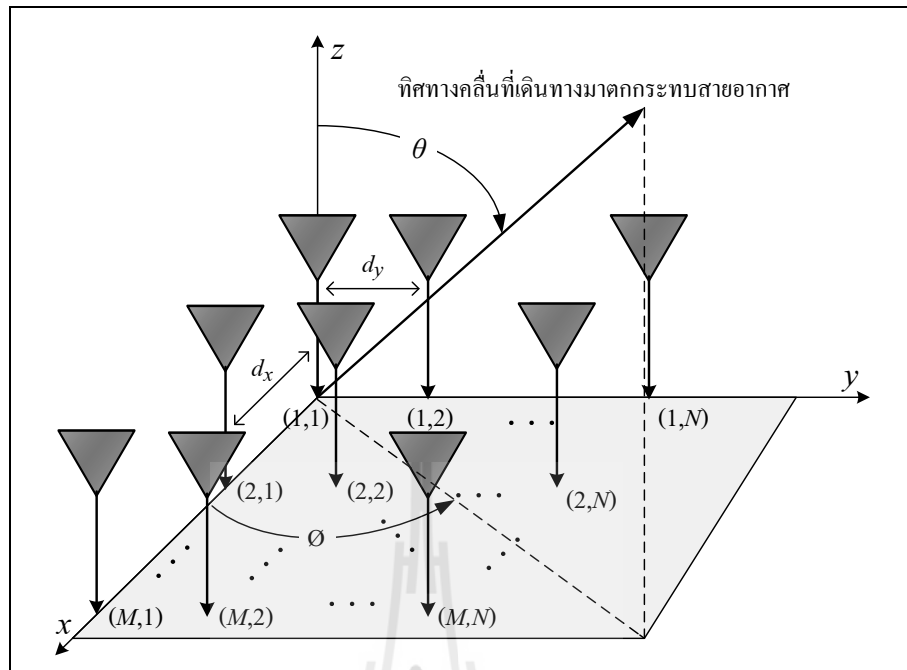
$$\begin{aligned}
 AF &= AF_x \cdot AF_y \\
 &= \sum_{m=1}^M a_m e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N b_n e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)} \\
 &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N w_{mn} e^{j[(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x) + (n-1)(kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)]}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

เมื่อ $w_{mn} = a_m \cdot b_n$ โดยที่ a_m และ b_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนัก β_x และ β_y คือ ค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)

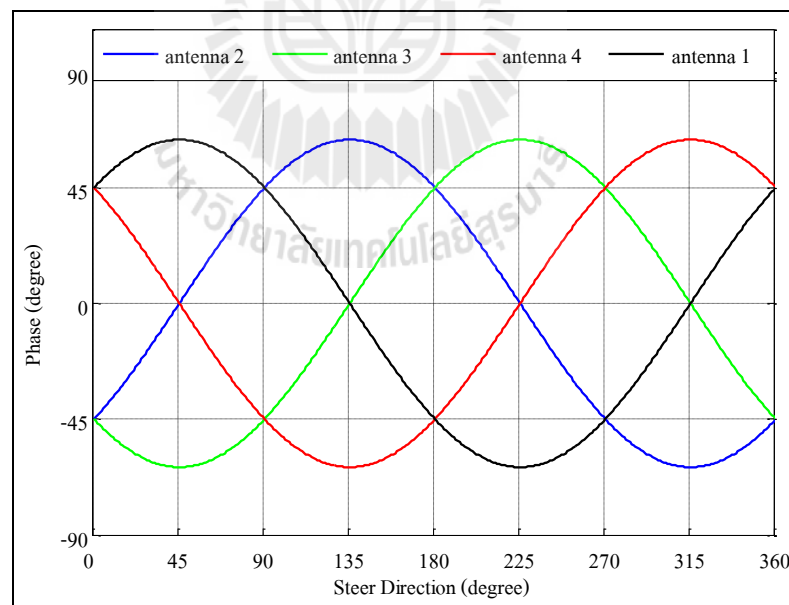
$$\beta_x = -kd_x \sin \theta_0 \cos \phi_0 \tag{2.8}$$

$$\beta_y = -kd_y \sin \theta_0 \sin \phi_0 \tag{2.9}$$

จากรูปที่ 2.7 เมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่มุม θ หรือ มุมในแนวระนาบ (azimuth plane) สายอากาศแต่ละต้นนั้นจะสามารถรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณได้เหมือนกันทุกต้น แต่จะแตกต่างกันที่เวลาของสายอากาศแต่ละต้นเมื่อได้รับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ ดังนั้นเราจึงสามารถเขียนกราฟของเฟสที่ต่างกันของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากับ $\lambda/4$ เมื่อมีสัญญาณเข้ามาจากมุม θ ตั้งแต่ 0° ถึง 360° ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การวางตัวของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ



รูปที่ 2.8 เฟสที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละตัวสำหรับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 2×2 เทียบกับทิศทางกรมาถึงของสัญญาณ

2.3.3 สายอากาศแถวลำดับวงกลม

สายอากาศแถวลำดับวงกลม เป็นสายอากาศที่มีการจัดเรียงตัวกันเป็นวงกลม ซึ่งมีแนวคิดมาจากสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น จากงานวิจัยของ Ioannides and Balanis (2004); Herscovici and Christodoulou (2005) ได้นำเสนอสายอากาศแถวลำดับวงกลมสมมาตรสำหรับระบบสายอากาศแก่ง จากรูปที่ 2.9 กำหนดให้ N เป็นจำนวนของสายอากาศที่วางเรียงกันเป็นวงกลมสมมาตรบนระนาบ $x-y$ จัดวางเรียงเป็นลักษณะรูปแหวนวงกลมด้วยรัศมี a ซึ่งระบบพิกัดทรงกลมถูกนำมาอธิบายทิศทางการเข้ามาของระนาบคลื่น จุดอ้างอิงของระบบพิกัดจะอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของแถวลำดับวงกลม มี θ เป็นมุมเงย (elevation angle) วัดจากแกน z มายังระนาบคลื่น และ ϕ เป็นมุมแนวระนาบ (azimuth angle) จะวัดทวนเข็มนาฬิกาจากแกน x บนระนาบ $x-y$ โดยที่สายอากาศแต่ละต้นจะมีความสัมพันธ์กับตัวถ่วงน้ำหนัก (weight) w_n และเฟส (phase) δ_n ซึ่งจะกำหนดจุดระยะสนามไกล (far-field) เป็นทิศทางของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศ ตำแหน่งมุมของสายอากาศที่จำนวน n คำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$\phi_n = \frac{2\pi}{N}(n-1), \quad n=1,2,\dots,N \quad (2.10)$$

ระนาบคลื่นที่มาตกกระทบด้วยความยาวคลื่น (wavelength) λ ซึ่งสอดคล้องกับเลขคลื่น $k = 2\pi/\lambda$ หน่วยเวกเตอร์ \hat{r} จากจุดกำเนิดไปยังในทิศทางจุดระยะสนามไกลเขียนได้ดังสมการที่ 2.11

$$\hat{r} = \sin \theta \cos \phi \hat{x} + \sin \theta \sin \phi \hat{y} + \cos \theta \hat{z} \quad (2.11)$$

หน่วยเวกเตอร์ $\hat{\rho}_n$ จากจุดกำเนิดไปยังตำแหน่งของสายอากาศที่จำนวน n เขียนได้ดังสมการที่ 2.12

$$\hat{\rho}_n = \cos \phi_n \hat{x} + \sin \phi_n \hat{y} \quad (2.12)$$

เวกเตอร์ เป็นระยะทางความต่างด้วยระยะนาบคลื่นไปถึงตำแหน่งของสายอากาศที่จำนวน n เมื่อเทียบกับจุดกำเนิดเขียนได้จากสมการที่ 2.13

$$r_n = r - a\hat{\rho}_n \cdot \hat{r} \quad (2.13)$$

จาก

$$\hat{\rho}_n \cdot \hat{r} = \sin \theta \cos \phi \cos \phi_n + \sin \theta \sin \phi \sin \phi_n \quad (2.14)$$

$$\hat{\rho}_n \cdot \hat{r} = \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) \quad (2.15)$$

ดังนั้นเราสามารถหาตัวประกอบแอมพลิจูดของสายอากาศได้ดังสมการที่ 2.15

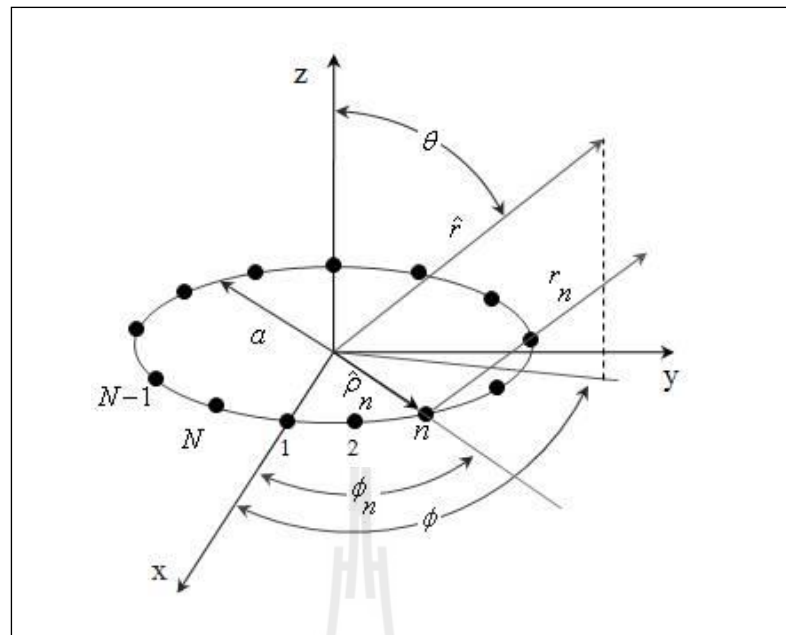
$$AF = \sum_{n=1}^N w_n e^{j(ka\hat{\rho}_n \cdot \hat{r} + \delta_n)} \quad (2.16)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N w_n e^{j[ka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \delta_n]} \quad (2.17)$$

โดยที่

$$\delta_n = -ka \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n) \quad (2.18)$$

ระบบพิกัดของลำดับวงกลมสามารถแสดงลักษณะการวางตัวของสายอากาศแอมพลิจูดวงกลม ซึ่งสายอากาศแอมพลิจูดวงกลมมีการใช้งานมาหลายปีเช่นเดียวกับสายอากาศแอมพลิจูดแบบเชิงเส้น แต่สายอากาศแอมพลิจูดแบบเชิงเส้นไม่เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ได้ติดตั้งไว้อยู่อย่างกระจายตัวและติดตั้งอยู่บริเวณ โคจรอบ ซึ่งสายอากาศแอมพลิจูดวงกลมไม่เพียงใช้งานได้ดีเทียบเท่ากับสายอากาศแอมพลิจูดแบบเชิงเส้น แต่ยังสามารถจัดทิศทางลำคลื่น (beam steering) ได้รอบทิศทางที่กำหนดได้ โดยอ้างอิงจากหนังสือของ Gross, F. B. (2005)



รูปที่ 2.9 ระบบพิกัดของลำดับวงกลม

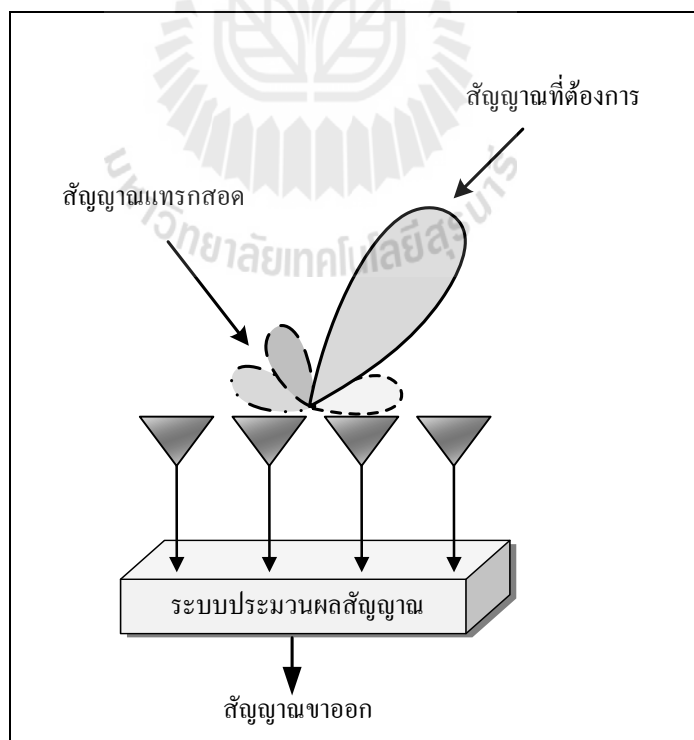
2.4 ระบบสายอากาศเก่ง

สายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ได้รับความสนใจในช่วงปี 2473 เป็นต้นมา เนื่องจากความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพในระบบสื่อสารไร้สาย สายอากาศเก่งประกอบด้วยกลุ่มของสายอากาศหลาย ๆ ต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ กันร่วมกับการประมวลผลสัญญาณทั้งทางเวลาและตำแหน่ง ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสื่อสารไร้สายดีขึ้น สายอากาศถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางการสื่อสารไร้สาย เพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของช่องสัญญาณซึ่งมีอยู่จำกัด ในขณะที่ผู้ใช้มีมากขึ้น สายอากาศเก่งช่วยปรับปรุงระบบโดยการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณและมีความสามารถในการหันลำคลื่นหลักไปในทิศทางที่ต้องการ ในขณะที่เดียวกันก็จะสามารถหันจุดศูนย์หรือพुर่องไปในทิศทางที่เราไม่ต้องการ หรือทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้เช่นกัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการก่อรูปลำคลื่น (beamforming)

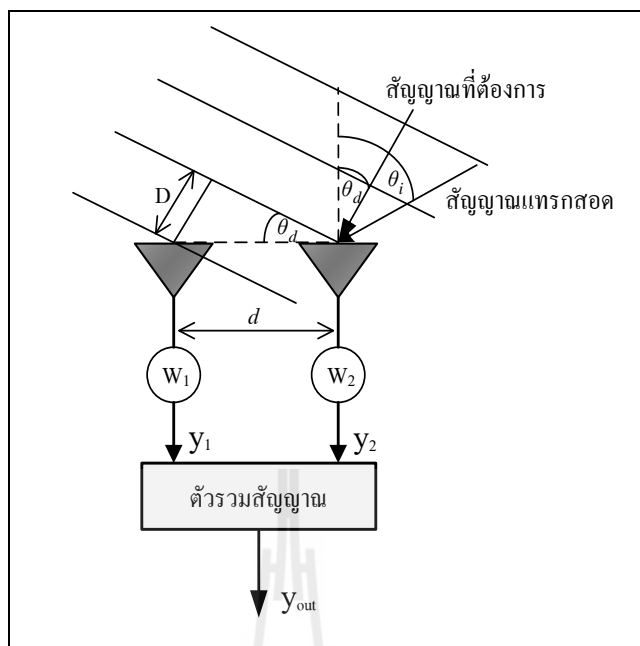
รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศเก่งซึ่งจะประกอบด้วยสองส่วนหลัก ๆ คือ สายอากาศแถวลำดับ (array antennas) และระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing systems) ซึ่งในระบบประมวลผลจะทำหน้าที่ในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Direction of Arrival : DOA) และการคำนวณเพื่อก่อรูปลำคลื่น ตามที่ได้แสดงในหนังสือของ Liberti and Rappaport (1999)

ในส่วนของการหั่นลำคลื่น ระบบสายอากาศเก่งสามารถหั่นลำคลื่นหลัก ไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการและจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการปรับเฟส หรือแอมพลิจูดของสัญญาณที่มายังสายอากาศแถวลำดับแต่ละต้น เพื่อหั่นลำคลื่นหลัก ไปยังทิศทางที่ต้องการ และหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งการปรับเฟสหรือแอมพลิจูดนั้น เรียกว่า การถ่วงน้ำหนัก สายอากาศแต่ละต้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกัน ออกไปตามมุมเฟสของสัญญาณที่มาจากกระทบสายอากาศต้นนั้น ๆ โดยหลักการเบื้องต้นของการหั่นลำคลื่นสามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้น ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11 จากรูป D คือ ความต่างเฟสของสัญญาณที่มาจากกระทบสายอากาศแต่ละต้น d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ W คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศแต่ละต้น y คือ สัญญาณขาออกของสายอากาศ θ_d และ θ_i คือ มุมที่มาจากกระทบที่สายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับ จากรูปสัญญาณขาออกจากสายอากาศต้นที่ 1 คือ y_1 และสายอากาศต้นที่ 2 คือ y_2 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$y_{out} = y_1 + y_2 \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.10 ระบบสายอากาศเก่ง



รูปที่ 2.11 ระบบสายอากาศแก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ

โดยที่สัญญาณขาออกของสัญญาณที่ต้องการคือ y_d และ สัญญาณขาออกของสัญญาณแทรกสอดคือ y_i และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นมีค่าดังนี้

$$y_{2d} = A_d \quad (2.20)$$

$$y_{2i} = A_i \quad (2.21)$$

$$y_{1d} = A_d e^{j\theta_d} \quad (2.22)$$

$$y_{1i} = A_i e^{j\theta_i} \quad (2.23)$$

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

$$y_2 = y_{2d} + y_{2i} = w_2(A_d + A_i) \quad (2.24)$$

$$y_1 = y_{1d} + y_{1i} = w_1(A_d e^{j\theta_d} + A_i e^{j\theta_i}) \quad (2.25)$$

แทนค่าสมการที่ (2.24) และ (2.25) ลงในสมการที่ (2.19) จะได้

$$y_{out} = A_i(w_2 + w_1 e^{j\theta_i}) + A_d(w_2 + w_1 e^{j\theta_d}) \quad (2.26)$$

เราต้องการให้พจน์ของ A_i ในสมการที่ (2.26) มีค่าเป็นศูนย์นั่นคือส่วนของสัญญาณแทรกสอดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดออกไป และทำให้พจน์ของ A_d สมการที่ (2.26) ซึ่งเป็นส่วนของสัญญาณที่ต้องการมีค่าสูงสุด ดังนั้น

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_i} = 0 \quad (2.27)$$

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.27) และ (2.28) จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) ของสายอากาศทั้งสองต้นดังนี้

$$w_1 = \frac{1}{e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i}} \quad (2.29)$$

$$w_2 = \frac{e^{j\theta_i}}{e^{j\theta_i} - e^{j\theta_d}} \quad (2.30)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (2.29) และ (2.30) ลงในสมการที่ (2.26) จะได้สัญญาณขาออกเท่ากับ

$$y_{out} = A_d \quad (2.31)$$

จากสมการที่ 2.31 สัญญาณขาออกมีค่าเท่ากับสัญญาณที่ต้องการ แสดงว่าระบบไม่มีสัญญาณแทรกสอดอีกต่อไป ดังนั้นจึงทำให้ระบบสามารถให้สัญญาณที่ดีที่สุดที่มาจากทิศทางที่ต้องการได้

ข้อดีของระบบสายอากาศแก่ง

- 1) เพิ่มพื้นที่ให้บริการ เนื่องจากมีอัตราขยายที่สูงจากการใช้สายอากาศแถวลำดับ
- 2) ระบบสายอากาศแก่งสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ ดังนั้นจึงทำให้ปัญหาจากสัญญาณแทรกสอดลดน้อยลง
- 3) มีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดีขึ้น
- 4) ประหยัดพลังงาน เนื่องจากสายอากาศแก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของผู้ที่ต้องการใช้งานได้และไม่ต้องทำการส่งในทิศทางของผู้ที่ไม่ต้องการใช้งาน จึงทำให้ไม่สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

ข้อเสียของระบบสายอากาศแก่ง

- 1) ระบบสายอากาศแก่งมีราคาต้นทุนในการผลิตสูง
- 2) สำหรับการใช้งานที่ความถี่ต่ำ สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ยากต่อการติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ

ระบบสายอากาศแก่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ (switched-beam antennas) และสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น (adaptive array antennas) ซึ่งจะมีรายละเอียดจากหนังสือของ Ahmed, E.Z. (2005) โดยสังเขปดังนี้

2.4.1 สายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

สายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นนั้น เป็นสายอากาศที่มีการเลือกลำคลื่นที่ดีที่สุดไปยังสัญญาณที่ต้องการได้ โดยใช้เพียงเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ถูกกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักไว้แล้ว โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ซึ่งประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และตัวเลือกลำคลื่น โดยมีหลักการทำงานดังนี้

- 1) สวิตช์ลำคลื่นเพื่อตรวจหาทิศทางความแรงของสัญญาณ
- 2) ตัวเลือกลำคลื่นจะทำการเลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นในทิศทางที่มีความแรงของสัญญาณแรงที่สุด
- 3) ใช้ลำคลื่นที่ตัวเลือกลำคลื่นได้ทำการเลือกไว้เมื่อผู้ใช้งานไม่มีการเคลื่อนที่
- 4) ทำการปรับเปลี่ยนลำคลื่นใหม่เมื่อมีความแรงของสัญญาณมาจากทิศทางอื่น ๆ

ข้อดีของระบบสายอากาศแก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

- 1) ระบบมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น

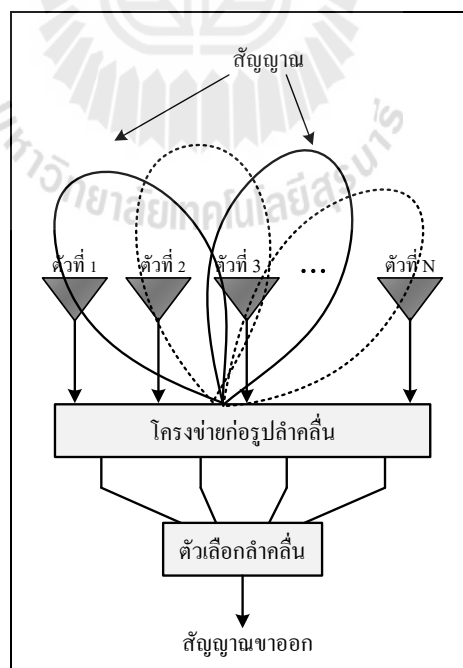
2) ประหยัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายเนื่องจากระบบมีความซับซ้อนน้อยในกรณีที่ใช้ระบบใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก

3) ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่นจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Peng, M., and Wang, W. (2005); Sarkar, D.K., Seungwon, C., and Shim, D. (1999)

ข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น

- 1) มีอัตราการขยายของสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างลำคลื่น
- 2) ไม่สามารถลดสัญญาณแทรกสอดที่อยู่ใกล้กับสัญญาณที่ต้องการได้
- 3) ในการเลือกสัญญาณมีโอกาสผิดพลาด อาจเกิดจากสัญญาณที่เข้ามาไม่ชัดเจน

รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สายอากาศแต่ละต้นจะส่งสัญญาณไปยังโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเพื่อทำการถ่วงน้ำหนัก เนื่องจากสัญญาณที่มาตกกระทบยังสายอากาศแต่ละต้นมีมุมเฟสที่ต่างกันออกไป และสร้างลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่แรงที่สุด โดยอาศัยตัวเลือกลำคลื่นทำหน้าที่เลือกลำคลื่นไปยังสัญญาณที่เราต้องการ จึงทำให้สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดได้จากทิศทางของสัญญาณที่เราไม่ต้องการได้ ส่งผลให้ได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น

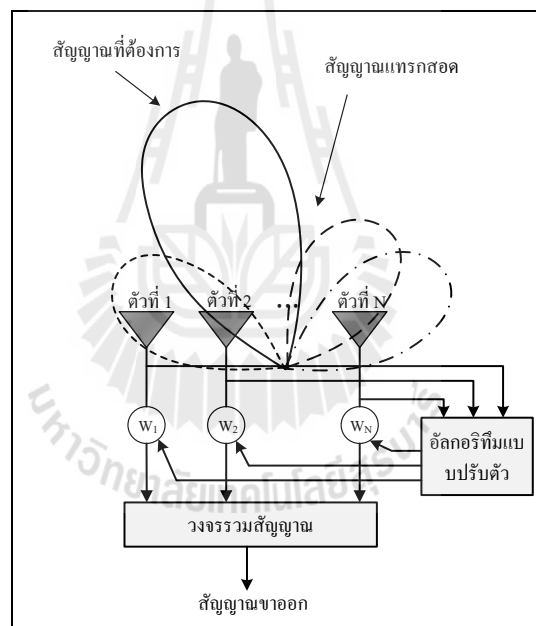


รูปที่ 2.12 โครงสร้างและองค์ประกอบของสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น

2.4.2 สายอากาศเก่งแบบปรับค่าคลื่น

สายอากาศประเภทนี้มีความสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ตลอดเวลา โดยมีหลักการทำงานของสายอากาศประเภทนี้คือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีการถ่วงน้ำหนัก โดยอัลกอริทึมแบบปรับตัว (adaptive algorithm) ทำหน้าที่คำนวณหาความสัมพันธ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณแล้วส่งค่ากลับไปให้ตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อคูณเข้ากับสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13 โดยระบบจะทำงานแบบวนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้

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



รูปที่ 2.13 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับค่าคลื่น

ข้อดีของสายอากาศเก่งแบบปรับค่าคลื่น

- 1) มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Noise Ratio : SNR) ที่ดี
- 2) สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบได้ดีกว่าระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น

ข้อเสียระบบสายอากาศแก่งแบบปรับลำคลื่น

- 1) มีความซับซ้อนสูงกว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น
- 2) ต้องการสัญญาณที่แน่นอนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการหั่นลำคลื่นหลักไปยังสัญญาณที่ต้องการ
- 3) ต้องการหน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูง
- 4) มีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากระบบมีความซับซ้อนมาก

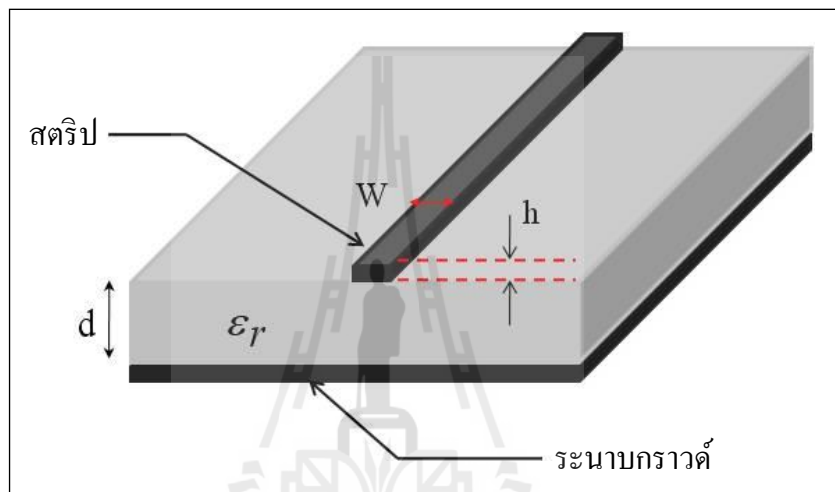
จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นได้อธิบายถึงหลักการทำงานและข้อดีข้อเสียของระบบสายอากาศแก่งทั้งแบบสวิตช์ลำคลื่นและแบบปรับตัวไปแล้ว พบว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นมีความซับซ้อนในการสร้างลำคลื่นและหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแบบปรับตัว นอกจากนี้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นยังไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูงก็สามารถสร้างและหั่นลำคลื่นได้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสร้าง และติดตั้งสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับตัว นอกจากนี้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นยังไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูงก็สามารถสร้างและหั่นลำคลื่นได้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสร้าง และติดตั้งสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับตัว ดังนั้นสายอากาศแบบสวิตช์ ลำคลื่นจึงเป็นสายอากาศที่น่าสนใจ

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิคสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นมาใช้ในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยการศึกษาเบื้องต้นได้นำสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบขนาด 2×2 มาทำการจำลองผลทาง โปรแกรมที่สร้างขึ้นสำหรับเครือข่ายเมฆไร้สาย เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการแทรกสอดของสัญญาณร่วมที่มีต่อระบบ และได้เสนอผลงานทางวิชาการเรื่องสมรรถนะของสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ใช้โปรโตคอลเอสซีอาร์ (2010)

2.5 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

จากงานวิจัยของ David, M.P. (1998); Pozar, D.M. (2005) สายส่งสัญญาณไมโครสตริปแบบระนาบนิยมใช้กันมาก เนื่องจากสามารถผลิตขึ้นโดยกระบวนการสร้างลายวงจรและสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ไมโครเวฟอื่น ๆ ได้ง่าย ลักษณะของสายส่งสัญญาณบนโครงสร้างไมโครสตริปที่แสดงในรูป 2.14 ประกอบด้วยสตริป (strip) ซึ่งเป็นส่วนที่นำสัญญาณ มีความกว้างเป็น W และมีความหนาเป็น h ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะ โดยสตริปจะอยู่บนชั้นของฉนวนที่หนา ϵ_r เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant) และความหนาของฉนวนเท่ากับ d สำหรับแผ่นโลหะที่อยู่ด้านล่างจะทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์ (ground plane) ของวงจร

ในความเป็นจริงแล้วการมีอยู่ของฉนวนไฟฟ้าที่บริเวณเหนือบริเวณสตริป ($y > d$) มีเส้นแรงอยู่ภายในฉนวนไฟฟ้าเกือบจะทั้งหมด และจะมีอยู่ระหว่างตัวนำกับกราวด์ด้วยบางส่วน ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้ไมโครสตริปไม่สามารถรองรับคลื่นทรานส์เวอร์สอิเล็กโตรแมกเนติกเวฟ (Transverse Electromagnetic : TEM) ได้เนื่องจากมีความเร็วเฟสที่อยู่ในฉนวนไฟฟ้าเท่ากับ $c/\sqrt{\epsilon_r}$ แต่ความเร็วในอากาศมีค่าเท่ากับ c ดังนั้นความเร็วเฟสที่อยู่บริเวณผิวหน้าของฉนวนไฟฟ้ากับอากาศจึงไม่เป็นไปตามชนิดของคลื่น TEM



รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างของไมโครสตริป

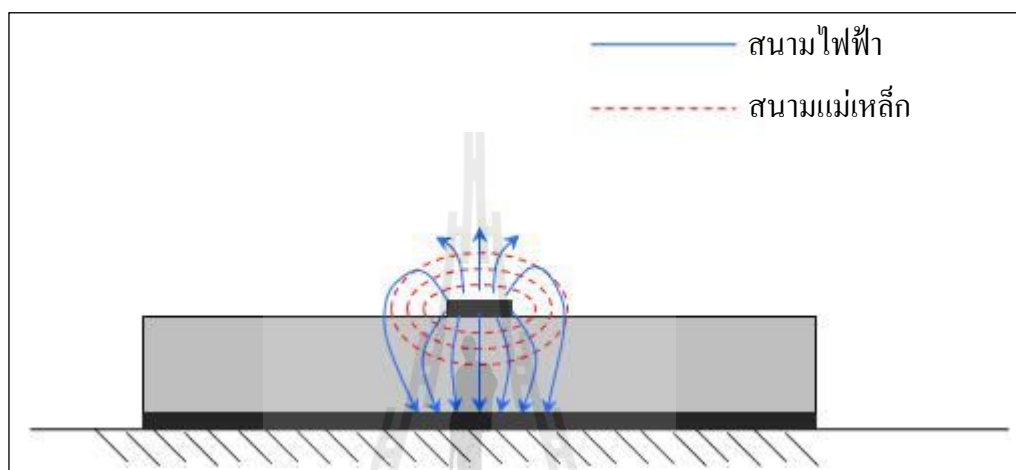
ในไมโครสตริปประกอบไปด้วยคลื่นสนามไฟฟ้าและคลื่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งลักษณะการกระจายของสนามบนสายนำสัญญาณไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 2.15 แต่อย่างไรก็ตาม ฉนวนไฟฟ้าที่อยู่ด้านล่างจะต้องเป็นแบบที่บางหรือ ($d \ll \lambda$) และสนามเป็น quasi-TEM ซึ่งค่าความเร็วเฟส (phase velocity) และค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น (propagation constant) หาได้จากสมการที่ 2.32 และสมการที่ 2.33

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.32)$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_e} \quad (2.33)$$

โดยที่ c คือความเร็วแสงในอากาศมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที ϵ_e คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล และ k_0 คือค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในอากาศจากสมการที่ 2.34 โดย f คือความถี่

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (2.34)$$



รูปที่ 2.15 รูปแบบการแพร่กระจายสนามของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

เนื่องจากบางเส้นของสนามอยู่ในฉนวนไฟฟ้า แต่บางเส้นอยู่ในอากาศ ดังนั้นค่า ϵ_e จะมีความสัมพันธ์ว่า $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ และขึ้นอยู่กับความหนาของฉนวนไฟฟ้าที่อยู่ด้านล่างและความกว้างของตัวนำไฟฟ้า

สมการการหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.35 และหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristics impedance : Z_0) ได้จากสมการที่ 2.36

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \right) \quad (2.35)$$

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\varepsilon_e} \ln\left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d}\right) & ; \frac{W}{d} < 1 \\ \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_e} \left[\frac{W}{d} + 1.393 \right] + 0.667 \ln\left(\frac{W}{d} + 1.444\right)} & ; \frac{W}{d} \geq 1 \end{cases} \quad (2.36)$$

จากค่า Z_0 และ ε_e สามารถหาค่า W/d ได้จากสมการที่ 2.37

$$\frac{W}{D} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & ; \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r} \right\} \right] & ; \frac{W}{d} > 2 \end{cases} \quad (2.37)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r} \right)} \quad (2.38)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.39)$$

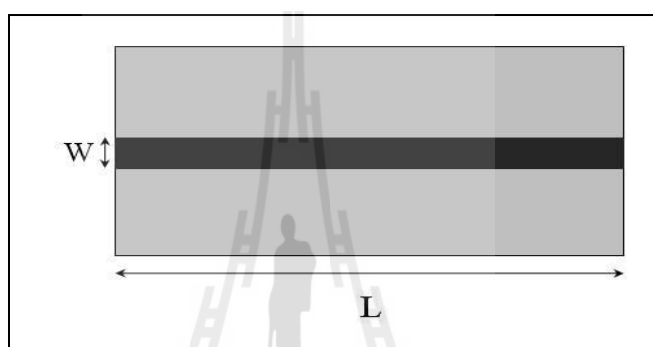
วงจรเลื่อนเฟส (Phase shifter)

เราทำการศึกษาคูณสมบัติของการเดินทางของสัญญาณบนแถบไมโครสตริปโดยใช้ไมโครสตริป 50 โอห์มเป็นพื้นฐานในการทดสอบ ในวิธีการออกแบบไมโครสตริป 50 โอห์ม ($Z_0 = 50$) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แนะนำเสนอเทคนิคการก่อรูปลำคลื่นโดยใช้วงจรเลื่อนเฟสก่อรูปลำคลื่นไปยังทิศทางที่กำหนด โดยวงจรเลื่อนเฟสนี้สร้างมาจากการออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริป 50 โอห์มดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยที่ W คือความกว้างของตัวเลื่อนเฟสในสายส่งไมโครสตริป และมีความยาวเท่ากับ L ที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งสามารถหา W ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 2.40 และหาความยาว L ได้จากสมการที่ 2.41

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (2.40)$$

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} L \quad (2.41)$$

โดยที่ θ คือมุมของตัวเลื่อนเฟสที่ต้องการออกแบบ λ คือความยาวคลื่น



รูปที่ 2.16 วงจรเลื่อนเฟสที่ออกแบบบนไมโครสตริป

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังเป็นเพียงกรณีศึกษาเบื้องต้น ดังนั้นระบบการก่อรูปลำคลื่น จึงได้ทำการออกแบบระบบในกรณีที่ยากก่อน นั่นก็คือวงจรเลื่อนเฟสซึ่งเป็นวงจรในสายส่งแบบไมโครสตริปที่สร้างได้ง่ายและไม่ซับซ้อน

2.6 สรุป

ตามเนื้อหาที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายนั้นยังมีข้อเสียในเรื่องของการเกิดสัญญาณแทรกสอดจากอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ใกล้เคียงกัน จากข้อเสียที่เกิดขึ้นในเครือข่ายเมฆไร้สายที่กล่าวมานั้น ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาถึงผลกระทบของเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยมีแนวคิดที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการติดตั้งระบบสายอากาศเก่งไวที่อุปกรณ์จัดเส้นทาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน (Signal to Interference plus Noise Ratio : SINR) โดยใช้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น ที่ได้ออกแบบและสร้างแผงวงจรพิมพ์สำหรับส่วนประมวลสัญญาณโดยใช้ตัวเลื่อนเฟส

บทที่ 3

การจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของการแทรกสอดของสัญญาณร่วมที่มีต่อระบบเครือข่ายไร้สาย เปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้สายอากาศรอบทิศทางกับระบบที่ใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่น และออกแบบระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นอย่างง่ายที่มีความสามารถก่อรูปลำคลื่นไปยังทิศทางที่กำหนดได้เพื่อนำไปใช้งานกับเครือข่ายไร้สายที่ความถี่ 2.45 GHz โดยในการจำลองผลทางโปรแกรมเมทแลบจะมีการกำหนดรูปแบบของระบบเครือข่ายไร้สายและสถานการณ์การติดตั้งสายอากาศ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

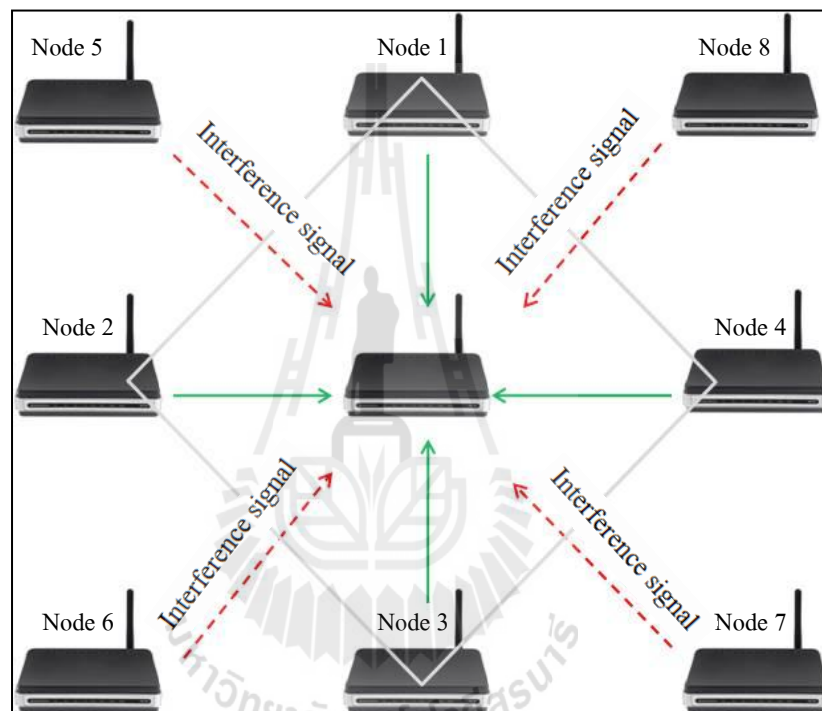
3.2 สถานการณ์ของระบบเครือข่ายไร้สาย

ในการศึกษาสมรรถนะของระบบเครือข่ายไร้สายที่ใช้สายอากาศกึ่งนั้น เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของระบบได้กว้างขึ้นจึงได้กำหนดการวางอุปกรณ์จัดเส้นทาง (router) ของระบบเครือข่ายไร้สายเป็น 2 แบบ โดยแบบที่ 1 กำหนดให้ระบบเครือข่ายไร้สายมีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางเป็นแบบสี่เหลี่ยม และแบบที่ 2 มีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางเป็นแบบหกเหลี่ยม ทั้ง 2 ระบบนี้จะกำหนดให้อุปกรณ์ที่อยู่ตรงกลางเป็นอุปกรณ์จัดเส้นทางเกตเวย์ (gateway router) รับสัญญาณจากอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ในเมชเดียวกันจะกำหนดให้เป็นสัญญาณที่สนใจ (desire signal) และอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ใกล้เคียงกันแต่ไม่ได้อยู่ในเมชเดียวกันกำหนดให้เป็นสัญญาณแทรกสอด (interference signal) ดังรูป 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ โดยที่ระยะตำแหน่งของอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้นมีระยะที่เท่ากัน จากรูปที่ 3.1 กำหนดให้โนดที่ 1 ถึง 4 เป็นเมชเดียวกันและเป็นสัญญาณที่ต้องการ ส่วน โหนดที่ 5 ถึง 8 เป็นสัญญาณแทรกสอด เช่นเดียวกับรูปที่ 3.2 กำหนดให้อุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ตรงกลางเป็นเกตเวย์รับสัญญาณจาก โหนดที่ 1 ถึง 6 และ โหนดที่ 7 ถึง 12 เป็นสัญญาณแทรกสอด จากนั้นเพื่อเปรียบเทียบผลความแตกต่างระหว่างระบบที่ใช้สายอากาศรอบทิศทางกับระบบที่ใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้กำหนดสถานการณ์ในการวิเคราะห์ระบบเป็น 3 สถานการณ์ดังต่อไปนี้

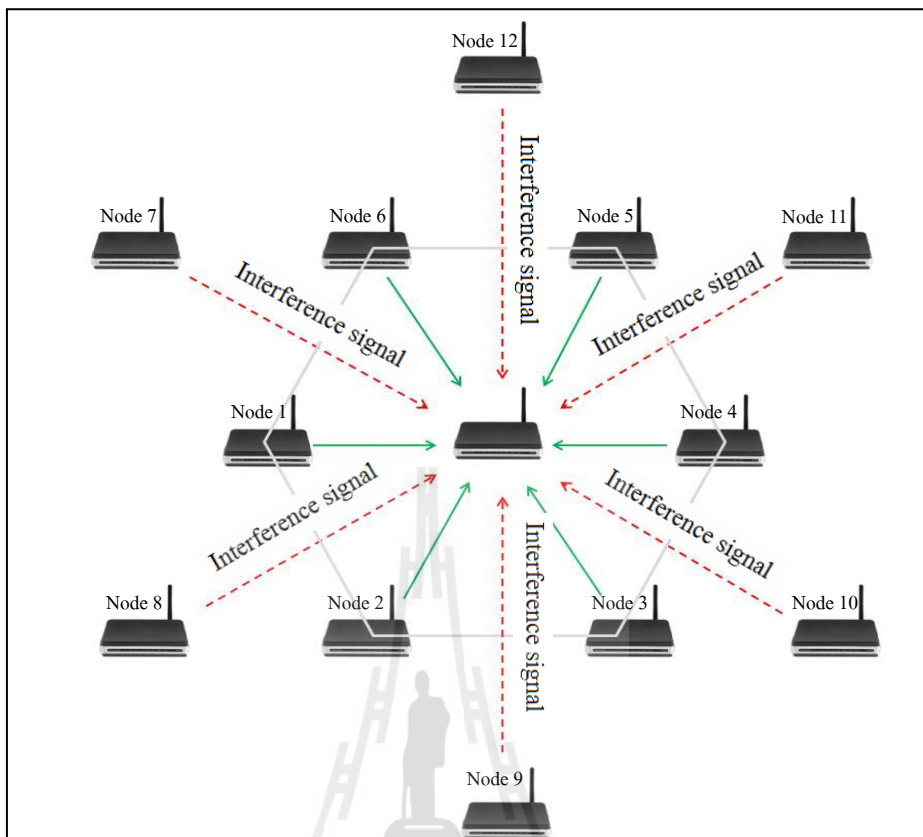
สถานการณ์ที่ 1 กำหนดให้ติดตั้งสายอากาศรอบทิศทางไว้ที่อุปกรณ์จัดเส้นทางทุกตัวในระบบเครือข่ายเมชไร้สายทั้ง 2 แบบ

สถานการณ์ที่ 2 กำหนดให้ติดตั้งสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นไว้ที่เกตเวย์เพียงตัวเดียว ส่วนอุปกรณ์จัดเส้นทางที่เหลือทั้งหมดติดตั้งด้วยสายอากาศรอบทิศทาง

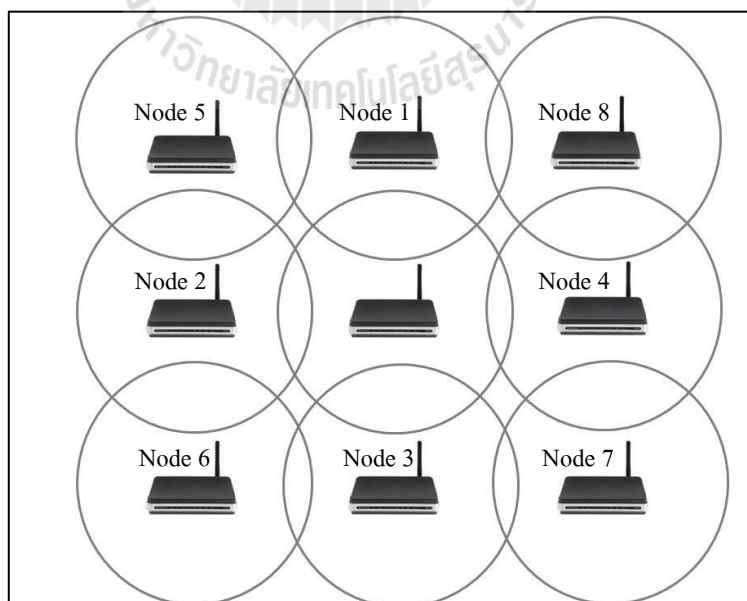
สถานการณ์ที่ 3 ติดตั้งสายอากาศสวิทช์ลำคลื่นไว้กับอุปกรณ์จัดเส้นทางทุกตัว ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.8



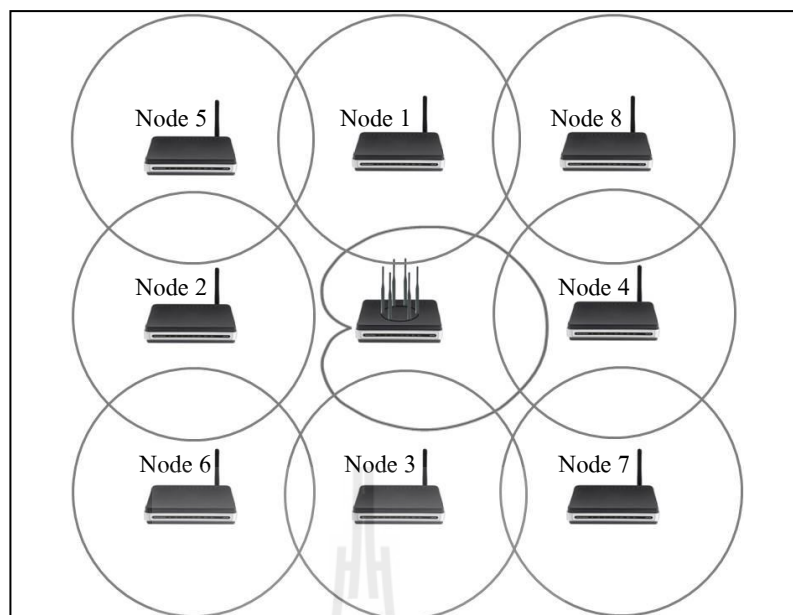
รูปที่ 3.1 รูปแบบการอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม



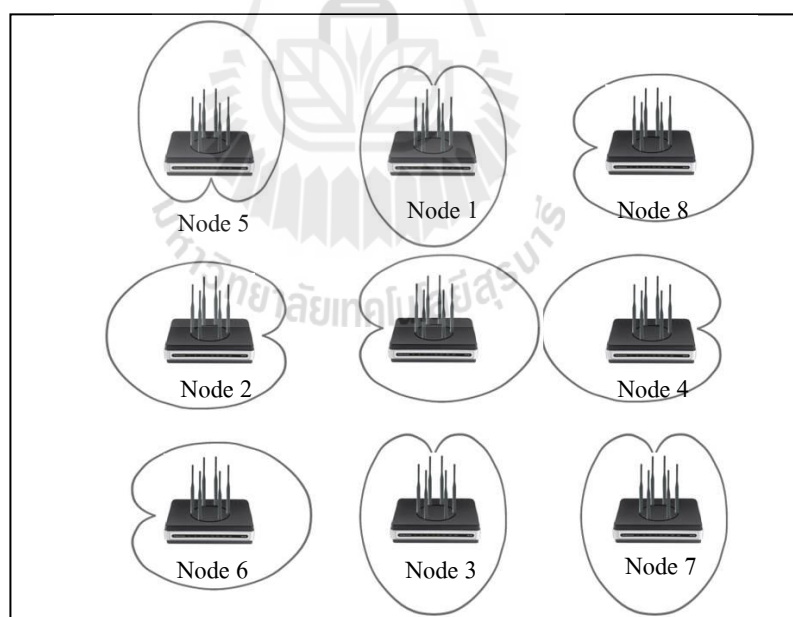
รูปที่ 3.2 รูปแบบการอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม



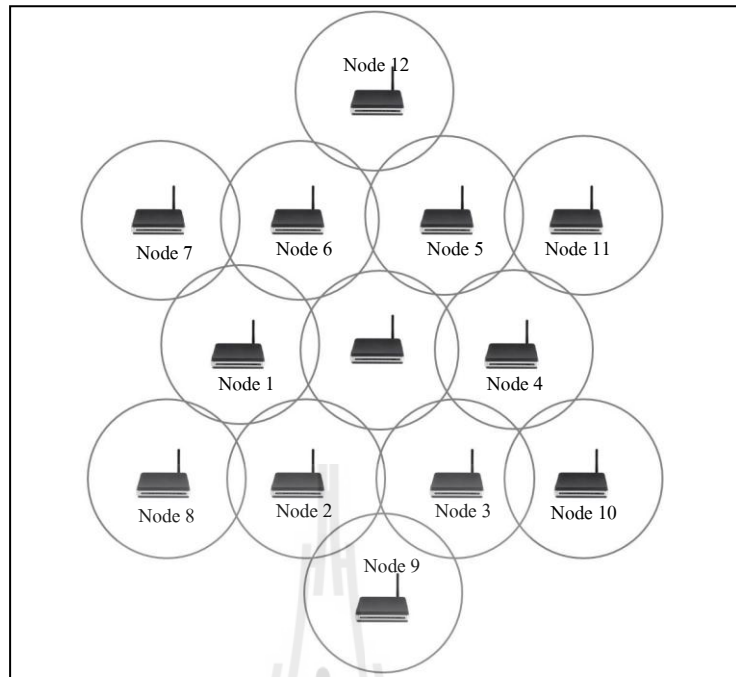
รูปที่ 3.3 สถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 1



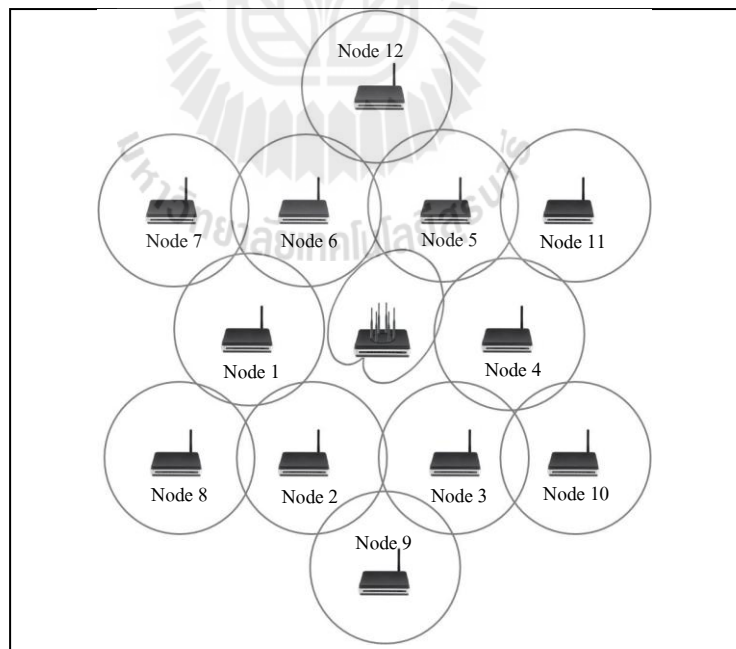
รูปที่ 3.4 สถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 2



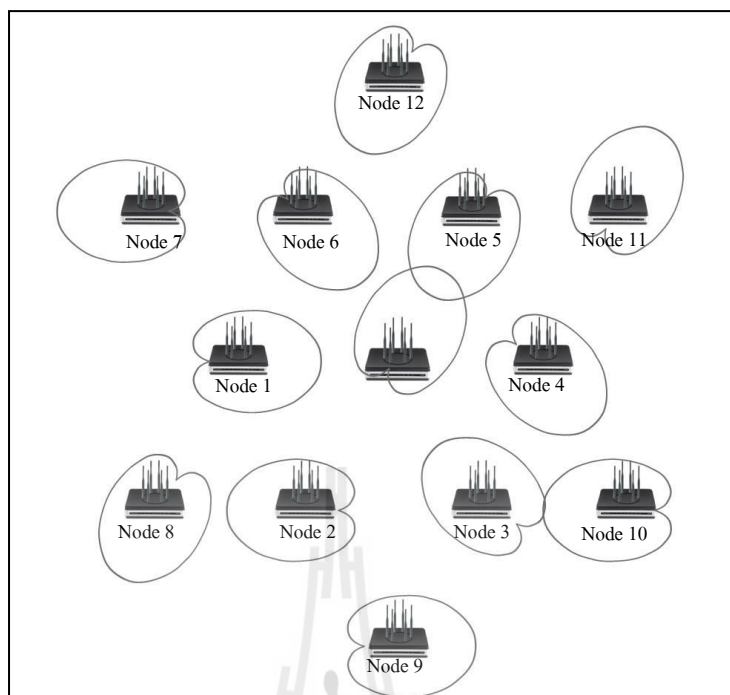
รูปที่ 3.5 สถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 3



รูปที่ 3.6 สถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 1



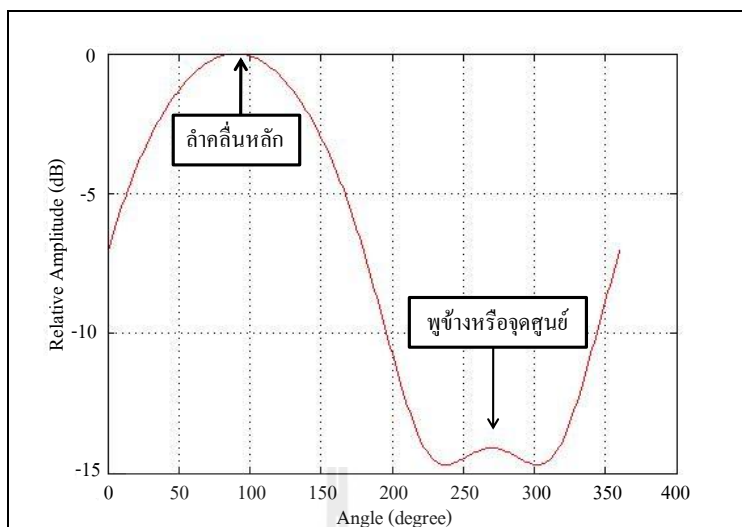
รูปที่ 3.7 สถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 2



รูปที่ 3.8 สถานการณ์การติดตั้งสายอากาศของระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมในสถานการณ์ที่ 3

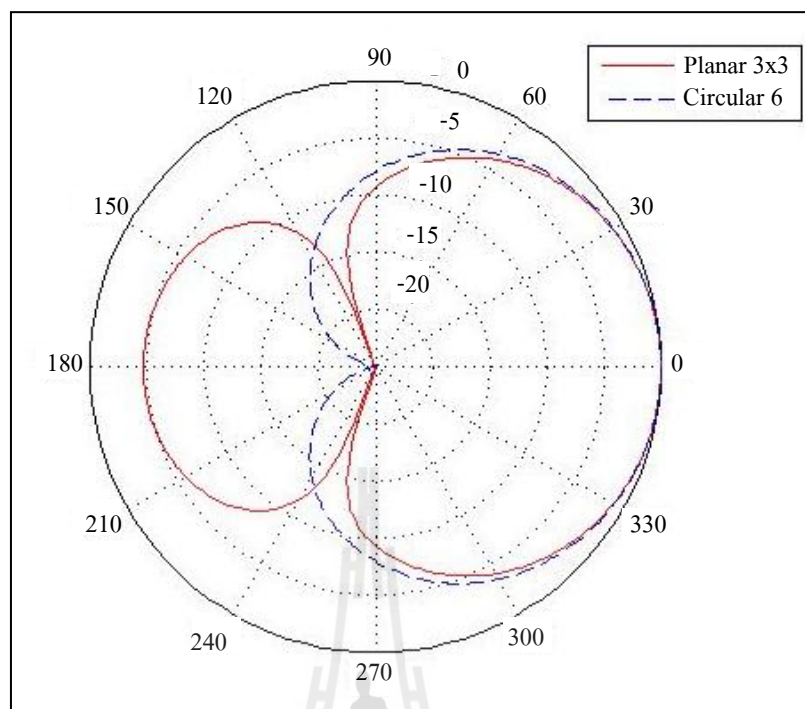
3.3 สายอากาศแถวลำดับ

จากงานวิจัย สายอากาศที่ใช้ในระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นนั้นจะเป็นสายอากาศประเภทแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมขนาด 2×2 มีระยะห่างระหว่างสายอากาศ $d = \lambda/4$ เนื่องจากเราได้จำลองผลด้วยโปรแกรมแมทแลบ เพื่อดูแบบรูปลำคลื่นหลักการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$ นั้น พบว่าสามารถก่อรูปไปยั้งทิศทางที่ต้องการและมีระดับพูข้างหรือจุดศูนย์ที่ต่ำมากดังรูปที่ 3.9 ซึ่งคุณสมบัตินี้เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ได้กำหนดรูปแบบการวางอุปกรณ์จัดเส้นทางไว้ในงานวิจัยฉบับนี้ เนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศนี้ไม่มีพูข้างจึงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณจากอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้เคียงซึ่งเป็นสัญญาณแทรกสอดได้ดีกว่าระบบที่ใช้สายอากาศรอบทิศทาง เมื่อวิเคราะห์ผลการจำลองผลทางโปรแกรมแมทแลบพบว่าค่าอัตราของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดของระบบที่ใช้สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นมีค่ามากกว่าระบบที่ใช้สายอากาศรอบทิศทาง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสามารถปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายได้ดีกว่าระบบที่ใช้สายอากาศรอบทิศทาง



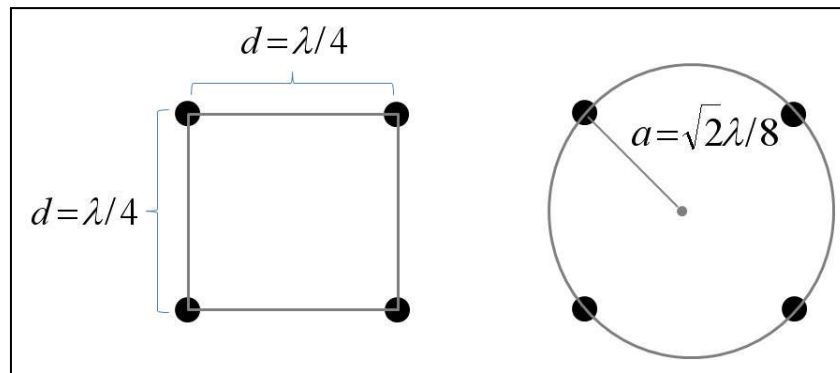
รูปที่ 3.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 2×2
มีระยะห่างระหว่างสายอากาศเท่ากับ $\lambda/4$

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับจำนวนที่เหมาะสมของสายอากาศ เพื่อประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย เพราะถ้ากำหนดจำนวนสายอากาศที่ใช้ในระบบมากจะเกิดการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย แต่ถ้าใช้จำนวนสายอากาศน้อยอาจทำให้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นไม่มีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูล เมื่อพิจารณาสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบแบบสี่เหลี่ยมขนาด 2×2 แล้ว จะเห็นว่าถ้าเพิ่มจำนวนของสายอากาศชนิดนี้จะสามารถเพิ่มได้เป็น 3×3 4×4 ... $M \times N$ ส่วนสายอากาศแถวลำดับวงกลมสามารถเพิ่มจำนวนสายอากาศได้เป็น 3 4 5 ... N ต้น เมื่อเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบและสายอากาศแถวลำดับวงกลมในกรณีที่มีการถ่วงน้ำหนักไว้แล้วดังรูปที่ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบมีพหุหลังซึ่งจะเป็นผลเสียเมื่อนำมาใช้ในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย และในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายมีการวางแผนจัดเส้นทางที่ใกล้กัน ดังนั้นจะไม่พิจารณากำลังขยายที่เปรียบเทียบกันระหว่างสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้นกับสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 3×3 ต้น จึงสรุปได้ว่าสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้นซึ่งมีจำนวนสายอากาศที่น้อยกว่าสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ 3×3 ต้น แต่ให้ผลแบบรูปการแผ่พลังงานได้ดีกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสายอากาศแถวมาใช้ในการงานวิจัย



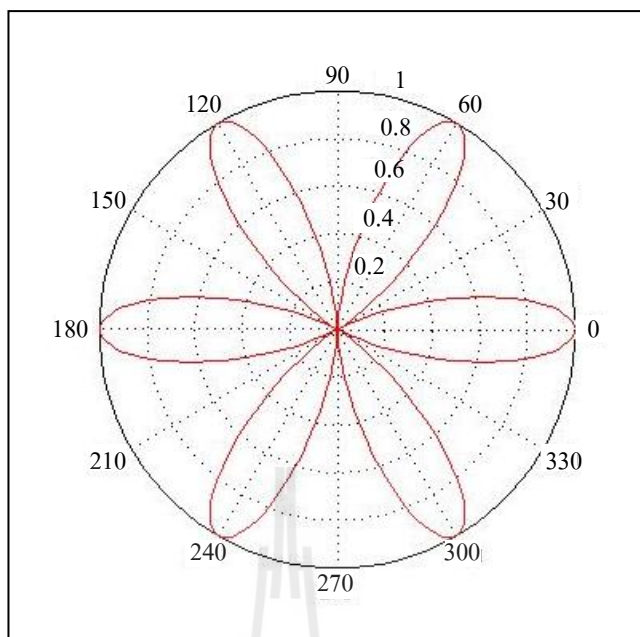
รูปที่ 3.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบขนาด 3×3 ต้น
และสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอสายอากาศแถวลำดับวงกลมมาทำการศึกษาเกี่ยวกับจำนวนที่เหมาะสมของสายอากาศ โดยนำสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบมาเป็นระยะอ้างอิงเพื่อออกแบบสายอากาศแถวลำดับวงกลมดังรูปที่ 3.10

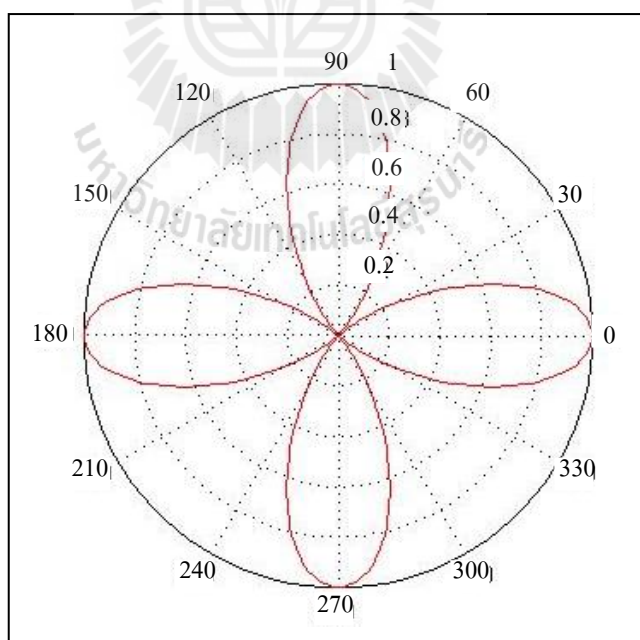


รูปที่ 3.11 การจัดวางสายอากาศแบบแถวลำดับเชิงระนาบและแบบแถวลำดับวงกลม

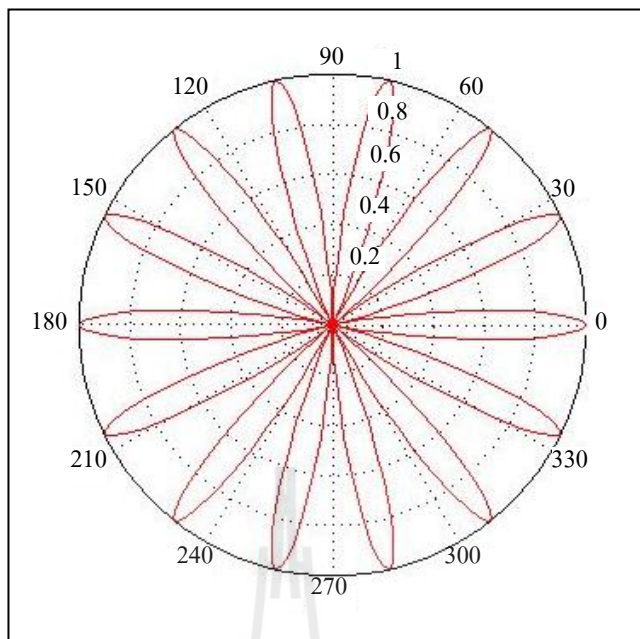
เนื่องจากสายอากาศแถวลำดับวงกลมจะพิจารณารัศมีของวงกลม a เป็นระยะห่างของสายอากาศ เมื่อนำ d มาเป็นระยะอ้างอิงเพื่อทำการหารัศมีของวงกลมจะสามารถหาค่าได้เท่ากับ $\sqrt{2}\lambda/8$ จากนั้นทำการจำลองแบบเพื่อหาจำนวนที่เหมาะสมของสายอากาศโดยใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมที่รัศมี $a = \sqrt{2}\lambda/8$ โดยการทดลองจะเลือกทดลองตั้งแต่สายอากาศจำนวน 3 ต้นจนถึงสายอากาศจำนวน 8 ต้น จำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้ง 6 ชุด คือ สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น โดยการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกร่องน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 3.12 ถึงรูปที่ 3.17 จะสังเกตว่าลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานมีทิศทางของลำคลื่นชี้ไปหลายทิศทาง ส่วนการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนักนั้นแสดงในรูปที่ 3.18 ถึงรูปที่ 3.23 จะสังเกตว่าลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานมีการก่อรูปลำคลื่นชี้ไปในทิศทางเดียวที่กำหนดไว้ จากนั้นจะนำค่าจากการจำลองผลแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศมาทดลองในโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนเปรียบเทียบกับสายอากาศแต่ละชุด เพื่อสังเกตความสามารถในการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณของสายอากาศแต่ละชุดว่าจะมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนเสถียรหรือเริ่มคงที่ที่สายอากาศชุดใด



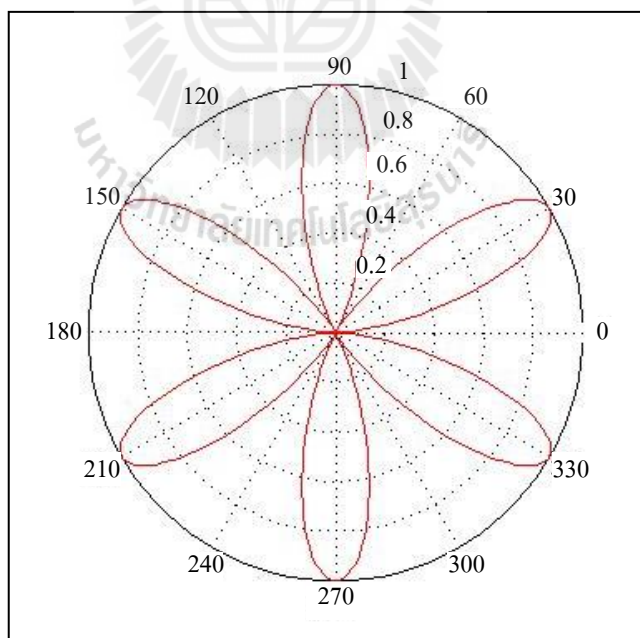
รูปที่ 3.12 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 3 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีการถ่วงน้ำหนัก



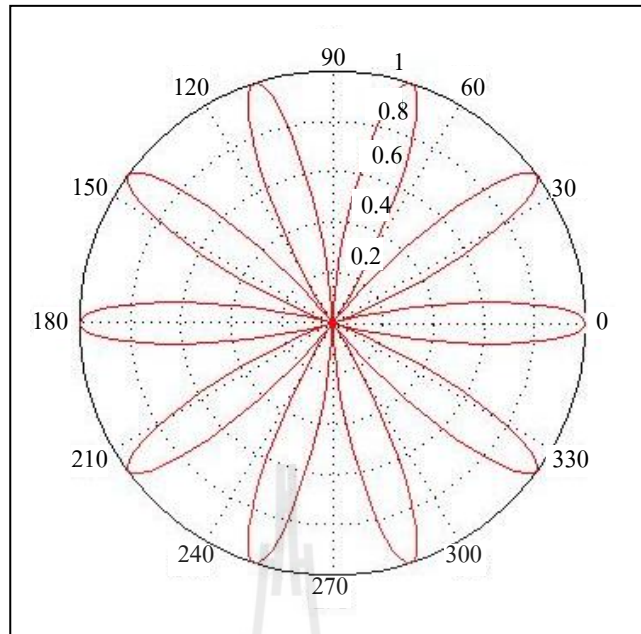
รูปที่ 3.13 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 4 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีการถ่วงน้ำหนัก



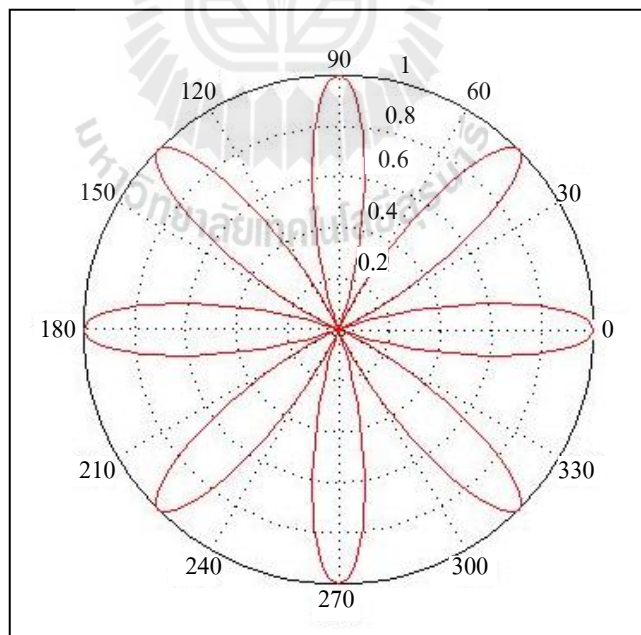
รูปที่ 3.14 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 5 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกร่องน้ำหนัก



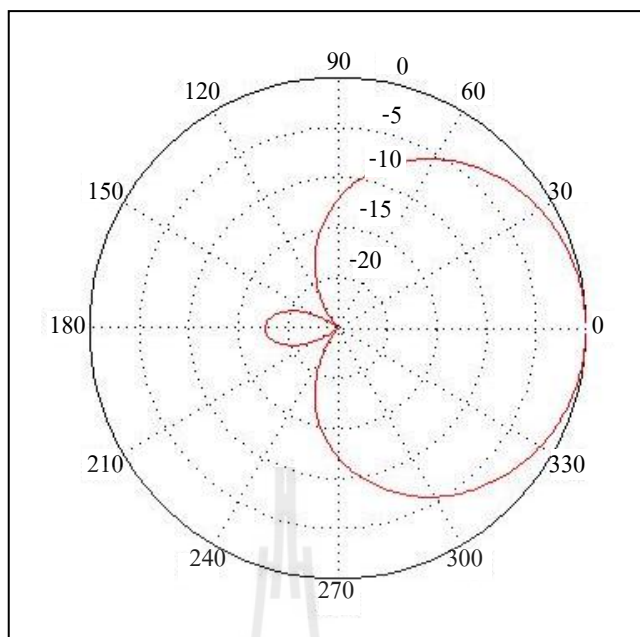
รูปที่ 3.15 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกร่องน้ำหนัก



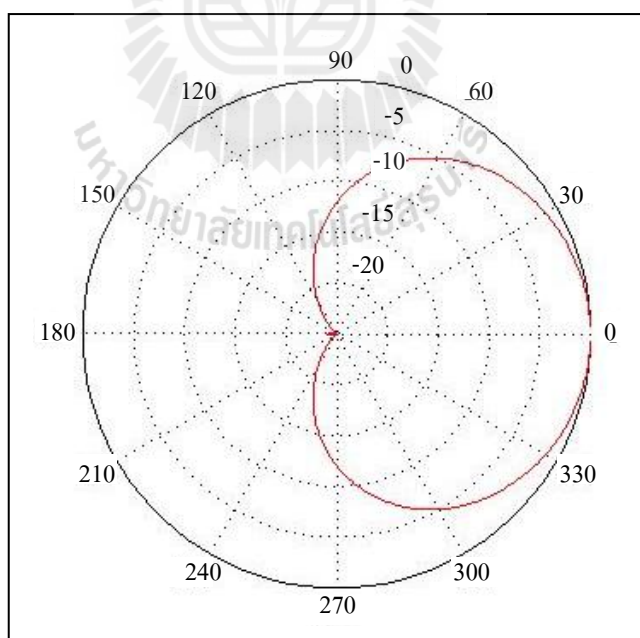
รูปที่ 3.16 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 7 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกรอ่วงน้ำหนัก



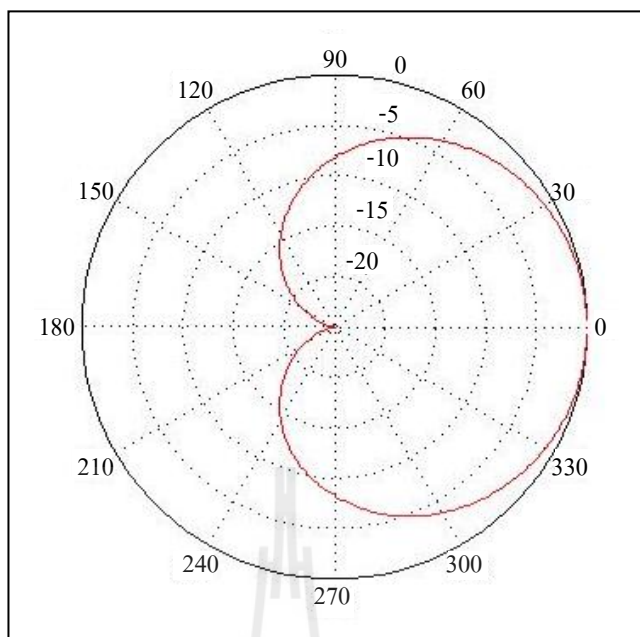
รูปที่ 3.17 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 8 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศยังไม่มีกรอ่วงน้ำหนัก



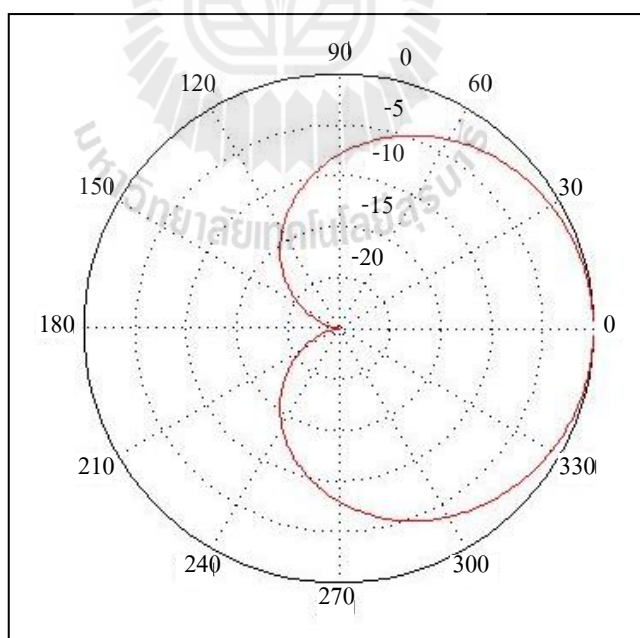
รูปที่ 3.18 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 3 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก



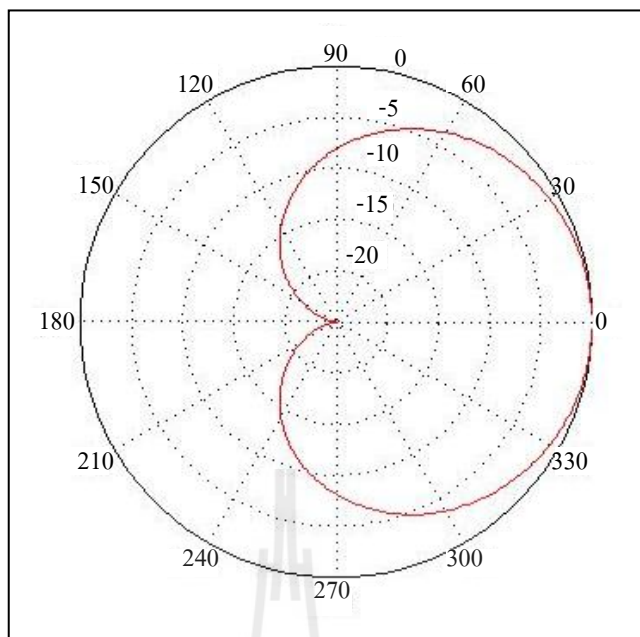
รูปที่ 3.19 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 4 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก



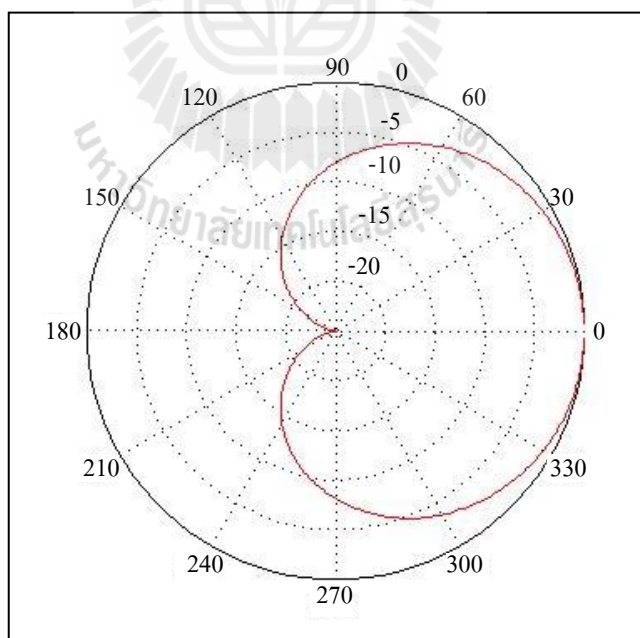
รูปที่ 3.20 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 5 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก



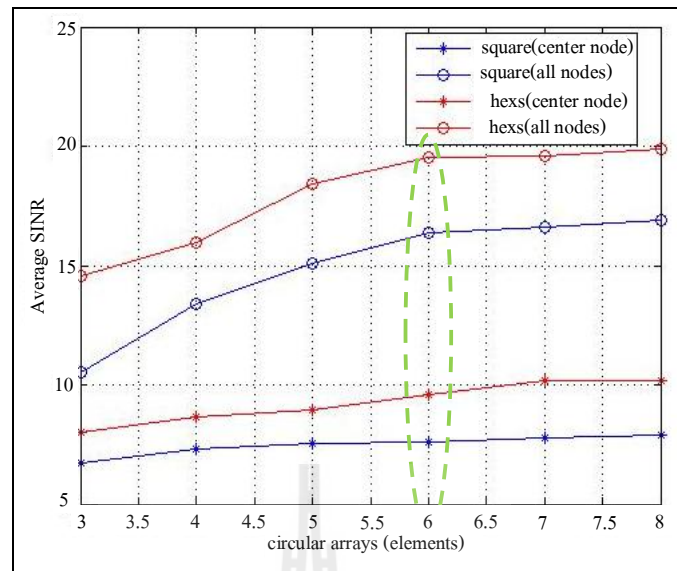
รูปที่ 3.21 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 3.22 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 7 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 3.23 การจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมขนาด 8 ต้น
ในกรณีที่สายอากาศมีการถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงจำนวนสายอากาศที่เหมาะสม

ในการออกแบบเครือข่ายเมชไร้สายได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการจำลองแบบทางคอมพิวเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จากผลการจำลองแบบเพื่อหาจำนวนที่เหมาะสมของสายอากาศที่ใช้ในระบบเครือข่ายเมชไร้สายทั้งระบบที่มีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางเป็นแบบสี่เหลี่ยมและแบบหกเหลี่ยมดังรูปที่ 3.24 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกกับสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นหมายถึงประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลดีขึ้น กราฟจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจำนวนสายอากาศที่ 6 ต้นกราฟจะเริ่มคงที่และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยไปจนถึงจำนวนสายอากาศที่ 8 ต้น ดังนั้นจะสรุปได้ว่าสายอากาศที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในระบบเครือข่ายเมชไร้สายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือสายอากาศแถวลำดับวงกลมจำนวน 6 ต้น ที่รัศมี $a = \sqrt{2}\lambda/8$ ซึ่งสามารถคำนวณระยะห่างรัศมีของสายอากาศแต่ละต้นได้จากสมการที่ (3.2)

$$v = f\lambda \quad (3.1)$$

ความยาวคลื่น

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

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

โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศในสมการ (3.2)

$$a = \frac{\sqrt{2}\lambda}{8} = \frac{\sqrt{2} \times 12.24}{8} \quad (3.2)$$

$$\therefore a = 2.16 \text{ เซนติเมตร}$$

ดังนั้นระยะห่างรัศมีของสายอากาศเท่ากับ 2.16 เซนติเมตร



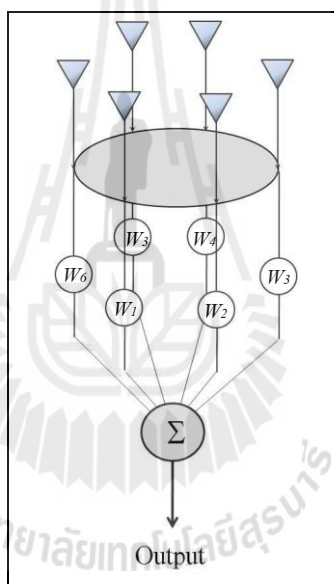
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายเมฆไร้สาย

พารามิเตอร์	ค่า
จำนวนโนดที่ใช้จำลองแบบ	ระบบที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยม <ul style="list-style-type: none"> - โหนดที่สนใจจำนวน 4 ตัว - โหนดแทรกสอดจำนวน 4 ตัว ระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยม <ul style="list-style-type: none"> - โหนดที่สนใจจำนวน 6 ตัว - โหนดแทรกสอดจำนวน 6 ตัว
เกตเวย์	1 ตัว วางไว้ตำแหน่งตรงกลางเมฆ
ความถี่ที่ใช้ทำงาน	2.4 GHz
โปรโตคอล	โปรโตคอลเอสซีอาร์ SCR
แบบการเผยแพร่พลังงาน (Propagation model)	Two ray model
แบบการสูญเสียเนื่องจากสิ่งกีดขวาง (Path loss model)	Simplified path loss model
ระยะอ้างอิง	1 m.
ครรชนิการสูญเสียเนื่องจากสิ่งกีดขวาง (Path loss components: γ)	4
ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)	20 dB
ขนาดของคิว	ไม่จำกัด (∞)
การสร้างแพ็คเกจ (Packet generation)	อัตราการให้บริการ (λ) = 0.9 อัตราความหนาแน่นของข้อมูล (ρ) = 0.5
เวลาในการจำลองแบบ	200 วินาที

3.4 เครือข่ายก่อรูปลำคลื่น

ในระบบสายอากาศแก่ประเภทสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นจะมีตัวถ่วงน้ำหนัก (weight) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เพื่อที่จะนำหน้าที่เป็นตัวปรับเลือกลำคลื่นให้ชี้ไปในทิศทางที่ต้องการ โดยตัวถ่วงน้ำหนักที่เราได้กล่าวถึงนั้น เรียกว่า โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังเป็นเพียงกรณีศึกษาเบื้องต้น ดังนั้นโครงข่ายการก่อรูปลำคลื่นจึงนำวงจรเลื่อนเฟสมาใช้ในสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น จากรูปที่ 3.25 แสดงรูปองค์ประกอบ

ของสายอากาศสวิตช์ลากลื่นซึ่งประกอบไปด้วยสายอากาศจำนวน 6 ต้น เชื่อมต่อเข้ากับตัวถ่วงน้ำหนักแต่ละตัวและรวมสัญญาณเข้ากับอุปกรณ์รวมสัญญาณ (combiner) โดยส่วนที่เป็นตัวถ่วงน้ำหนักจะมีทั้งหมด 6 ตัว คือ W_1 W_2 W_3 W_4 W_5 และ W_6 เมื่อมีแหล่งกำเนิดสัญญาณเข้ามาที่มุม θ ใดๆ ตัวถ่วงน้ำหนักนี้จะทำหน้าที่ปรับมุมของสัญญาณในสายอากาศแต่ละต้น เพื่อที่จะทำให้ค่า Σ ที่รวมสัญญาณออกมามีค่าสูงสุด ซึ่งก็คือ 6 เท่าของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่จ่ายสัญญาณเข้ามา สำหรับการออกแบบวงจรเลื่อนเฟสจะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของตัวเลื่อนเฟสแต่ละตัว ซึ่งพารามิเตอร์ของตัวเลื่อนเฟสได้จากการจำลองผลทางโปรแกรม ตามตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 และจะนำเอาข้อมูลเหล่านี้เป็นแนวทางเพื่อนำไปใช้ออกแบบวงจรเลื่อนเฟส ซึ่งจะนำเสนอในบทถัดไป



รูปที่ 3.25 องค์ประกอบของสายอากาศที่ได้เสนอ

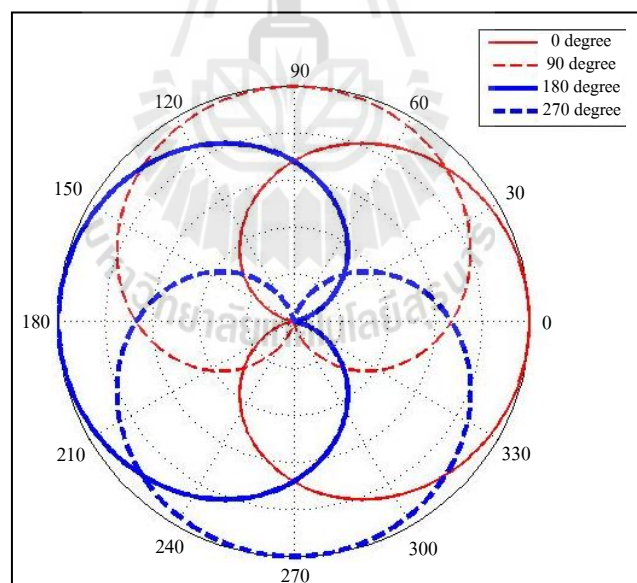
ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักสำหรับระบบที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยมและใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8) \lambda$

ทิศทางของ ลำคลื่นหลัก	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก					
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6
0°	$0.4440 + 0.8960i$	$0.8497 + 0.5272i$	$0.8497 - 0.5272i$	$0.4440 - 0.8960i$	$0.8497 - 0.5272i$	$0.8497 + 0.5272i$
90°	$1.0000 + 0.0000i$	$0.5720 + 0.8203i$	$0.5720 + 0.8203i$	$1.0000 + 0.0000i$	$0.5720 - 0.8203i$	$0.5720 - 0.8203i$
180°	$0.4440 - 0.8960i$	$0.8497 - 0.5272i$	$0.8497 + 0.5272i$	$0.4440 + 0.8960i$	$0.8497 + 0.5272i$	$0.8497 - 0.5272i$
270°	$1.0000 - 0.0000i$	$0.5720 - 0.8203i$	$0.5720 - 0.8203i$	$1.0000 + 0.0000i$	$0.5720 + 0.8203i$	$0.5720 + 0.8203i$

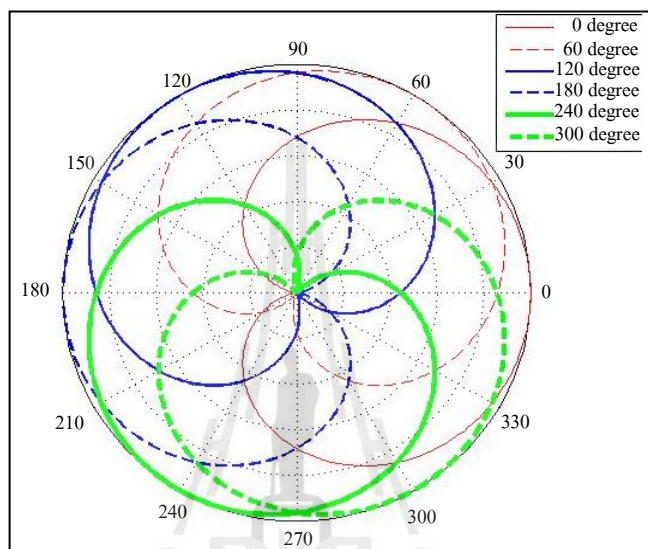
ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักสำหรับระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมและใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น
 ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$

ทิศทางของ ลำคลื่นหลัก	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก					
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6
0°	$0.4440 + 0.8960i$	$0.8497 + 0.5272i$	$0.8497 - 0.5272i$	$0.4440 - 0.8960i$	$0.8497 - 0.5272i$	$0.8497 + 0.5272i$
60°	$0.8497 + 0.5272i$	$0.4440 + 0.8960i$	$0.8497 + 0.5272i$	$0.8497 - 0.5272i$	$0.4440 - 0.8960i$	$0.8497 - 0.5272i$
120°	$0.8497 - 0.5272i$	$0.8497 + 0.5272i$	$0.4440 + 0.8960i$	$0.8497 + 0.5272i$	$0.8497 - 0.5272i$	$0.4440 - 0.8960i$

สายอากาศที่ได้นำเสนอนี้จะนำไปใช้งานร่วมกับระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ได้เสนอวิธีการกำหนดการวางอุปกรณ์จัดเส้นทางของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ในหัวข้อนี้จะแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมที่ได้จากการจำลองผลทางโปรแกรม โดยกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลัก 4 ทิศทาง คือ 0° 90° 180° และ 270° สำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่กำหนดการวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.26 และรูปที่ 3.27 แสดงการกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลัก 6 ทิศทาง คือ 0° 60° 120° 180° 240° และ 300° สำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่กำหนดการวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม



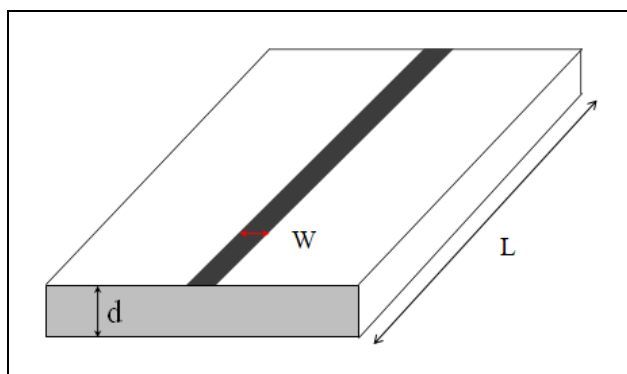
รูปที่ 3.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น
ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$ สำหรับระบบที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.27 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น
ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$ สำหรับระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยม

3.5 วงจรเลื่อนเฟส

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น และมีระยะห่างรัศมีของสายอากาศสายเท่ากับ รัศมี $(\sqrt{2}/8)\lambda$ ใช่วงจรเลื่อนเฟสเป็นโครงข่ายก่อรูปลำดับสี่ ในการออกแบบจะใช้การคำนวณพื้นฐานมาจากการคำนวณของไมโครสตริปโดยใช้ไมโครสตริป $50\ \Omega$ ซึ่งทำการออกแบบบนแผงวงจรพิมพ์แบบ FR4 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_r เท่ากับ 4.8 และมีความหนาของแผ่นไดอิเล็กตริก d เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ที่ความถี่ 2.45 GHz



รูปที่ 3.28 ตัวเลื่อนเฟส

ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้จากตารางที่ 3.2 และสมการที่ 3.3 โดยจะต้องแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อนจากตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 ให้เป็นองศาเสียก่อน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$Z = a+bi \quad ; \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.3)$$

ตัวอย่างการคำนวณจากตารางที่ 3.2

1. ทิศทางของลำคลื่นหลัก 0° ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 1 (W_1) = $0.4440 + 0.8960i$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.8960}{0.4440}\right) = 63.64^\circ$$

2. ทิศทางของลำคลื่นหลัก 0° ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 2 (W_2) = $0.8497 + 0.5272i$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.5272}{0.8497}\right) = 31.82^\circ$$

3. ทิศทางของลำคลื่นหลัก 0° ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 3 (W_3) = $0.8497 - 0.5272i$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.5272}{0.8497}\right) = -31.82^\circ$$

4. ทิศทางของลำคลื่นหลัก 0° ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 4 (W_4) = $0.4440 - 0.8960i$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.5272}{0.8497}\right) = -63.64^\circ$$

5. ทิศทางของลำคลื่นหลัก 0° ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 5 (W_5) = $0.8497 - 0.5272i$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.5272}{0.8497}\right) = -31.82^\circ$$

6. ทิศทางของลำคลื่นหลัก 0° ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 6 (W_6) = $0.8497 + 0.5272i$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.5272}{0.8497}\right) = 31.82^\circ$$

ตารางที่ 3.4 ค่าเฟสที่ได้จากการจำลองผลสำหรับระบบที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยมและใช้

สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$

ทิศทางของ ลำคลื่นหลัก	เฟสของตัวถ่วงน้ำหนัก					
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
0	63.64°	31.82°	-31.82°	-63.64°	-31.82°	31.82°
90	0°	55.11°	55.11°	0°	-55.11°	-55.11°
180	-63.64°	-31.82°	31.82°	-63.64°	31.82°	-31.82°
270	0°	-55.11°	-55.11°	0°	55.11°	55.11°

ตารางที่ 3.5 ค่าเฟสที่ได้จากการจำลองผลสำหรับระบบที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมและใช้

สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$

ทิศทางของ ลำคลื่นหลัก	เฟสของตัวถ่วงน้ำหนัก					
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6

0	63.64°	31.82°	-31.82°	-63.64°	-31.82°	31.82°
60	31.82°	63.64°	31.82°	-31.82°	-63.64°	-31.82°
90	0°	55.11°	55.11°	0°	-55.11°	-55.11°
120	-31.82°	31.82°	63.64°	31.82°	-31.82°	-63.64°
180	-63.64°	-31.82°	31.82°	-63.64°	31.82°	-31.82°
240	-31.82°	-63.64°	-31.82°	31.82°	63.64°	31.82°
270	0°	-55.11°	-55.11°	0°	55.11°	55.11°
300	31.82°	-31.82°	-63.64°	-31.82°	31.82°	63.64°

จากค่าเฟสของตัวถ่วงน้ำหนักที่ได้ในตารางที่ 3.4 และตาราง 3.5 ที่ได้ทำการคำนวณการแปลงค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนมาเป็นองศาจากตารางที่ 3.2 และตาราง 3.3 เพื่อจะนำมาทำการออกแบบอุปกรณ์ตัวเลื่อนเฟส โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่จะนำมาออกแบบมีทั้งหมด 7 ค่า คือ 0° 31.82° 55.11° 63.64° -31.82° -55.11° และ -63.64° ซึ่งค่า 0° ไม่ต้องออกแบบ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเฟส จากนั้นจะนำมาทำการออกแบบอุปกรณ์ โดยอาศัยการจำลองผลในโปรแกรม CST Microwave Studio ในการปรับมุมเฟสของอุปกรณ์ตามที่เราต้องการ

ในการออกแบบและคำนวณนั้น เรายังจะใช้พื้นฐานมาจากการคำนวณของไมโครสตริป 50 Ω ดังที่ได้แสดงในหัวข้อ 3.3.1 หาค่า W เพื่อนำไปออกแบบหาความยาวของไมโครสตริปในโปรแกรม CST Microwave Studio

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{2A-2} & ; \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B-1 - \ln(2B-1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & ; \frac{W}{d} > 2 \end{cases} \quad (3.4)$$

เมื่อ $Z_0 = 50 \quad \Omega$ จาก

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (3.5)$$

แทนค่าจะได้

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

นำค่า A ที่ได้แทนลงในสมการที่ (3.4) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

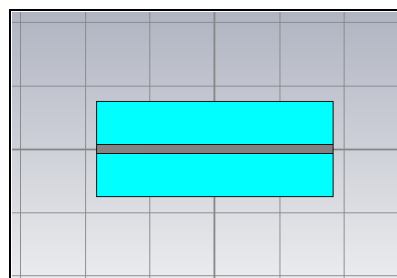
$$\frac{W}{d} = \frac{8e^A}{e^{2A-2}} = \frac{8e^{1.582}}{e^{2(1.582)-2}}$$

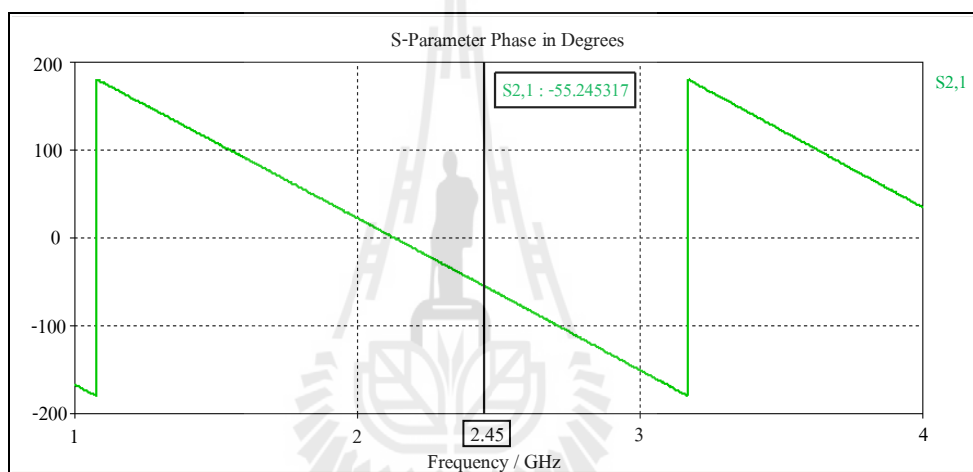
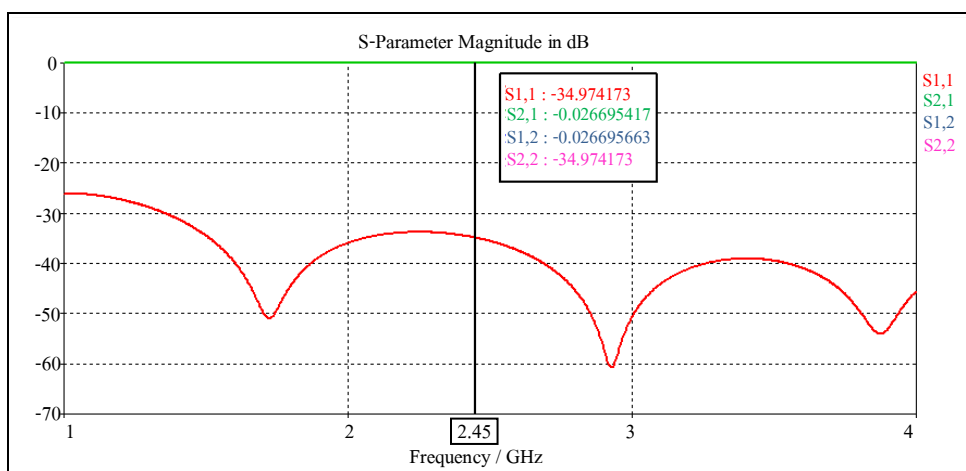
$$\frac{W}{d} = 1.796 \quad ; \quad \frac{W}{d} < 2$$

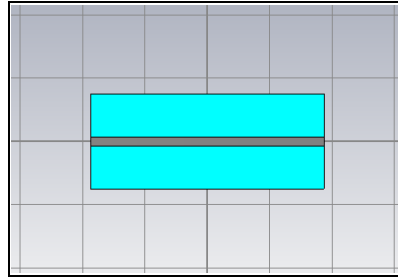
จะเห็นว่าเป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น

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

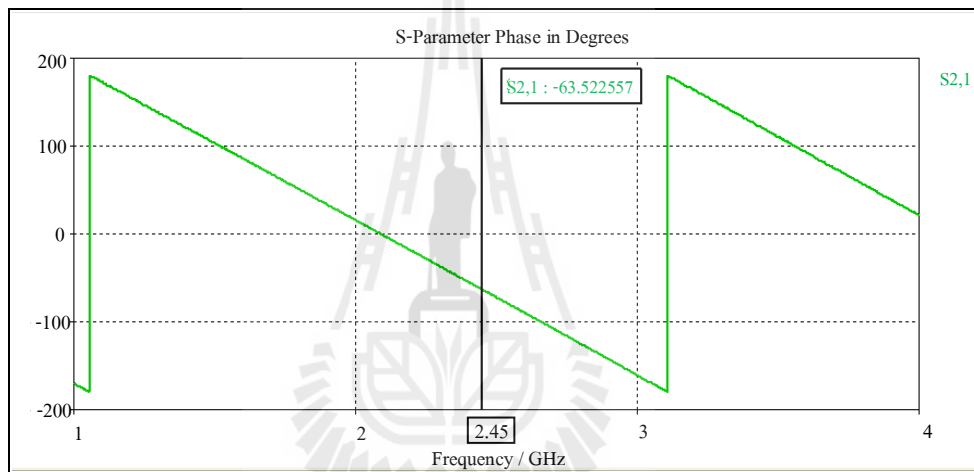
เมื่อได้ความกว้างของไมโครสตริป $W = 2.87$ มิลลิเมตร จากนั้นนำค่าความกว้างมาออกแบบเพื่อหาความยาวของไมโครสตริป วัดค่ามุมเฟสและค่าแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ โดยการใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ถึง รูปที่ 3.46



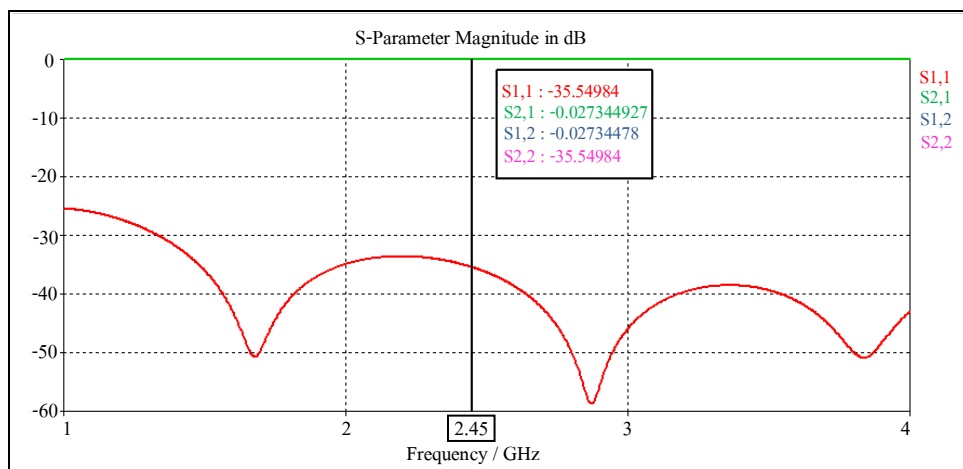
รูปที่ 3.29 วงจรเลื่อนเฟส -55.11° รูปที่ 3.30 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -55.11° รูปที่ 3.31 แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส -55.11°



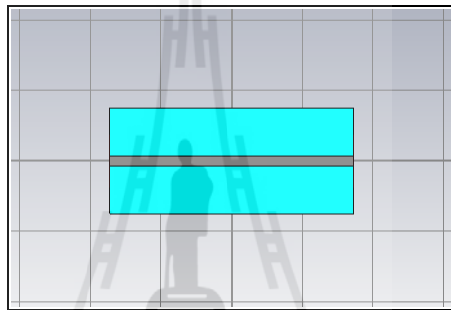
รูปที่ 3.32 วงจรเลื่อนเฟส -63.52°



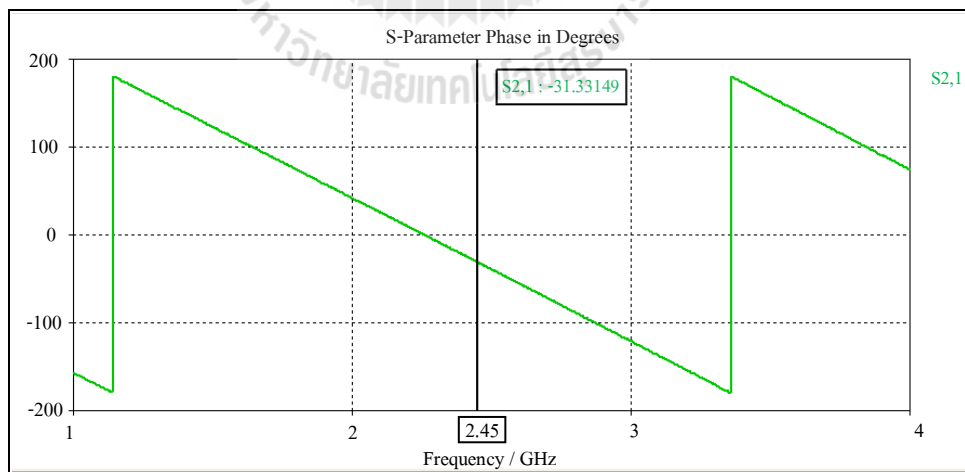
รูปที่ 3.33 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -63.52°



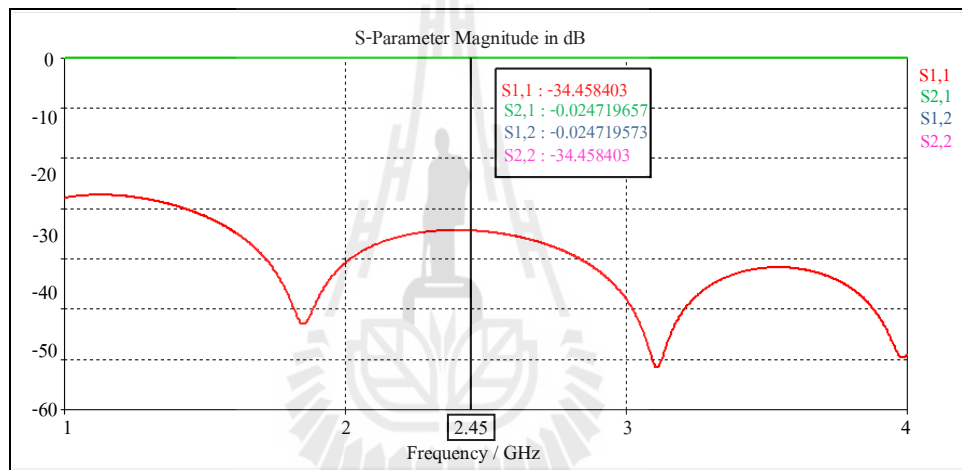
รูปที่ 3.34 แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส -63.52°



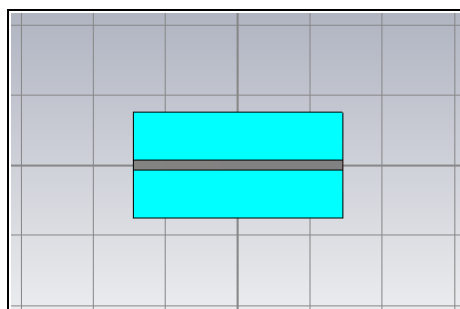
รูปที่ 3.35 วงจรเลื่อนเฟส -31.82°



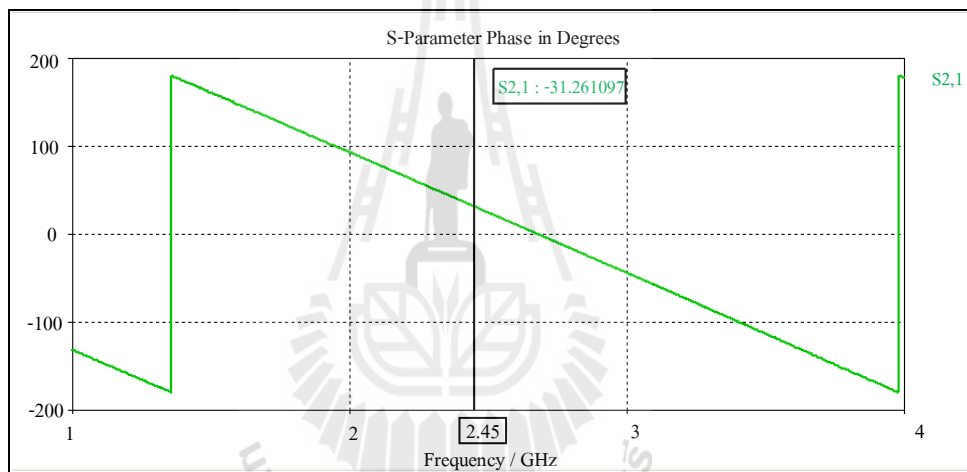
รูปที่ 3.36 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -31.82°



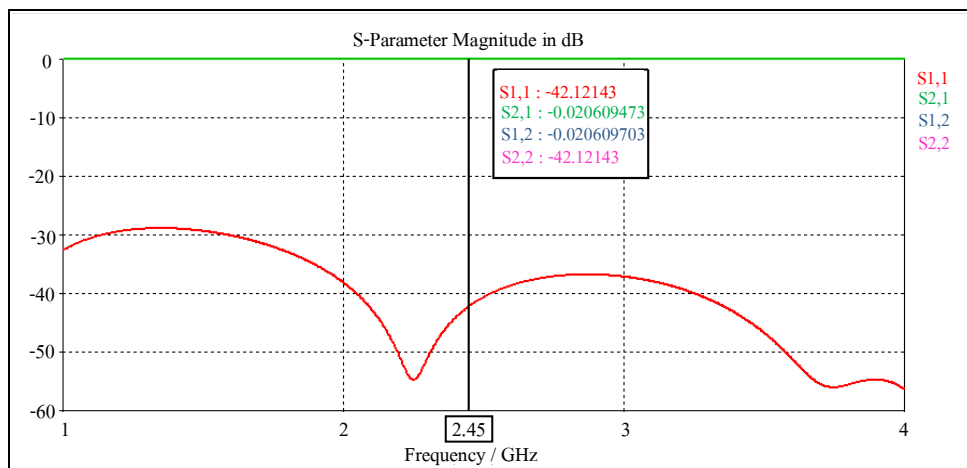
รูปที่ 3.37 แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส -31.82°

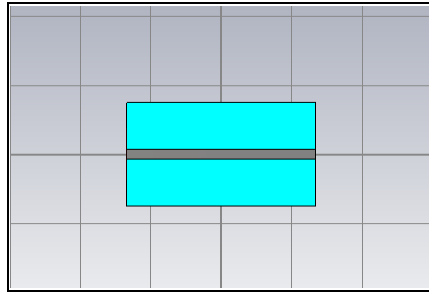
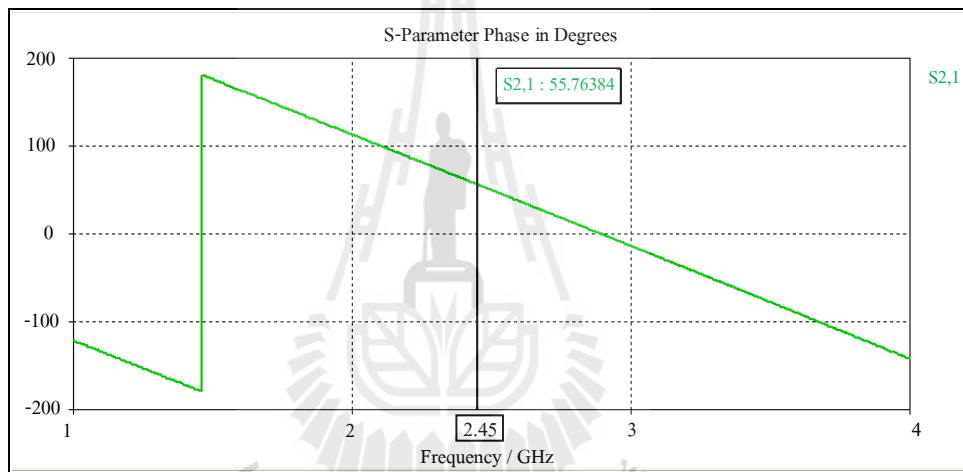
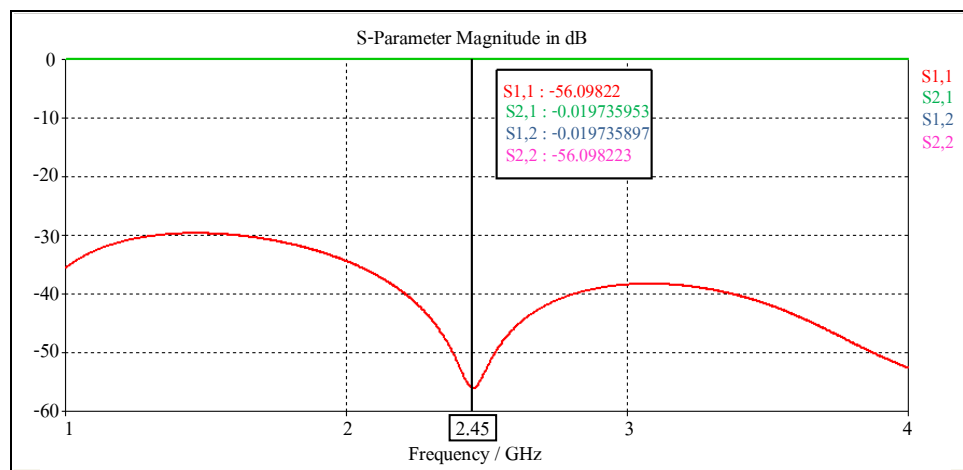


รูปที่ 3.38 วงจรเลื่อนเฟส 31.82°

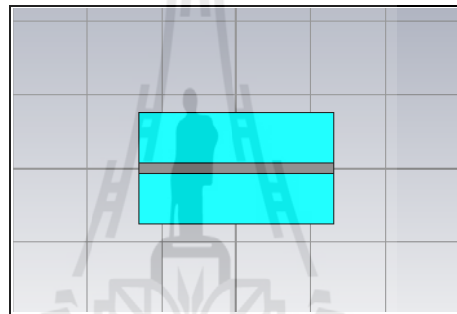


รูปที่ 3.39 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 31.82°

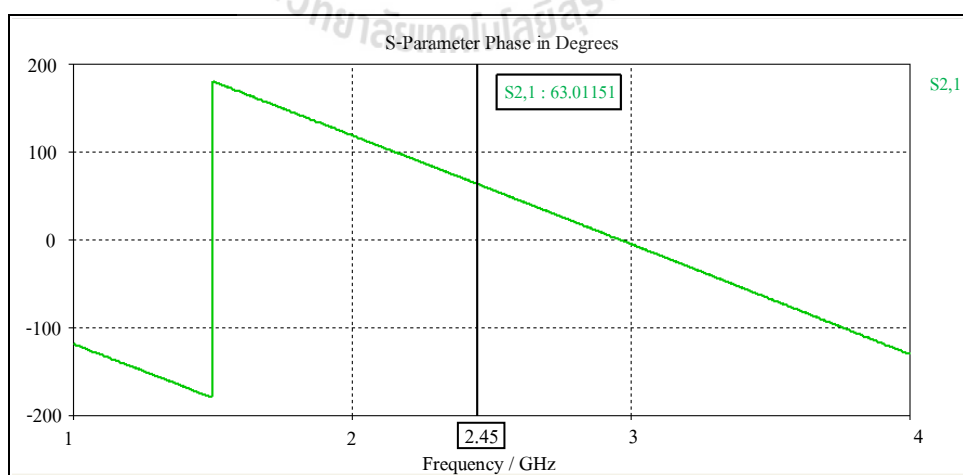


รูปที่ 3.40 แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส 31.82° รูปที่ 3.41 วงจรเลื่อนเฟส 55.11° รูปที่ 3.42 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 55.11° 

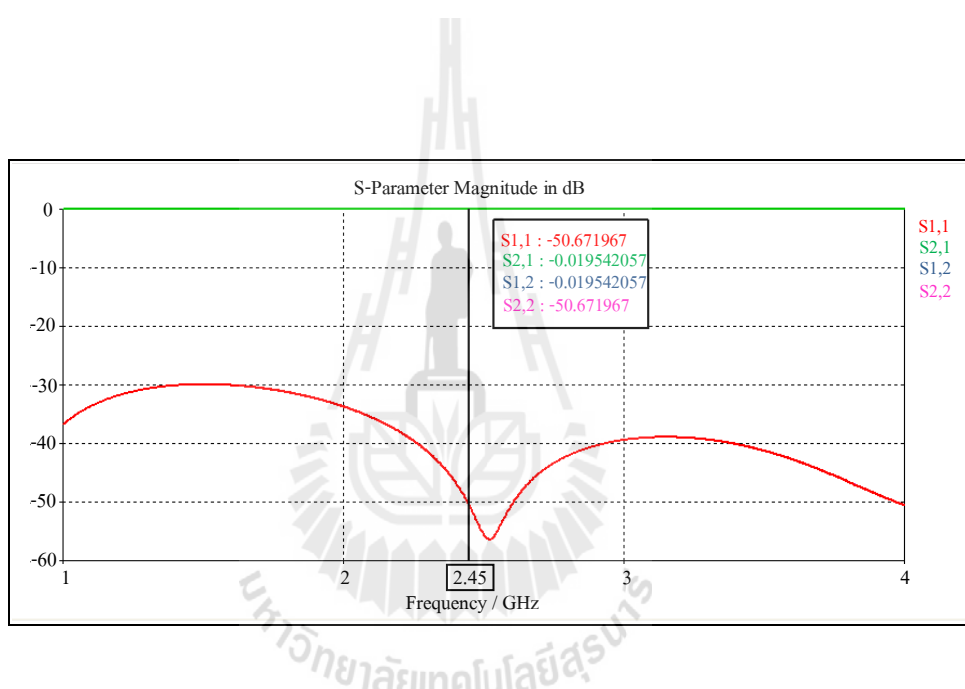
รูปที่ 3.43 แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส 55.11°



รูปที่ 3.44 วงจรเลื่อนเฟส 63.52°



รูปที่ 3.45 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 63.52°



รูปที่ 3.46 แอมพลิจูดของวงจรเลื่อนเฟส 63.52°

ตารางที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่วงน้ำหนักที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio

เฟสที่กำหนดตามทฤษฎี	เฟสจากการออกแบบจากโปรแกรม CST Microwave Studio	
	เฟส	S11 (dB)
63.64°	63.01°	-50.67
55.11°	55.76°	-56.09
31.82°	31.26°	-42.12
-31.82°	-31.33°	-34.45
55.11°	-55.24°	-34.97
-63.64°	-63.52°	-35.54

จะเห็นว่าลายวงจรแต่ละอันมีความยาวที่แตกต่างกันเป็นเพราะค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนักที่ทำให้สามารถก่อรูปลาคี่นั้นนั้นมีทิศทางที่แตกต่างกัน จากการปรับความยาวของวงจรเลื่อนเฟสในรูปที่ 3.39 ถึง รูปที่ 3.46 จากการจำลองผลนั้นมุมเฟสที่ได้ อาจจะมีค่าไม่ตรงมากนัก แต่ค่าที่ได้ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับเฟสของตัวเลื่อนเฟสที่กำหนด จากตารางที่ 3.5 ที่ออกแบบขึ้นนั้น เราจะนำไปสร้างจริงบนแผ่นพิมพ์ลายวงจรและทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรขาย ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

3.6 ผลการทดสอบในคอมพิวเตอร์

เนื้อหาหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงผลการทดลอง โดยจะเป็นการจำลองผลระบบเครือข่ายเมชไร้สายด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะแบ่งผลการทดลองออกเป็นสองส่วนหลัก ๆ คือ ผลการทดลองที่เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของระบบที่ใช้สายอากาศรอบทิศทางกับระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลาคี่ที่ได้เสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ และผลการทดลองที่พิจารณาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน ผลการจำลองผลระบบเครือข่ายเมชไร้สายจะเป็นการใช้โปรแกรม MATLAB โดยการกำหนดโนดของสัญญาณที่สนใจและโนดของสัญญาณแทรกสอด จากนั้นทำการสุ่มเวลาเข้าใช้บริการ (arrival time) และเวลาใช้บริการ (service time) ของทุกโนด แล้วทำการเรียงลำดับการเข้าใช้บริการเป็นลำดับก่อนหลัง โปรแกรมจะทำการตรวจสอบเวลาที่ชนกันของข้อมูลทั้งระบบที่ใช้สายอากาศรอบทิศทางและระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลาคี่แล้วนำมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนซึ่งจะอธิบายการทำงานของโปรแกรมอย่างละเอียดในภาคผนวก ข

ผลการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

การทดลองที่ 1 กำหนดค่าอัตราเข้าใช้บริการเท่ากับ 0.9 และค่าความหนาแน่นของข้อมูลเท่ากับ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 0.9

การทดลองที่ 2 กำหนดค่าอัตราเข้าใช้บริการเท่ากับ 0.5 และค่าความหนาแน่นของข้อมูลเท่ากับ 0.9 โดยการทดลองนี้จะแสดงกราฟในรูปของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ SINR

จากกราฟสามารถอธิบายเส้นต่าง ๆ ได้ดังนี้

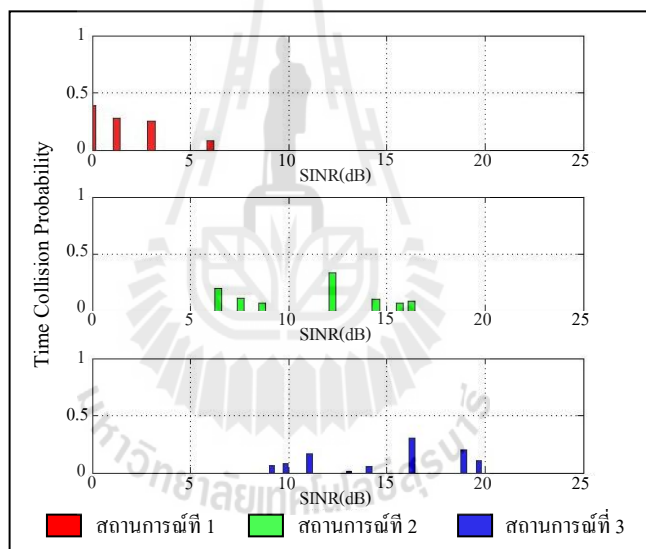
สถานการณ์ 1 คือ เส้นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวก สัญญาณรบกวน เมื่อมีการติดตั้งสายอากาศรอบทิศทางไว้ทุก โหนด

สถานการณ์ 2 คือ เส้นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวก สัญญาณรบกวน เมื่อมีการติดตั้งสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น ไว้ โหนดตรงกลาง ส่วน โหนดที่เหลือติดตั้งสายอากาศรอบทิศทางไว้ทุก โหนด

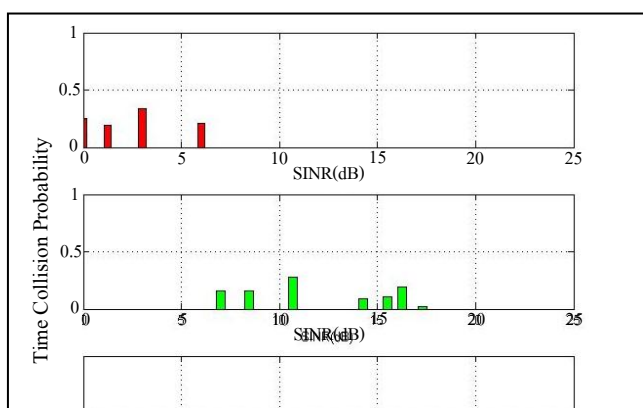
สถานการณ์ 3 คือ เส้นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวก สัญญาณรบกวน เมื่อมีการติดตั้งสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นไว้ทุก โหนด

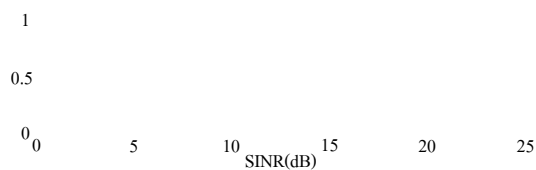
รูปที่ 3.47 และ 3.48 เป็นผลการทดลองที่จำลองแบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม จากรูปที่ 3.47 กราฟเส้นที่เป็นสถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 3 มีค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนมากกว่า สถานการณ์ที่ 1 และเส้นกราฟแต่ละเส้นจะมีลักษณะลดลงเมื่อค่าความหนาแน่นของข้อมูลเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สถานการณ์ที่ 3

จะมีค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนสูงสุดเนื่องจากมีการติดตั้งสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นไว้ทุก โหนดจึงทำให้ลำคลื่นของอุปกรณ์จัดเส้นทางเกิดเวกซ์สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณแทรกสอดได้ดี ส่วนสถานการณ์ที่ 2 ที่ติดตั้งสายอากาศรอบทิศทางไว้ทุก โหนดทั้ง โหนดที่เป็นสัญญาณที่สนใจกับ โหนดของสัญญาณแทรกสอด และติดตั้งสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นไว้เฉพาะ โหนดตรงกลางจึงสามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณได้เป็นบางส่วนฉะนั้นค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนจึงมีค่าน้อยกว่า สถานการณ์ที่ 3 แต่มีค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนมากกว่า สถานการณ์ 1 ที่ติดตั้งสายอากาศรอบทิศทางไว้ทุก โหนด จากรูปที่ 3.48 สามารถวิเคราะห์ได้ 2 กรณี คือ กรณีแรกพิจารณาที่ความถี่ในการใช้งานของระบบที่มากที่สุดนั่นหมายถึงกราฟแท่งที่สูงที่สุดของแต่ละสถานการณ์เมื่อเปรียบเทียบกันจะสังเกตว่าที่สถานการณ์ที่ 3 นั้นแม้ในช่วงที่มีการใช้งานมากแต่ก็ยังอยู่ในระดับ SINR ที่มากกว่าสถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 1 ส่วนกรณีที่ 2 คือ พิจารณาที่ช่วงระดับ SINR ของกราฟแท่งที่มากที่สุดหมายถึงเมื่อวิเคราะห์ที่สถานการณ์ที่ 3 กราฟช่วงที่มากกว่ากราฟแท่งสุดท้ายของสถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 1 นั้นมาบวกรวมกันยังได้มากกว่ากราฟแท่งสุดท้ายของสถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 1 นั้นหมายถึงมีการใช้งานในช่วงที่ระดับ SINR สูงมากกว่า สถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 1 จากรูปที่ 3.49 และ 3.50 เป็นผลการทดลองที่จำลองแบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม ซึ่งผลการทดลองทั้งสองรูปนี้เป็นการทดลองมีผลเป็น ไปในแนวทางเดียวกันกับเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม

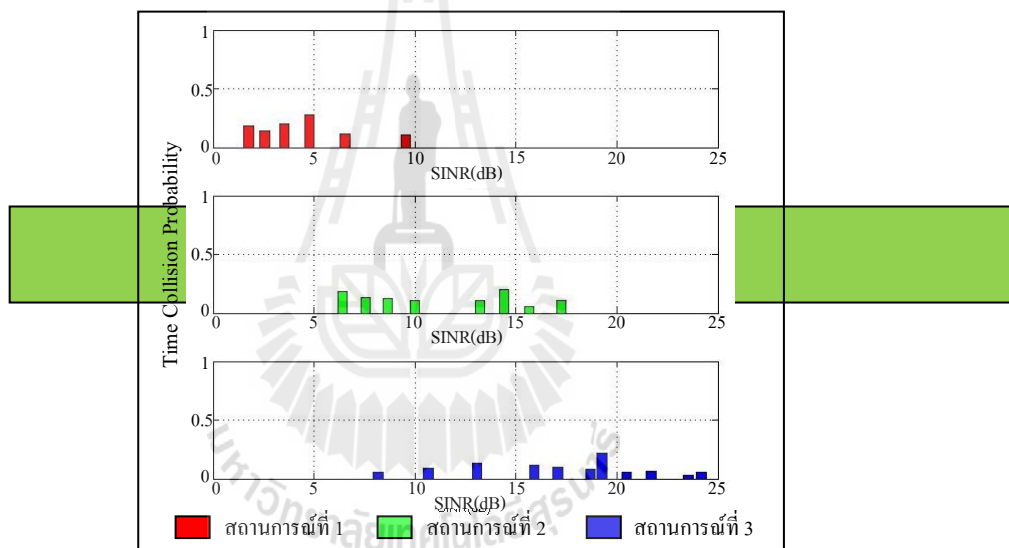


รูปที่ 3.47 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง SINR กับ ความน่าจะเป็นของเวลาที่เกิดการชนกันของสถานการณ์ที่ 1 สถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 3 สำหรับระบบเครือข่ายเมชไร้สายที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยมที่ใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$

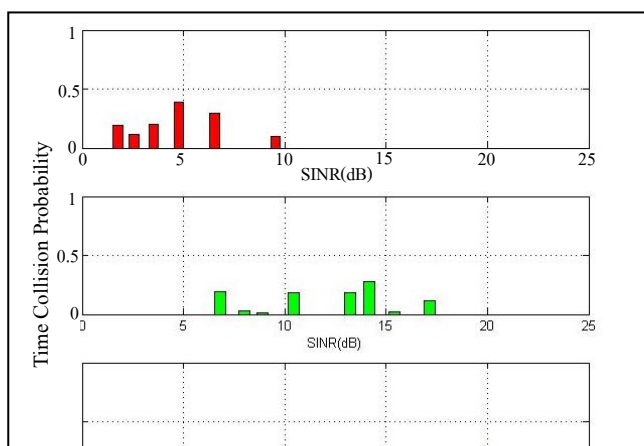


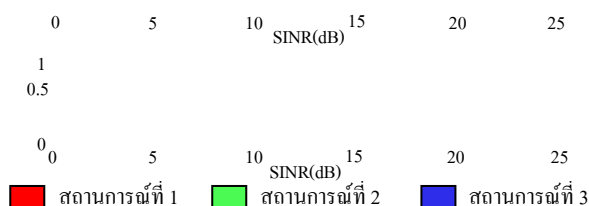


รูปที่ 3.48 กราฟแสดงผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่าง SINR กับ ความน่าจะเป็นของเวลาที่เกิดการชนกันของสถานการณ์ที่ 1 สถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 3 สำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์แบบสี่เหลี่ยมที่ใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$



รูปที่ 3.49 กราฟแสดงผลการวัดทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง SINR กับ ความน่าจะเป็นของเวลาที่เกิดการชนกันของสถานการณ์ที่ 1 สถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 3 สำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมที่ใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$





รูปที่ 3.50 กราฟแสดงผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่าง SINR กับ ความน่าจะเป็นของเวลา ที่เกิดการชนกันของสถานการณ์ที่ 1 สถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 3 สำหรับ ระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์แบบหกเหลี่ยมที่ใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$

3.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการจำลองแบบของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายทางโปรแกรม MATLAB จากผลที่ได้พบว่าระบบสายอากาศสวิตช์ค่าคลื่นที่ใช้ในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายสามารถปรับปรุงคุณภาพในการส่งข้อมูลได้ดีว่าระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง และสามารถนำอุปกรณ์ระบบสายอากาศสวิตช์ค่าคลื่นที่ได้เสนอในวิทยานิพนธ์ไปทำการสร้างและวัดผลจริงได้โดยที่เราจะนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

การทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลที่ได้ทดสอบอุปกรณ์ตัวเลื่อนเฟสและสายอากาศ สวิตซ์ลำคลื่นที่ได้เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์ใน โปรแกรม แมทแล็บ เพื่อศึกษาผลกระทบของการแทรกสอดของสัญญาณร่วมในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย โดยการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการวัดทดสอบจริงของระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นกับผลของ ระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นในทางทฤษฎี

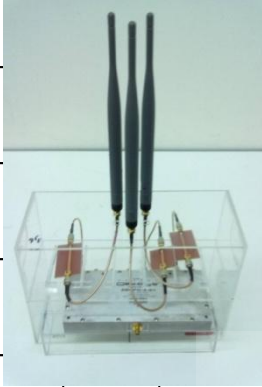
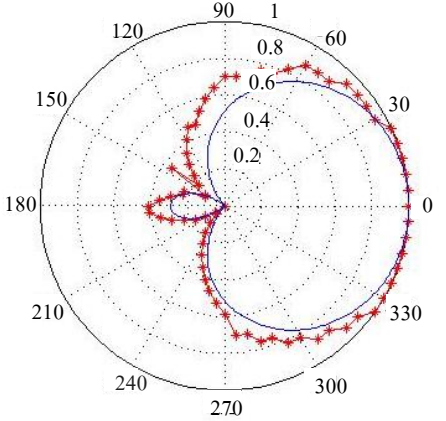

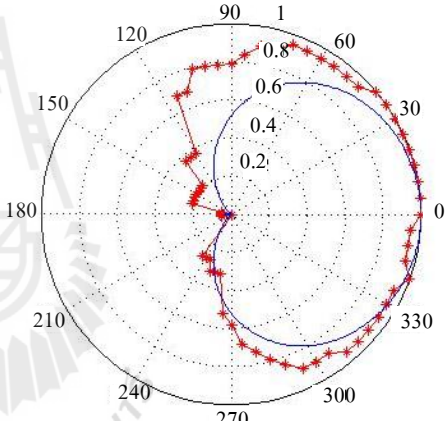

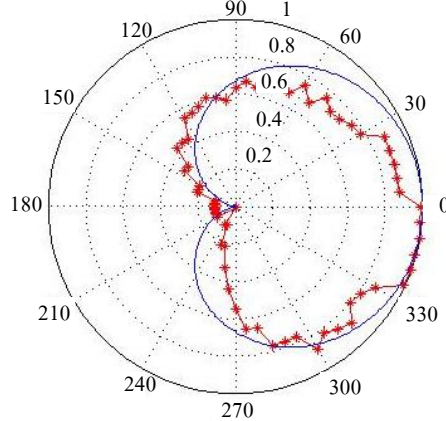
4.2 การทดสอบอุปกรณ์สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นและวงจรเลื่อนเฟส

จากบทที่ 3 เราได้ทำการออกแบบและจำลองผลแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ สวิตซ์ลำคลื่น เพื่อนำมาใช้งานในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ได้จำลองแบบโดยโปรแกรมแมทแล็บ และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสายอากาศรอบทิศทาง รวมทั้งวงจรเลื่อนเฟสที่ได้ทำการ ออกแบบไว้เรานำขนาดและรูปร่างที่ได้มาทำการสร้างอุปกรณ์จริงและทดสอบผลได้ดังนี้


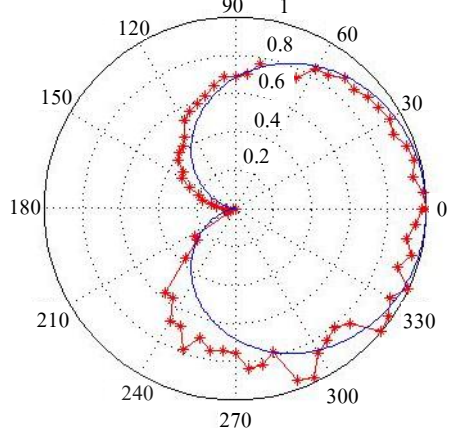
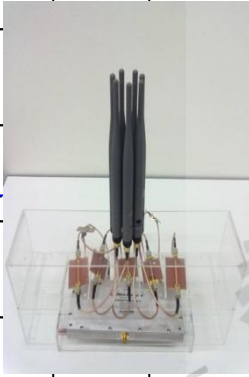
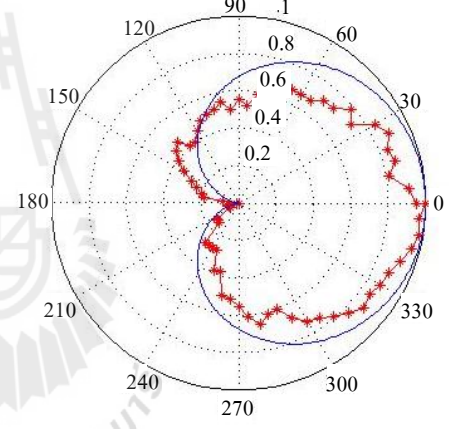

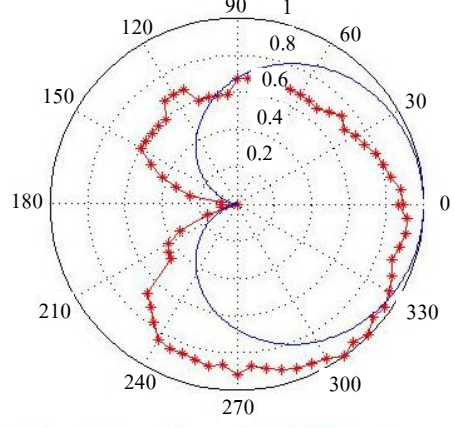
4.2.1 การทดสอบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นเพื่อหาค่าความเหมาะสมของจำนวน สายอากาศ

ระบบสายอากาศที่สร้างขึ้นจริงประกอบด้วยสายอากาศโมโนโพล (monopole) วงจรเลื่อนเฟสและอุปกรณ์ร่วมสัญญาณ สายอากาศแต่ละชุดถูกวัดแบบรูปการแผ่พลังงานภายใน ห้องที่ไม่มี การสะท้อนของคลื่น (anechoic chamber) โดยมีสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบ เดียว (omnidirection antenna) เป็นสายอากาศภาคส่งซึ่งจะได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ แต่ละชุดดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นแบบ แถวลำดับวงกลมขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น ผลการวัดข้างต้นจะเห็นว่า แบบรูปการแผ่พลังงาน ของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น ที่เปรียบเทียบระหว่างผลวัดที่ได้จาก สายอากาศจริงและผลที่ได้จากการจำลองผลใน โปรแกรมแมทแล็บนั้น ในบางกรณีผลวัดจริงแบบ รูปการแผ่พลังงานมีอัตราขยายที่ต่ำกว่าผลทางทฤษฎี สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากความ คลาดเคลื่อนในตำแหน่งสายอากาศหรือมีการลดทอนของสายเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ แต่อย่างไรก็ ตามจากผลการวัดจริงก็แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันเช่นเดียวกับผลของทางทฤษฎี

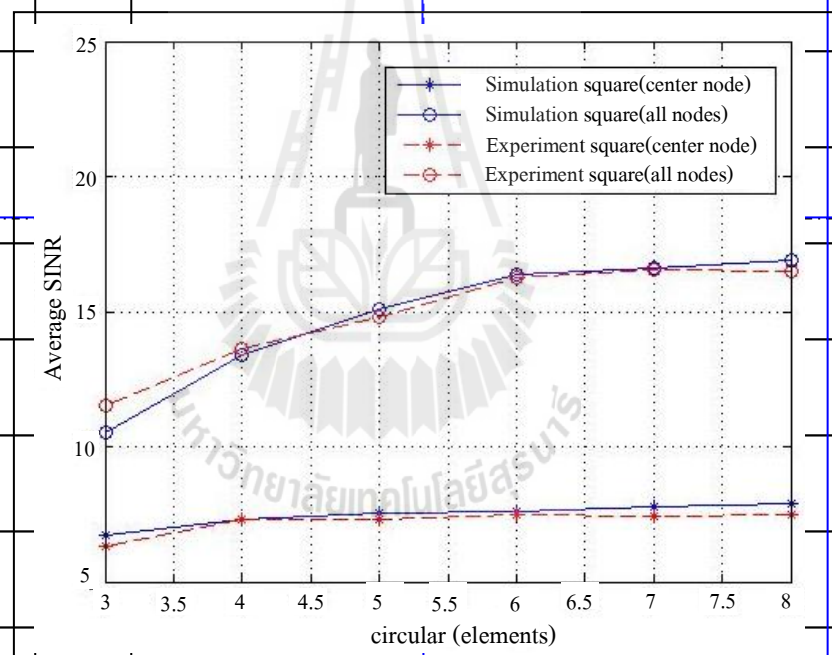
ตารางที่ 4.1 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิตซ์ต่ำคลื่นขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น

สายอากาศต้นแบบ	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ
 <p data-bbox="395 801 657 846">สายอากาศขนาด 3 ต้น</p>	 <p data-bbox="949 835 1348 875"> * วัดจริง — จำลองแบบ </p>
 <p data-bbox="395 1314 657 1359">สายอากาศขนาด 4 ต้น</p>	 <p data-bbox="949 1361 1348 1402"> * วัดจริง — จำลองแบบ </p>
 <p data-bbox="395 1841 657 1886">สายอากาศขนาด 5 ต้น</p>	 <p data-bbox="949 1888 1348 1928"> * วัดจริง — จำลองแบบ </p>

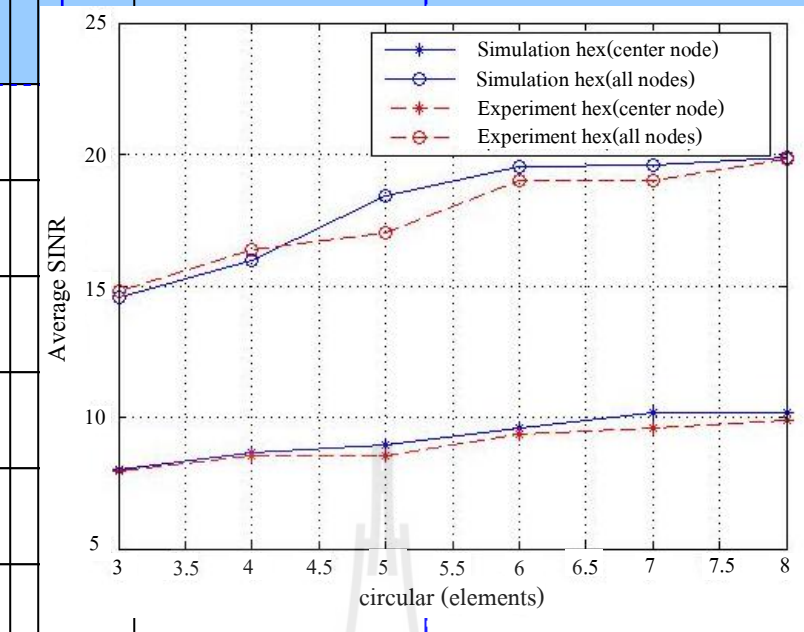
ตารางที่ 4.1 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น (ต่อ)

สายอากาศต้นแบบ	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ
 <p data-bbox="399 795 662 840">สายอากาศขนาด 6 ต้น</p>	 <p data-bbox="821 851 1340 896"> —* วัดจริง — จำลองแบบ </p>
 <p data-bbox="399 1310 662 1355">สายอากาศขนาด 7 ต้น</p>	 <p data-bbox="821 1355 1340 1400"> —* วัดจริง — จำลองแบบ </p>
 <p data-bbox="399 1814 662 1859">สายอากาศขนาด 8 ต้น</p>	 <p data-bbox="821 1859 1340 1904"> —* วัดจริง — จำลองแบบ </p>

จากผลการวัดจริงที่ได้จะนำมาใส่ในส่วนที่เป็นฟังก์ชันสายอากาศของโปรแกรมแมทแล็บ เพื่อวิเคราะห์การจำลองแบบการหาจำนวนที่เหมาะสมของสายอากาศที่ได้กล่าวในบทที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 จากรูปจะเห็นว่าเส้นกราฟที่ได้จากผลวัดของสายอากาศที่สร้างจริงนั้นมีแนวโน้มไปในทางที่สอดคล้องกันกับกราฟที่ได้จากผลการจำลองแบบทางทฤษฎี คือ เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ตามลำดับ จะทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงจำนวนสายอากาศขนาด 6 ต้น กราฟจะเริ่มคงที่และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงสายอากาศขนาด 8 ต้น ฉะนั้นจากการที่ได้สรุปผลการเลือกสายอากาศที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับระบบเครือข่ายนี้ไว้ในบทที่ 3 สามารถยืนยันได้ว่าสายอากาศสวิตซ์ค่าคลื่นแบบแฉวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น เป็นจำนวนสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้งานในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสายอากาศกับค่าเฉลี่ย SINR
สำหรับเครือข่ายเมฆไร้สายที่มีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม



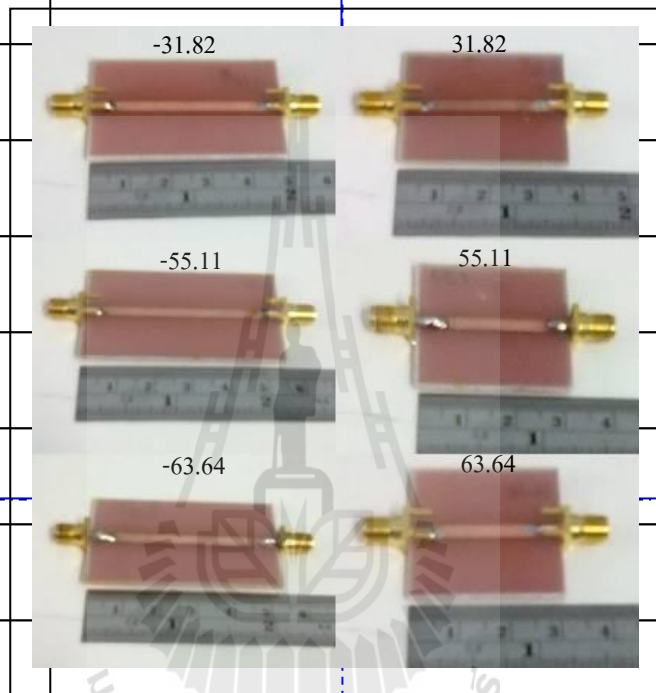
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสายอากาศกับค่าเฉลี่ย SINR สำหรับเครือข่ายเมชไร้สายที่มีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม

4.2.2 การทดสอบวงจรเลื่อนเฟสสำหรับสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น

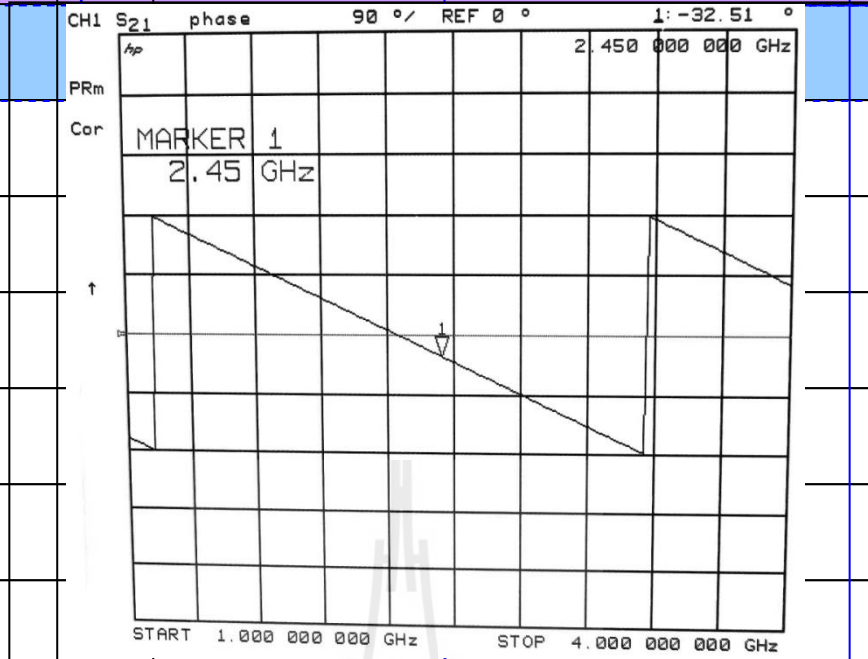
จากบทที่ 3 เราได้ทำการออกแบบและจำลองผลของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการนั้นก็คือวงจรเลื่อนเฟสสำหรับสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่ได้นำเสนอไป ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้นจริงและทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆคือ เฟส (phase) และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น 8722D จากรูปที่ 4.3 คือชุดวงจรเลื่อนเฟสที่จะนำมาติดตั้งในระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นแบบสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ซึ่งค่าเฟสของวงจรเลื่อนเฟสทั้งหมดที่ใช้มี -31.82° 31.82° -55.11° 55.11° -63.64° และ 63.64° ที่สร้างบนแผ่น PCB-FR4 และใช้หัว SMA connector เป็นหัวต่อ

จากรูปที่ 4.4 – 4.15 คือกราฟแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์วงจรเลื่อนเฟสทั้งหมดโดยการถ่ายภาพเนื่องจากสายที่ใช้เชื่อมต่อกันระหว่างเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไปยังคอมพิวเตอร์นั้นเกิดการชำรุดจึงทำให้ไม่สามารถดึงรูปภาพทั้งหมดออกมาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายได้โดยตรง เราจึงได้สรุปค่าต่างๆที่วัดได้ดังตารางที่ 4.2 คือค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์วงจรเลื่อนเฟสที่ใช้ในการหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่เราต้องการ จากค่าที่ได้ในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าแอมพลิจูดที่ได้มีค่าแตกต่างกันไปจากการออกแบบทางทฤษฎี

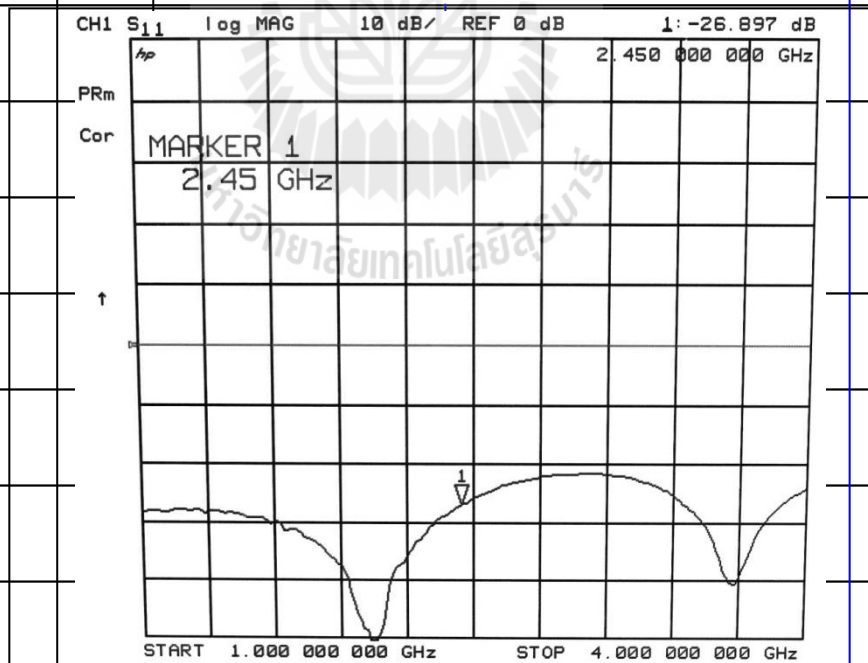
เล็กน้อยและค่ามุมเฟสที่ได้จากการวัดได้ในแต่ละวงจรมีความใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีที่ได้จากการจำลองผลในตารางที่ 3.6 จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบอุปกรณ์วงจรเลื่อนเฟส ถึงแม้ว่าจะมีมุมเฟสที่ค่าเคลื่อนอยู่บ้างเล็กน้อย ซึ่งอาจจะเกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการสร้างแต่ชุดอุปกรณ์ที่เราได้ทำการสร้างนั้นก็ยังสามารถนำวงจรเลื่อนเฟสมานำใช้งานในโครงข่ายต่อรูปจำลองของสายอากาศสวิตซ์ต่ำคลื่นได้



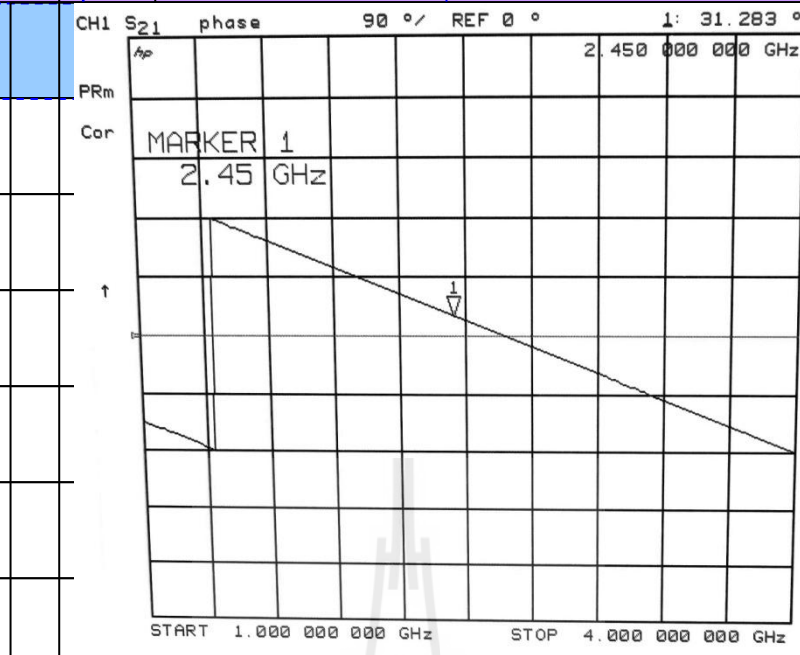
รูปที่ 4.3 วงจรเลื่อนเฟสที่สร้างงานจริง



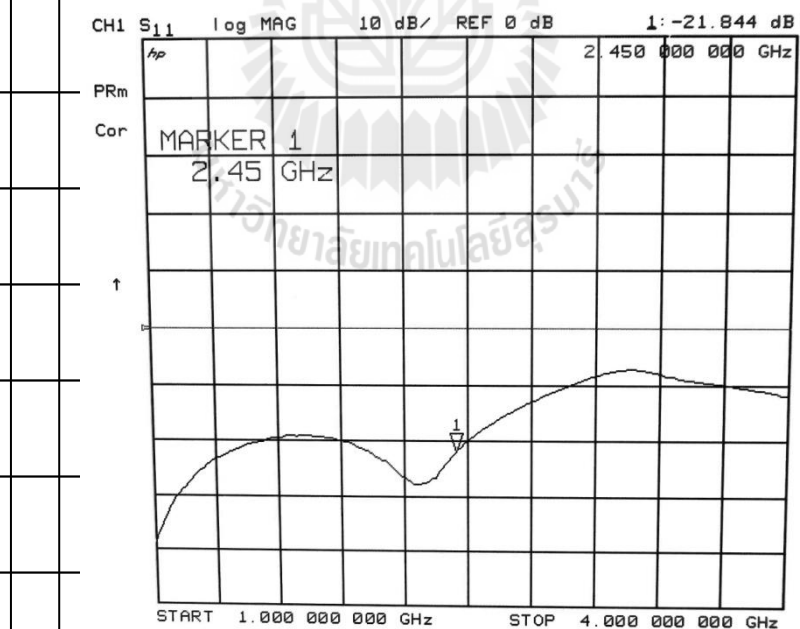
รูปที่ 4.4 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -31.82°



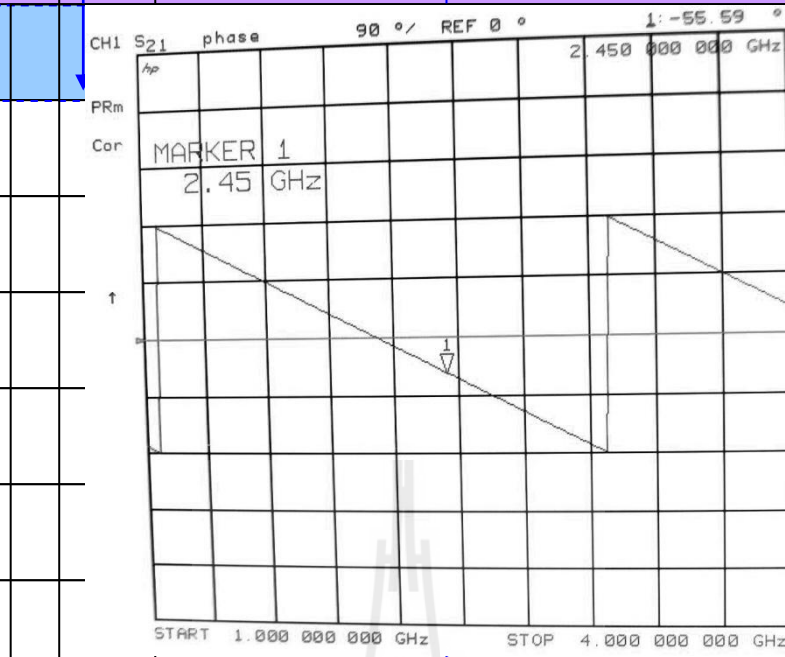
รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรเลื่อนเฟส -31.82°



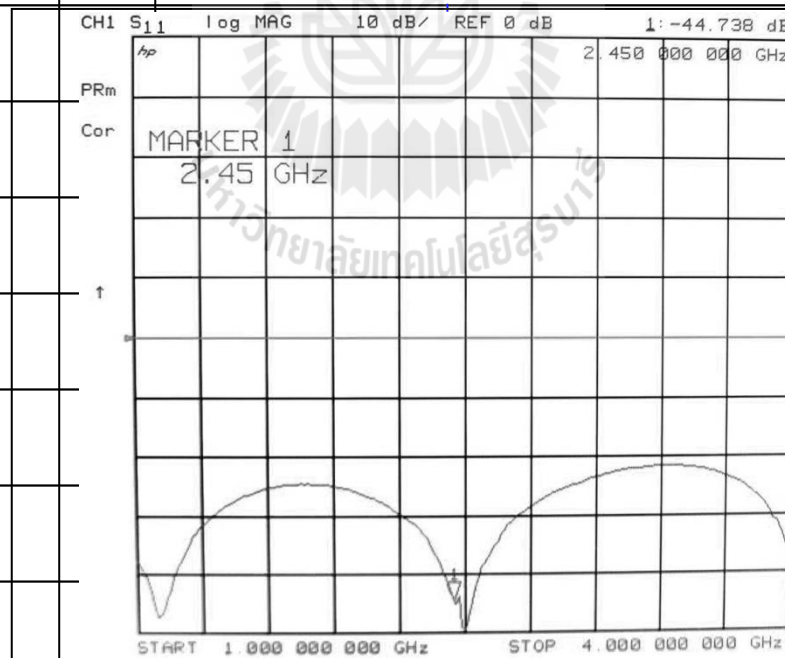
รูปที่ 4.6 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 31.82°



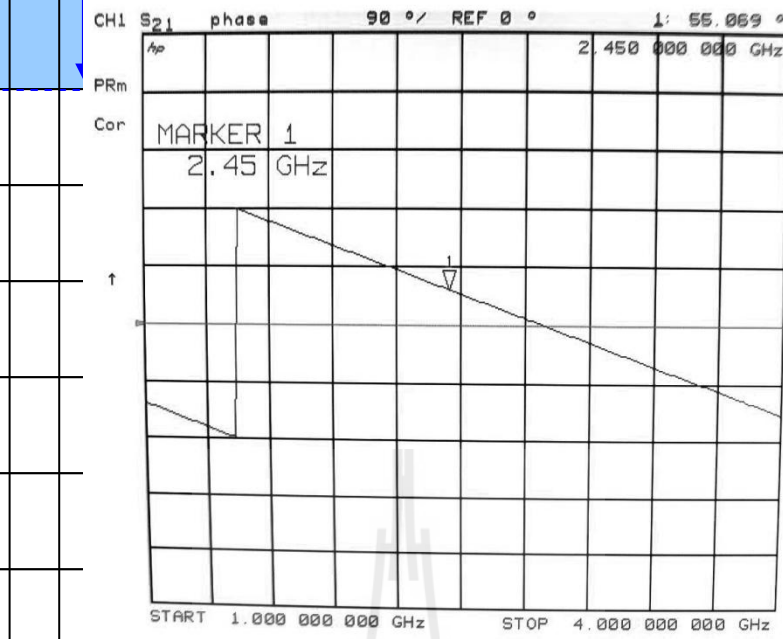
รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรเลื่อนเฟส 31.82°



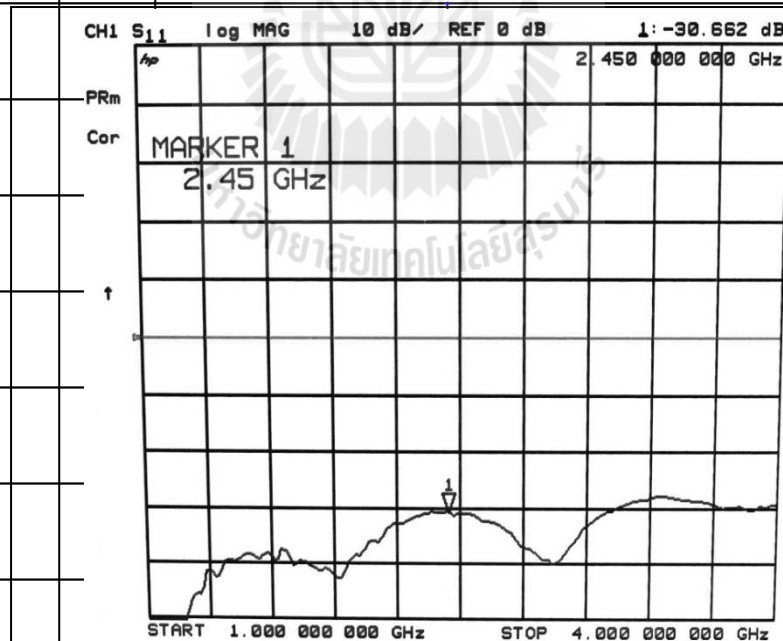
รูปที่ 4.8 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -55.11°



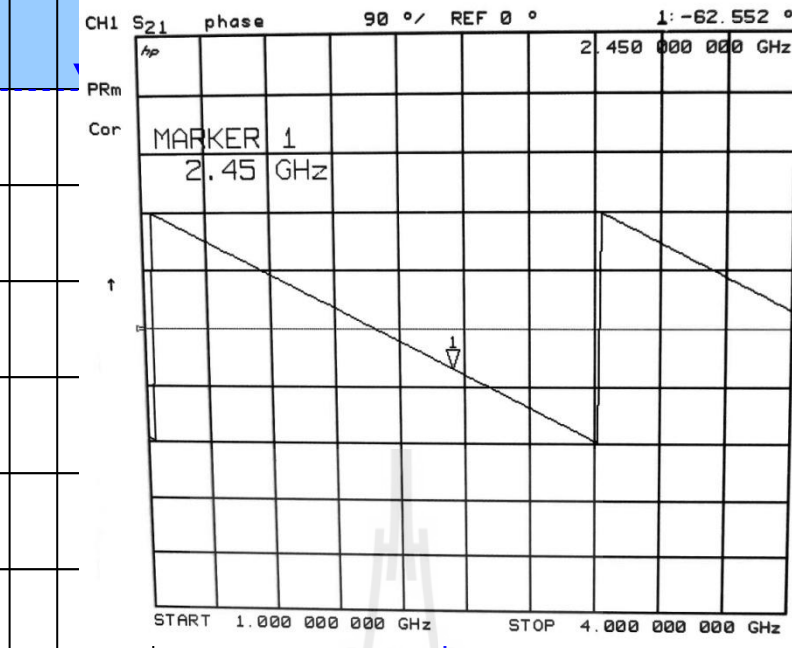
รูปที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรเลื่อนเฟส -55.11°



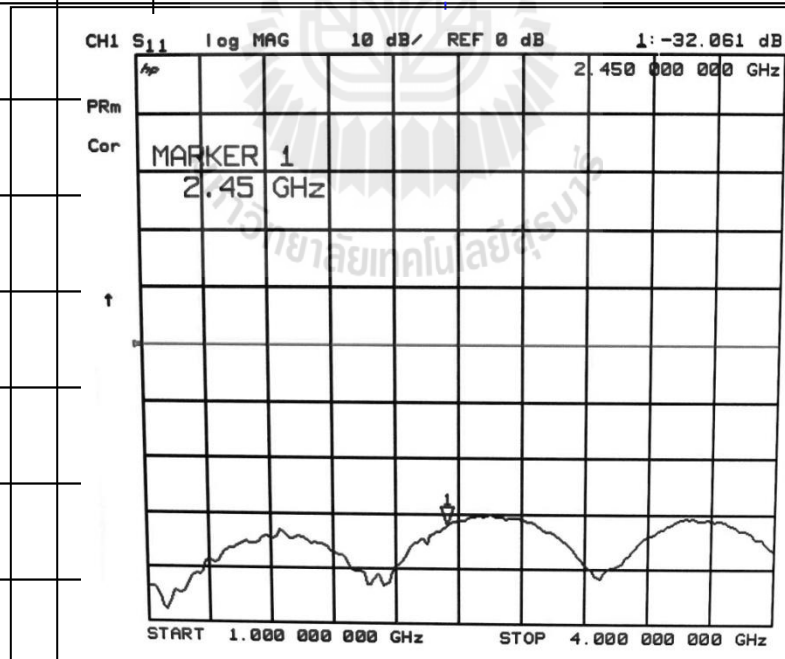
รูปที่ 4.10 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 55.11°



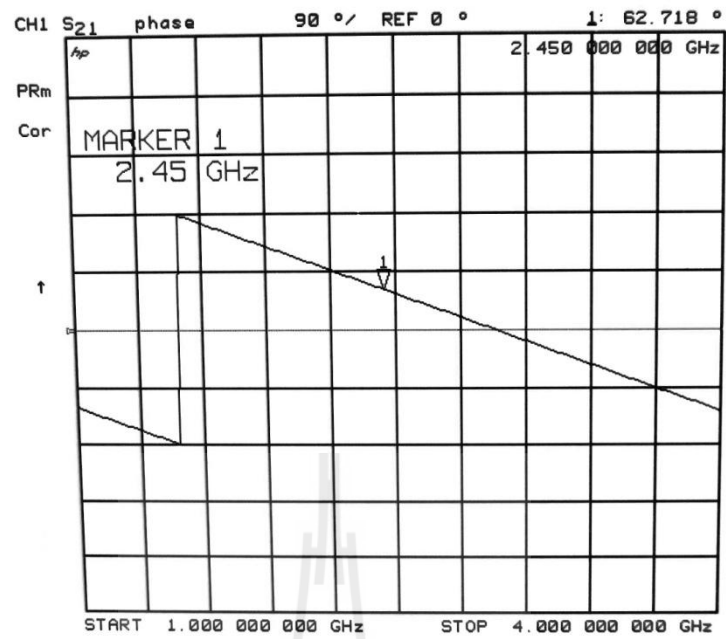
รูปที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรเลื่อนเฟส 55.11°



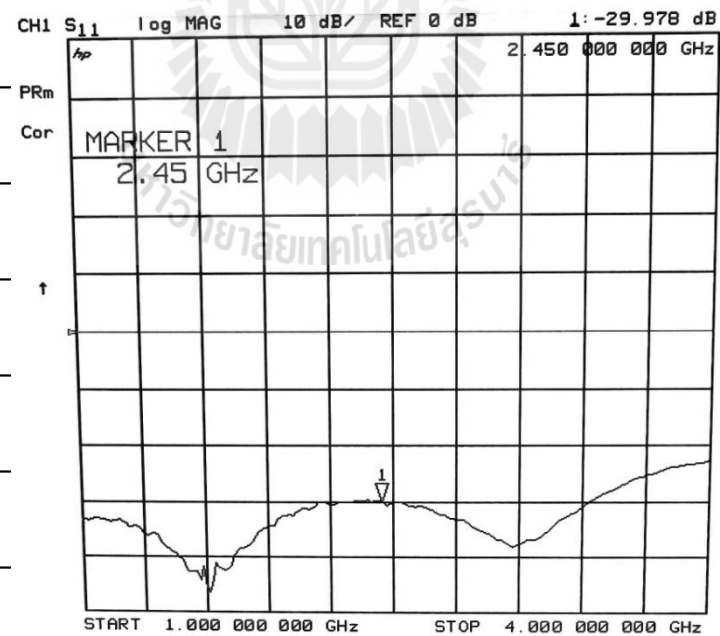
รูปที่ 4.12 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส -63.64°



รูปที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรเลื่อนเฟส -63.64°



รูปที่ 4.14 มุมเฟสของวงจรเลื่อนเฟส 63.64°



รูปที่ 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของวงจรเลื่อนเฟส 63.64°

ตารางที่ 4.2 ค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสที่ได้จากการวัดชุดอุปกรณ์ วงจรเลื่อนเฟสสำหรับสายอากาศ
แถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$

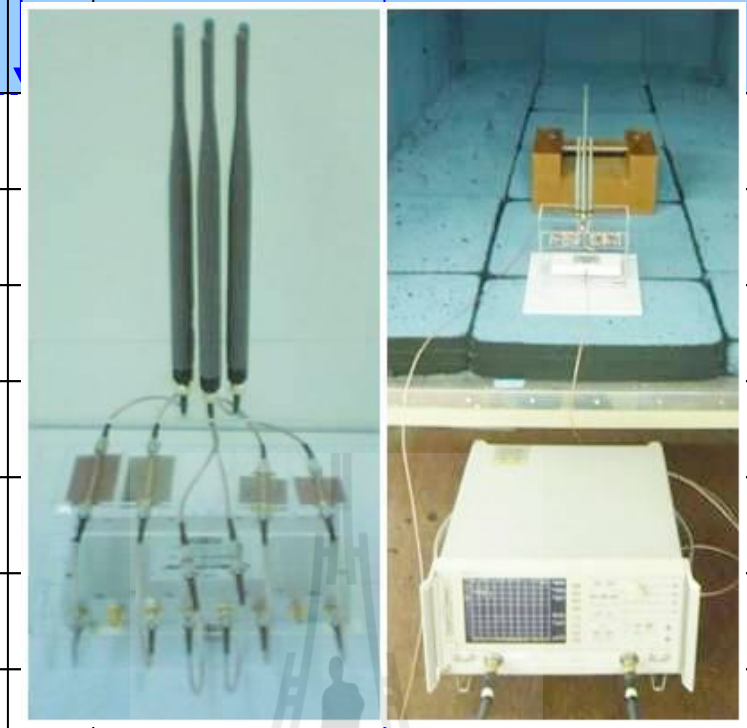
อุปกรณ์	ค่าที่ได้จากการวัดอุปกรณ์	
	แอมพลิจูด (dB)	มุมเฟส (องศา)
วงจรเลื่อนเฟส -31.82°	35.29	-31.82°
วงจรเลื่อนเฟส 31.82°	-36.05	31.09°
วงจรเลื่อนเฟส -55.11°	-44.74	-55.59°
วงจรเลื่อนเฟส 55.11°	-33.79	55.07°
วงจรเลื่อนเฟส -63.64°	-32.65	-63.81°
วงจรเลื่อนเฟส 63.64°	-20.65	63.09°

4.2.3 ผลการทดสอบวัดแบบรูปแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น

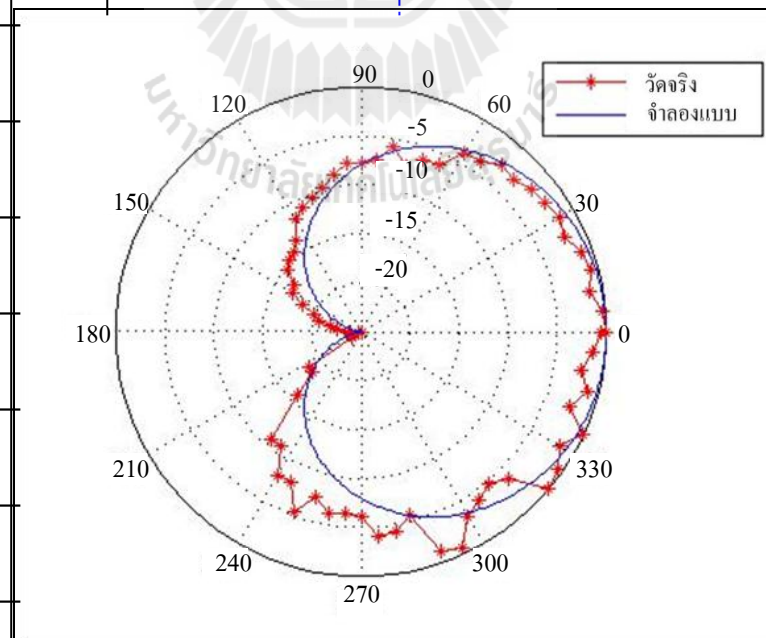
การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นจะทำการทดสอบในระยะสนามไกลคือ

$R = 2D^2 / \lambda$ ซึ่ง R คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศทดสอบและสายอากาศอ้างอิงและ D คือขนาดความยาวของสายอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.2 เซนติเมตร โดยการทดสอบนี้กำหนดให้ระยะทางมีค่าคงที่ที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้สายอากาศโมโนโพลเป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่สายอากาศภาคส่ง และสายอากาศสวิตซ์ลำดับขนาด 6 ต้น ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำมาทดสอบทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาครับดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งจะมีการหมุนรอบแนวแกนตั้งเพื่อรับคลื่นจากมุม 0 องศาจนถึงมุม 360 องศา

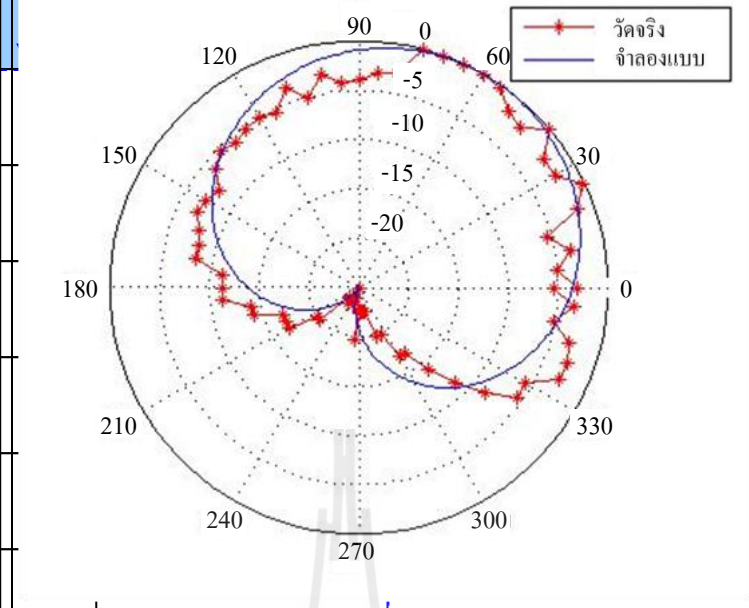
จากผลการวัดที่แสดงดังรูปที่ 2.17 ถึง 2.24 จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่มีลำดับหลักหันไปในทิศทาง 0° 60° 90° 120° 180° 240° 270° และ 300° ตามลำดับ ทั้งที่วัดได้จากสายอากาศจริงและที่ได้จากการจำลองผลทางทฤษฎีในโปรแกรมแมทแลบที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 มีความสอดคล้องกัน โดยเปรียบเทียบผลจากการวัดจริงกับผลการจำลองทางทฤษฎีในโปรแกรม แต่แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่สร้างขึ้น ในบางกรณีจะมีอัตราขยายที่ต่ำกว่าผลการจำลองทางทฤษฎี สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการสร้างสายอากาศ แต่อย่างไรก็ตามจากผลการวัดก็แสดงให้เห็นว่า สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้นนี้สามารถสวิตซ์ลำดับและนำมาใช้งานได้จริง และจะนำผลอัตราขยายจากการทดสอบนี้ไปจำลองแบบในระบบเครือข่ายเมซไร์สายทาง โปรแกรมแมทแลบในหัวข้อต่อไป



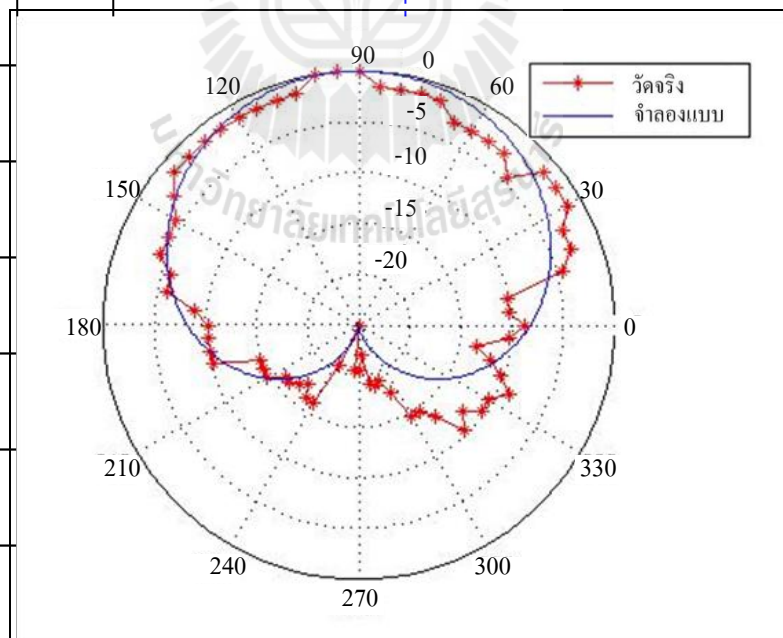
รูปที่ 4.16 สายอากาศที่ใช้ในการทำการทดสอบจริง



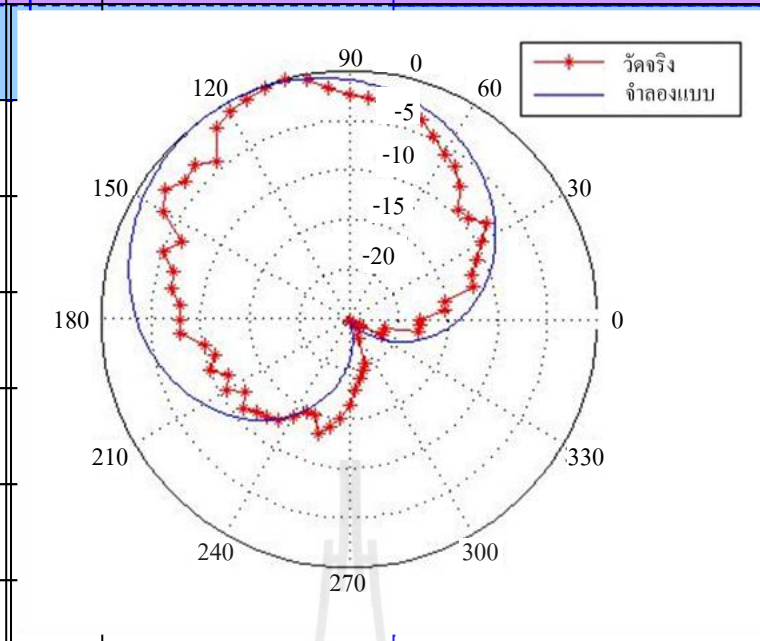
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม
ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 0^\circ$



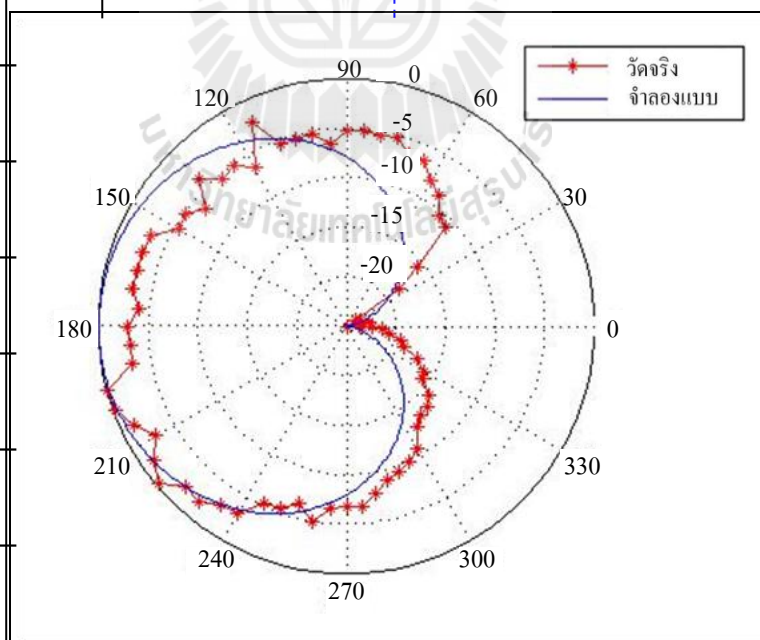
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม
ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 60^\circ$



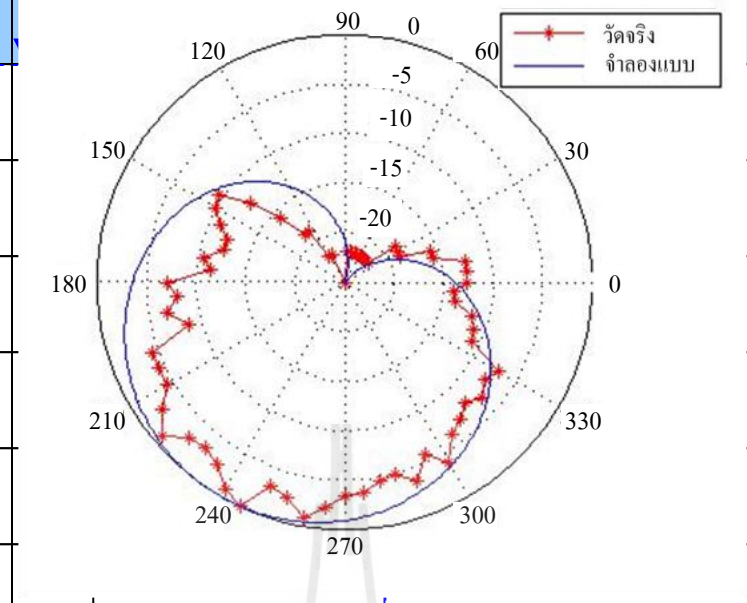
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม
ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 90^\circ$



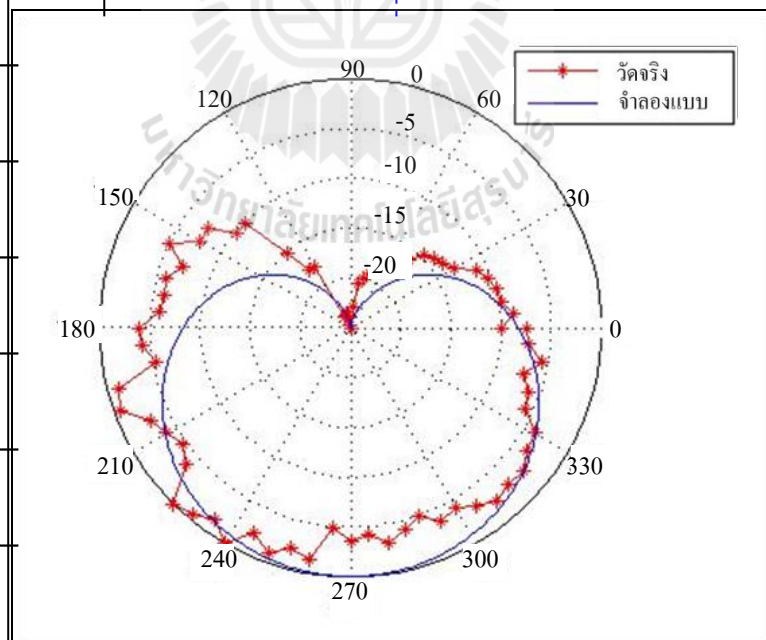
รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม
ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 120^\circ$



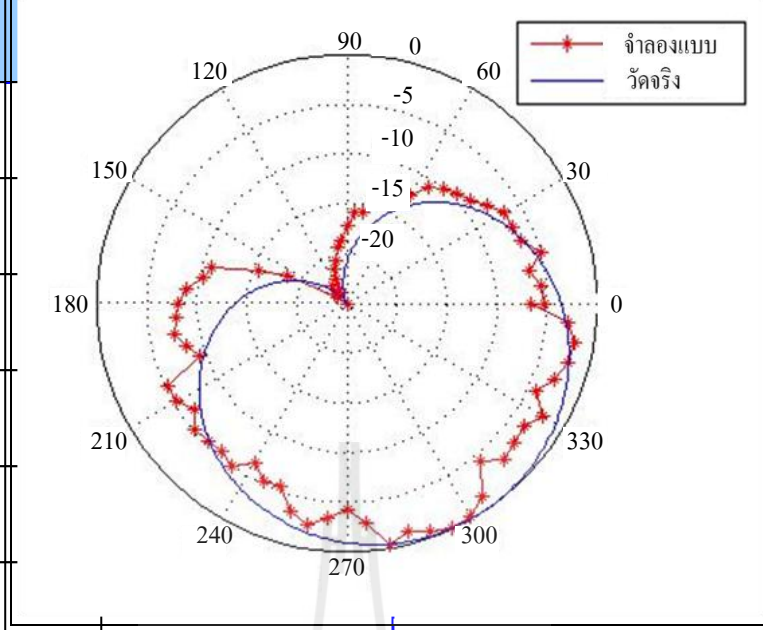
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม
ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 180^\circ$



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม
ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 240^\circ$



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม
ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 270^\circ$

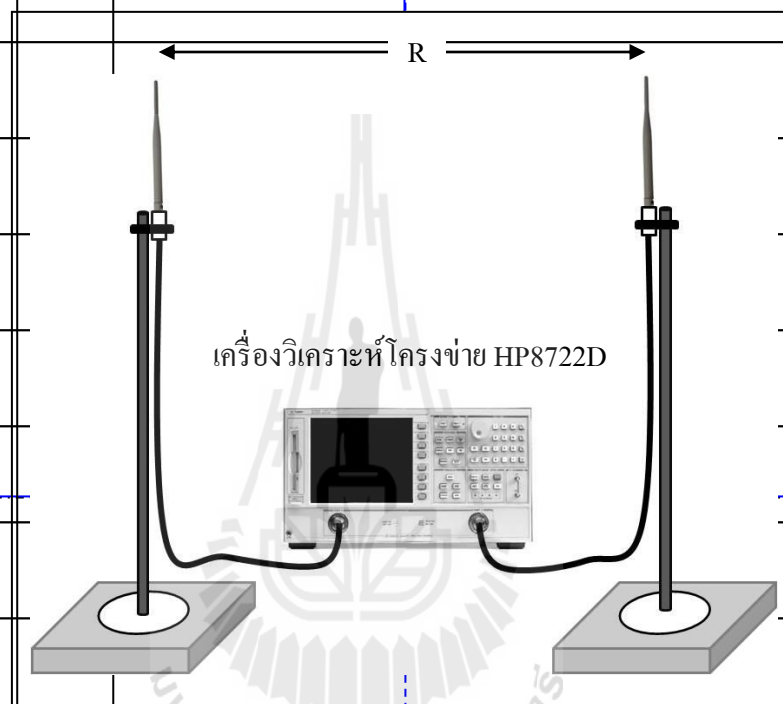


รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลม ขนาด 6 ต้น ที่ได้จากการวัดจริงและทางทฤษฎี เมื่อ $\theta = 300^\circ$



4.3 ผลการวัดทดสอบอัตราขยาย

สำหรับการวัดอัตราขยายของสายอากาศแฉวลำดับวงกลมในขั้นตอนแรกได้ทำการวัดอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพล เพื่อหาอัตราขยายของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัว (two-antenna method) ที่มีลักษณะเหมือนกันสำหรับการวัดทดสอบ โดยตัวหนึ่งที่ใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและอีกตัวหนึ่งที่เหลือจะเป็นสายอากาศภาครับ



รูปที่ 4.25 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพล

จากนั้นใช้สมการ การส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพล โดยสมการการส่งผ่านของฟรีสที่นำมาใช้เท่ากับ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (4.1)$$

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{r,dB} - P_{t,dB} + Loss}{2} \right) \quad (4.2)$$

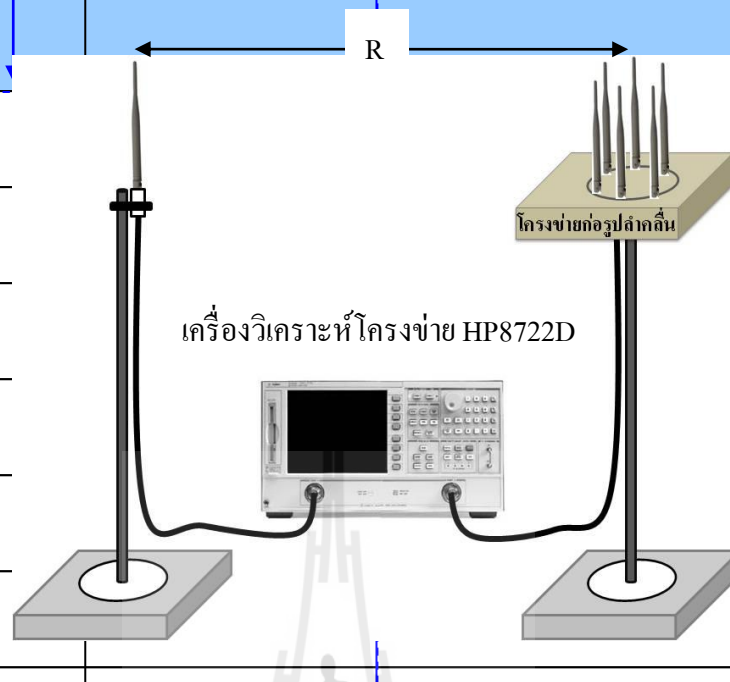
$$G_{dB} = \left(\frac{P_{r_{dB}} - P_{t_{dB}} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)}{2} \right) \quad (4.3)$$

$$G_{t_{dB}} = P_{t_{dB}} - P_{r_{dB}} - G_{r_{dB}} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4.4)$$

โดยที่	P_t	คือ	กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศส่ง
	P_r	คือ	กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศรับ
	G_{dB}	คือ	อัตราขยายรวมของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ เมื่อสายอากาศทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน
	G_t	คือ	อัตราขยายของสายอากาศส่ง
	G_r	คือ	อัตราขยายของสายอากาศรับ
	R	คือ	ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ (1 เมตร)

เมื่อ $P_r - P_t$ คือ ค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

ในขั้นตอนต่อมาได้ทำการวัดอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับวงกลม แสดงดังรูปที่ 4.26 โดยกำหนดให้สายอากาศโมโนโพลเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ดัน ที่มีการถ่วงน้ำหนักแล้วเป็นสายอากาศรับ ซึ่งได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวัดกำลังไฟฟ้าที่รับได้โดยกำหนดระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 70 เซนติเมตร มีกำลังด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศส่งเท่ากับ -10 dB



รูปที่ 4.26 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแฉวล์ลำดับ

ผลการวัดทดสอบอัตราขยายสายอากาศโมนโพล 1 ต้น

จากสมการ (4.3) สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศโมนโพลได้ดังนี้

$$G_{r_{dB}} = G_{r_{dB}} = \left((-30.3dB) + 20 \log \left(\frac{4 \times \pi \times (70 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9} \right) \right) = 3.4dB$$

ผลการวัดทดสอบอัตราขยายสายอากาศแกลวลำดับวงกลม

จากสมการ (4.4) สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น ได้ดังนี้

สายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 3 ต้น

$$G_{r_{dB}} = (-29.2\text{dB}) - (3.4\text{dB}) + 20\log\left(\frac{4 \times \pi \times (70 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9}\right) = 4.5\text{dB}$$

สายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 4 ต้น

$$G_{r_{dB}} = (-28.5\text{dB}) - (3.4\text{dB}) + 20\log\left(\frac{4 \times \pi \times (70 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9}\right) = 5.2\text{dB}$$

สายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 5 ต้น

$$G_{r_{dB}} = (-27.8\text{dB}) - (3.4\text{dB}) + 20\log\left(\frac{4 \times \pi \times (70 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9}\right) = 5.9\text{dB}$$

สายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น

$$G_{r_{dB}} = (-26.4\text{dB}) - (3.4\text{dB}) + 20\log\left(\frac{4 \times \pi \times (70 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9}\right) = 7.0\text{dB}$$

สายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 7 ต้น

$$G_{r_{dB}} = (-26.4\text{dB}) - (3.4\text{dB}) + 20\log\left(\frac{4 \times \pi \times (70 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9}\right) = 7.3\text{dB}$$

สายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 8 ต้น

$$G_{r_{dB}} = (-26\text{dB}) - (3.4\text{dB}) + 20\log\left(\frac{4 \times \pi \times (70 \times 10^{-2})}{3 \times 10^8 / 2.45 \times 10^9}\right) = 7.7\text{dB}$$

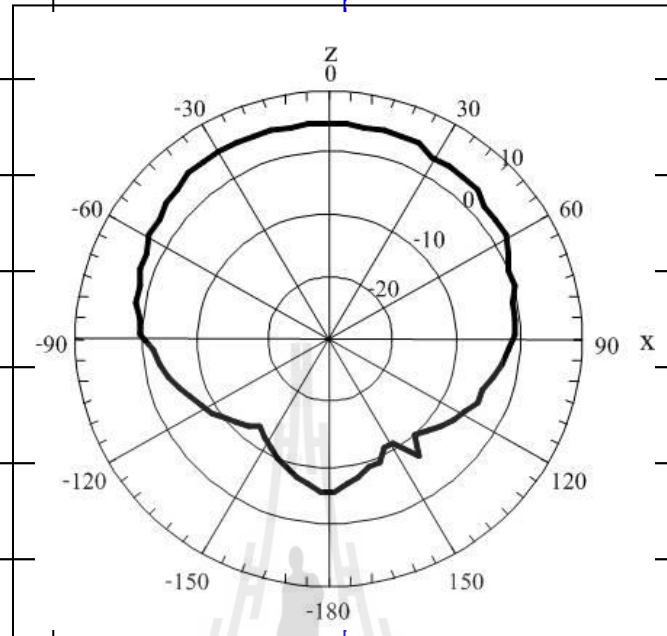
จากผลการคำนวณจะได้อัตราขยายของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น จากการวัดทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแลบ ซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณอัตราขยายของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น จากการวัดทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมแมทแลบ

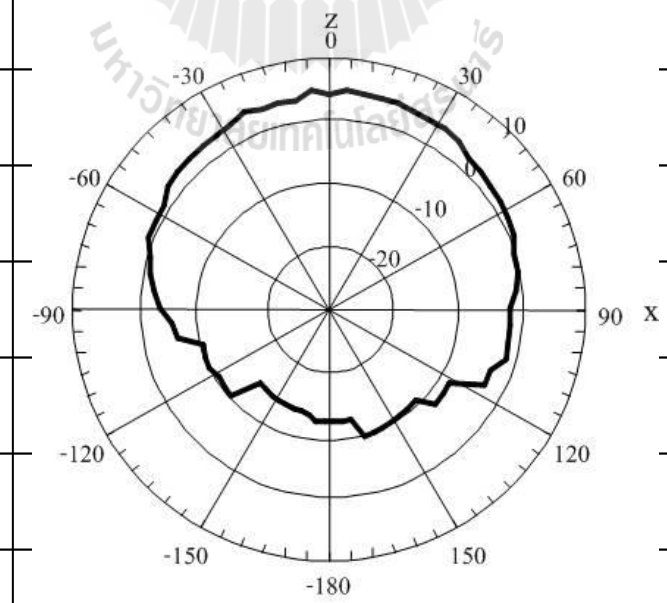
จำนวนสายอากาศ แกลวลำดับวงกลม	อัตราขยาย (dB)
	วัดทดสอบ
3	4.5
4	5.2
5	5.9
6	7.0
7	7.3
8	7.7

จากการวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแกลวลำดับวงกลมขนาด 3 4 5 6 7 และ 8 ต้น ได้นำค่าอัตราขยายกำลังมาพล็อตกราฟแสดงดังรูปที่ 4.27 ถึง 4.32 ตามลำดับ ซึ่ง

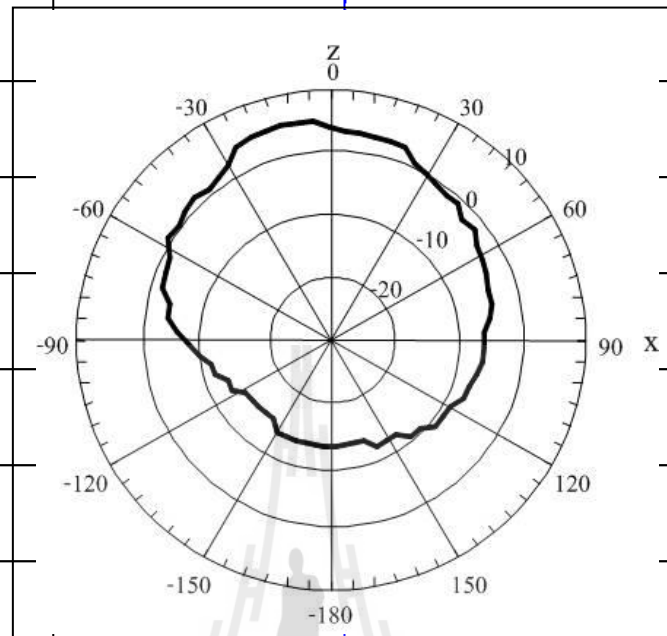
แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานมีลักษณะที่เจาะจงทิศทางและค่าคลื่นแคบลง เมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศ



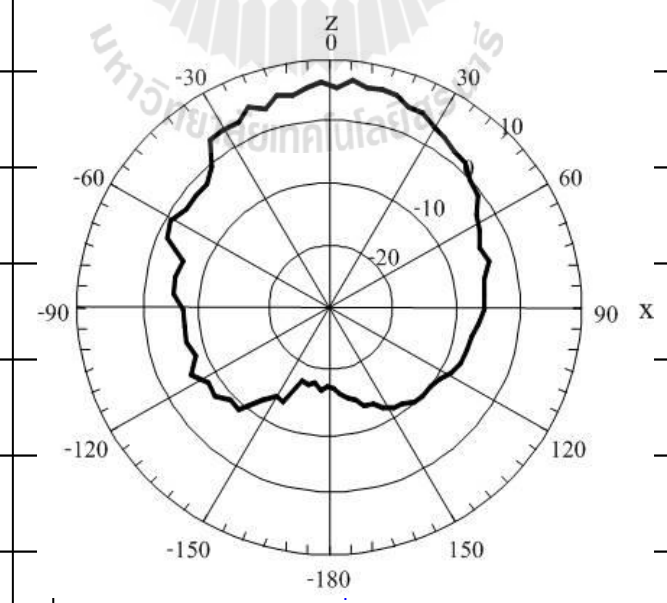
รูปที่ 4.27 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 3 ต้น



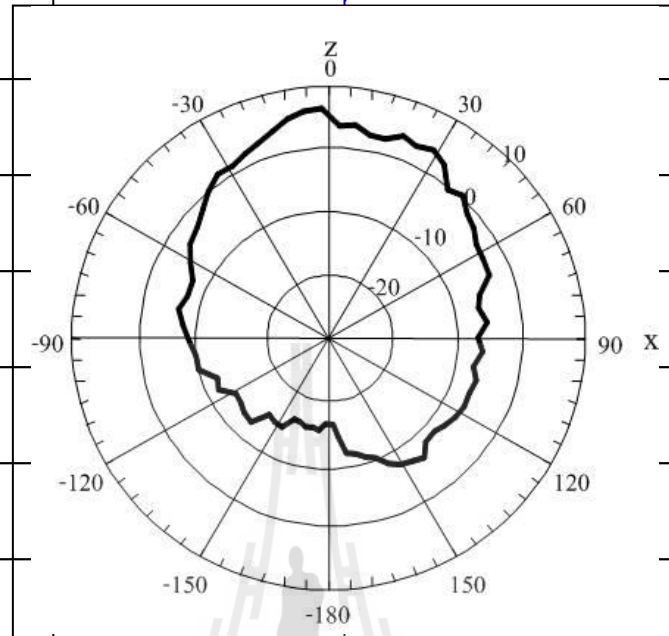
รูปที่ 4.28 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 4 ต้น



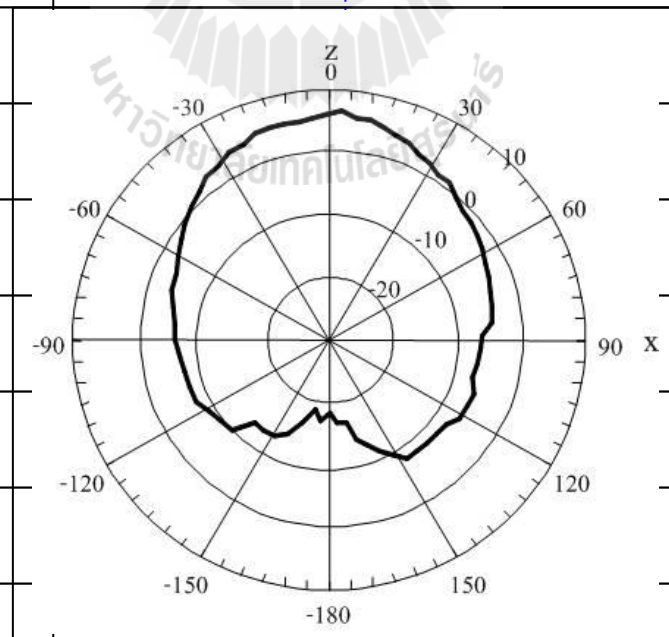
รูปที่ 4.29 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉกค่าดับวงกลมขนาด 5 ต้น



รูปที่ 4.30 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉกค่าดับวงกลมขนาด 6 ต้น



รูปที่ 4.31 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 7 ชั้น

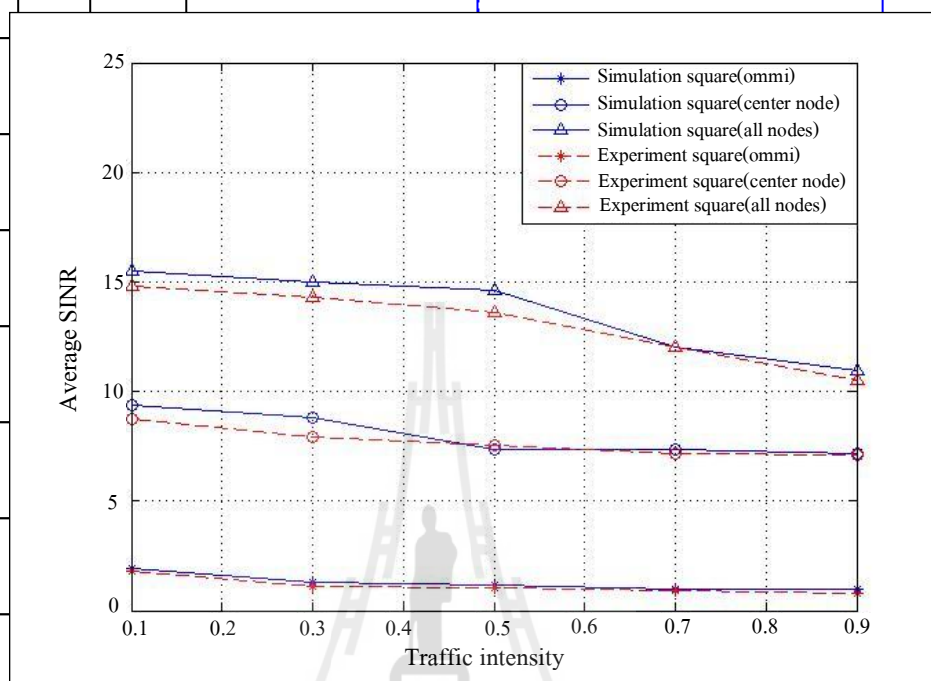


รูปที่ 4.32 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 8 ชั้น

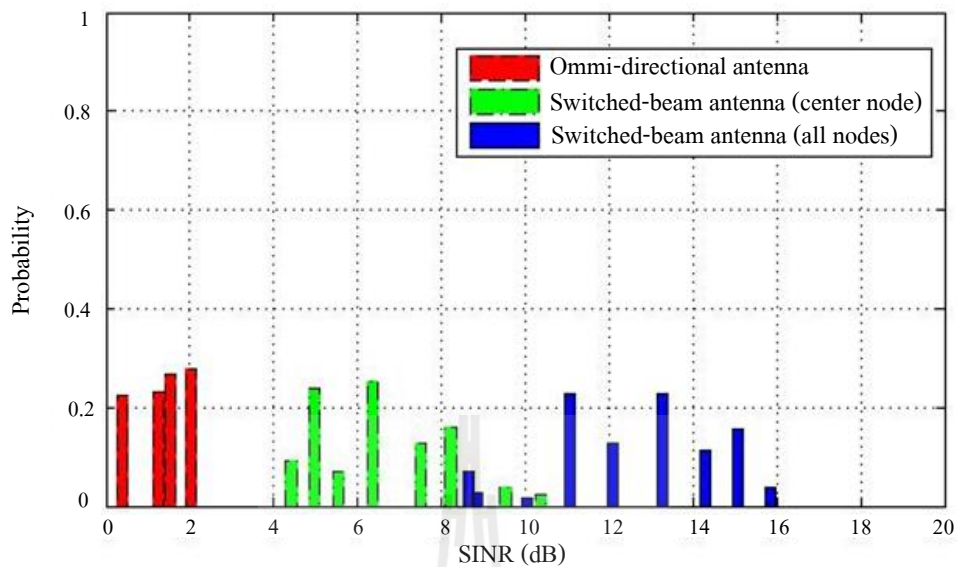
ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายโดยนำผลทดสอบของสายอากาศที่สร้างขึ้นจริงนำไปใช้งานในระบบที่จำลองแบบทางโปรแกรม และนำไปเปรียบเทียบกับการใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

4.4 การทดสอบสมรรถนะของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ใช้สายอากาศสวิทซ์ลำคลื่นแบบแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น

ระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 นั้น ได้นำเสนอโครงสร้างไว้ 2 แบบคือระบบที่มีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยมและระบบที่มีการจัดวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม โดยแต่ละแบบจะทำการติดตั้งสายอากาศไว้ 3 สถานการณ์คือสถานการณ์ที่ 1 ติดตั้งสายอากาศรอบทิศทางไว้ที่อุปกรณ์จัดเส้นทางทุก โหนด สถานการณ์ที่ 2 ติดตั้งสายอากาศสวิทซ์ลำคลื่นไว้ที่อุปกรณ์จัดเส้นทางที่โหนดตรงกลางและอุปกรณ์จัดเส้นทางที่เหลือติดตั้งสายอากาศรอบทิศทาง สถานการณ์ที่ 3 ติดตั้งสายอากาศสวิทซ์ลำคลื่นไว้ที่อุปกรณ์จัดเส้นทางทุกโหนด ในหัวข้อนี้จะนำผลการทดสอบการวัดสายอากาศมาทดลองในโปรแกรมทดสอบสมรรถนะของระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย เพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณระบบกวนเทียบกับอัตราความหนาแน่นของข้อมูล และคำนวณค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณระบบกวน ซึ่งจะนำผลที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้สายอากาศที่ได้ค่าจากทางทฤษฎี

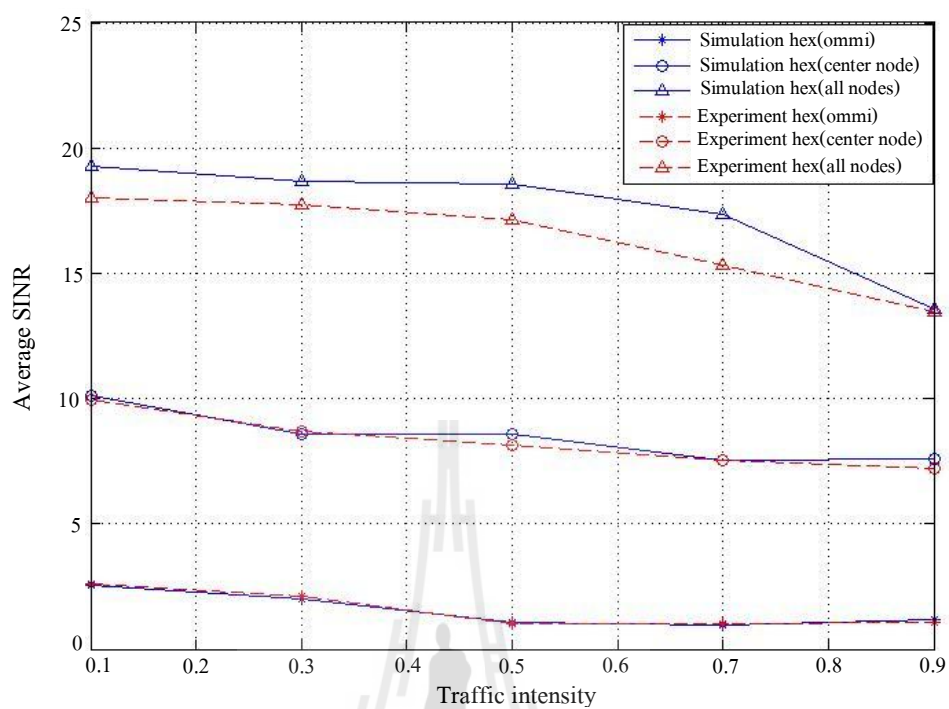


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองผลที่ได้จากสายอากาศที่วัดจริงกับสายอากาศทางทฤษฎีของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$

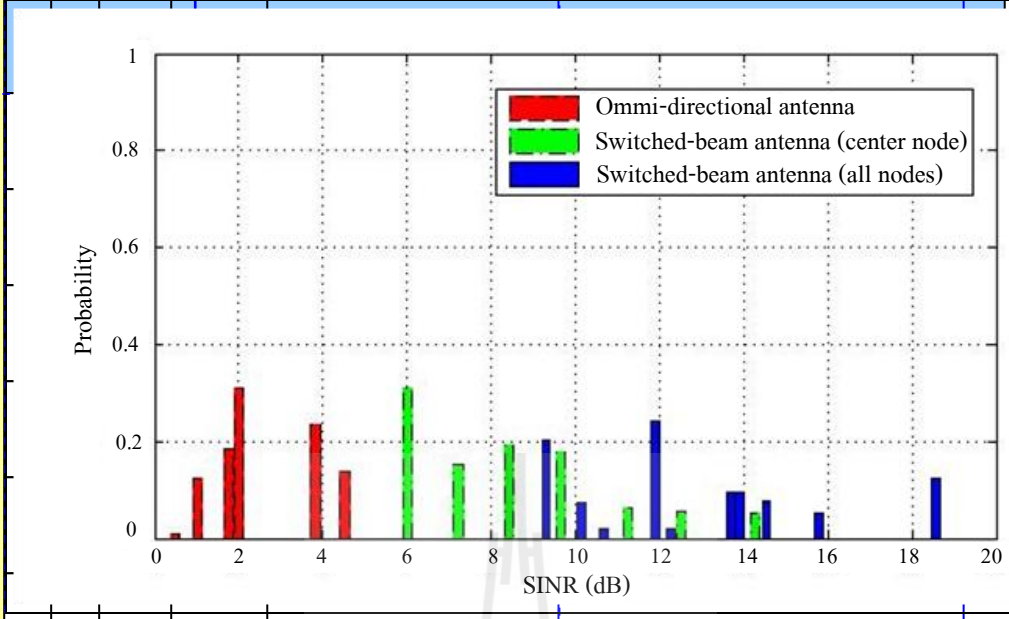


รูปที่ 4.34 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด บวกสัญญาณรบกวนของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบ สี่เหลี่ยมที่ใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$

จากรูปที่ 4.33 และ 4.34 เป็นกราฟที่จำลองผลจากระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์ จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม เปรียบเทียบผลจากการติดตั้งสายอากาศทั้ง 3 สถานการณ์ จากรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนที่ได้จาก สายอากาศที่ทำการทดสอบจริงนั้น ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด บวกสัญญาณรบกวนที่ได้จากสายอากาศทางทฤษฎี และลักษณะของกราฟก็เป็นไปอย่างสอดคล้อง กันทั้ง 3 สถานการณ์ จากรูปที่ 4.34 เป็นกราฟที่แสดงฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน ผลที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ รูปที่ 3.17 แล้วก็มีความใกล้เคียงกันและลักษณะของกราฟแท่งก็เป็นไปอย่างสอดคล้องเช่นกัน อย่างไรก็ตามแม้ผลที่ได้จากการทดสอบจริงนั้นจะคลาดเคลื่อนไปจากผลของทางทฤษฎี ซึ่งอาจเกิด ความผิดพลาดในขั้นตอนการสร้างในส่วนอุปกรณ์ที่เราได้ทำการสร้าง ผลที่ได้แสดงจากรูปที่ 4.33 และ 4.34 นั้นสามารถยืนยันได้ว่าการใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่นำเสนอและสร้างขึ้นนั้น สามารถใช้งานได้จริงและสามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบเครือข่าย เมฆไร้สายได้



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองผลที่ได้จากสายอากาศที่วัดจริงกับสายอากาศทางทฤษฎีของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$



รูปที่ 4.36 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด บวกสัญญาณรบกวนของระบบเครือข่ายเมฆ ไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบ หกเหลี่ยมใช้สายอากาศแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น ด้วยรัศมี $a = (\sqrt{2}/8)\lambda$

จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 เป็นกราฟที่จำลองผลจากระบบเครือข่ายเมฆ ไร้สายที่วางอุปกรณ์ จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม เปรียบเทียบผลจากการติดตั้งสายอากาศทั้ง 3 สถานการณ์ จากรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนที่ได้จาก สายอากาศที่ทำการทดสอบจริงนั้น ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด บวกสัญญาณรบกวนที่ได้จากสายอากาศทางทฤษฎี และลักษณะของกราฟก็เป็นไปอย่างสอดคล้อง กันทั้ง 3 สถานการณ์ จากรูปที่ 4.36 เป็นกราฟที่แสดงฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน ผลที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ รูปที่ 3.18 แล้วก็มีความใกล้เคียงกันและลักษณะของกราฟแท่งก็เป็นไปอย่างสอดคล้องเช่นกัน อย่างไรก็ตามแม้ผลที่ได้จากการทดสอบจริงนั้นจะคลาดเคลื่อนไปจากผลของทางทฤษฎี ซึ่งอาจเกิด ความผิดพลาดในขั้นตอนการสร้างในส่วนอุปกรณ์ที่เราได้ทำการสร้าง ผลที่ได้แสดงจากรูปที่ 4.35 และ 4.36 นั้นสามารถยืนยันได้ว่าการใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่นำเสนอและสร้างขึ้นนั้น สามารถใช้งานได้จริงและสามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบเครือข่าย ไร้สายได้

ความแตกต่างระหว่างระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยมกับระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยมก็คือ ระบบที่วางแบบสี่เหลี่ยมนั้นกำหนดให้อุปกรณ์รับส่งในเมฆเดียวกันวางห่างกันที่ระยะ R ส่วนอุปกรณ์ที่เป็นสัญญาณแทรกสอดนั้นห่างเท่ากับ $\sqrt{2}R$ และระบบที่วางแบบหกเหลี่ยมจะกำหนดให้อุปกรณ์รับส่งในเมฆเดียวกันวางห่างกันที่ระยะ R ส่วนอุปกรณ์ที่เป็นสัญญาณแทรกสอดนั้นห่างเท่ากับ $\sqrt{3}R$ เป็นที่ทราบกันว่า $\sqrt{2}R < \sqrt{3}R$ ดังนั้นระยะสัญญาณแทรกสอดในระบบที่วางแบบหกเหลี่ยมไกลกว่าระบบที่วางแบบสี่เหลี่ยม สัญญาณแทรกสอดจะมารบกวนอุปกรณ์รับได้น้อยกว่าทำให้คุณภาพของสัญญาณดีกว่า ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลจากกราฟที่จำลองผลจากระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยมและกราฟที่จำลองผลจากระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยมแล้วจะเห็นว่าค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของระบบที่วางแบบหกเหลี่ยมมีค่ามากกว่าที่วางแบบสี่เหลี่ยม

4.5 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการสร้างวงจรเลื่อนเฟสและระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นขึ้นจริง และทำการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ได้นำเสนอ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและเฟสของวงจรเลื่อนเฟส นอกจากนี้ยังได้นำผลที่ได้จากการวัดจริงมาทดสอบในโปรแกรมของระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนเทียบกับอัตราความหนาแน่นของข้อมูล และคำนวณหาค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่ได้นำเสนอสามารถใช้งานในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายเพื่อปรับปรุงคุณภาพในการส่งข้อมูลและหลีกเลี่ยงสัญญาณแทรกสอดในระบบได้

บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ระบบเครือข่ายเมฆไร้สายเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ต้องการแก้ไขปัญหาในเรื่องของการเดินสายเคเบิลเพื่อเชื่อมต่อจุดเข้าถึงในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย ซึ่งทำให้เกิดความสิ้นเปลืองและเกิดความยากลำบากต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตามระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่มีการใช้คลื่นวิทยุเป็นสื่อกลางในการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทางนั้น ก็ยังมีปัญหาในเรื่องการเกิดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วม เนื่องจากผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดและการลดทอนของสัญญาณในการส่งสัญญาณ ปัญหาดังกล่าวส่งผลให้ได้คุณภาพของสัญญาณที่ไม่ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายโดยใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่น จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้พบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาผลกระทบการเกิดการแทรกสอดช่องสัญญาณร่วมในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ใช้สายอากาศแก่ง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นแบบแถวลำดับวงกลมขนาด 6 ต้น มาใช้ในระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย เพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากอุปกรณ์จัดเส้นทางที่อยู่ใกล้เคียง ในระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นจะใช้วงจรเลื่อนเฟสเป็นโครงข่ายก่อนรูปลำคลื่น โดยจะใช้การกักตายบนแผงวงจรพิมพ์ที่ได้ทำการจำลองผลจากโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อนำสร้างสายอากาศที่ใช้ในการทำการทดสอบจริงและทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ได้นำเสนอ จากนั้นนำผลที่ได้มาทดลองในโปรแกรมทดสอบสมรรถนะของระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย เพื่อวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณระบบกวนและค่าฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณระบบกวนเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบรอบทิศทางผลที่ได้พบว่าระบบสายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณแทรกสอดได้ ทำให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณระบบกวนของระบบที่ใช้สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นมีค่ามากกว่าระบบที่ใช้สายอากาศรอบทิศทาง ทั้งในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่กำหนดการวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยมและระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่กำหนดการวางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม

เนื่องจากงานวิจัยเรื่องนี้ยังเป็นเพียงกรณีศึกษาเบื้องต้น ดังนั้นเราจึงได้ทำการออกแบบระบบของงานวิจัยในกรณีที่ยากก่อน นั่นคือใช้ตัวเลื่อนเฟสเป็นวงจร โครงข่ายก่อรูปลำดับชั้น ซึ่งกระบวนการของการออกแบบระบบทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และบทที่ 4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อปรับปรุงระบบเครือข่ายเมฆไร้สายให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันยังไม่มีเครือข่ายเมฆไร้สายในการใช้งานจริง งานวิจัยนี้จึงทำได้เพียงจำลองผลของระบบเครือข่ายเมฆไร้สายโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ ซึ่งในอนาคตเมื่อมีเครือข่ายเมฆไร้สายใช้แล้วจึงสามารถนำสายอากาศของงานวิจัยนี้ไปวัดทดสอบผลเพื่อเป็นการยืนยันว่าสายอากาศของเราสามารถปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายได้

5.3 แนวทางในการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยที่ได้นำเสนอนี้ยังเป็นระบบที่สามารถก่อรูปลำดับชั้นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ โดยใช้โครงข่ายก่อรูปลำดับชั้นอย่างง่าย ในอนาคตอาจจะใช้ระบบสายอากาศเก่งที่มีประสิทธิภาพมากกว่านี้ปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายให้ดีขึ้น

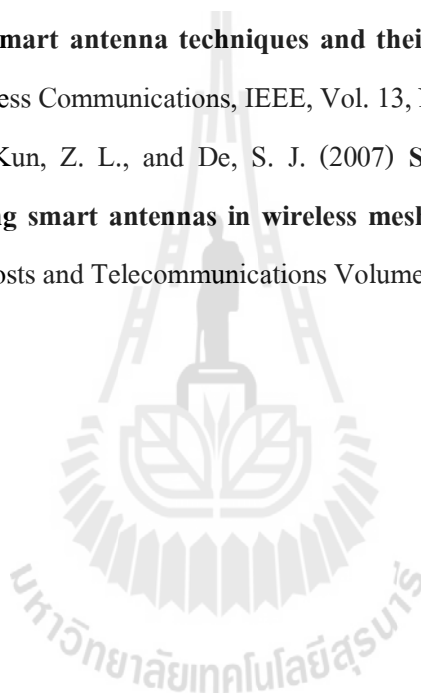


รายการอ้างอิง

- Agee, B. G. (1989). **Blind Separation and Capture of Communications Signals Using a Multitarget Constant Modulus Beamformer**. 1989 IEEE Military Communications Conf., Boston, MA, Oct.
- Ahmed, E. Z. (2005). **Smart Antenna Engineering**, ARTECH HOUSE, Inc.
- Akyildiz, I. F., and Wang, X. (2005). **A Survey on Wireless Mesh Networks**. Communications Magazine, IEEE, Vol. 43, pp. S23-S30
- Akyildiz, I. F., Wang, X., and Wang, W. (2005). **Wireless Mesh Networks: A Survey**,” **Computer Networks and ISDN Systems**. Vol. 4, pp. 445-487, March
- Babich, F., Comisso, M., and Mania, L. (2007). **Multi-Antenna Techniques for Wireless Mesh Networks in an Outdoor Environment**. Communications ICC '07 IEEE International Conference, pp. 4961-4966
- Bialkowski, M. E., and Uthansakul, M. (2006). **Fully Spatial Wide-Band Beamforming Using a Rectangular Array of Planar Monopoles**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 54, No. 2, pp. 527-533
- Chang, S. F., Chu, C. Y., Lin, K. H., and Li, W. R. (2004). **Switched-Beam Antenna Based on Modified Butler Matrix with Low Sidelobe Level**. Electronics Letters, Vol. 40, pp. 290-292
- David, M. P. (1998). **Microwave Engineering 2nd edition**, John Wiley & Sons, Inc.
- Fooks, E. H. (1990). **Microwave engineering using microstrip circuits**. Prentice Hall New York
- Frost, L. (1972). **An Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing**. Proc. Of the IEEE, Vol. 60, No. 8, Aug.
- Garcia, A. L. (1994). **Probability and Random Processes for Electrical Engineering**. Second Edition, pp.499-559, May
- Giambene, G. (2005). **Queuing the Theory and Telecommunications Networks and Applications**. Chapter 5 pp.305-382

- Gross, F. B. (2005). **Smart Antennas for Wireless Communication With MATLAB**. Fairfax, Virginia,
- Herscovici, N. T., and Christodoulou, C. (2005). **Uniform Circular Arrays for Smart Antennas” IEEE Antennas and Propagation Magazine**. Volume 47, No.4 August
- Hu, H., Zhang, Y., and Luo, J. (2007). **Distorted Antenna System: Open Architecture for Future Wireless Communications**. pp.201-239, June
- Jo, D., Lee, J., Lee, S. J., Kwon, T., Kim, W., and Choi, Y. (2009). **Understanding interference and carrier sensing in wireless mesh networks**. Communications Magazine IEEE, Vol. 47, No. 7, pp 102-109
- Stine, J. A. and The Mitre Corporation. (2006). **Exploiting Smart Antenna in Wireless Mesh Network Using Contention Access**. IEEE Wireless Communications , pp.38-49, April
- Jain, K., Padhye, J., Padmanavhan, V. N., and Qiu, L. (2005). **Impact of Interference on Multi-Hop Wireless Network Performance**. Wireless Networks vol. 11, pp.471-487
- Liber, J. J. C., and Rappaport, T. S. (1999). **Smart Antenna for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications**. Printice Hall PTR, NJ, 1999.
- Muthaiah, S. N., Iyer, A., Karnik, A., and Rosenberg, C. (2007) **Design of High Throughput Scheduled Mesh Networks: A Case for Directional Antennas**. IEEE GLOBECOM 2007, pp. 5080-5085
- Pannang, S., Uthansakul, M., and Uthansakul, P. (2010). **Performance of Switch – beam Antennas for Wireless Mesh Networks using Synchronous Collision Resolution Protocol**. International Conference on Computer and Information Application
- Peng, M., and Wang, W. (2005). **Comparison of Capacity between Adaptive Tracking and Switched Beam Smart Antenna Techniques in TDD-CDMA Systems**. Microwave Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2005. (MAPE 2005). IEEE International Symposium on Vol. 1, pp. 135-139
- Pozar, D. M. (2005). **Microwave Engineering**. Third edition, Weley, 2005.
- Rabbi, M. F., Rahman, M. T., Salehin, G. M. A., and Uddin, M. A. (2006). **An Efficient Wireless Mesh Network: A New Architecture**. Communication Technology, ICCT '06, pp. 1-5

- Sarkar, D. K., Seungwon, C., and Shim, D. (1999). **A Comparison of Tracking - Beam Arrays and Switching - Beam Arrays Operating in a CDMA Mobile Communication Channel.** IEEE Transactions on Antenna and Propagation, Mag., Vol. 41, pp. 10-56
- Sato, N., and Fujii, T. (2007). **Multi Antenna Utilization Scheme for Congestion Avoidance around the Gateway for Wireless Mesh Network.** The 18th Annual IEEE International Symposium on PIMRC 2007, pp.1-5, September
- Stine, J. A., (2006). **Exploiting smart antennas in wireless mesh networks using contention access.** IEEE Wireless Communications, Vol. 13, pp. 38-49
- Winters, J. H., (2006). **Smart antenna techniques and their application to wireless ad hoc networks.** Wireless Communications, IEEE, Vol. 13, No. 4, pp.77-83
- Yong, Z., Fei, W. Y., Kun, Z. L., and De, S. J. (2007) **Simulation and analysis of node throughput using smart antennas in wireless mesh networks.** The journal of China Universities of posts and Telecommunications Volume 14, Issue2, pp. 28-50, June





ภาคผนวก ก

การอธิบายส่วนประกอบของโปรแกรม

ในภาคผนวก ก. เป็นการอธิบายส่วนประกอบต่างๆ ของโปรแกรม โดยใช้รูปผังงานอธิบายโค้ดของโปรแกรมซึ่งแบ่งเป็นส่วนต่างๆดังนี้

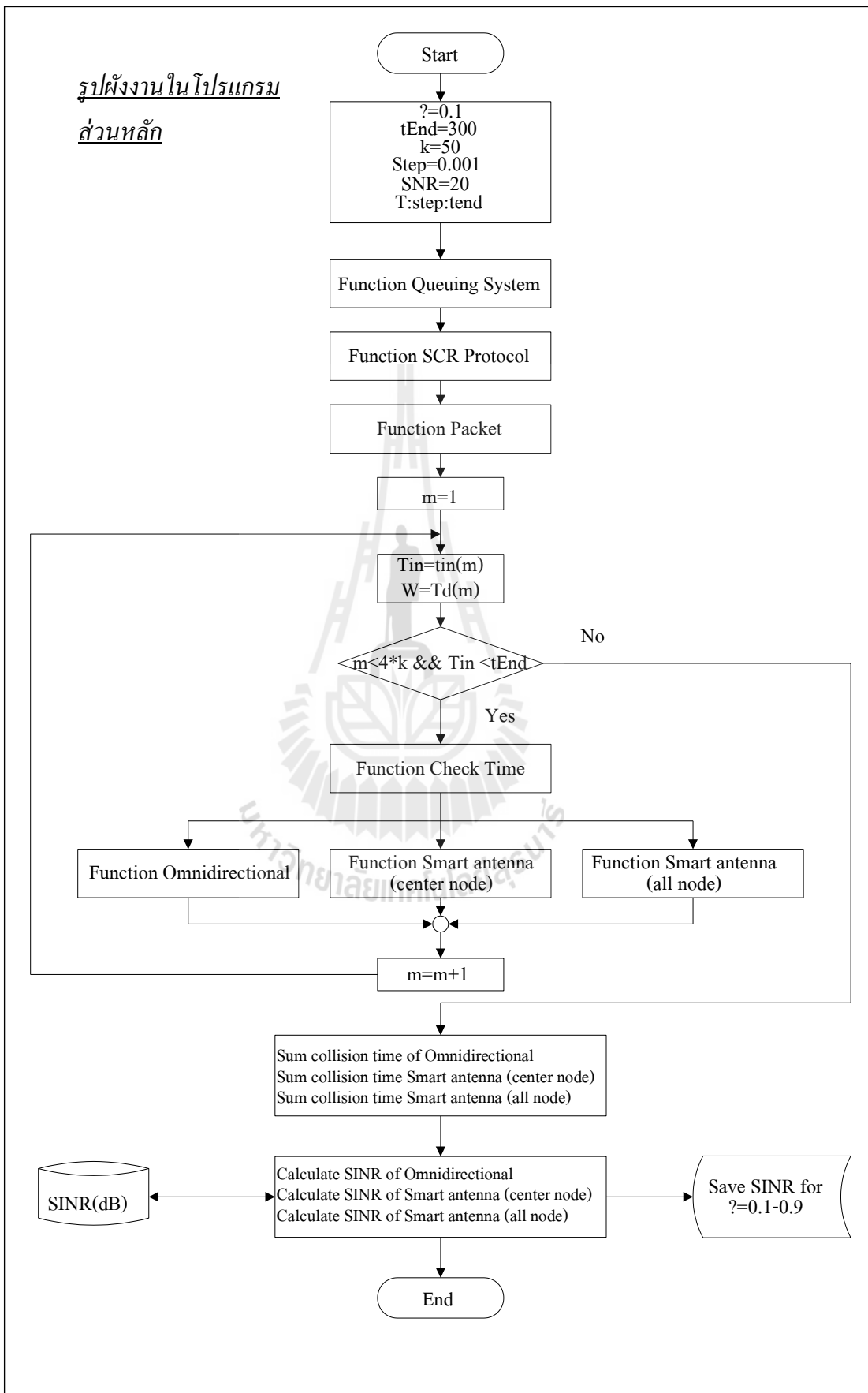
1. โปรแกรมส่วนหลัก
2. โปรแกรมส่วนฟังก์ชัน
 - ฟังก์ชันระบบแถวคอย
 - ฟังก์ชันโปรโตคอลเอสซีอาร์
 - ฟังก์ชันคำนวณแพ็คเกจ
 - ฟังก์ชันคำนวณเวลาที่มีการชนกันของข้อมูล
 - ฟังก์ชันระบบที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง
 - ฟังก์ชันระบบที่ใช้สายอากาศกึ่งติดตั้งไว้ที่อุปกรณ์จัดเส้นทางตรงกลาง
 - ฟังก์ชันระบบที่ใช้สายอากาศกึ่งติดตั้งไว้ที่อุปกรณ์จัดเส้นทางทุกตัว

การทำงานของโปรแกรมส่วนหลัก

โปรแกรมส่วนหลักจะรวมการทำงานทุกฟังก์ชันเข้าไว้ด้วยกัน โดยเริ่มต้นจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

- ρ คือ อัตราความหนาแน่นของข้อมูลที่จะกำหนดค่าในการจำลองแบบ แต่ครั้งเท่ากับ 0.1 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 ตามลำดับ
- tEnd คือ ค่าเวลาในการจำลองแบบเท่ากับ 200 วินาที
- step คือ ค่าทศนิยม
- SNR คือ อัตราส่วนระหว่างสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณรบกวนเท่ากับ 20 dB
- T คือ เวลาในการจำลองแบบกำหนดให้เท่ากับ 1 ถึง tEnd

รูปผังงานในโปรแกรม
ส่วนหลัก



รูปผังงานในโปรแกรมส่วนของฟังก์ชันระบบแถวคอย

โปรแกรมส่วนนี้เป็นฟังก์ชันการทำงานของระบบแถวคอย จะทำการสุ่มเวลาเข้าใช้บริการ และเวลาให้บริการเพื่อสร้างแพ็คเกจข้อมูลของ โหนดที่สนใจและ โหนดที่เป็นสัญญาณแทรกสอด โดยจะกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นดังนี้

พารามิเตอร์ที่กำหนดเริ่มต้น

- μ คืออัตราเวลาให้บริการกำหนดให้เท่ากับ 0.5
- $\lambda = \rho \times \mu$ คืออัตราการเข้าใช้บริการซึ่งคำนวณจากอัตราความหนาแน่นของข้อมูลคูณกับอัตราเวลาให้บริการ
- Arrival mean = $1/\lambda$ คือค่าเฉลี่ยของอัตราการเข้าใช้บริการที่จะนำไปใช้ในคำสั่งสุ่มเวลาเข้าใช้บริการ
- Service mean = $1/\mu$ คือค่าเฉลี่ยของอัตราเวลาให้บริการที่จะนำไปใช้ในคำสั่งสุ่มเวลาให้บริการ

การสุ่มเวลาของสัญญาณที่สนใจ

- กำหนด n_1 n_2 n_3 และ n_4 เป็นเวลาเข้าใช้บริการ
- กำหนด w_{n1} w_{n2} w_{n3} และ w_{n4} เป็นเวลาให้บริการ

การสุ่มเวลาของสัญญาณแทรกสอด

- กำหนด n_5 n_6 n_7 และ n_8 เป็นเวลาเข้าใช้บริการ
- กำหนด w_{I1} w_{I2} w_{I3} และ w_{I4} เป็นเวลาให้บริการ

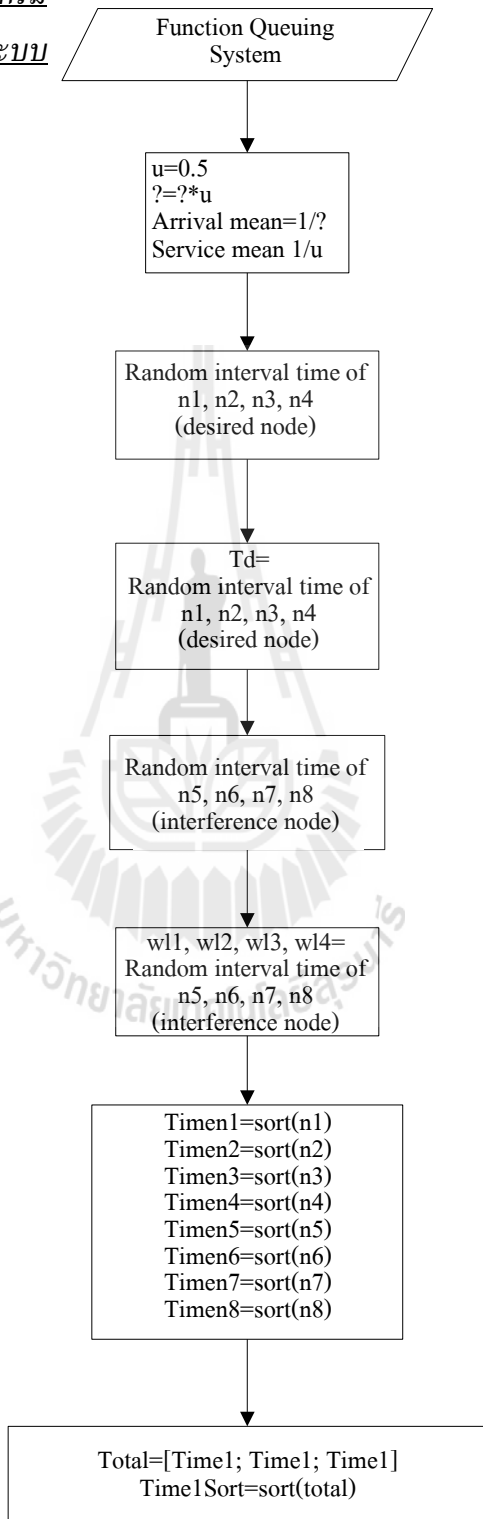
การเรียงค่าจากน้อยไปมาก

- กำหนด $Timen_1$ $Timen_2$ $Timen_3$ และ $Timen_4$ เป็นเวลาที่เรียงค่าจากน้อยไปมากของสัญญาณที่สนใจ
- กำหนด $Timen_5$ $Timen_6$ $Timen_7$ และ $Timen_8$ เป็นเวลาที่เรียงค่าจากน้อยไปมากของสัญญาณแทรกสอด

รวมค่าของสัญญาณที่สนใจ

- กำหนด TimeSort เป็นค่าที่เรียงข้อมูลทั้งหมดของสัญญาณที่สนใจจากน้อยไปมาก

รูปผังงานในโปรแกรม
ส่วนของฟังก์ชันระบบ



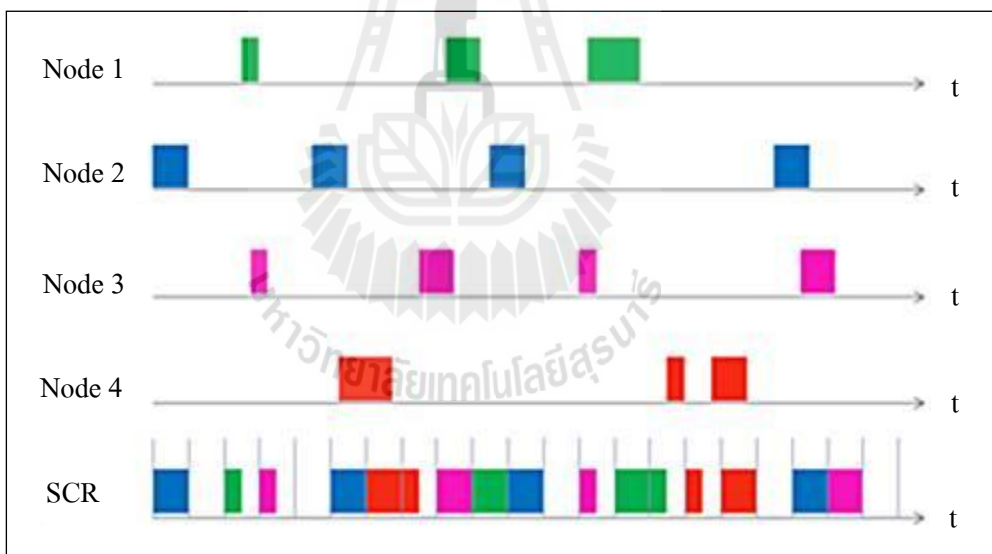
รูปผังงานในโปรแกรมส่วนของฟังก์ชันโปรโตคอลเอสซีอาร์

โปรแกรมส่วนนี้เป็นฟังก์ชันการทำงานของโปรโตคอลเอสซีอาร์ จะทำตรวจสอบข้อมูลของสัญญาณในเมฆเดียวกันให้เรียงข้อมูลเป็นลำดับก่อนหลัง จากนั้นจะสร้างเวลาเป็นสล็อตไว้เพื่อนำข้อมูลมาใส่ในเวลาสล็อต โดยขั้นตอนการทำงานมีดังนี้

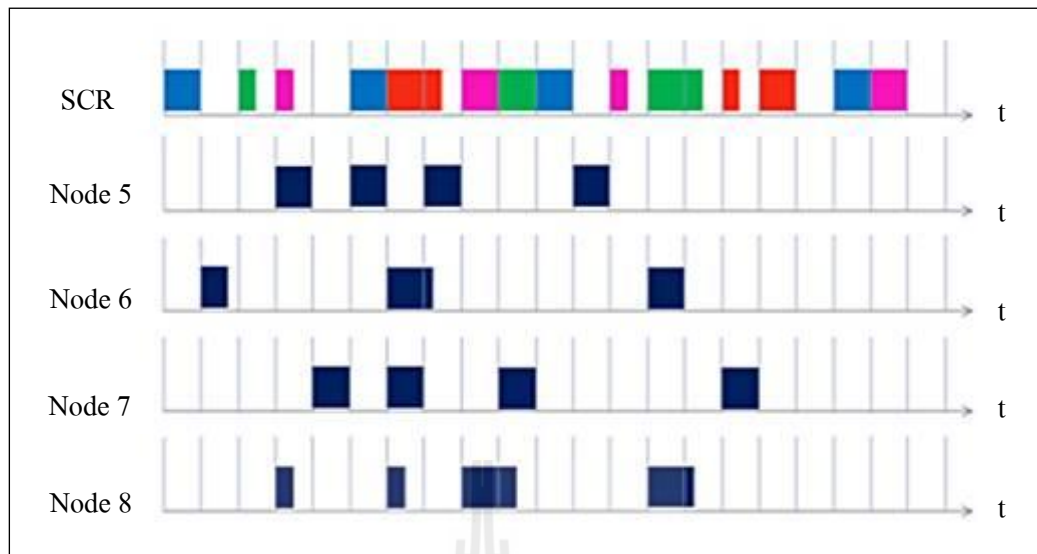
กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น

- $slot = service\ mean$ คือช่วงเวลาของสล็อตกำหนดให้เท่ากับค่าเฉลี่ยของเวลาให้บริการ
- $TimeNow(1) = 0$ คือเวลาเริ่มต้นของสล็อตที่ 1 กำหนดให้เท่ากับ 0
- $TimeNext(1) = TimeNow + slot$ คือเวลาสิ้นสุดของสล็อตที่ 1 กำหนดให้เท่ากับเวลาเริ่มต้นบวกเวลาสล็อต

การสร้างเวลาสล็อตและนำข้อมูลมาเรียงไว้ในเวลาสล็อตที่สร้างขึ้นอธิบายได้ดังรูปที่ ก.1 และรูปที่ ก.2

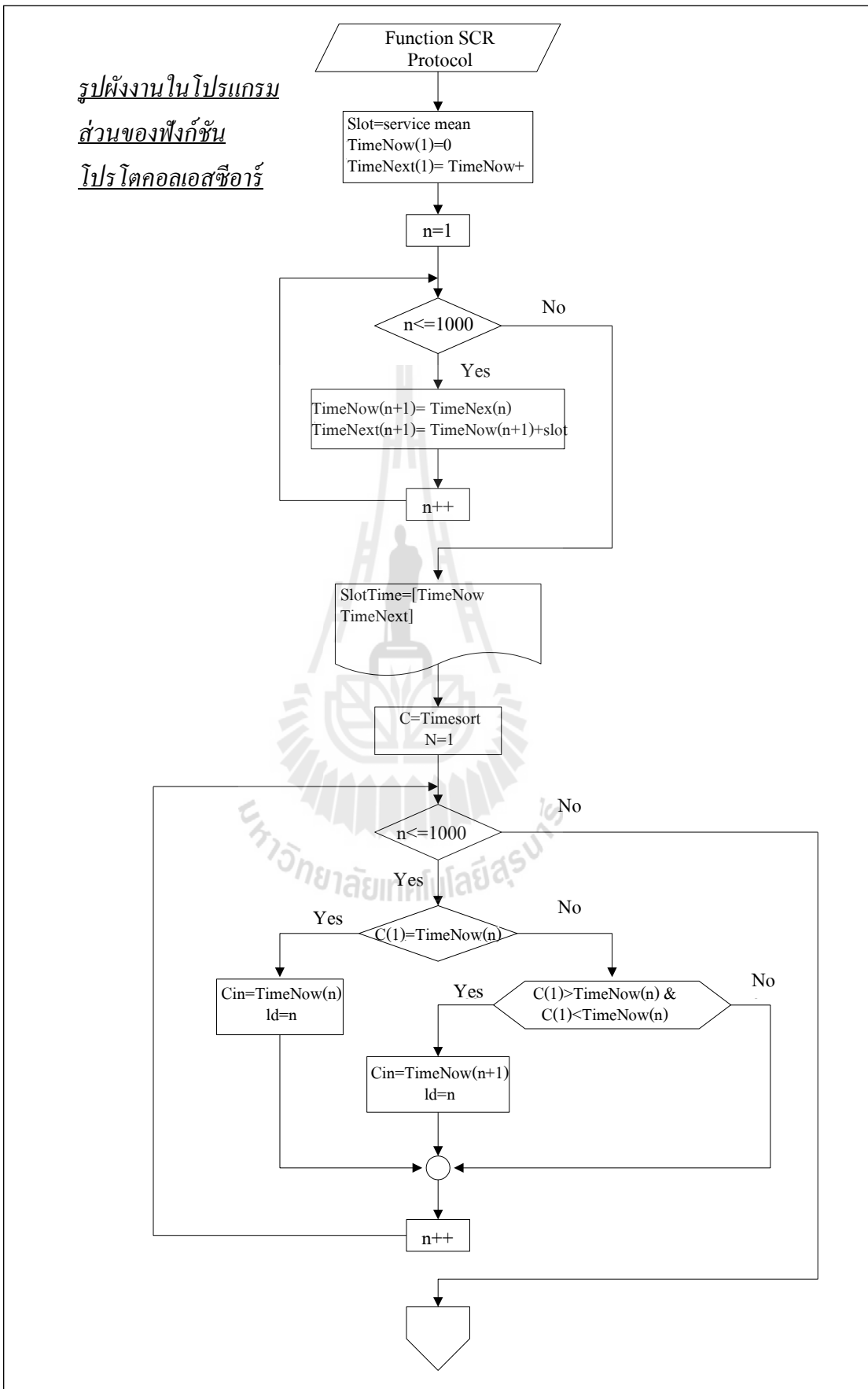


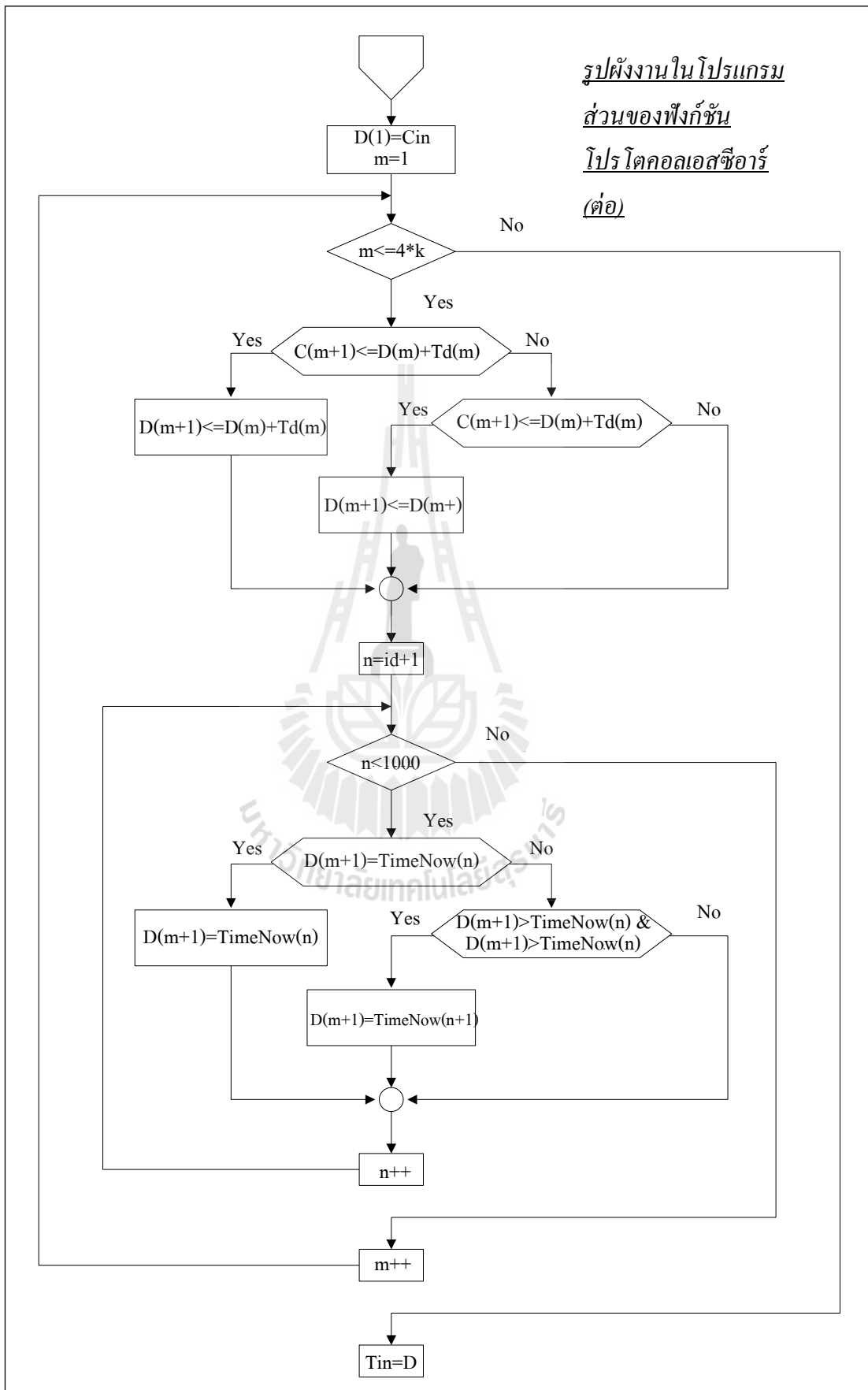
รูปที่ ก.1 ตัวอย่างแพ็คเกจที่ถูกจัดเรียงในเวลาสล็อตโดยโปรโตคอลเอสซีอาร์ ในเครือข่ายเมฆไร้สายของโนดที่สนใจ



รูปที่ ก.2 ตัวอย่างแพ็คเกจที่ถูกจัดเรียงในเวลาสล็อตโดยโปรโตคอลเอสซีอาร์ในเครือข่ายเมชไร้สายของโหนดที่สนใจและโหนดของสัญญาณแทรกสอด

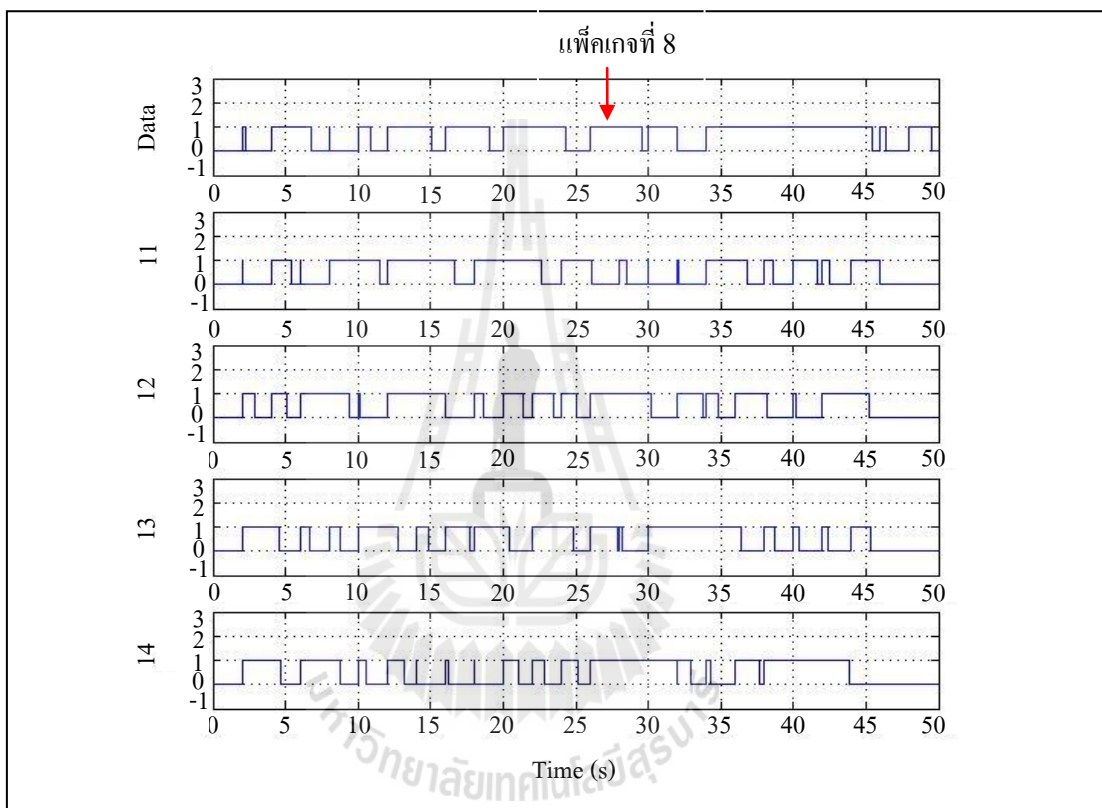
รูปผังงานในโปรแกรม
 ส่วนของฟังก์ชัน
 โปรโตคอลเอสซีอาร์





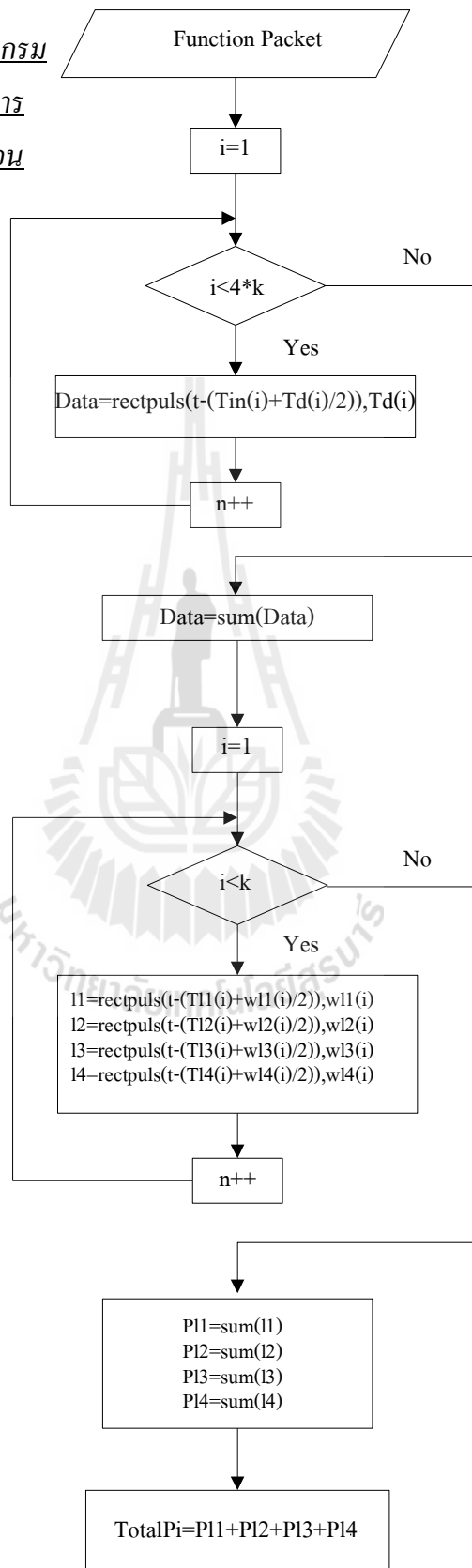
รูปผังงานในโปรแกรมส่วนของฟังก์ชันจำลองแบบเสมือนแพ็คเกจ

โปรแกรมส่วนนี้เป็นฟังก์ชันการจำลองแบบเสมือนแพ็คเกจ โดยสร้างพัลส์ขึ้นมาแทนแพ็คเกจเพื่อใช้ในการตรวจสอบจำนวนและช่วงเวลาในการชนกันของข้อมูลผลการจำลองแบบแสดงดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 ผลการจำลองแบบแพ็คเกจที่ถูกจัดเรียงในเวลาสล็อตโดยโปรโตคอลเอสซีอาร์
ในเครือข่ายเมฆไร้สายของโนคที่สนใจและโนคของสัญญาณทรกสอด

รูปผังงานในโปรแกรม
 ส่วนของฟังก์ชันการ
 สร้างแพ็คเกจเสมือน

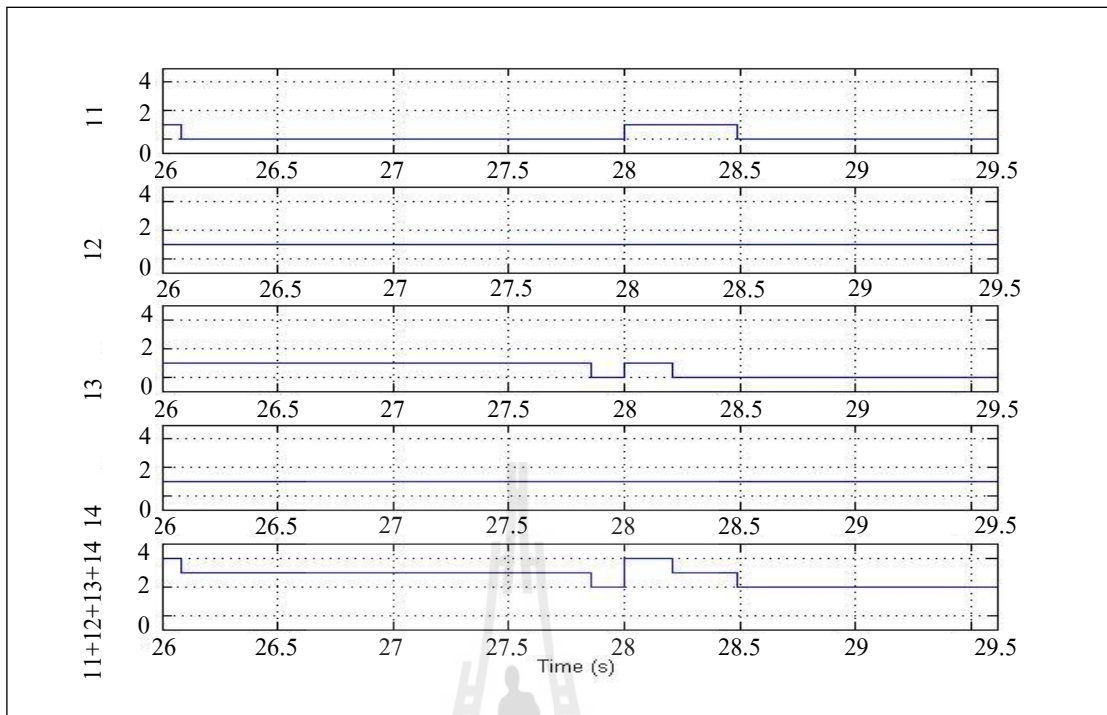


รูปผังงานในโปรแกรมส่วนของฟังก์ชันตรวจสอบจำนวนและช่วงเวลาที่ชนกันของข้อมูล

โปรแกรมส่วนนี้เป็นฟังก์ชันตรวจสอบจำนวนของโนดจากสัญญาณแทรกสอดที่มีส่งข้อมูลพร้อมกันกับ โนดของสัญญาณที่สนใจและช่วงเวลาที่มีการชนกันของข้อมูล โดยจะยกตัวอย่างในแฟ้มเกจที่ 8 จากรูปที่ ก.3 และตรวจสอบช่วงเวลาของแฟ้มเกจที่ 8 ดังแสดงในรูปที่ ก.4

จากรูปที่ ก.5 แสดงผลจำลองแบบของแฟ้มเกจที่ 8 ที่บอกจำนวนของ โนดและช่วงเวลาที่ชนกันของข้อมูลซึ่งแสดงข้อมูลดังต่อไปนี้

- Tin คือ เวลาเข้าใช้บริการเท่ากับ 26 วินาที
- W คือ เวลาให้บริการเท่ากับ 3.612 วินาที
- B แแถวที่ 1 บอกจำนวนของโนดจากสัญญาณแทรกสอดที่ชน
แถวที่ 2 บอกเวลาเริ่มต้นของแต่ละช่วง
- Bz บอกตำแหน่งโนดจากสัญญาณแทรกสอดที่ชน
ตำแหน่งที่ 1 คือ โนดที่อยู่ทิศ 135°
ตำแหน่งที่ 2 คือ โนดที่อยู่ทิศ 225°
ตำแหน่งที่ 3 คือ โนดที่อยู่ทิศ 315°
ตำแหน่งที่ 4 คือ โนดที่อยู่ทิศ 45°
- TCol แถวที่ 1 บอกจำนวนของโนดจากสัญญาณแทรกสอดที่ชน
แถวที่ 2 บอกระยะเวลาของแต่ละช่วง
- NCol บอกจำนวนของโนดจากสัญญาณแทรกสอดที่ชน
- L บอกขนาดของ TCol



รูปที่ ก.4 ผลการจำลองแบบที่ตรวจสอบในช่วงเฟสที่ 8



```

Command Window
New to MATLAB? Watch the Video, see Demos, or read Getting Started.

Start packet : 8

Position = 3

Tin = 26

W = 3.6120

De = 29.612

B =      4.0000    3.0000    2.0000    4.0000    3.0000    2.0000
      2.0000

      26.0030    26.0010    27.8570    28.0030    28.2060    28.4900
      29.6130

Bz =      1234     1204      204      1234     1230     1030

Tcol =      4.0000    3.0000    2.0000    4.0000    3.0000    2.0000

      0.0780    1.7760    0.14600    0.2050    0.2020    1.1230

Ncol =      4      3      2      4      3      2

L =      2      6
  
```

รูปที่ ก.5 ผลการจำลองแบบที่ตรวจสอบในช่วงแพ็กเกจที่ 8

Start packet : 8

กรอบที่ 1

Position = 3

Tin = 26

W = 3.6120

De = 29.612

กรอบที่ 2

B = 4.0000 3.0000 2.0000 4.0000 3.0000 2.0000 2.0000

26.0030 26.0010 27.8570 28.0030 28.2060 28.4900 29.6130

Bz = 1234 1204 204 1234 1230 1030

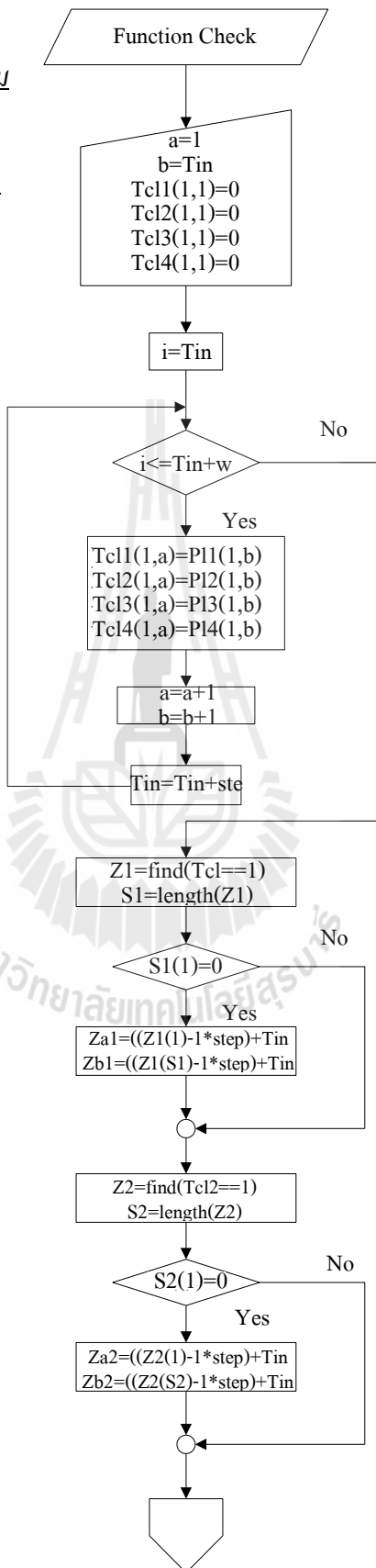
Tcol = 4.0000 3.0000 2.0000 4.0000 3.0000 2.0000

0.0780 1.7760 0.14600 0.2050 0.2020 1.1230

Ncol = 4 3 2 4 3 2

L = 2 6

รูปผังงานในโปรแกรม
ส่วนของฟังก์ชันการ
ตรวจสอบจำนวนและ
ช่วงเวลาที่ชนกันของ
ข้อมูล



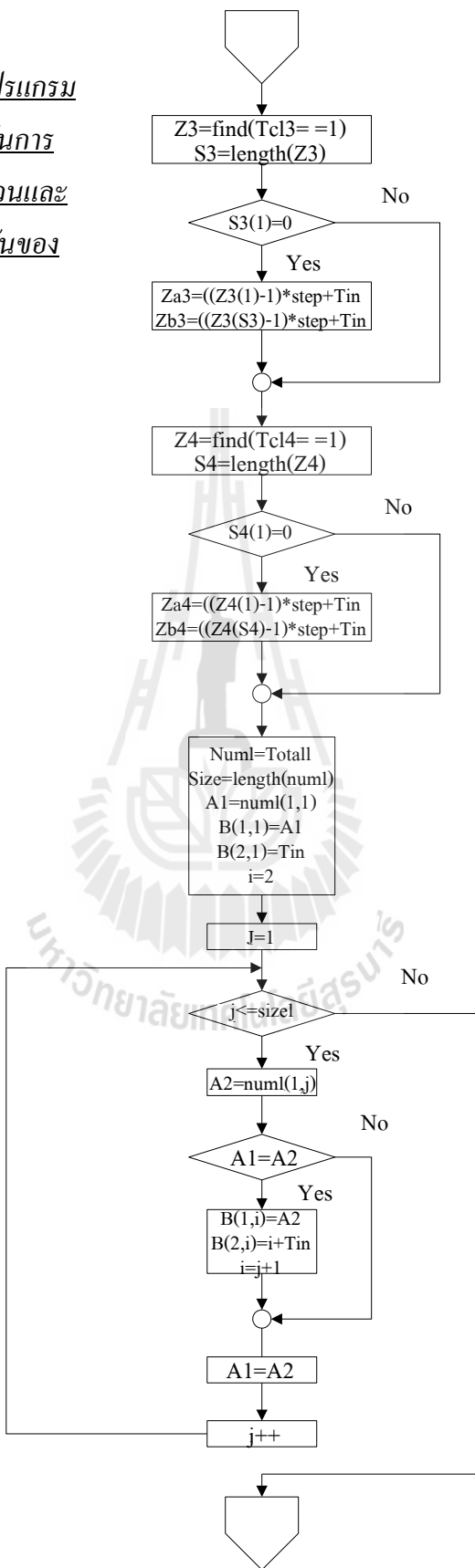
รูปผังงานในโปรแกรม

ส่วนของฟังก์ชันการ

ตรวจสอบจำนวนและ

ช่วงเวลาที่ชนกันของ

ข้อมูล (ต่อ)



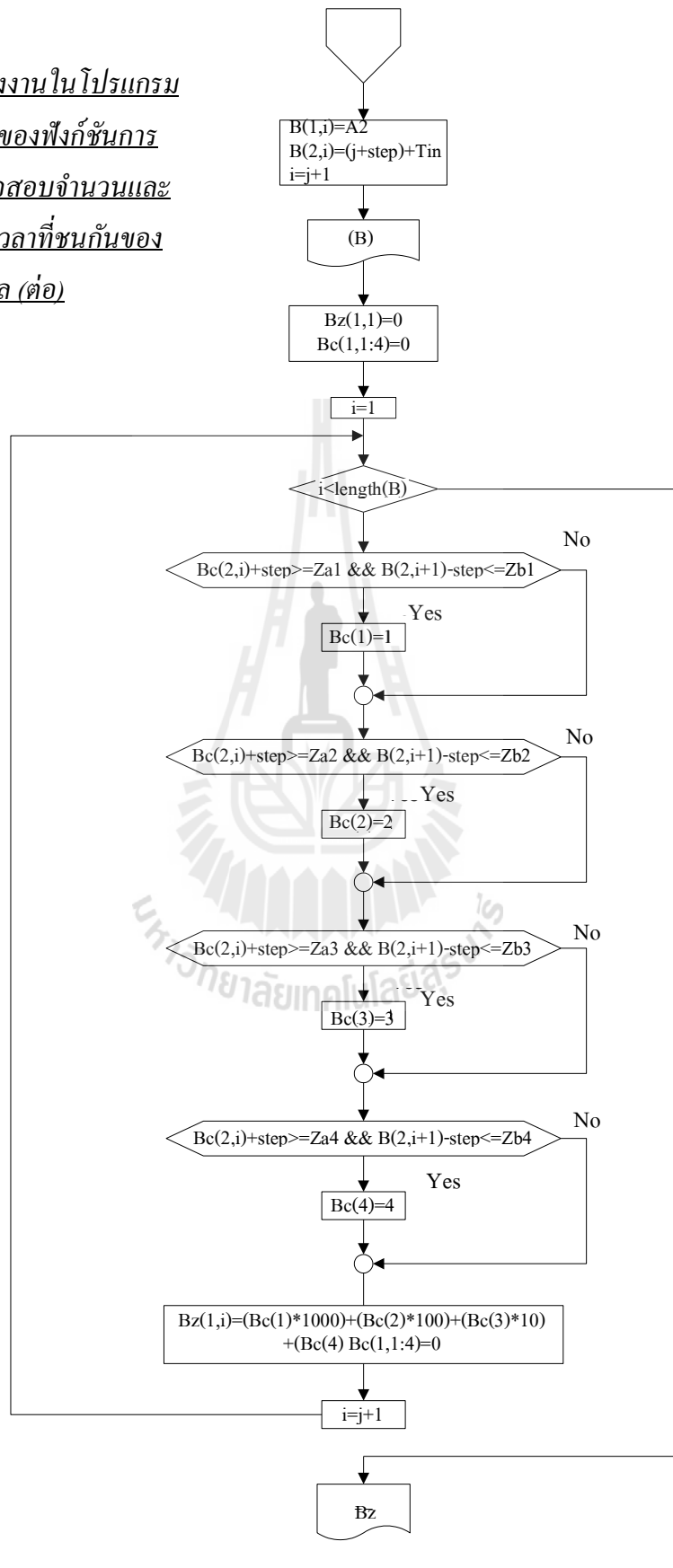
รูปผังงานในโปรแกรม

ส่วนของฟังก์ชันการ

ตรวจสอบจำนวนและ

ช่วงเวลาที่ชนกันของ

ข้อมูล (ต่อ)



รูปผังงานในโปรแกรมส่วนของฟังก์ชันการคำนวณเวลาที่เกิดการชนกันของข้อมูลในระบบเครือข่ายที่ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง

โปรแกรมส่วนนี้จะทำการตรวจสอบช่วงเวลาที่มีการชนกันของข้อมูลในแต่ละครั้งแล้วเก็บสะสมเวลาของจำนวน โหนดจากสัญญาณแทรกสอดที่เหมือนกัน จะอธิบายได้ดังนี้

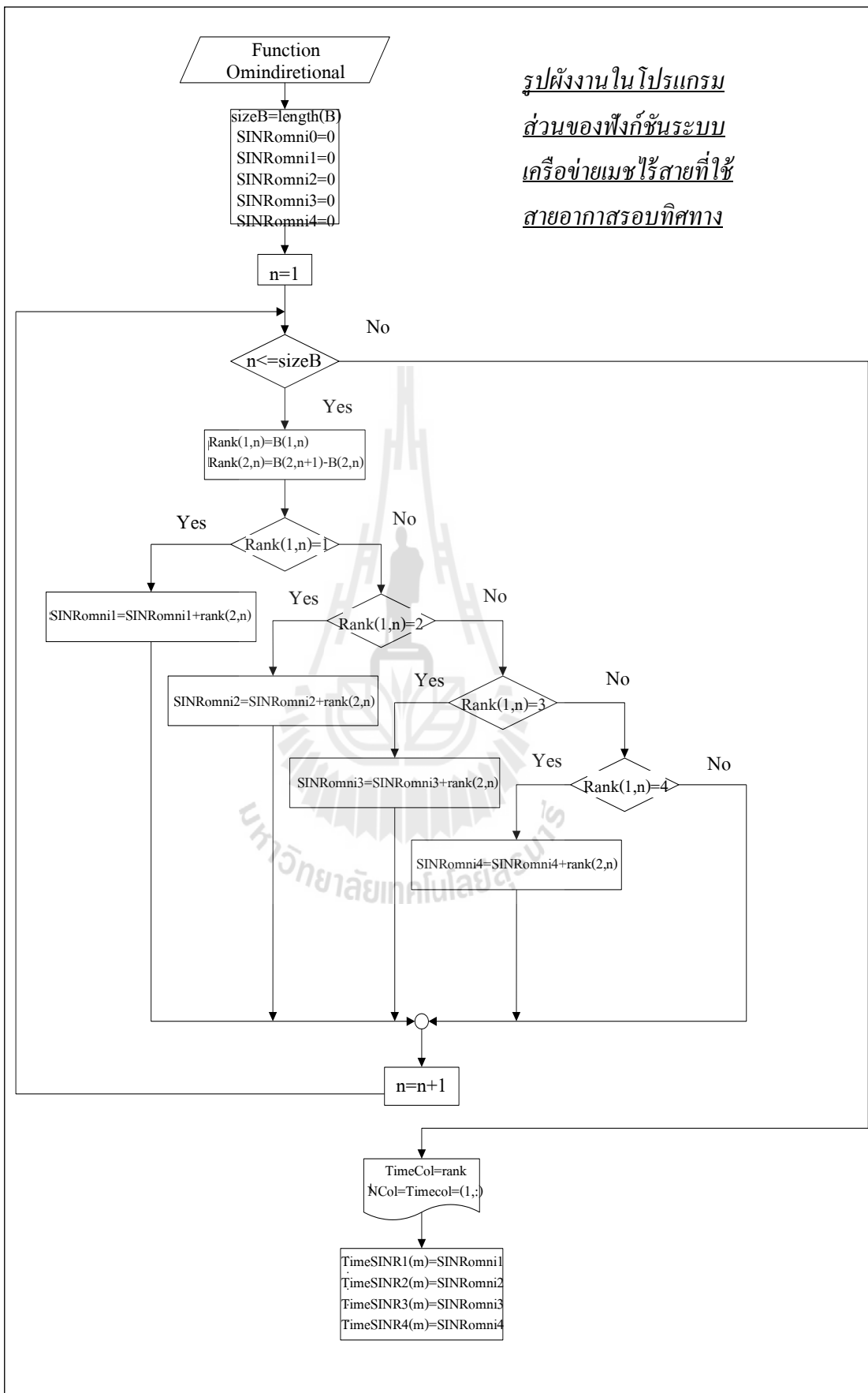
จากรูปที่ ก.5 ค่าของ TC₀₁ เท่ากับ

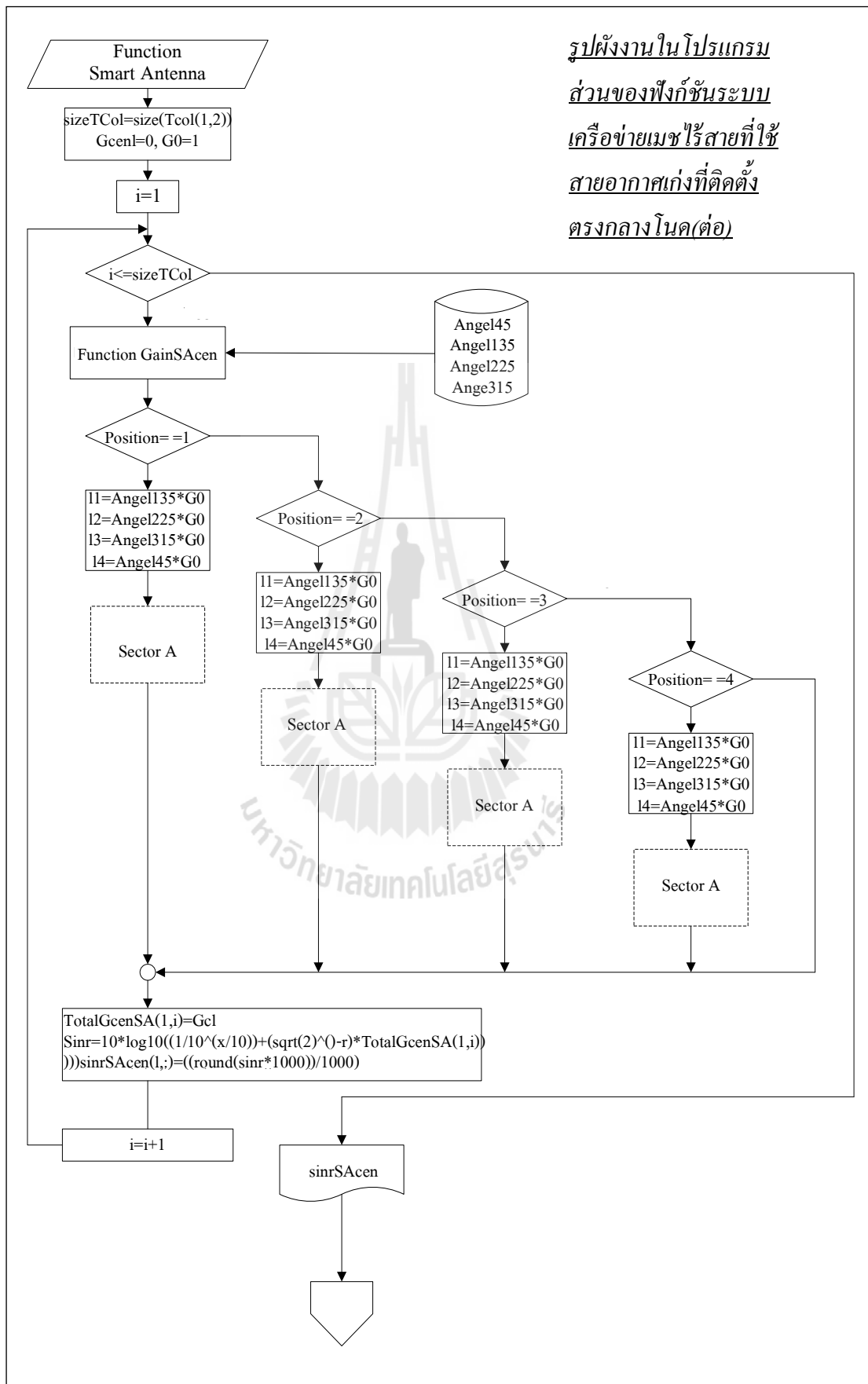
แถวที่ 1	4	3	2	4	3	2
แถวที่ 2	0.078	1.776	0.1460	0.205	0.202	1.123

วิธีคำนวณเวลา

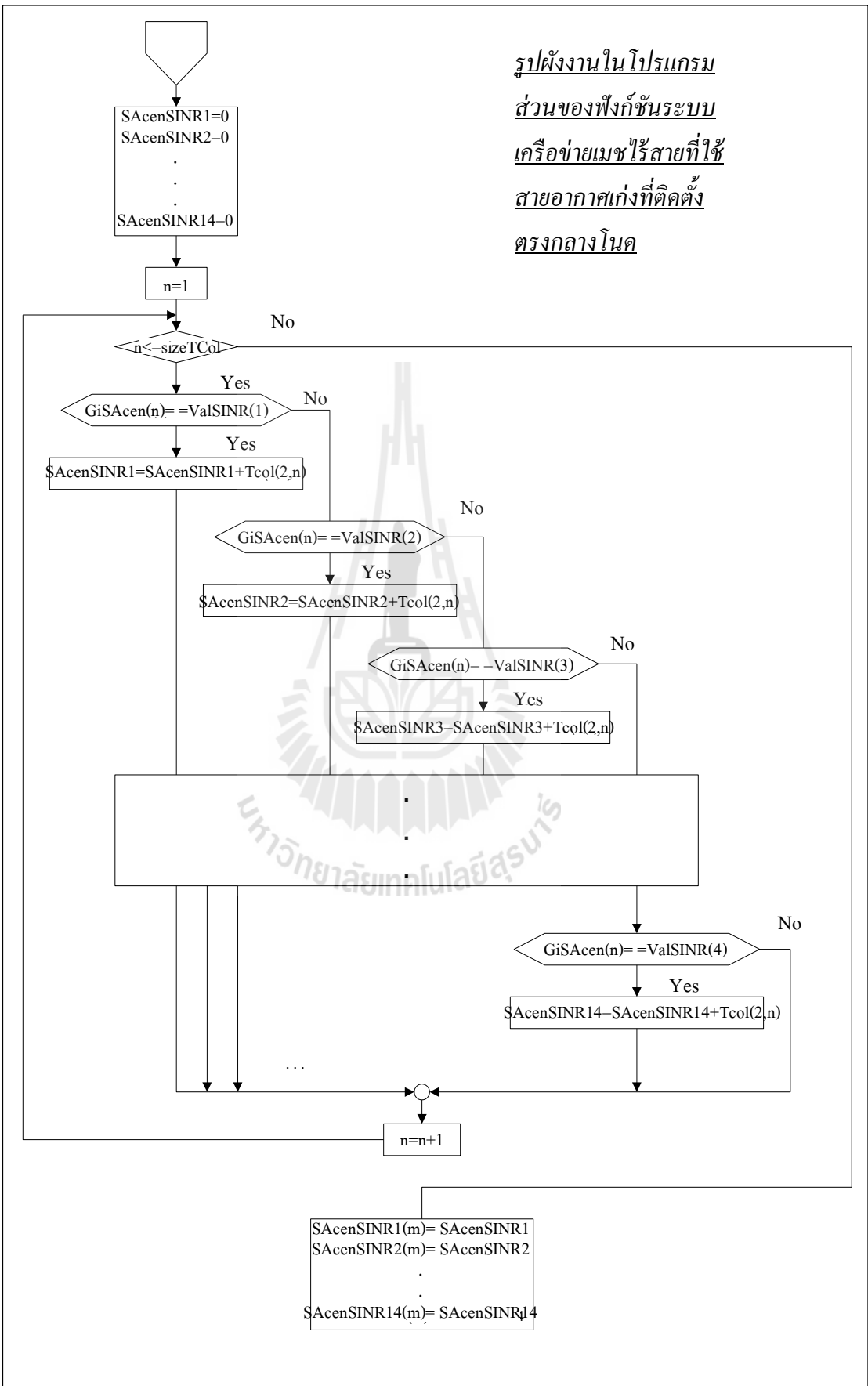
1. จำนวนที่มีโนดชนกันของข้อมูลเท่ากับ 2 จะมีช่วงเวลาทั้งหมดในแพ็คเกจที่ 8 เท่ากับ $0.146 + 1.123 = 1.269$ วินาที
2. จำนวนที่มีโนดชนกันของข้อมูลเท่ากับ 3 จะมีช่วงเวลาทั้งหมดในแพ็คเกจที่ 8 เท่ากับ $1.776 + 0.202 = 1.978$ วินาที
3. จำนวนที่มีโนดชนกันของข้อมูลเท่ากับ 4 จะมีช่วงเวลาทั้งหมดในแพ็คเกจที่ 8 เท่ากับ $0.078 + 0.205 = 0.283$ วินาที

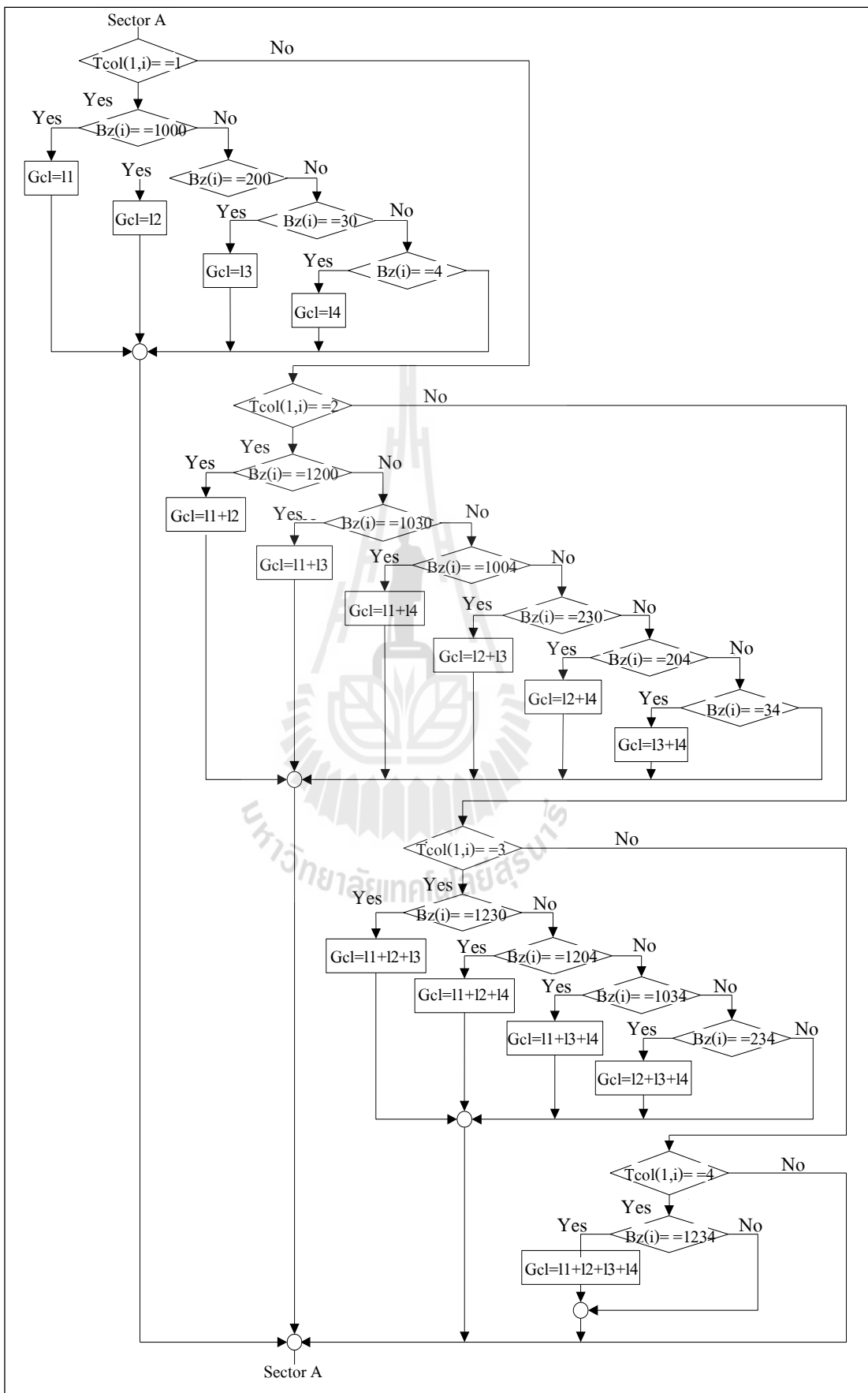
ในการคำนวณเวลาที่เกิดการชนกันของข้อมูลในระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่ใช้สายอากาศเก่งที่ติดตั้งตรงกลาง โหนดและติดตั้งทุก โหนดจะคำนวณในแบบเดียวกัน

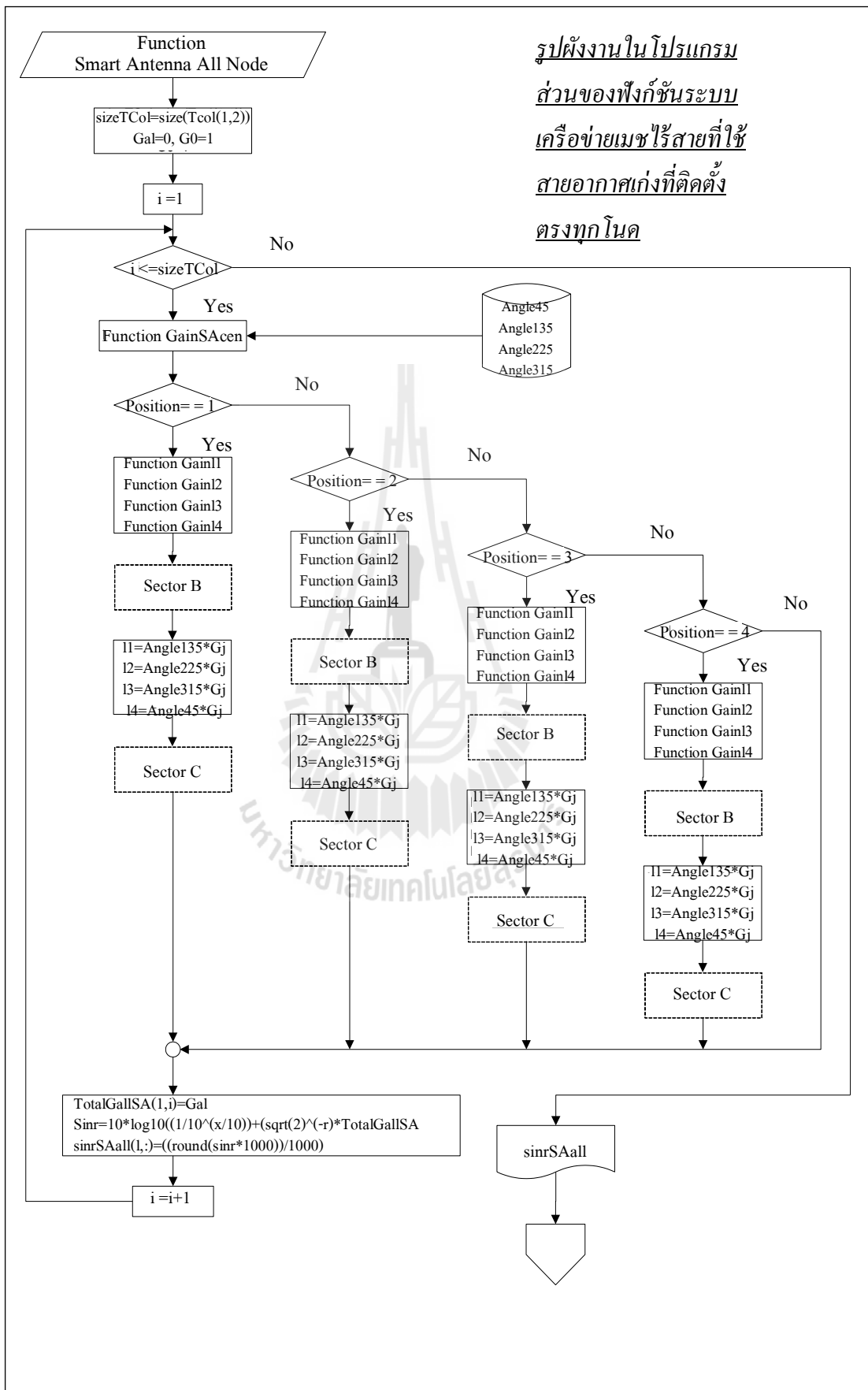




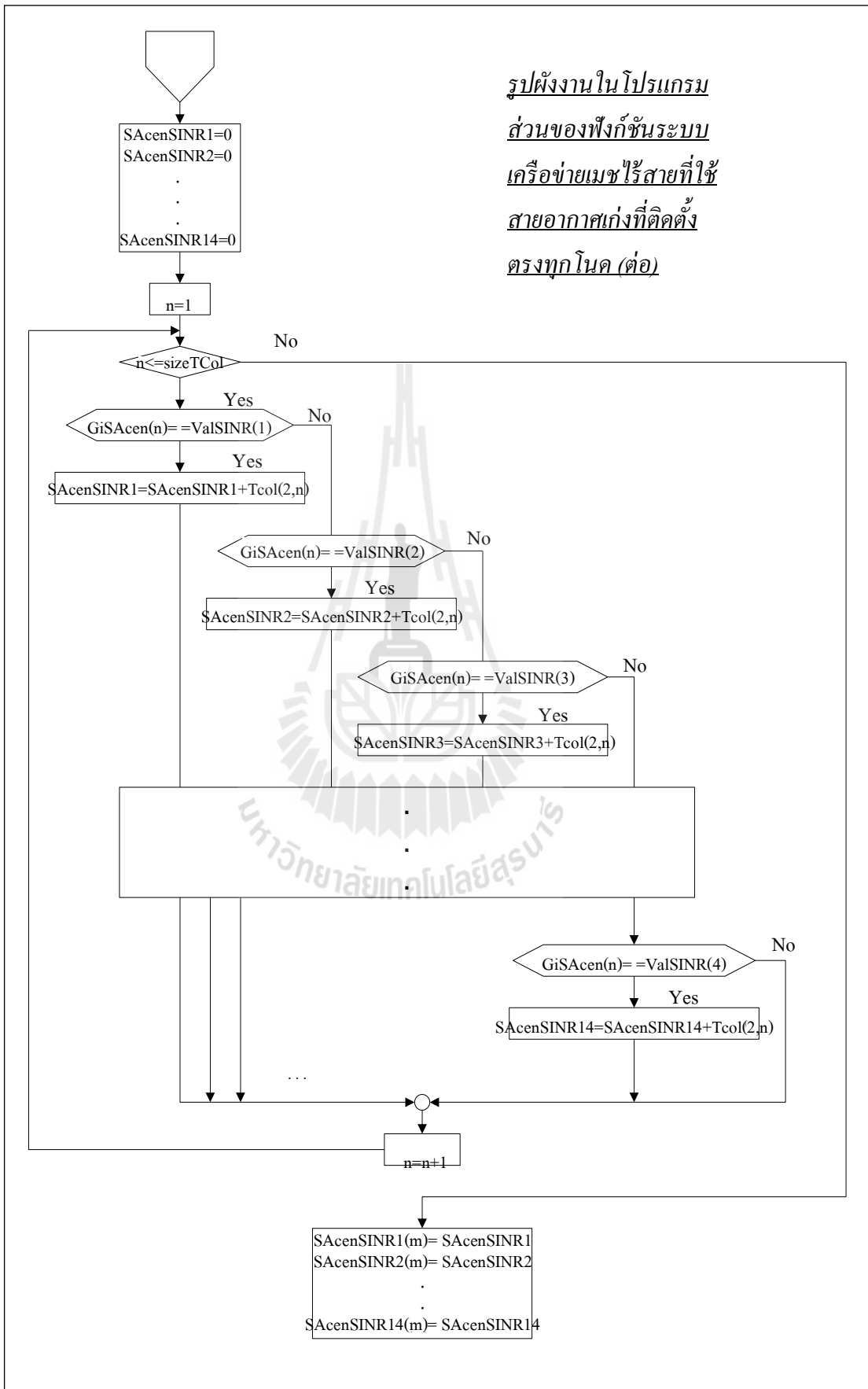
รูปผังงานในโปรแกรม
ส่วนของฟังก์ชันระบบ
เครือข่ายเมชไร้สายที่ใช้
สายอากาศกึ่งที่ติดตั้ง
ตรงกลางโนด

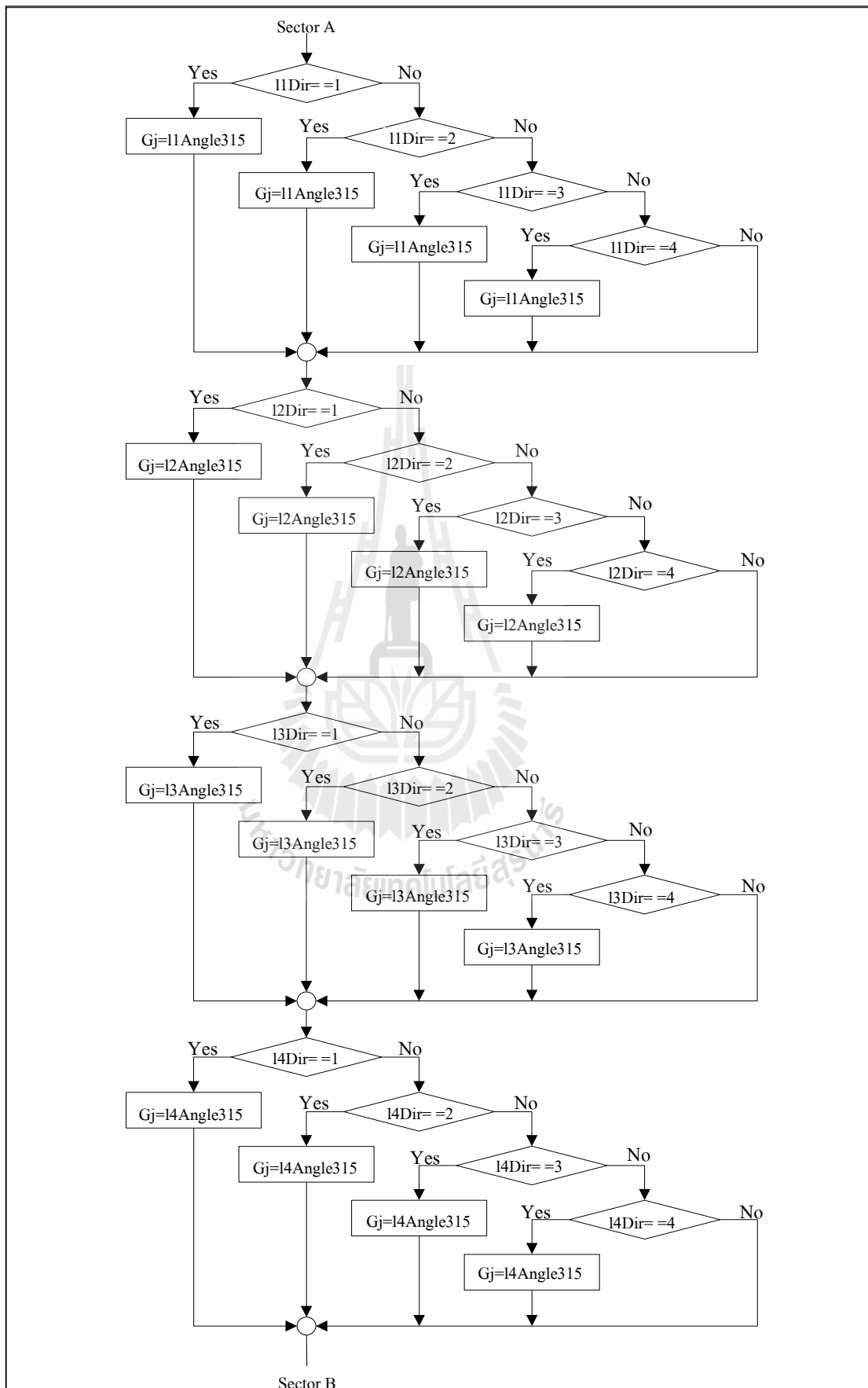


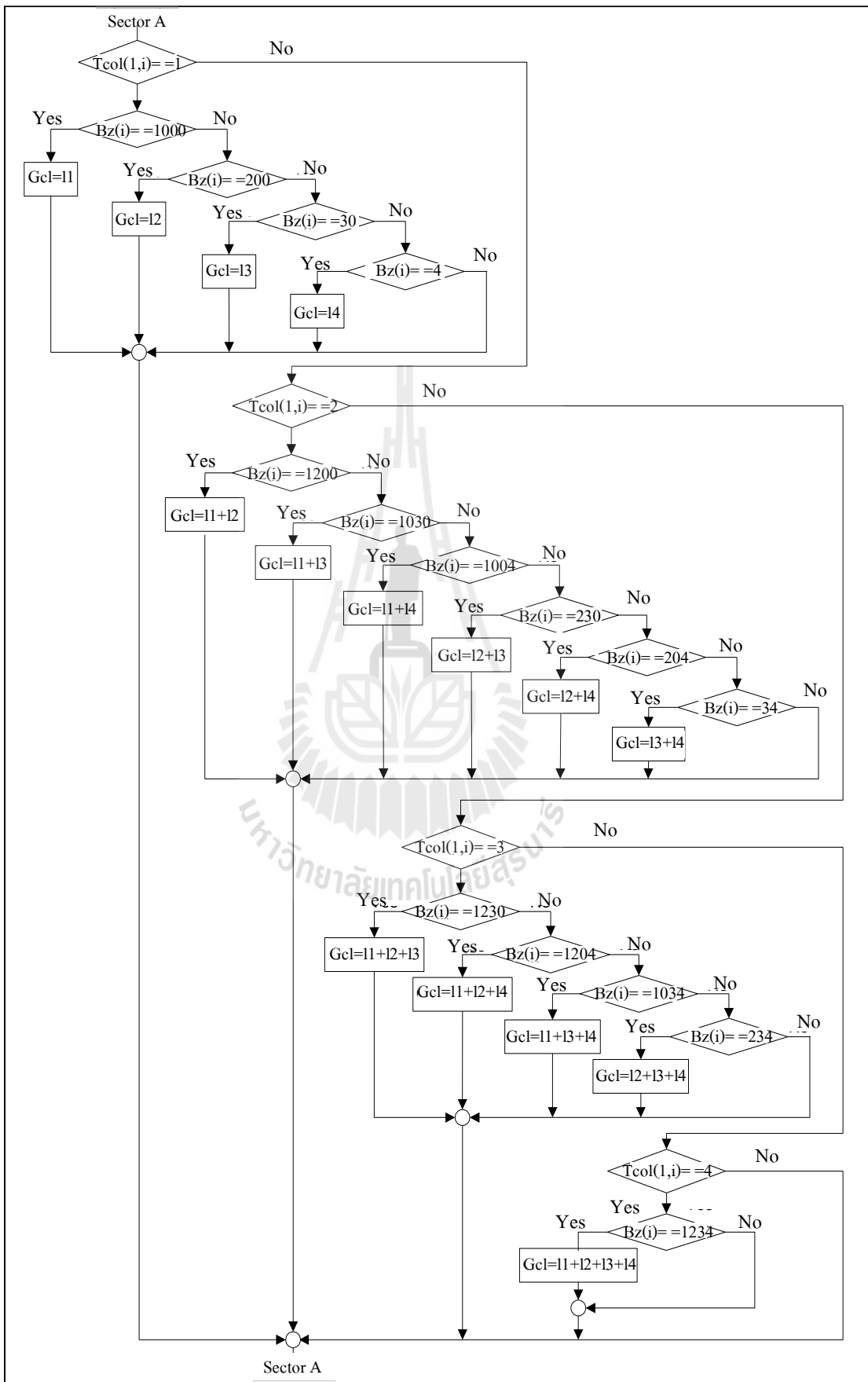




รูปผังงานในโปรแกรม
ส่วนของฟังก์ชันระบบ
เครือข่ายเมชไร้สายที่ใช้
สายอากาศแก่งที่ติดตั้ง
ตรงทุกโนด (ต่อ)



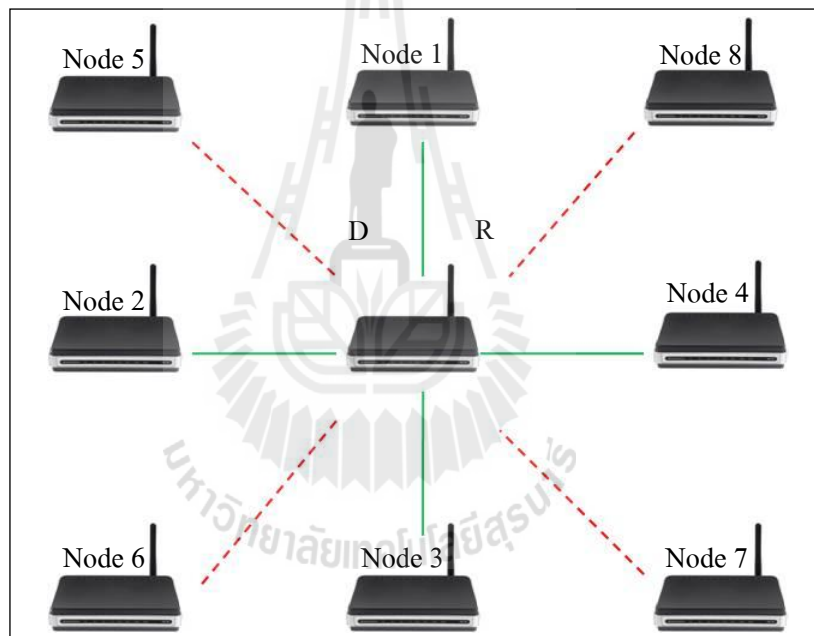




การอธิบายการทำงานของโปรแกรมที่ได้กล่าวมานั้นเป็นโปรแกรมสำหรับระบบเครือข่ายเมชไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยมเท่านั้น อย่างไรก็ตามโปรแกรมสำหรับระบบเครือข่ายเมชไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยมเป็นโปรแกรมแบบเดียวกันเพียงแต่จำนวนโนดที่สนใจจะกำหนดเพิ่มจาก 4 เป็น 6 โหนด และจำนวนโนดของสัญญาณแทรกสอดเพิ่มจาก 4 เป็น 6 เช่นกัน

การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับระบบเครือข่ายเมชไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม

1. กำหนดให้ระยะทางจากโนดตรงกลางไปยังโนดที่สนใจเป็น R และกำหนดให้ระยะทางจากโนดตรงกลางไปยังโนดจากสัญญาณแทรกสอดเป็น D ดังรูปที่ ก.6
2. จากรูปจะได้ว่า $D = \sqrt{2}R$



รูปที่ ก.6 กำหนดตัวแปรระยะทาง

3. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

- $x = 20$

- $SNR (dB) = x$

- $SNR (ratio) = 10^{x/10}$

$$\frac{S}{N} = 10^{x/10} \Rightarrow N = \frac{S}{10^{x/10}}$$

สูตรคำนวณ SINR ของสถานการณ์ที่ 1 สำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
ที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม

กำหนดให้

- S คือกำลังสัญญาณของ โหนดที่สนใจ
 N คือกำลังสัญญาณรบกวน
 I คือกำลังสัญญาณแทรกสอด
 γ คือ Path loss components
 G_n คืออัตราขยายกำลังของสัญญาณจากสายอากาศรอบทิศทาง
 G_i คืออัตราขยายกำลังของสัญญาณจากสายอากาศกึ่งที่โนดตรงกลาง
 G_j คืออัตราขยายกำลังของสัญญาณจากสายอากาศกึ่งที่โนดสัญญาณแทรกสอด
 n คือจำนวน โหนดที่เกิดการชนกันของข้อมูล
 i คือจำนวน โหนดที่เกิดการชนกันของข้อมูล
 j คือจำนวน โหนดที่เกิดการชนกันของข้อมูล

$$SINR = \frac{S}{N + I}$$

$$SINR = \frac{R^{-\gamma}}{\left(\frac{R^{-\gamma}}{10^x/10} \right) + \left(\sum_{k=1}^4 G_n \times D^{-\gamma} \right)}$$

$$SINR = \frac{R^{-\gamma}}{\left(\frac{R^{-\gamma}}{10^{20/10}} \right) + \left(\sum_{k=1}^4 G_n \times (\sqrt{2}R)^{-\gamma} \right)}$$

$$SINR = \frac{1}{\left(10^{-(20/10)} \right) + \left(\sum_{k=1}^4 G_n \times (\sqrt{2})^{-4} \right)} \quad ; \gamma = 4$$

$$SINR = \frac{1}{0.01 + 0.25 \left(\sum_{k=1}^4 G_n \right)}$$

สูตรคำนวณ SINR ของสถานการณ์ที่ 2 สำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
ที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบสี่เหลี่ยม

$$SINR = \frac{S}{N+I}$$

$$SINR = \frac{R^{-\gamma}}{\left(\frac{R^{-\gamma}}{10^x/10}\right) + \left(\sum_{k=1}^4 (G_i \times G_n) \times D^{-\gamma}\right)}$$

$$SINR = \frac{1}{\left(10^{-(20/10)}\right) + \left(\sum_{k=1}^4 (G_i \times G_n) \times (\sqrt{2})^{-4}\right)} \quad ; \gamma=4$$

$$SINR = \frac{1}{0.01 + 0.25 \left(\sum_{k=1}^4 (G_i \times G_n)\right)}$$

สูตรคำนวณ SINR ของสถานการณ์ที่ 3 สำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สายที่วางอุปกรณ์จัด
เส้นทางแบบสี่เหลี่ยม

$$SINR = \frac{S}{N+I}$$

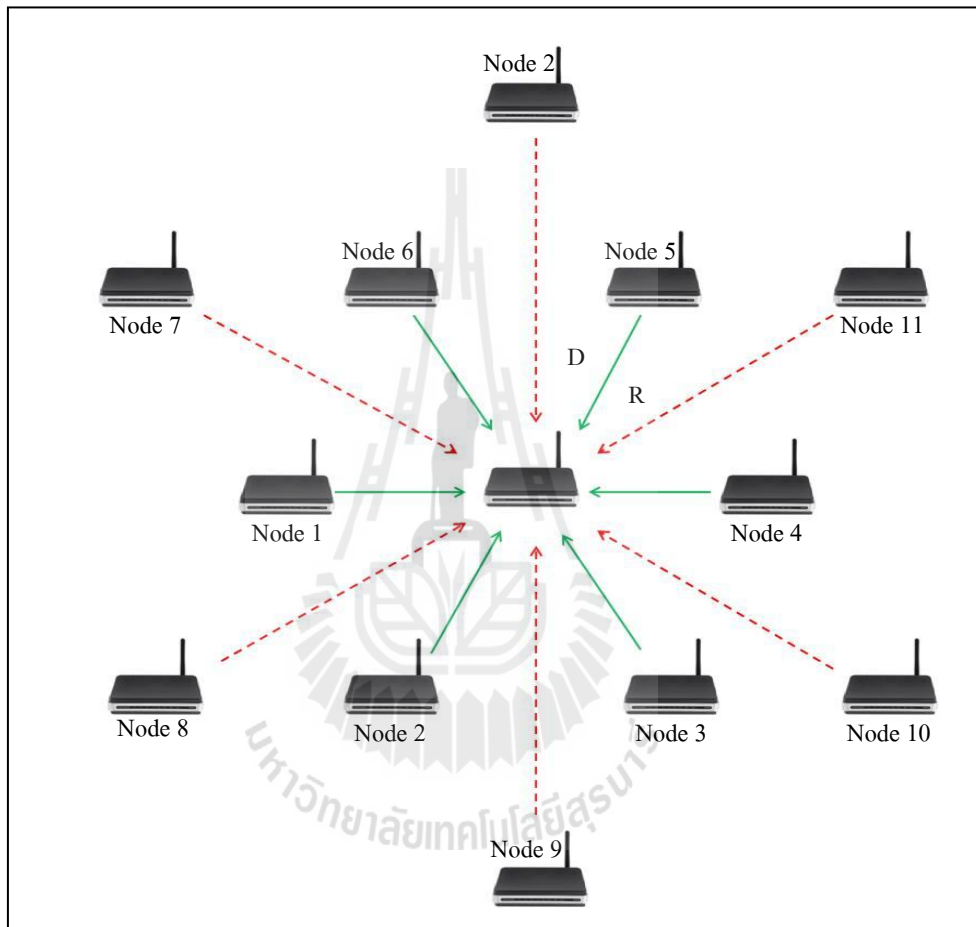
$$SINR = \frac{R^{-\gamma}}{\left(\frac{R^{-\gamma}}{10^x/10}\right) + \left(\sum_{i,j=1}^4 (G_i \times G_j) \times D^{-\gamma}\right)}$$

$$SINR = \frac{1}{\left(10^{-(20/10)}\right) + \left(\sum_{i,j=1}^4 (G_i \times G_j) \times (\sqrt{2})^{-4}\right)} \quad ; \gamma=4$$

$$SINR = \frac{1}{0.01 + 0.25 \left(\sum_{i,j=1}^4 (G_i \times G_j)\right)}$$

การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับระบบเครือข่ายไร้สายที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม

1. กำหนดให้ระยะทางจากโนดตรงกลางไปยังโนดที่สนใจเป็น R และกำหนดให้ระยะทางจากโนดตรงกลางไปยังโนดจากสัญญาณแทรกสอดเป็น D ดังรูปที่ ก.7
2. จากรูปจะได้ว่า $D = \sqrt{3}R$



รูปที่ ก.7 กำหนดตัวแปรระยะทาง

3. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

- $x = 20$
- $SNR (dB) = x$
- $SNR (ratio) = 10^{x/10}$

$$\frac{S}{N} = 10^{x/10} \Rightarrow N = \frac{S}{10^{x/10}}$$

สูตรคำนวณ SINR ของสถานการณ์ที่ 1 สำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
ที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม

$$SINR = \frac{S}{N + I}$$

$$SINR = \frac{R^{-\gamma}}{\left(\frac{R^{-\gamma}}{10^x/10} \right) + \left(\sum_{n=1}^6 G_n \times D^{-\gamma} \right)}$$

$$SINR = \frac{R^{-\gamma}}{\left(\frac{R^{-\gamma}}{10^{20/10}} \right) + \left(\sum_{n=1}^6 G_n \times (\sqrt{3}R)^{-\gamma} \right)}$$

$$SINR = \frac{1}{\left(10^{-(20/10)} \right) + \left(\sum_{n=1}^6 G_n \times (\sqrt{3})^{-4} \right)} \quad ; \gamma = 4$$

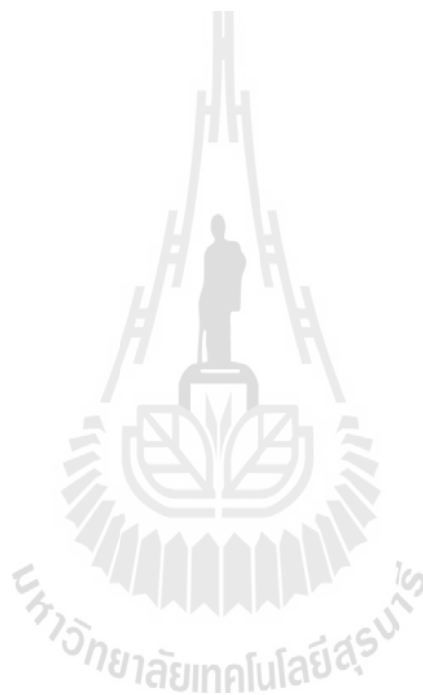
$$SINR = \frac{1}{0.01 + 0.111 \left(\sum_{n=1}^6 G_n \right)}$$

สูตรคำนวณ SINR ของสถานการณ์ที่ 2 สำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
ที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม

$$SINR = \frac{1}{0.01 + 0.111 \left(\sum_{i,n=1}^6 (G_i \times G_n) \right)}$$

สูตรคำนวณ SINR ของสถานการณ์ที่ 3 สำหรับระบบเครือข่ายเมฆไร้สาย
ที่วางอุปกรณ์จัดเส้นทางแบบหกเหลี่ยม

$$SINR = \frac{1}{0.01 + 0.111 \left(\sum_{i,j=1}^6 (G_i \times G_j) \right)}$$





ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Pangam, S., Uthansakul, P., and Uthansakul, M., (2010) **Performance of Switched-beam Antennas for Wireless Mesh Networks using Synchronous Collision Resolution Protocol.** The 2010 International Conference on Computer and Information Application, Tianjin, China, 3-5 Dec. 2010 : pp 430-433.



Performance of Switched-beam Antennas for Wireless Mesh Networks using Synchronous Collision Resolution Protocol

Sineenart Pannang, Peerapong Uthansakul and Monthippa Uthansakul

School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000
e-mail: m5240036@g.sut.ac.th, uthansakul@sut.ac.th and uthansakul@sut.ac.th

Abstract— The use of switched-beam antennas for Wireless Mesh Networks (WMNs) has gained a lot of attention recently. However, it has not been concluded yet which protocol is suitable for this approach. One interesting protocol named as Synchronous Collision Resolution (SCR) has been proposed to manage the packet schedule between mesh routers. The SCR concept is of advantage over other protocols such as CSMA/CA and TDMA. Nevertheless, the evaluation of SCR protocol has never been performed in literatures so far. Therefore, in this paper, the study of switched-beam antennas in cooperating with SCR protocol is proposed by concerning both desired and interference mesh routers. The simulation results confirm the success of using switched-beam antennas for WMN using SCR protocol.

Keywords— Beamforming, Switched-beam antennas, Smart Antennas, Wireless Mesh Networks (WMNs)

I. INTRODUCTION

In WLANs, access points communicate to each other using cables. This causes an expense and somehow introduces difficulty in accessibility for some areas. To tackle these impairments, the idea of exploiting radio signal instead of cables has been recently proposed, so called Wireless Mesh Networks (WMNs) [1]. These networks are constituted by radio nodes organized in a mesh topology. Apart from benefits in environment that lack communication infrastructures, they also offer redundancy. Once one node can no longer operate, the rest can communicate to each other directly or through one or more intermediate nodes. To this end, a draft extension of the IEEE 802.11 standard for WMNs is under development [2].

Switched-beam antennas, considered as one technique of smart antenna technology, are the practically promising techniques to enhance the capability of wireless communication systems. For WMNs, both mesh routers and gateway totally communicate to each other through air interface. Hence, performance improvements in WMNs can be expected by using switched-beam antennas. In literatures, there are many studies of applying smart antennas to WMNs [3]-[5]. In [3], a better routing scheme is achieved when smart antennas are operated. Also the study in [4] confirms the benefits of smart antennas in WMNs by increasing available throughputs. In [5], the coverage area can be improved when using smart antenna technique. However, it has not been concluded yet which protocol is suitable for applying smart antenna to WMNs. In [6], IEEE organization plans to use a new Medium Access Control (MAC) protocol

as a standard for WMNs. The new protocol named as Synchronous Collision Resolution (SCR) is a contention based access protocol to schedule a packet flows between mesh routers in WMNs. It is especially well-suited for the use with smart antennas. It has been shown in [6] that its conceptual study provides more benefits than CSMA/CA and TDMA protocols. Also SCR protocol can be matched with the infrastructure of conventional WLANs. Unfortunately, there has never been the illustration of its performances so far presented in literatures.

In this paper, the performance evaluation of using switched-beam antennas in cooperating with SCR protocols is presented. Moreover, the interference signals from neighboring mesh routers are also included in the investigations. Although many works neglect to include these interference but one of the true benefits of using smart antennas is to reduce an interference problem.

The remainder of paper is organized as follows. Section II describes the details of related concepts such as SCR protocol, switched-beam antennas and queuing theory. Then the problem of interference conditions is explained in Section III. Section IV provides an aspect of simulation scenarios. In Section V, simulation results and discussion are given. In this paper, the results in term of Signal to Interference Ratio (SIR) are of interest to justify the system merits under interference conditions. Finally, Section VI presents the conclusions of this paper.

II. RELATED CONCEPTS

The constituent of scenario exploring the impact of using switched-beam antennas in cooperating with SCR protocol for WMNs has three main concepts including SCR protocol, switched-beam antennas and queuing theory.

A. Synchronous Collision Resolution (SCR) MAC Protocol

Synchronous Collision Resolution (SCR) [6]-[7] is a broad MAC definition and viewed as an access framework in which there are many possible designs. The benefits of SCR protocol are far reaching and several sequel stories, which have been published in literatures. The SCR protocol has the significant four characteristics as follows:

- 1) *The wireless channel is slotted.*
- 2) *All nodes with packets to transmit attempt to gain access to every transmission slot.*
- 3) *Contending nodes use signaling to arbitrate their access.*

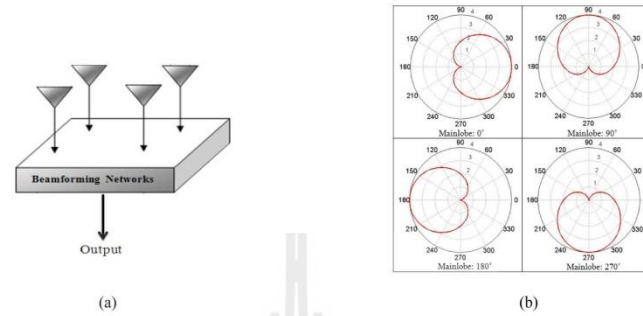


Figure 1. 2x2 Switched-beam antennas (a) configuration (b) simulated radiation pattern at 0°, 90°, 180° and 270°

4) All packet transmissions occurring during a transmission slot are sent simultaneously.

Design choices that determine capabilities of SCR are the size and framing of transmission slots, the use of the RTS-CTS handshake packets, and the specific details of signaling. Switched-beam Antennas

In general, smart antennas consist of processing unit and array antennas in which signals are intelligently combined to exploit the spatial domain and improve the performance of wireless communication systems. This paper chooses switched-beam antennas as one type of smart antenna technology to apply in WMNs. This type of smart antenna can switch main beam to some fixed directions. It is the simplest technique and easiest to retro-fit to existing wireless technologies. In this paper, the switched-beam antennas consist of 2x2 array antennas as shown in Figure 1(a). The reason of that is to keep a compact size for real installation. Figure 1(b) shows the simulated radiation patterns for those 4 beam patterns which provide beam directions at 0°, 90°, 180° and 270° simultaneously. As we can see, its main beam can be successfully steered to the predefined directions.

B. Queuing Theory

To realize the packet behavior of WMNs, this paper adopts a simple queuing model referred to M/M/1/∞ queue [8]. This model assumes a Poisson distribution for packet arrivals and exponential distribution for service times with a single server and infinite waiting space. In general, we find that the analysis of a single server queue is attractive because it is generally more tractable than the analysis of a multi-server queue. Furthermore, bounding results may be obtained by considering a system with n parallel single server queues where an arriving customer can join any of the queues randomly.

Queuing systems are an optimal reference model for research and development in communication areas. A basic structure of queuing systems is depicted in Figure 2. For the traffic intensity of M/M/1 queuing systems expressed as $\rho = \lambda / \mu$ where ρ is the traffic intensity, λ is the mean

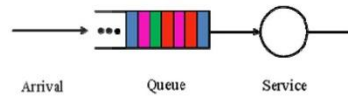


Figure 2. Queuing system

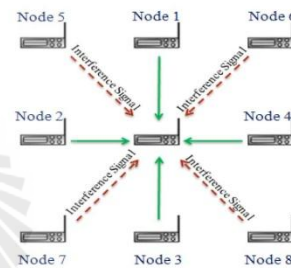


Figure 3. Configuration and direction of signals in WMNs

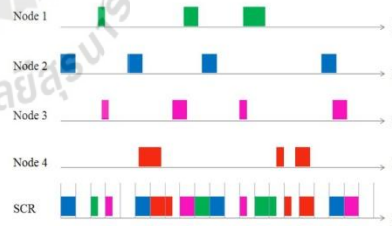


Figure 4. Example of packet arrivals in WMNs

arrival rate and μ is the mean service rate. The queue shown in Figure 2 is referred to receiving nodes which the center node is presented in Figure 3. For packet arrivals, it is assumed as a Poisson distribution. The arrival in Figure 2 can be any packets generated from any four surrounding nodes. To illustrate how it works in simulations, Figure 4

depicts an example of packet generated by four surrounding nodes (Nodes 1, 2, 3 and 4) and the outcome of all sending packets when using SCR protocol at queue of receiver (center node).

III. INTERFERENCE PROBLEM

As mentioned earlier, this paper focuses on the interference problem in WMNs [9]. Although SCR protocol is implemented to avoid the collision between transmitting nodes, like interference free, but it is still possible to get an unintentional interfering signals from other nodes. Figure 3 depicts the situations of interference problem in WMNs. It is assumed that the communications between nodes are possible only for vertical and horizontal links due to the fact that these links are shorter than diagonal links. Hence, while the corner nodes are sending their packets, the center node can receive these signals unintentionally so called as interference signals. These interference signals hamper coverage and capacity as well as limit the effectiveness of existing systems.

To illustrate the effect of interference signals, Figure 5 depicts an example of packet collisions on the outcome of SCR protocol given in Figure 4. As seen in this figure, most of the packet durations received at center node is collided with the signals from interference nodes. The results indicate the necessity of using smart antennas to decrease interferences signals.

IV. SIMULATION SCENARIOS

In simulations, the distances between neighboring nodes along the horizontal and vertical links are the same. The index to evaluate system performance is a Signal to Interference Ratio (SIR) which is the ratio of desired signal power to power of interference signals. The SIR is an important entity in communication systems, which indicates the quality of connection between source and destination.

In order to evaluate the performance of WMNs using switched-beam antennas under interference conditions, three scenarios are presented. Firstly, all nodes operate with omni-directional antennas as shown in Figure 6(a). This scenario is the conventional system without using switched-beam antennas. For second scenario, the center node only employs switched-beam antennas. This scenario is depicted in Figure 6(b). In this scenario, it can be analogous that the center node is a gateway. It is interesting to observe system performance when only gateway upgrades to use switched-beam antennas. For last scenarios shown in Figure 6(c), all nodes operate switched-beam antennas. Next, three experiments will be performed to indicate the performance of WMNs as follows.

Experiment 1: Assuming the mean arrival rate (λ) is 0.5 and the traffic intensity (ρ) are 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 and 0.9.

Experiment 2: Fix the mean service rate (μ) is 0.5 and the traffic intensity (ρ) are 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 and 0.9.

Experiment 3: Assuming the mean arrival time rate (λ) is 0.5 and the traffic intensity (ρ) is 0.5, in order to show SIR probability distribution.

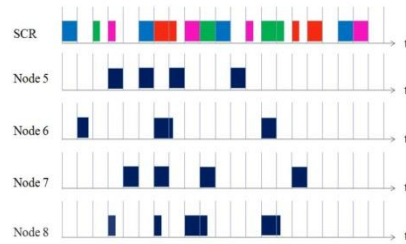


Figure 5. Example of packet collisions due to interference signals

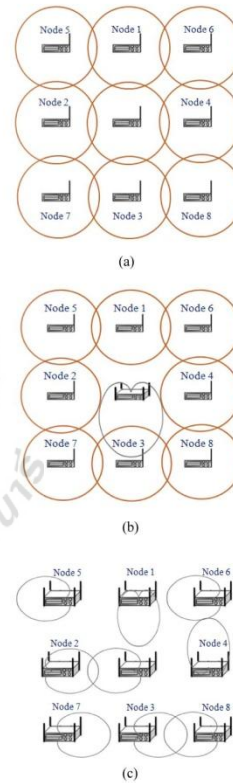
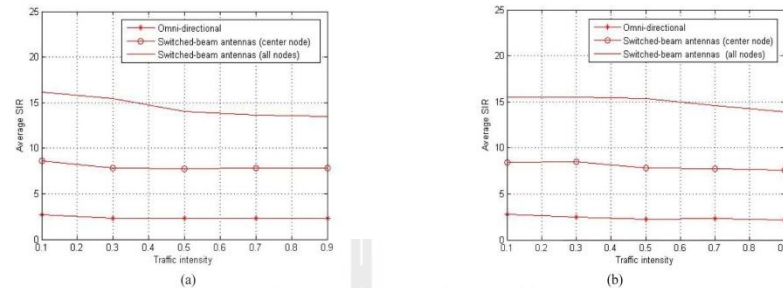


Figure 6. WMNs simulation scenarios (a) Omni-directional antenna for all nodes, (b) Switched-beam antennas placed at the center node and (c) Switched-beam antennas placed at all nodes

Figure 7. Average SIR vs traffic intensity (ρ)(a) Fixed $\lambda = 0.5$ (b) Fixed $\mu = 0.5$

V. RESULTS AND DISCUSSION

The simulation results of traffic intensity vs average SIR are shown in Figures 7(a) and 7(b). We can see the average SIR obtained from using switched-beam antennas in two scenarios is higher than omni-directional scenario. The average SIR of using switched-beam antennas for all nodes approximately gain 12 dB higher than omni-directional scenario and 6 dB higher than using switched-beam antennas at center node.

In Figure 8, the probability distribution of SIR for switched-beam antennas (placed all nodes) occurs on the area of the highest SIR while the probability distribution of omni-directional antenna distributes on area of the smallest SIR.

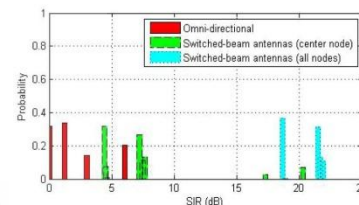
From the results of above three simulation experiments, it can confirm the use of switched-beam antenna in cooperating with SCR protocol for WMNs. Also the results reveal that switched-beam antennas can avoid the interference problem more effectively even it is used on only one node at the center.

VI. CONCLUSION

In this paper, the investigation into performance of WMNs using switched-beam antennas in cooperating with SCR protocol has been presented. Our contribution is the illustration of SCR protocol that works together with smart antennas to manage contention access in WMNs. Moreover, the interference problem has been considered and examined. The results show that using switched-beam antennas can improve the quality of SIR in comparison with using omni-directional antenna. For the future work, the real measurements to confirm the simulation results will be undertaken. Also the other type of smart antennas might be involved in the performance analysis.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the financial support from Suranaree University of Technology, Thailand.

Figure 8. Probability distribution of SIR for traffic intensity (ρ) = 0.5

REFERENCES

- [1] Ian F. Akyildiz, Xudong Wang, and Weilin Wang, "Wireless Mesh Networks: A Survey," *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 4, pp. 445-487, March 2005.
- [2] F. Babich, M. Comisso and L. Mania, "Multi-Antenna Techniques for Wireless Mesh Networks in an Outdoor Environment," *Communications ICC '07 IEEE International Conference*, pp.4961-4966, June 2007.
- [3] Skanda N. Muthaiah, Aravind Iyer, Aditya Kamik and Catherine Rosenberg, "Design of High Throughput Scheduled Mesh Networks: A Case for Directional Antennas" *IEEE GLOBECOM 2007*, pp. 5080-5085
- [4] Zhang Yong, Wei Yi-fei, Zhang Li-kun and Song Jun-de, "Simulation and analysis of node throughput using smart antennas in wireless mesh networks" *The journal of China Universities of posts and Telecommunications* Volume 14, Issue2, pp. 28-50, June 2007
- [5] Norihiko Sato and Takeo Fujii, "Multi Antenna Utilization Scheme for Congestion Avoidance around the Gateway for Wireless Mesh Network" *The 18th Annual IEEE International Symposium on PIMRC 2007*, pp.1-5, September 2007
- [6] John A. stine and The Mitre Corporation, "Exploiting Smart Antenna in Wireless Mesh Network Using Contention Access" *IEEE Wireless Communications*, pp.38-49, April 2006
- [7] Honglin Hu, Yan Zhang and Jijun Luo, "Distuted Antenna System: OpenArchitecture for Future Wireless Communications", pp.201-239, June 2007
- [8] Alberto Leon-Garcia "Probability and Random Processes for Electrical Engineering" Second Edition, pp.499-559, May 1994
- [9] Kanak Jain, Jitendra Padhye, Venkata N. Padmanavhan and Lili Qiu, "Impact of Interference on Multi-Hop Wireless Network Performance" *Wireless Networks* vol. 11, pp.471-487, 2005.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสินีนากู แป้นงาม เกิดเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม 2526 ที่จังหวัดชลบุรี เริ่มการศึกษา
ระดับประถม ที่โรงเรียนบ้านอำเภอ ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนสัจจวิทยาคม จังหวัด
ชลบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2551 จากนั้น
ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
ณ สถาบันการศึกษาเดิม

โดยขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่
ระดับนานาชาติจำนวน 1 ฉบับ โดยมีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ข.

