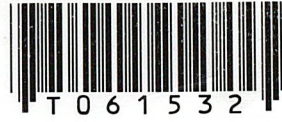


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



สายอากาศอัตรการขยายสูงทิศทางเดียวสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร
High Gain with Unidirectional Beam Antenna for Outdoor Wireless Local Area Network

โดย

นางกมลลดา สุโกศล 45015001
นายจรูญ ตะเภทอง 45015003
นายจิรยุทธ มาลาวงษ์ 45015004

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์
รศ.ดร. สมพล โกศลวิตร

61532
ยน 18 ก.ค. 2549
เป็

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

สายอากาศอัตรการขยายสูงทิศทางเดียวสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร
A High Gain with Unidirectional Beam Antenna for Outdoor Wireless Local Area Network

โดย

นางกมลลดา สุโกศล

นายจรูญ ตะเภทอง

นายจिरยุทธ มาลาวงษ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

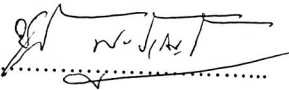
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง สายอากาศอัตรการขยายสูงทิศทางเดียวสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร

A High Gain with Unidirectional Beam Antenna for Outdoor Wireless Local Area Network

ผู้จัดทำ

1. นางกมลดา สุโกศล 45015001
2. นายจรรุญ ตะเภททอง 45015003
3. นายจิริยุทธ มาลาวงษ์ 45015004


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร)

สายอากาศอัตรการขยายสูงทิศทางเดียวสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร
A High Gain with Unidirectional Beam Antenna for Outdoor Wireless Local Area Network

โดย นางกมลลดา สุโกศล 45015001
นายจรรณู ตะเกาทอง 45015003
นายจิรยุทธ มาลาวงษ์ 45015004

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบและการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศอัตรการขยายสูงทิศทางเดียวสำหรับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร โดยทำการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศก่อน แล้วทำการประเมินคุณสมบัติของสายอากาศในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นจะใช้วิธีเทคนิคสองรังสี (two – ray model) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ระยะทาง ความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate) ค่าวิสัยสามารถ (throughput) ที่สูงสุดได้นำสายอากาศที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์มาทำการสร้างและทดสอบ ตลอดจนประเมินประสิทธิภาพเทียบกับสายอากาศไดโพลซึ่งใช้เป็นสายอากาศอ้างอิง วิธีการประเมินและผลที่ได้นี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ต่อไป

Abstract

This project presents the design and evaluation of a high gain with unidirectional beam antenna for outdoor wireless local area network. The antenna properties is firstly characterized and designed. The two-ray model plays a vital role in evaluating the antenna performance in the outdoor wireless LAN system. The link distance, bit error rate, throughput is also estimated. Finally, the antenna prototype is also fabricated and measured. The results are compared with the reference dipole antenna. The results of this project are very useful for the wireless LAN system in the outdoor environment.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 สายอากาศอัตรายายสูงทิศทางเดียว	2
2.1 โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงกลม	2
2.2 สายอากาศแบบทิศทางเดียว (Unidirectional Antenna)	5
2.3 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม (Corner Reflector)	6
2.4 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศวงแหวนแบบวงกลม	7
2.4.1 การพิจารณาคาร์ซีและ ความยาวของตัวสายอากาศวงแหวนแบบวงกลม	7
2.4.2 การพิจารณาค่าความยาวโพรบ	9
2.4.3 การพิจารณาค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งาน	11
2.4.4 การพิจารณาค่าขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม	12
2.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	16
2.5.1 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	16
2.5.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง	17
2.5.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก	18
2.5.4 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	19
2.5.5 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลัง	20
2.5.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ	21
2.6 การออกแบบสร้าง	22
2.7 การทดสอบ	25
2.8 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ	27
2.9 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	31
2.10 ผลการทดสอบหาอัตรายายของสายอากาศ (Gain)	33
2.11 สรุป	34
บทที่ 3 การวิเคราะห์แบบจำลองอากาศว่าง และแบบจำลองสองรังสี	35
3.1 แบบจำลองอากาศว่าง	35
3.2 แบบจำลองสองรังสี	37
3.3 สรุป	43
บทที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11	44
4.1 บทนำ	44
4.2 พื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11	44
4.2.1 โทโปโลยี (Topology)	44
4.2.2 การควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control)	44

4.2.3 รูปแบบเฟรม	45
4.2.4 ชั้นสื่อสารกายภาพ	46
4.2.5 ค่าวิสัยสามารถอุณหภูมิต่ำที่สุด	46
4.3 ระยะเวลาบริการสูงสุด	48
4.4 อัตราผิดพลาดแพ็คเกจและค่าวิสัยสามารถ	49
4.5 สรุป	50
บทที่ 5 การประเมินประสิทธิภาพและผลการทดสอบ	51
5.1 การทดสอบประสิทธิภาพ	51
5.2 การวัดกำลังงานรับและผลการทดสอบระยะเวลาบริการ	53
5.3 การทดสอบค่าวิสัยสามารถ	53
5.4 ผลการทดสอบระยะเวลาบริการและค่าวิสัยสามารถที่ Transmission Data Rate 11 Mbps	54
5.5 สรุป	55
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	56
ภาคผนวก	57
ภาคผนวก ก	58
ภาคผนวก ข	60
ภาคผนวก ค	101
ภาคผนวก ง	103
ภาคผนวก จ	104
กิตติกรรมประกาศ	112
เอกสารอ้างอิง	113

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม	2
รูปที่ 2.2 โครงสร้างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม	6
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับความยาวของวงแหวนแบบวงกลม ในแต่ละค่ารัศมีของวงแหวน	8
รูปที่ 2.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019 λ มีค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.185 λ 0.285 λ และ 0.35 λ	8
รูปที่ 2.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014 λ มีค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.15 λ 0.285 λ และ 0.35 λ	9
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า VSWR กับความยาวโพรบในแต่ละค่ารัศมีของวง แหวนแบบวงกลม	10
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับความยาวโพรบ ในแต่ละค่ารัศมีของ วงแหวนแบบวงกลม	10
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับความยาวโพรบ ในแต่ละค่ารัศมี ของวงแหวนแบบวงกลม	11
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความถี่ที่ใช้งานกับค่า VSWR และค่าการสูญเสียย้อนกลับ (return loss) ในแต่ละค่ารัศมีของวงแหวนแบบวงกลม	12
รูปที่ 2.11 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยมีขนาดของความยาวเท่ากับสองเท่าของระยะห่าง ระหว่างตัวป้อนสัญญาณกับตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่มีมุมเท่ากับ 90°	12
รูปที่ 2.12 ผลการวิเคราะห์หาความยาวของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019 λ วางใกล้ตัวสะท้อน คลื่นแบบ มุม 90°	13
รูปที่ 2.13 ผลการวิเคราะห์หาความยาวของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014 λ วางใกล้ตัวสะท้อน คลื่นแบบ มุม 90°	14
รูปที่ 2.14 ผลการวิเคราะห์หาความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019 λ วางใกล้ตัวสะท้อน คลื่นแบบ มุม 90°	15
รูปที่ 2.15 ผลการวิเคราะห์หาความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยใช้โปรแกรม NEC 2 ในกรณีวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014 λ วางใกล้ตัวสะท้อนคลื่นแบบ มุม 90°	15

รูปที่ 2.16	ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม	16
รูปที่ 2.17	ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม	17
รูปที่ 2.18	ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม	18
รูปที่ 2.19	ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม	19
รูปที่ 2.20	ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม	20
รูปที่ 2.21	ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม	21
รูปที่ 2.22	สายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมมีค่ารีซีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ	22
รูปที่ 2.23	สายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมมีค่ารีซีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ	23
รูปที่ 2.24	ลักษณะของ Connector SMA 50Ω และ Connector N - type 50Ω	23
รูปที่ 2.25	สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมที่มีค่ารีซีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ	24
รูปที่ 2.26	สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมที่มีค่ารีซีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ	24
รูปที่ 2.27	แสดงการต่อสายอากาศที่จะทำการวัดค่าพารามิเตอร์เข้ากับเครื่อง Network Analyzer	25
รูปที่ 2.28	การจัดวางสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม ภายในห้องทดสอบโดยสายอากาศที่สร้างขึ้นทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ	26
รูปที่ 2.29	การวางสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมในระนาบสนามไฟฟ้าภายในห้องทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	26
รูปที่ 2.30	การวางสายสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมในระนาบสนามแม่เหล็กภายในห้องทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	27
รูปที่ 2.31	ตัวอย่างผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม	27
รูปที่ 2.32	ตัวอย่างผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม	28
รูปที่ 2.33	ตัวอย่างผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม	28
รูปที่ 2.34	ผลการทดสอบสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	31

รูปที่ 2.35 ผลการทดสอบสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	32
รูปที่ 2.36 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศ	33
รูปที่ 3.1 การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองอากาศว่างที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5 GHz	37
รูปที่ 3.2 แบบจำลองสองรังสี	38
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแบบจำลองสองรังสี เมื่อ $f = 2.45$ GHz	40
รูปที่ 3.4 อัตราขยายเมื่อเปรียบเทียบกับความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่างเมื่อ $h_t = 5$ m $h_r = 1.5$ m $f = 2.45$ GHz	40
รูปที่ 3.5 การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองสองรังสี	42
รูปที่ 3.6 เขตเฟรสเนล	43
รูปที่ 4.1 เฟรมชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ	45
รูปที่ 4.2 กลุ่มบริการพื้นฐาน (BSS) กลุ่มบริการขยาย (ESS) และระบบกระจาย (DS)	45
รูปที่ 4.3 ปรัชญาการร่อนตัวในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย	45
รูปที่ 4.4 แผนผังเวลาการส่งข้อมูล IEEE 802.11	47
รูปที่ 4.5 ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของขนาด MSDU ที่อัตราบิต 1, 2, 5.5 และ 11 Mbps	47
รูปที่ 5.1 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ (ก) พารามิเตอร์การทดสอบ (ข) แผนผังการทดสอบ	51
รูปที่ 5.2 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ (ก) ด้านสถานีฐาน (ข) ด้านลูกข่าย	52
รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศ	53
รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศที่ Transmission Data Rate 11 Mbps	54

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนในแต่ละโหมดคลื่น (TE_{mn})	4
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบ กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของสายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ	29
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบ กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของสายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ	29
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบ กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ	30
ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบ กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ	30
ตารางที่ 2.6 ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม	34
ตารางที่ 4.1 ค่าเวลาต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูล	46
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ	50
ตารางที่ 5.2 ระยะเวลาบริการสูงสุด	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

การสื่อสารแบบจุดต่อจุด (point to point communication) มีความสำคัญและได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เพราะการสื่อสารในระบบนี้มีความแม่นยำสูง สายอากาศที่ใช้ในระบบการสื่อสารแบบนี้จึงควรมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการสูง สายอากาศอัตรการขยายสูงแบบทิศทางเดียวจึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการสื่อสารแบบจุดต่อจุด

ระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย หรือ WLAN (Wireless LAN) เป็นระบบสื่อสารข้อมูลที่มีความยืดหยุ่นสูง ปัจจุบันกำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากระบบ WLAN เป็นระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด สายอากาศที่จะนำมาใช้ในระบบนี้จึงต้องเป็นสายอากาศที่มีอัตรการขยายสูงที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

สำหรับโครงการนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศอัตรการขยายสูงที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (Unidirectional Pattern Antenna) ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนสามารถสร้างได้ง่าย วัสดุที่ใช้ราคาไม่แพงสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด และมีค่าการสูญเสียต่ำ (low loss) โดยสายอากาศมีโครงสร้างเป็นตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม (Comer Reflector) ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม (Circular Ring) ล้อมรอบโพรบไฟฟ้าเชิงเส้น

ซึ่งในปริณยานุพินธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม การพิจารณาระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม (Comer Reflector) และตัวป้อนสัญญาณแบบวงแหวนวงกลม (Circular Ring) จะถูกเลือกให้มีความเหมาะสม โดยจะพิจารณาคูณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่ามุมยก และค่ามุมกวาดที่สนามสูงสุด ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของสายอากาศ จากนั้นนำสายอากาศที่ได้จากการออกแบบมาทำการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคารในพจน์ของระยะบริการสูงสุด (Maximum Link Distance) และค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ซึ่งแสดงถึงคุณภาพการให้บริการของโครงข่าย การหาระยะบริการสูงสุดทำได้โดยใช้วิธีแปลงค่าอัตรการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่ระบบยอมรับได้ให้มีหน่วยเป็นระยะทางโดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบสองรังสี

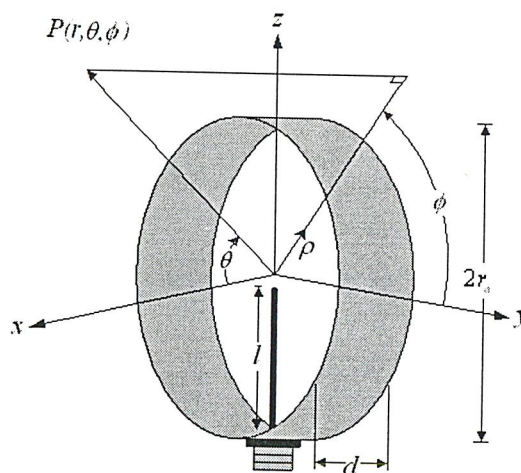
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศแบบทิศทางเดียวที่มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูง สำหรับใช้ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร หรือ WLAN (Wireless LAN)

บทที่ 2

สายอากาศอัตรายาวสูงทิศทางเดียว

2.1. โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงกลม

สายอากาศที่วิเคราะห์ประกอบด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นความยาว l ที่ต่อกับสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโดยผ่านตัวต่อแบบ N - type และถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปทรงกระบอก โดยมีรัศมีและความยาวของวงแหวนเป็น r_0 และ d ตามลำดับ ซึ่งโพรบจะวางตัวตามแนวแกน z ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม

ให้พิจารณาว่า วงแหวนเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกซึ่งมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายในทิศทาง x และ $-x$ และจะแพร่กระจายออกจากขอบของวงแหวนที่ช่องเปิดทั้ง 2 ด้าน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากช่องเปิดทั้ง 2 ด้านนี้จะสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยโหมดคลื่นต่างๆมากมายที่อยู่ในท่อนำคลื่นทรงกระบอก ดังนั้น ความยาวของวงแหวนและรัศมีจึงถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อที่จะทำให้โหมดอื่นๆถูกตัดออกไปให้เหลือเพียงโหมดคลื่นหลัก (dominant mode : TE_{11}) เพียงโหมดเดียว แต่อย่างไรก็ตามบริเวณที่ใกล้กับโพรบก็ยังคงมีโหมดคลื่นอื่นรวมอยู่ด้วย

โดยทั่วไปแล้ว โหมดคลื่นอื่นๆที่ไม่ใช่โหมดคลื่นหลักจะเป็นรูปแบบของคลื่นที่เรียกว่า คลื่นจางหายและโหมดคลื่นเหล่านี้จะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรบมีค่ามากขึ้น ด้วยเหตุนี้จะต้องเลือกระยะทางที่ห่างจากโพรบที่ทำให้ขนาดของโหมดคลื่นอื่น ๆ มีค่าน้อยมากจึงสามารถละเลยได้ เพื่อที่ว่าบริเวณขอบของวงแหวนที่ช่องเปิดทั้งสองด้านซึ่งเป็นจุดที่คลื่นจะเดินทางออกไปนั้นจะมีแต่รูปแบบเพียงรูปแบบเดียว ซึ่งก็คือการกำหนดค่าความยาวของวงแหวนนั่นเอง ส่วนการกำหนดค่ารัศมีจะต้องทำให้มีค่าความถี่คutoff ที่ต่ำที่สุด เพื่อให้มีเพียงโหมดคลื่นหลักแพร่กระจายออก

จากช่องเปิดทั้ง 2 ด้านของวงแหวน และ โหมดคลื่นอื่นๆ ที่อยู่ติดกับ โหมดคลื่นหลัก คือ TE_{21} จะต้องถูกตัดออกไป

ดังนั้นค่ารัศมีของวงแหวนแบบวงกลมที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$0.293\lambda < r_a < 0.486\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นที่ความถี่ที่ใช้งาน โดยค่าความถี่ที่ใช้งานคือ 2.45 GHz

ให้พิจารณารูปที่ 2.1 โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นภายในวงแหวนจะขนานกับรัศมีของวงแหวนเป็นผลให้คลื่นที่ประกอบไปด้วยโหมดคลื่นต่างๆ (TE_{mn}) ถูกปล่อยออกมาในบริเวณใกล้เคียงกับโพรบ โดยคลื่นที่ออกมานั้นจะมีความซับซ้อนมาก นั่นหมายความว่า ความถี่ใช้งานค่าหนึ่งเป็นไปได้ว่าคลื่นจะประกอบไปด้วยโหมดคลื่นต่างๆมากมาย แต่ที่มีความสำคัญต่อการเดินทางของคลื่นสำหรับสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ คือ โหมดคลื่นของ TE_{11} , TE_{21} และ TE_{01}

ขณะที่คลื่นเดินทางออกจากช่องเปิดทั้ง 2 ด้านของวงแหวนแบบวงกลม คลื่นจะเกิดการลดทอนซึ่ง ค่าคงที่ของการลดทอนสำหรับโหมดคลื่นหลัก แสดงได้ดังนี้

$$\alpha_{11} = \frac{R_s}{r_a \eta} \frac{8.686}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{c11}}\right)^2}} \left[\left(\frac{\lambda}{\lambda_{c11}}\right)^2 + 0.420 \right] \quad (\text{dB/m}) \quad (2.2)$$

เมื่อ λ_{c11} คือ ความยาวคลื่นคัตออฟ (cut off wavelength) ของโหมดคลื่นหลัก ซึ่งมีค่าเท่ากับ $3.412r_a$ โดยที่ r_a คือ ค่ารัศมีของวงแหวน

η คือ ค่าอินทรีนสิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลาง

R_s คือ ค่าความต้านทานคุณลักษณะอิสระที่ไม่ขึ้นกับความถี่ของผนังโลหะ

(frequency - dependent characteristic resistance of metal walls)

โดยที่
$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (2.3)$$

เมื่อ ω คือ ความถี่เชิงมุม (rad /sec) และ $\omega = 2\pi f$

μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) ของวัสดุ (H/m)

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

μ_0 คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

μ_r คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุ

σ คือ ค่าความนำจำเพาะของวัสดุ (conductivity) (S/m)

ในส่วนของคลื่นจางหายนั้น จะมีค่าความยาวคลื่นในอากาศ (free space) มีค่ามากกว่า ค่าความยาวคลื่นคัตออฟของตัวเอง ซึ่งโหมดของคลื่นจางหายที่มีความสำคัญต่อการเดินทางของคลื่นสำหรับสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ ได้แก่ TE₂₁ และ TE₀₁ โดยค่าการลดทอนของคลื่นจางหายอันเนื่องมาจากระยะทางนั้น จะสอดคล้องกับตัวประกอบ (factor) ของ $e^{-\alpha x}$

ซึ่งค่าคงที่ของการลดทอนสำหรับโหมดคลื่นของ TE₂₁ แสดงได้ดังนี้

$$\alpha_{21} = \frac{17.372\pi}{\lambda_{c21}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{c21}}{\lambda}\right)^2} \quad (\text{dB/m}) \quad (2.4)$$

เมื่อ λ_{c21} คือ ค่าความยาวคลื่นคัตออฟ (cut off wavelength) ของโหมดคลื่น TE₂₁ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $2.057r_a$ โดยที่ r_a คือ ค่ารัศมีของวงแหวน

และค่าคงที่ของการลดทอนสำหรับโหมดคลื่นของ TE₀₁ แสดงได้ดังนี้

$$\alpha_{01} = \frac{17.372\pi}{\lambda_{c01}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{c01}}{\lambda}\right)^2} \quad (\text{dB/m}) \quad (2.5)$$

เมื่อ λ_{c01} คือ ค่าความยาวคลื่นคัตออฟ (cut off wavelength) ของโหมดคลื่น TE₀₁ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.6396r_a$ โดยที่ r_a คือ ค่ารัศมีของวงแหวน

กำลังงานที่แพร่กระจาย (power flow) ในแต่ละโหมดคลื่น (TE_{mn}) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P = |A|^2 \omega \mu \beta r_a^4 A_{mn} \quad (2.6)$$

เมื่อ A_{mn} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนในแต่ละโหมดคลื่น (TE_{mn}) แสดงค่าได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนในแต่ละโหมดคลื่น (TE_{mn})

		$A_{mn} \times 10^{-3}$		
n \ m	m	0	1	2
1	1	17.4	55.3	11.4
2	2	2.87	3.19	1.56
3	3	0.349	0.794	0.492

β คือ ค่าคงที่เฟส (phase constant) (rad/m) ; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

r_u คือ ค่ารัศมีของวงแหวน (m)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (rad /sec) ; $\omega = 2\pi f$

μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ของวัสดุ (H/m) ;

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

μ_0 คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

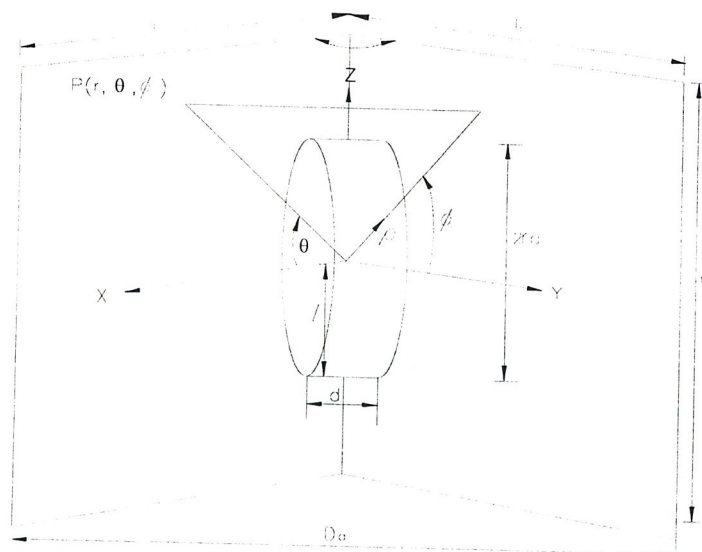
μ_r คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุ

A คือ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ โดยปกติจะนอร์มัลไลซ์ (normalize) ให้เท่ากับ 1

2.2 สายอากาศแบบทิศทางเดียว (Unidirectional Antenna)

โครงสร้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม

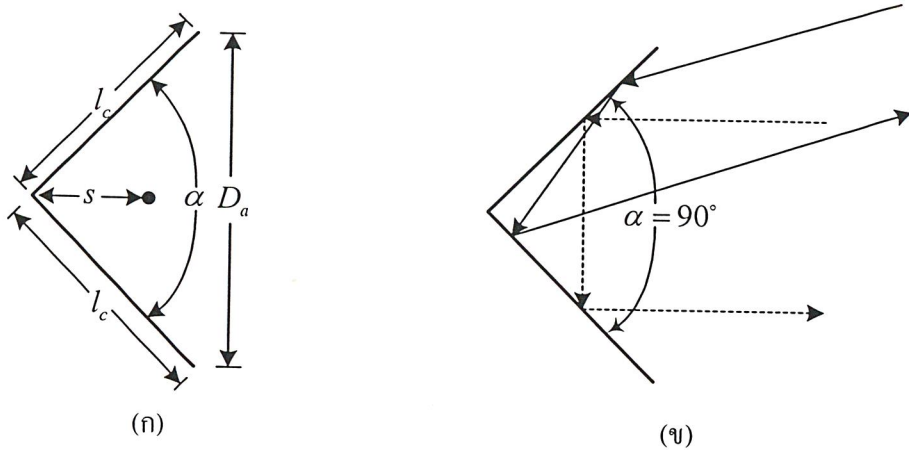
ในโครงการนี้ต้องการนำเสนอสายอากาศแบบทิศทางเดียวที่มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสามารถทำได้ โดยนำสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมล้อมรอบโพรบไฟฟ้าเชิงเส้น โดยตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมเกิดจากแผ่นสะท้อนสองแผ่นมีความยาว l_c ความสูง h ทำมุมกัน α ที่มีความกว้างที่ยาวที่สุดของตัวสะท้อนเท่ากับ D_a ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนกับวงแหวนวงกลมเท่ากับ s ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งในโครงการนี้ในการคำนวณหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมและตัวป้อนสัญญาณแบบวงแหวนจะพิจารณาให้ตัวสะท้อนมีขนาด l_c , h และ D_a เป็นอนันต์ และทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับวงแหวนเป็นค่าต่างๆ เพื่อหาระยะที่เหมาะสม ซึ่งสายอากาศจะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม



รูปที่ 2.2 โครงสร้างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม

2.3 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม (Corner Reflector)

โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมจะประกอบด้วยแผ่นสะท้อน 2 แผ่น ทำมุมกันดังรูปที่ 2.3 (ก) ซึ่งโครงสร้างของตัวสะท้อนแบบมุมจะทำได้ง่าย ซึ่งสัญญาณจะย้อนกลับในทิศทางเดิมที่รับเข้ามาดังแสดงได้ในรูปที่ 2.3(ข) คือมุม 90°



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม

โดยในทางปฏิบัติตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่นิยมเลือกใช้คือ แผ่นสะท้อน 2 แผ่นทำมุมกัน 90° แต่ก็ยังมีบางงานที่ใช้มุมอื่นๆ โดยประสิทธิภาพของระบบที่ได้จะดูได้จาก ที่ระยะห่างระหว่างจุดยอดมุมกับตัวป้อนสัญญาณ โดยที่ระยะห่างจะเพิ่มขึ้นถ้ามุมของตัวสะท้อนลดลง สำหรับตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์ อัตราขยาย (gain) จะเพิ่มขึ้น เมื่อมุมระหว่างแผ่นระนาบลดลง อย่างไรก็ตามอาจจะไม่เป็นจริงหากขนาดของแผ่นเพลท (plate) มีขนาดจำกัด ดังนั้นเพื่อให้ง่ายในการพิจารณาจะให้แผ่นเพลท (plate) มีขนาดอนันต์ ($l_c = \infty$) แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าจำกัด ความยาว (l_c) และความสูง (h)

โดยให้ขนาดความกว้างที่ยาวที่สุดของตัวสะท้อนที่ทำมุม (D_a) จะมีค่าเท่ากับ $\lambda < D_a < 2\lambda$ และความยาวของตัวสะท้อนจะมีค่าที่ต่างกันขึ้นกับขนาดของมุมเช่น มุม 90° จะมีความยาวเท่ากับ $l_c = 2s$ ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณกับจุดยอดของมุม (s) ปกติจะใช้ค่าระหว่าง $\frac{\lambda}{3} < s < \frac{2\lambda}{3}$ และความสูงของตัวสะท้อนปกติจะใช้ประมาณ 1.2-1.5 เท่าของความยาวทั้งหมดของตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแพร่กระจายจากด้านหลัง ในการทดลองหากเราเพิ่มขนาดของด้านข้างก็ไม่ได้มีผลต่อความกว้างลำคลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง แต่มันจะเพิ่มแบนด์วิดท์ (Bandwidth) และความต้านทานการแผ่กระจายคลื่น (radiation resistance) และจะเห็นว่าขนาดของลำคลื่นหลักจากการที่มีขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดจำกัดจะกว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์

2.4 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศวงแหวนแบบวงกลม

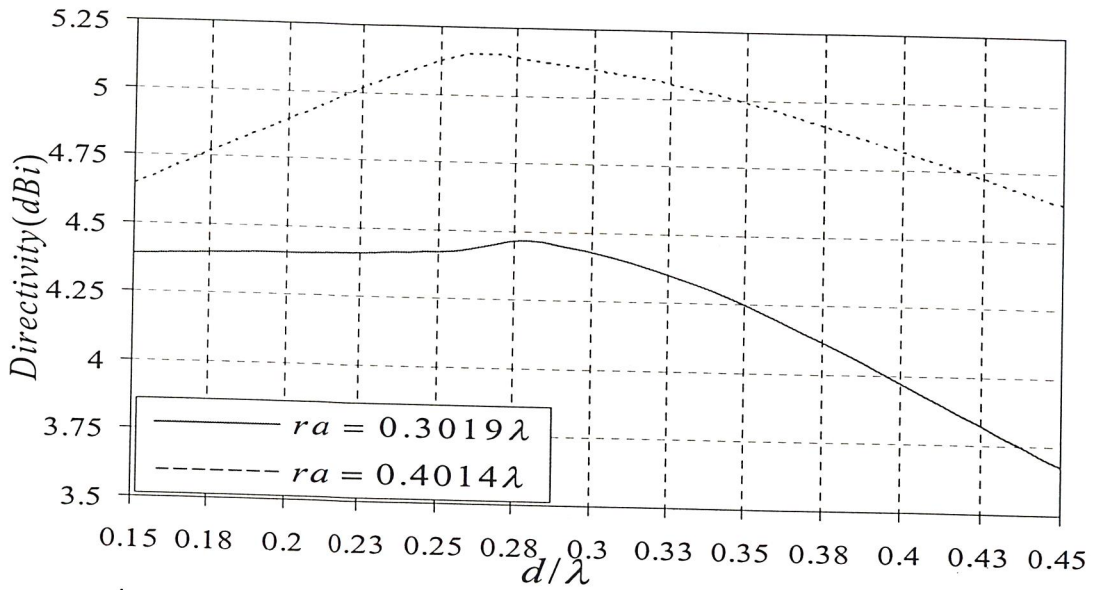
ในการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมนั้นจะสนใจในส่วนของ ค่าขนาดของ ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม ค่าความกว้าง ความสูง และค่ารัศมีและความยาวของตัวป้อนสัญญาณวงแหวน แบบวงกลม โดยค่าดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศและจะต้องพิจารณา พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อไปนี้คือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของตัวสายอากาศ (Directivity) ความยาว ของโพรบที่ใช้กับตัวสายอากาศ โดยจะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ (Impedance) ค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าการสูญเสียเนื่องมาจากการย้อนกลับ (Return loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) ของสายอากาศ

2.4.1 การพิจารณาค่ารัศมีและความยาวของตัวสายอากาศวงแหวนแบบวงกลม

ในการพิจารณาถึงค่ารัศมีของสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมนั้น จะพิจารณาถึงค่ารัศมีของตัว สายอากาศที่ทำให้คลื่นที่ออกจากตัวสายอากาศมีเพียงรูปแบบของคลื่นหลักเท่านั้น ซึ่งค่ารัศมีเหล่านี้จะมีความเหมาะสมกับความยาวของวงแหวนที่ไม่เหมือนกัน โดยแต่ละค่ารัศมีจะต้องมีค่าความยาวของวง แหวนที่เหมาะสมกับค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญที่ใช้วิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศ

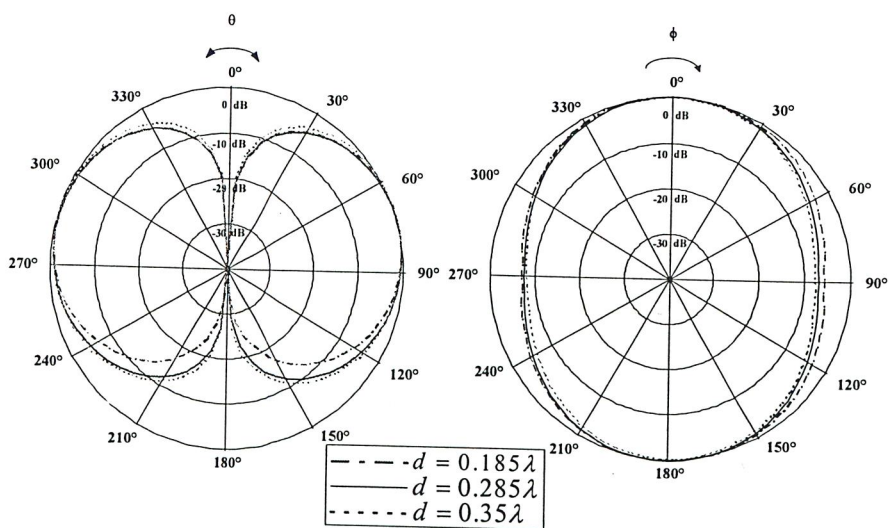
จากรูป 2.4 จะพบว่าค่ารัศมี (r_n) เท่ากับ 0.3019 λ ซึ่งเป็นค่ารัศมีที่อยู่ใกล้รูปแบบคลื่นหลัก TE₁₁ นั้นมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางใกล้เคียงกับค่ารัศมี (r_n) เท่ากับ 0.4014 λ ซึ่งเป็นค่ารัศมีที่อยู่ห่างออก จากรูปแบบคลื่นหลัก TE₁₁ และจะเห็นว่าค่ารัศมี (r_n) ทั้งสองนั้นจะมีค่าความยาวที่เหมาะสมเพียงค่าเดียว เท่านั้น ที่จะทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าสูงสุด ส่วนการออกแบบที่ค่าอื่นๆ นอกเหนือจากนี้ก็ยังสามารถ ทำได้เช่นเดียวกัน เช่น ถ้าเรารู้ค่ารัศมีและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ต้องการก็สามารถหาค่าความยาวที่ เหมาะสมได้

จากรูป 2.4 จะพบว่าที่ค่ารัศมี (r_n) เท่ากับ 0.3019 λ ค่าความยาวของวงแหวนที่เหมาะสมที่สุด คือ 0.285 λ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าสูงสุด และที่ค่ารัศมี (r_n) เท่ากับ 0.4014 λ ค่า ความยาวของวงแหวนที่ทำให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าสูงสุดคือ 0.285 λ เมื่อได้ค่าความยาวที่ เหมาะสมแล้ว จากนั้นจึงนำค่ารัศมีและความยาวของวงแหวนที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ มีความสำคัญๆ เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับความยาวของวงแหวนแบบวงกลม ในแต่ละค่ารัศมีของวงแหวน

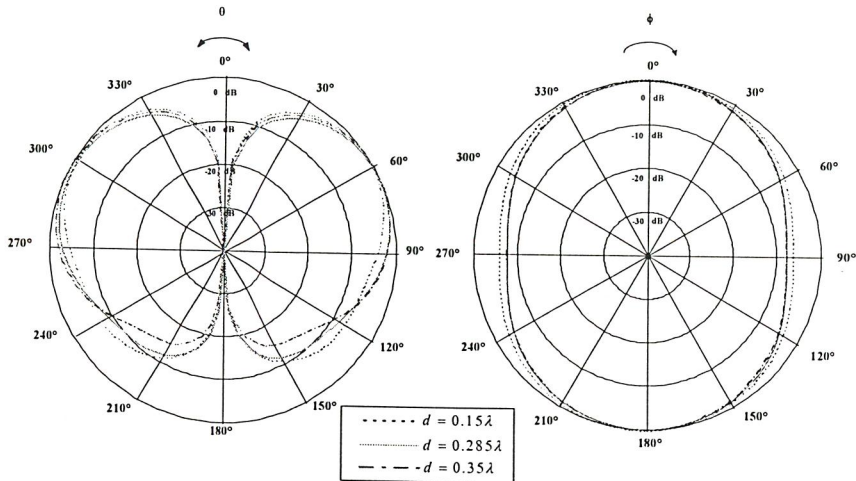
จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ทำการเปรียบเทียบค่าความยาวของวงแหวนต่างๆ กัน ซึ่งพบว่าที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ ความยาวของวงแหวนที่มีค่ามากกว่าค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ลำคลื่นจะมีขนาดใหญ่กว่า และเมื่อความยาวของวงแหวนน้อยกว่าค่าที่ออกแบบไว้ลำคลื่นจะมีขนาดเล็กเหมือนกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.5 และที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014λ จะพบว่าถ้าความยาวของวงแหวนที่มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ลำคลื่นจะมีขนาดใหญ่กว่า และเมื่อความยาวมากกว่าค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ลำคลื่นจะมีขนาดเล็กเหมือนกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



ก) ระบายสนามไฟฟ้า

ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ มีค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.185λ 0.285λ และ 0.35λ



ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

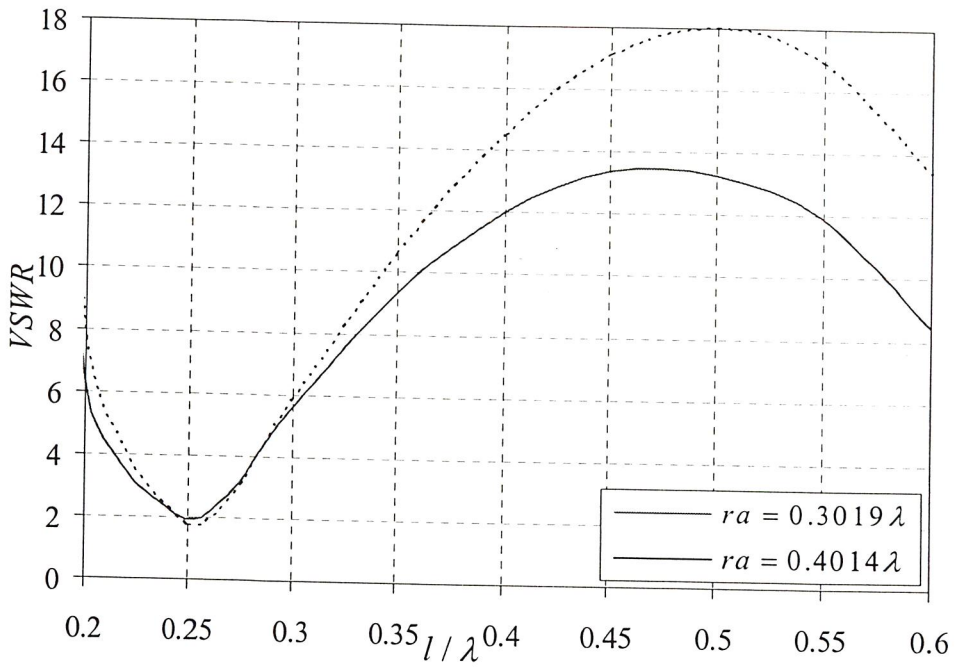
ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.6 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014λ มีค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.15λ 0.285λ และ 0.35λ

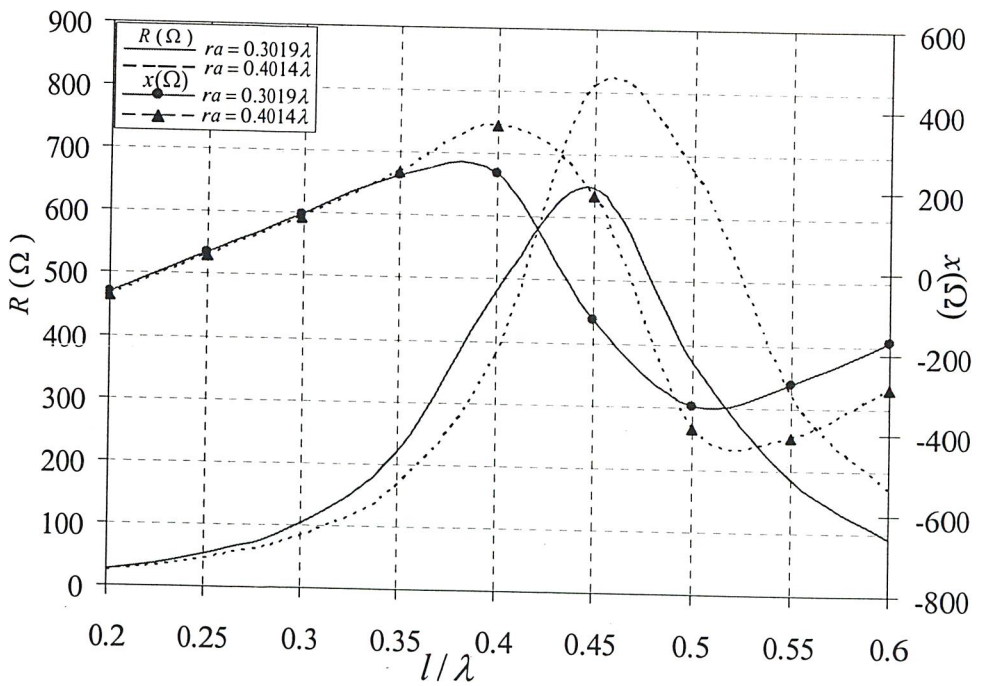
ความยาวที่เหมาะสมของตัวสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ มีค่าเท่ากับ 0.285λ ให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 4.46 dBi และที่ ค่ารัศมีเท่ากับ 0.4014λ ได้ค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.285λ โดยให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 5.16 dBi

2.4.2 การพิจารณาค่าความยาวโพรบ

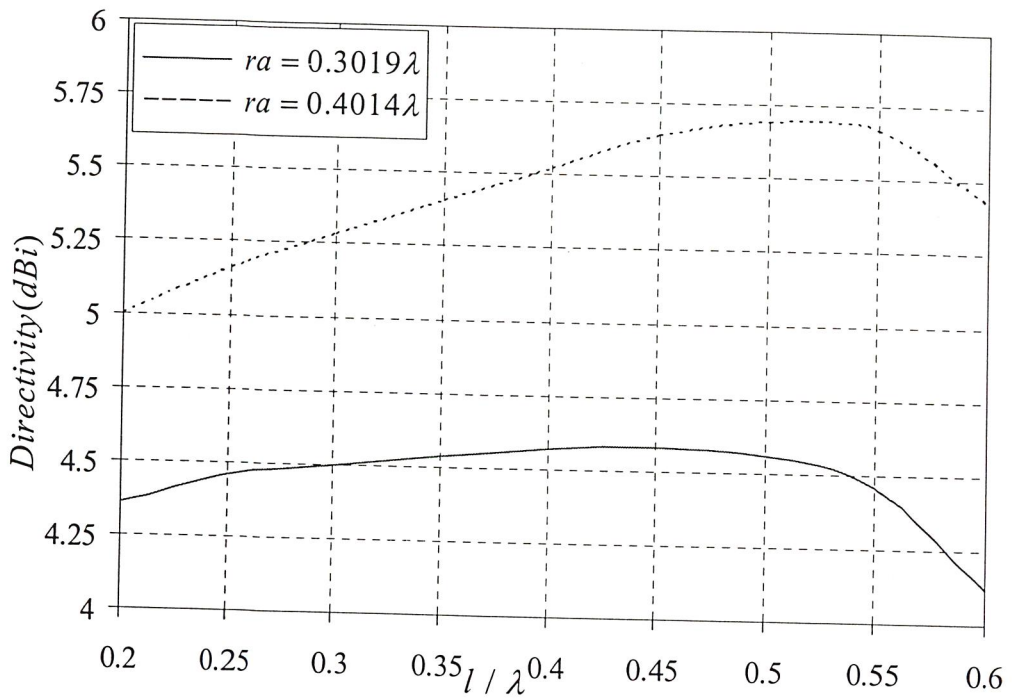
การพิจารณาค่าความยาวโพรบนั้น จะต้องทำให้เข้าใกล้การเกิดรีโซแนนซ์ (resonance) ให้มากที่สุดเพื่อให้คลื่นที่ส่งออกไปมีพลังงานมากที่สุดก็จะทำให้สามารถส่งไปได้ไกลโดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ 50Ω เพื่อให้คลื่นที่ออกมาจากสายนำสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω สามารถส่งผ่านสายอากาศออกไปได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นก็ต้องทำให้สายอากาศมีค่า VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ไม่ควรมีค่ามากกว่า 2 และค่าการสูญเสียย้อนกลับ (return loss) จะต้องมีค่าน้อยกว่า -9.54 dB ขึ้นไป ดังนั้นค่าความยาวโพรบที่ได้นั้นต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อทำการพิจารณาผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC2) จะเห็นว่าค่าความยาวโพรบที่เหมาะสมของค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ มีค่าเท่ากับ 0.25λ ซึ่งเป็นค่าความยาวโพรบที่ทำให้ได้ค่า VSWR เท่ากับ 1.93 ได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $52.4 + j34.2 \Omega$ และค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 4.46 dBi ส่วนค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014λ ค่าความยาวโพรบที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.25λ จะทำให้ได้ค่า VSWR เท่ากับ 1.71 ได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $44. + j24.7 \Omega$ และมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 5.16 dBi



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า VSWR กับความยาวโพรบในแต่ละค่ารัศมีของวงแหวนแบบวงกลม



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับความยาวโพรบ ในแต่ละค่ารัศมีของวงแหวนแบบวงกลม



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพเจาะจงทิศทางกับความยาวโพรบ ในแต่ละค่ารัศมีของวงแหวนแบบวงกลม

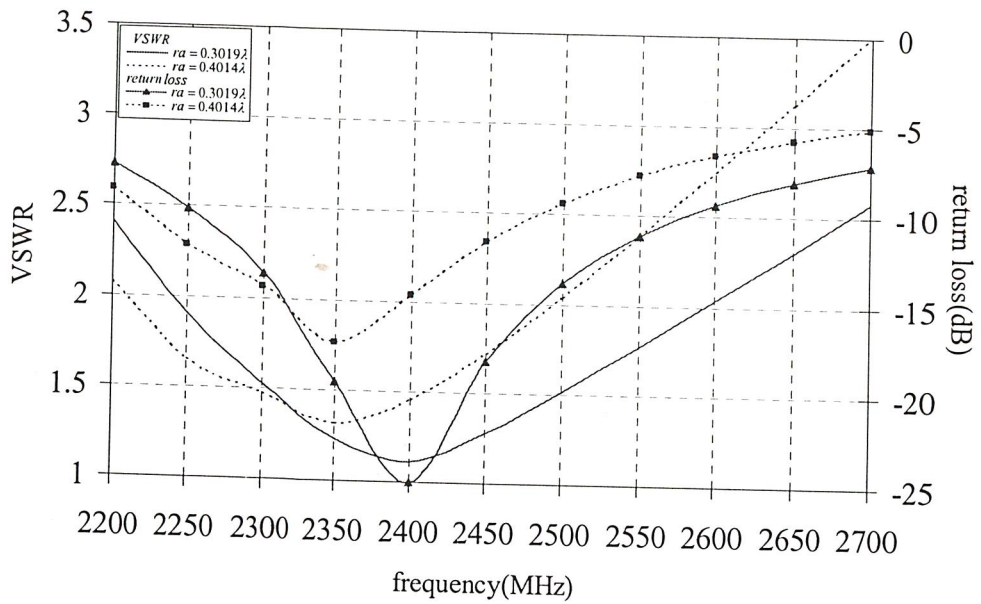
2.4.3 การพิจารณาค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งาน

แบนด์วิดท์ของสายอากาศถูกกำหนดให้เป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด อาจคิดเป็นช่วงของความถี่ที่สายอากาศยังคงมีคุณสมบัติต่าง ๆ อยู่ในช่วงที่ใช้งานได้ คือมีค่าไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่กลางที่ออกแบบ โดยที่สามารถกำหนดคุณสมบัติของแบนด์วิดท์ให้เป็นไปตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่าง

ส่วนการคำนวณหาค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานนั้น ทำได้โดยการหาความถี่ที่สูงกว่าและต่ำกว่าความถี่กลางที่มีค่า VSWR เท่ากับ 2 จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งานได้ดังนี้

$$\Delta f(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100 \tag{2.7}$$

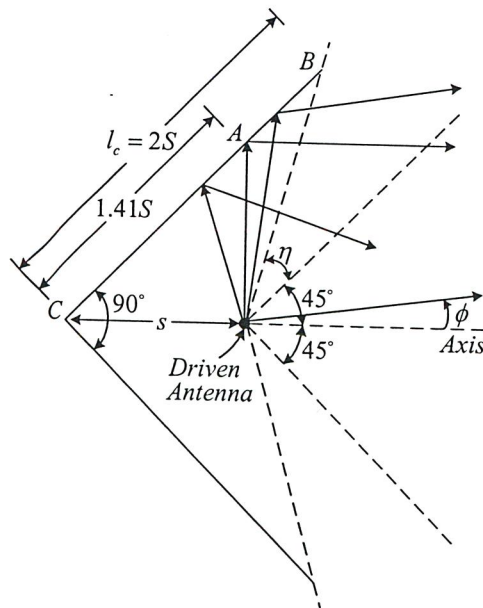
ซึ่งค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานควรจะมีค่ามากกว่า 10% ขึ้นไปและจากรูป 2.10 จะพบว่าที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ มีค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานมากกว่าที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014λ



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความถี่ที่ใช้งานกับค่า VSWR และค่าการสูญเสียย้อนกลับ (return loss) ในแต่ละค่ารัศมีของวงแหวนแบบวงกลม

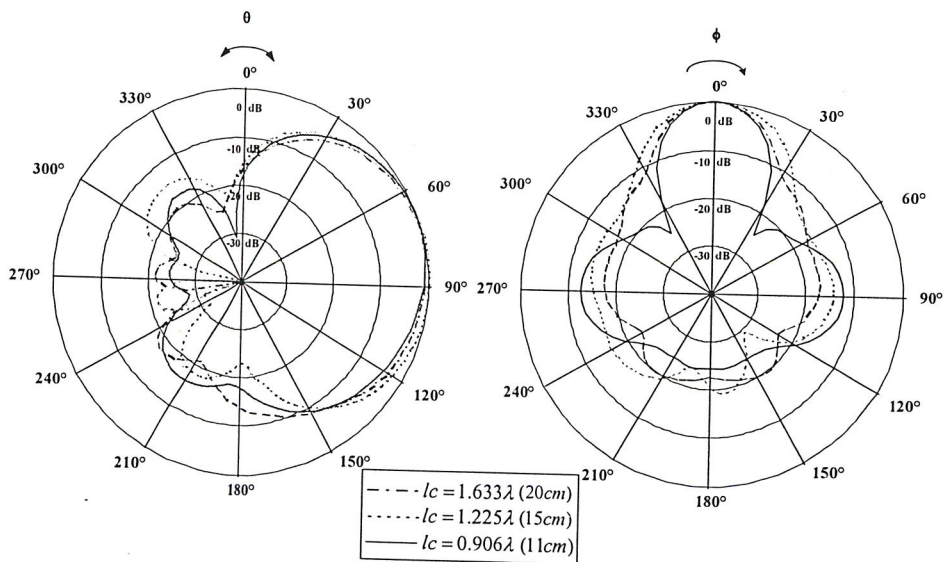
จากการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ พบว่าที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ ค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.285λ ค่าความยาวโพรบเท่ากับ 0.25λ และค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014λ ค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.285λ ค่าความยาวโพรบเท่ากับ 0.25λ เป็นค่าที่เหมาะสมที่จะใช้ออกแบบสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว

2.4.4 การพิจารณาค่าขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม



รูปที่ 2.11 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยมีขนาดของความยาวเท่ากับสองเท่าของระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณกับตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่มีมุมเท่ากับ 90°

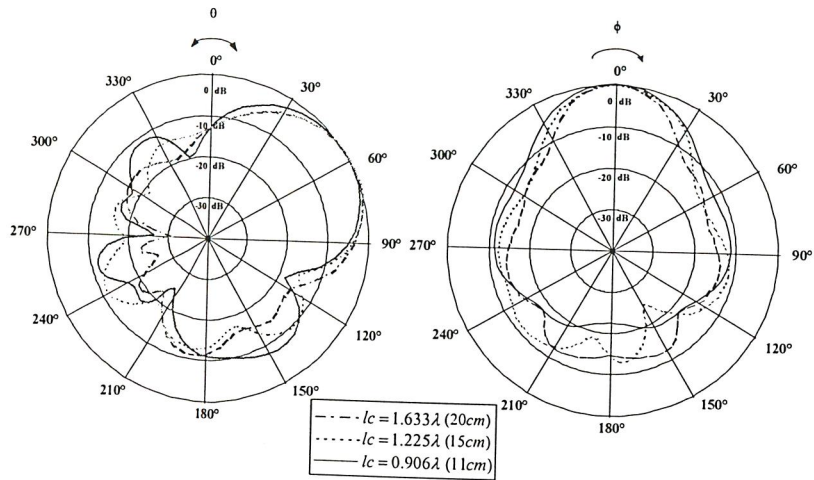
จากรูปที่ 2.11 เนื่องจากตัวสะท้อนแบบมุมมีขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์ ซึ่งในการสร้างไม่สามารถสร้างขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์ได้ จึงจำเป็นต้องสร้างขนาดของของตัวสะท้อนที่มีขนาดจำกัดโดยต้องคำนึงถึงผลที่ได้จากการมีขนาดตัวสะท้อนที่จำกัดต้องไม่เปลี่ยนแปลงไปมาก โดยในการออกแบบความยาวของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมจะพิจารณาจาก ตำแหน่งที่คลื่นเคลื่อนที่ออกจากตัวสายอากาศไปตกกระทบกับตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมแล้วทำให้คลื่นที่สะท้อนขนานกับแกน เมื่อพิจารณากรณีของตัวสะท้อนทำมุม 90° ที่แสดงไว้ดังรูป จุดที่สะท้อนแล้วคลื่นสะท้อนขนานกับแกนคือจุด A จะมีความยาวจากมุมเท่ากับ $1.41S$ โดยที่ S คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม ซึ่งเราอาจทำการเพิ่มความยาวของตัวสะท้อนเพิ่มขึ้นจากจุด A เท่ากับที่ระยะจุด B โดยมีระยะที่เพิ่มประมาณ $0.6S$ จากจุด A ทำให้มีความยาวของตัวสะท้อนเท่ากับ $l_c = 2S$ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในทางปฏิบัติสำหรับกรณีของตัวสะท้อนทำมุม 90° และผลการวิเคราะห์ความยาวของตัวสะท้อน โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC2) พบว่าค่าที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้มีความยาวของตัวสะท้อนเท่ากับ $l_c = 2S$ ดังรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13



ก) ระบายสนามไฟฟ้า

ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.12 ผลการวิเคราะห์หาความยาวของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ วางใกล้ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90°

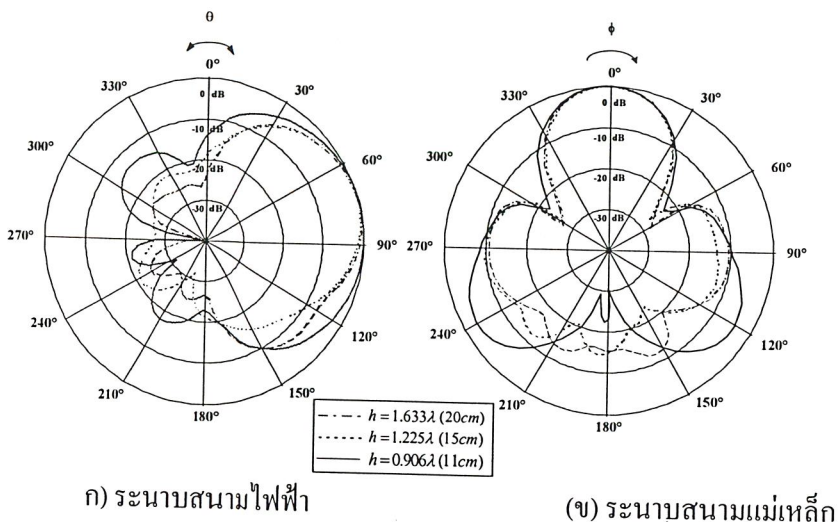


ก) ระบายสนามไฟฟ้า

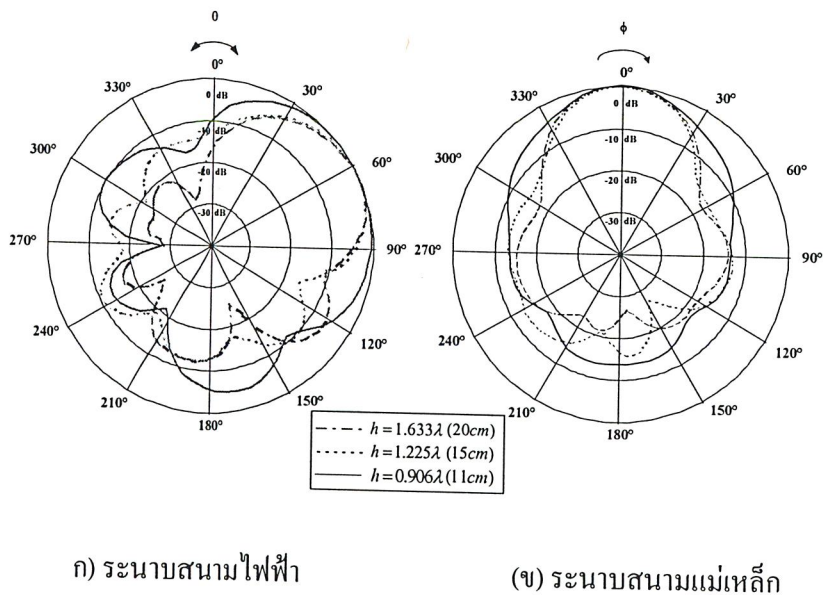
ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.13 ผลการวิเคราะห์หาความยาวของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_d) เท่ากับ 0.4014λ วางใกล้ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90°

ส่วนความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมปกติจะใช้ประมาณ 1.2 - 1.5 เท่าของความสูงทั้งหมดของตัวป้อนสัญญาณ เมื่อเราทราบระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับตัวป้อนสัญญาณที่ต้องการแล้วก็จะสามารถหาขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมได้ ซึ่งความสูงของตัวสะท้อนนั้นยังมีความสูงมากก็จะทำให้เกิดลำคลื่นย่อยด้านหลังต่ำ แต่จะต้องมีขนาดไม่สูงมากเกินไป เพราะจะทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก เมื่อทำการพิจารณาผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC2) จะเห็นว่าขนาดความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมเมื่อมีขนาดเท่ากับ 0.906λ (11 ซม.) จะเกิดลำคลื่นย่อยด้านหลัง (back lobe) มาก จึงได้เพิ่มความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมขึ้นเพื่อให้เกิดลำคลื่นย่อยด้านหลังน้อยลง ซึ่งแสดงตัวอย่างผลของลำคลื่นย่อยด้านหลังที่ได้จากการเพิ่มความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมได้ดังรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ผลการวิเคราะห์หาค่าความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ วางใกล้ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90°



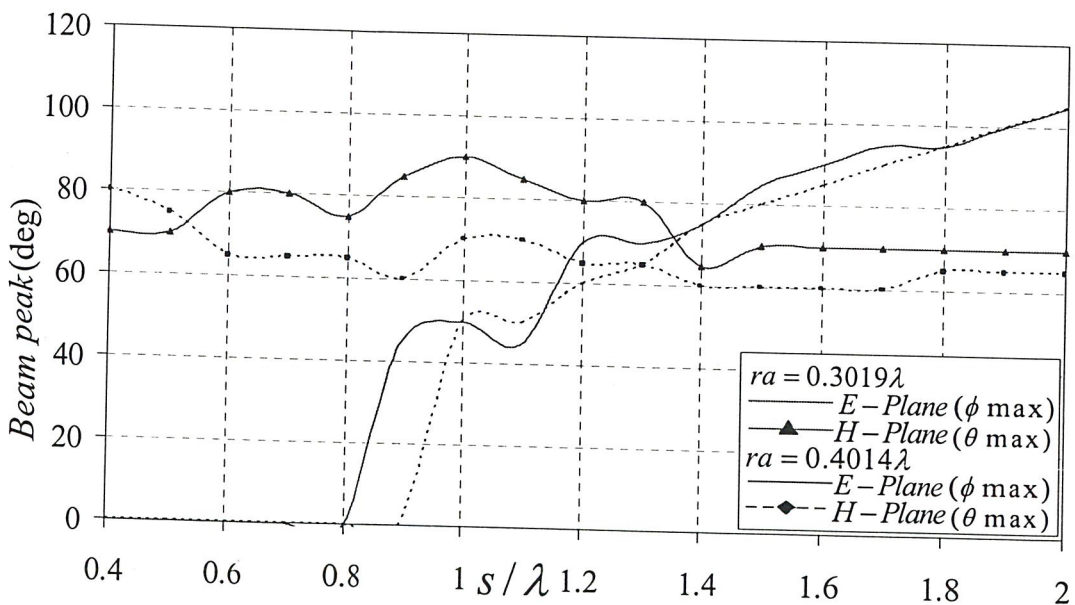
รูปที่ 2.15 ผลการวิเคราะห์หาค่าความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยใช้โปรแกรม NEC 2 ในกรณีวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014λ วางใกล้ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90°

2.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลัง และค่าสภาพเงาเชิงทิศทางสูงสุดของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับโพรบกระตุ้นวงแหวน ซึ่งในการพิจารณาคุณลักษณะทั้งหมดนี้ระยะห่างระหว่างโพรบกระตุ้นวงแหวนกับตัวสะท้อนนั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะขึ้นอยู่กับค่ารัศมีของวงแหวนและความยาวของวงแหวน

2.5.1 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

ในการออกแบบสายอากาศแบบทิศทางเดียวนี้ ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งที่จะต้องพิจารณา ตัวอย่างเช่นหากต้องการให้การแพร่กระจายสนามแรงไปทางด้านหน้าของสายอากาศ ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าต้องมีค่าเท่ากับ 90° ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็กต้องเท่ากับ 0° และเงื่อนไขนี้ต้องเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งสองระนาบด้วย

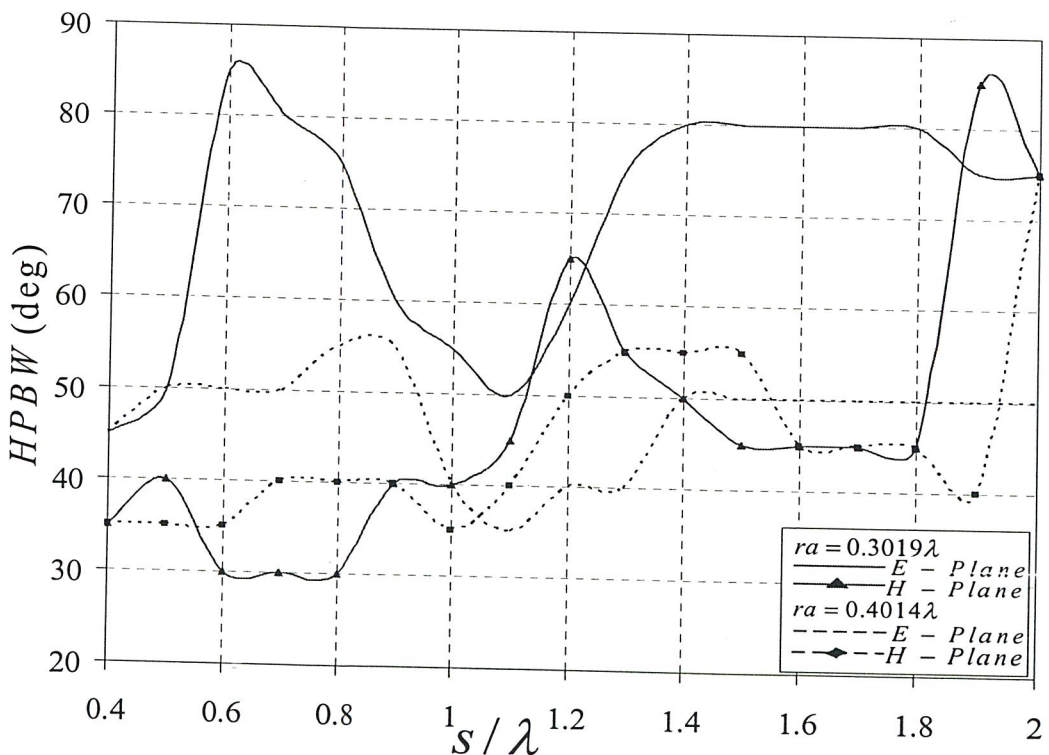


รูปที่ 2.16 ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม

จากรูปที่ 2.16 แสดงค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้า และค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม เมื่อพิจารณาระยะที่น้อยที่สุดที่ใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมที่ต้องการนั้น พบว่าในกรณีที่ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับตัวป้อนสัญญาณที่คาร์ซีมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ อยู่ที่ $0.4\lambda - 0.8\lambda$ ส่วนคาร์ซีมี (r_a) เท่ากับ 0.4014λ อยู่ที่ $0.4\lambda - 0.9\lambda$ นั้นมีค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้า และค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบสายอากาศร่วมกับคุณลักษณะอื่นที่จะแสดงในหัวข้อต่อไป

2.5.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง

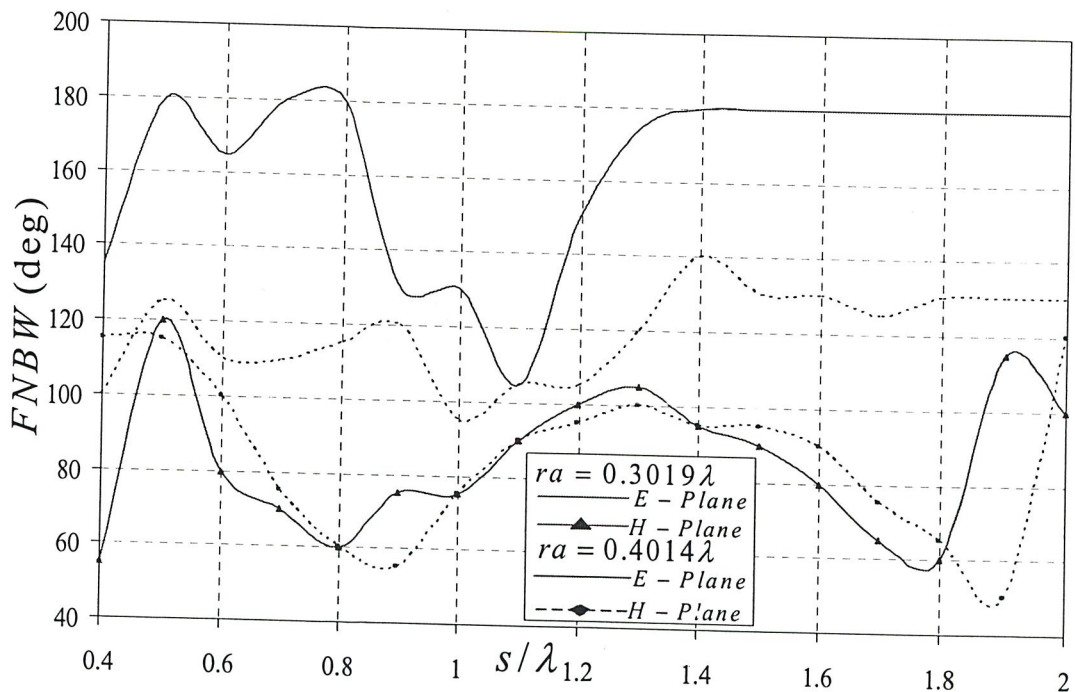
ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ โดยค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ต้องการคือ มีลักษณะแคบๆ ทั้งนี้เพื่อให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการได้แม่นยำยิ่งขึ้นและมีการสูญเสียกำลังงานในทิศทางอื่นน้อยๆด้วย



รูปที่ 2.17 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม

รูปที่ 2.17 แสดงค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศที่พิจารณาจากระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับโพรบกระตุ้นวงแหวนแบบวงกลม พบว่าในระนาบสนามไฟฟ้าในตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ ในช่วงแรกจะมีแนวโน้มของค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งเพิ่มขึ้นจนถึงที่ระยะห่าง 0.6λ ก็จะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ที่ระยะ 1.2λ จะมีแนวโน้มของค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศเพิ่มขึ้นอีก และจะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงระยะห่างระหว่าง $1.4\lambda - 1.8\lambda$ ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นพบว่าแนวโน้มของค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงระยะห่างระหว่าง $0.8\lambda - 1.2\lambda$ และ $1.8\lambda - 1.9\lambda$ จากนั้นจะมีแนวโน้มของค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศเพิ่มขึ้นมีค่ามากที่สุดที่ระยะห่าง 1.9λ ส่วนที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014λ แนวโน้มของค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงระยะห่างระหว่าง $1.4\lambda - 1.8\lambda$ และในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นพบว่าแนวโน้มของค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงระยะห่างระหว่าง $1.0\lambda - 1.5\lambda$ และลดลงในช่วงระยะห่างระหว่าง $1.6\lambda - 1.9\lambda$

2.5.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก

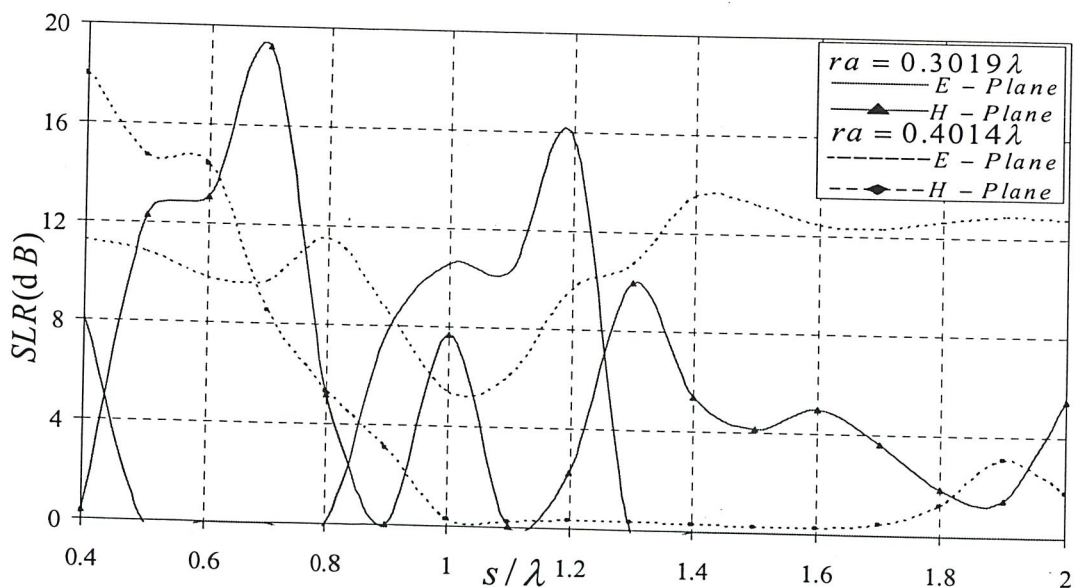


รูปที่ 2.18 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม

จากรูปที่ 2.18 พบว่าค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกในระนาบสนามไฟฟ้าของคาร์ซีมี (r_n) เท่ากับ 0.3019λ จะกว้างสุดที่ระยะ $0.7-0.8\lambda$ จากนั้นค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกจะลดลงอย่างรวดเร็วและคงที่ตลอดช่วงระยะห่างระหว่าง $1.4\lambda-2.0\lambda$ ส่วนค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกในระนาบสนามแม่เหล็กนั้น จะมีค่าความกว้างของลำคลื่นกว้างสุดที่ระยะ 0.5λ และจะมีค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกแคบสุดที่ระยะ 0.4λ ส่วนที่คาร์ซีมี (r_n) เท่ากับ 0.4014λ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีค่าความกว้างของลำคลื่นกว้างสุดที่ระยะ 0.5λ และค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกในระนาบสนามแม่เหล็ก จะมีแนวโน้มค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกลดลงในช่วงระยะห่างระหว่าง $0.5\lambda-0.9\lambda$ และ $1.4\lambda-1.9\lambda$

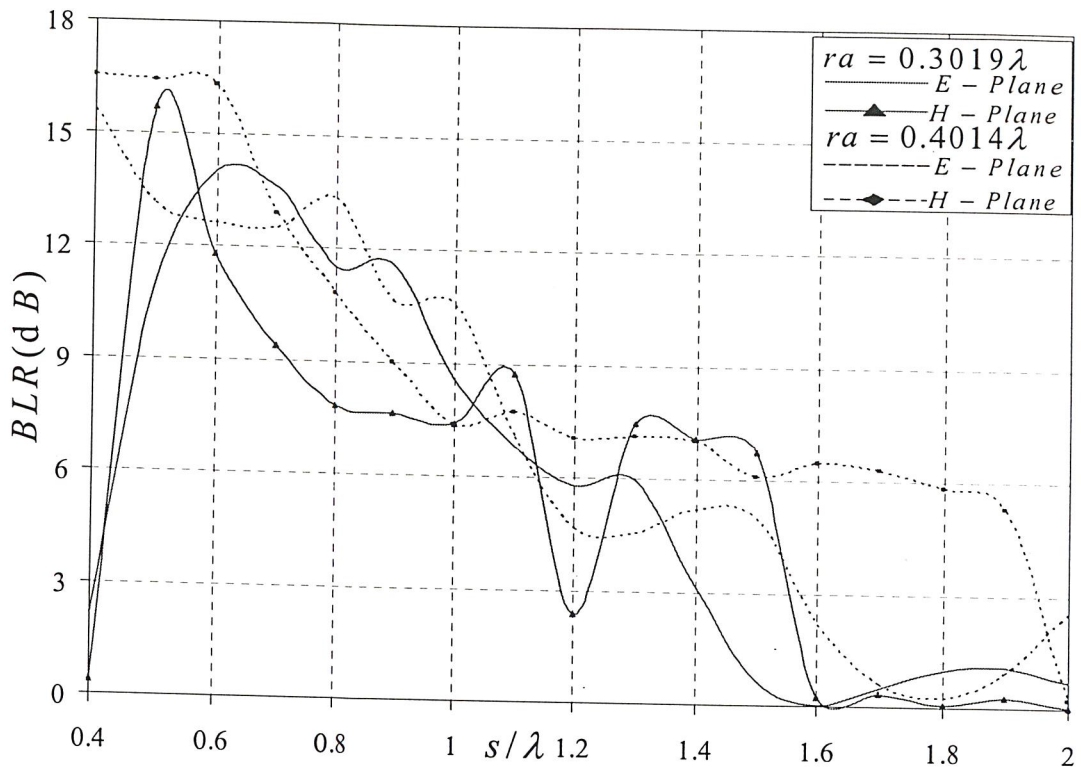
2.5.4 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง แสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งพบว่าในการแพร่กระจายคลื่นค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างของคาร์ซีมี (r_n) เท่ากับ 0.3019λ ในระนาบสนามไฟฟ้าในช่วงระยะห่างระหว่าง $0.5\lambda-0.8\lambda$ และ $1.3\lambda-2.0\lambda$ จะไม่มีค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง สำหรับในระนาบสนามแม่เหล็ก จะพบว่าค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีค่ามากที่สุดที่ระยะห่าง 0.7λ ส่วนที่คาร์ซีมี (r_n) เท่ากับ 0.4014λ ในระนาบสนามไฟฟ้าค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีค่ามากในช่วงระยะห่างระหว่าง $1.4\lambda-2.0\lambda$ สำหรับในระนาบสนามแม่เหล็กจะพบว่าในช่วงระยะห่างระหว่าง $1.0\lambda-1.8\lambda$ ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีค่าน้อย



รูปที่ 2.19 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม

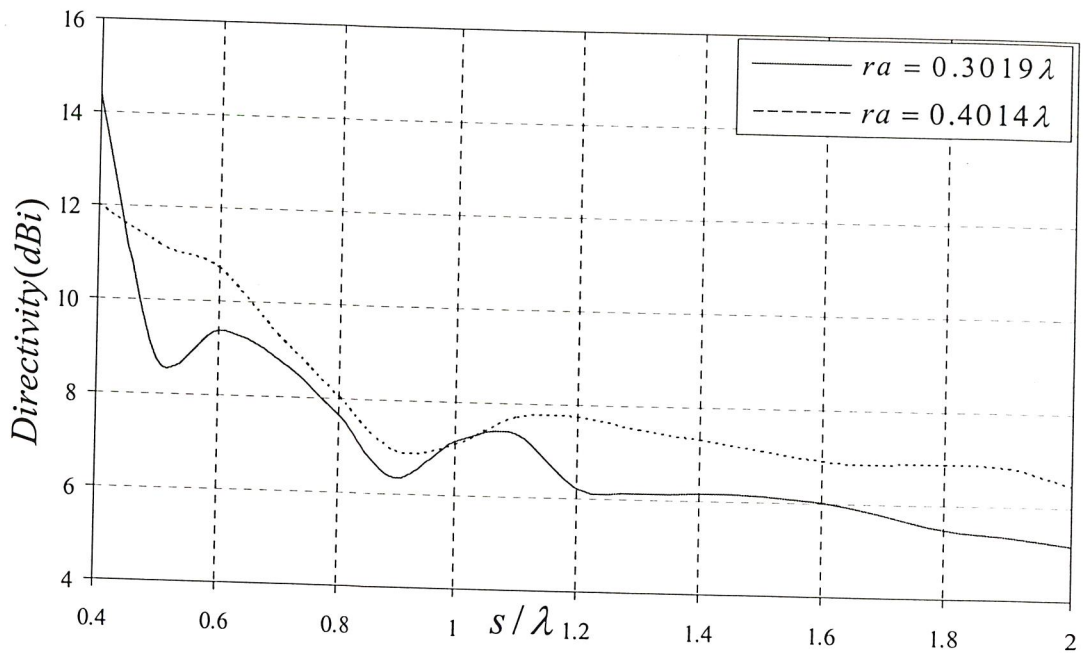
2.5.5 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลัง



รูปที่ 2.20 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม

จากรูป 2.20 จะพบว่าในการแพร่กระจายคลื่นค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ และที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014λ ในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กในช่วงระยะห่างที่มีค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านหลังยิ่งมากยิ่งขึ้นเพราะจะทำให้มีการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการสูง

2.5.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ



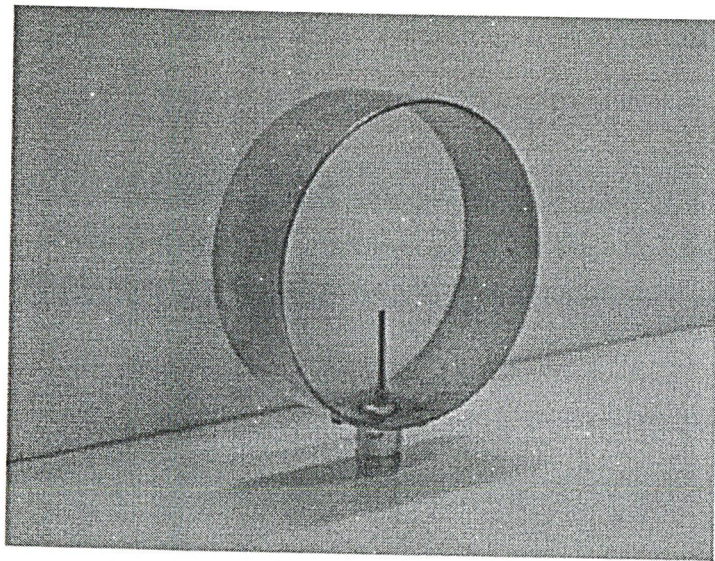
รูปที่ 2.21 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.21 เมื่อทำการพิจารณาจะสังเกตเห็นว่าในช่วงระยะห่างใกล้แผ่นสะท้อนจะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสูง และพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ จะมีค่าสูงสุดที่ระยะห่างเท่ากับ 0.7λ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.81 dBi และที่ค่ารัศมี (r_a) เท่ากับ 0.4014λ จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสูงสุดที่ระยะห่างเท่ากับ 0.6125λ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.4 dBi ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งหมดที่ผ่านมานี้จะนำไปสู่การออกแบบและการสร้างต่อไป

2.6 การออกแบบสร้าง

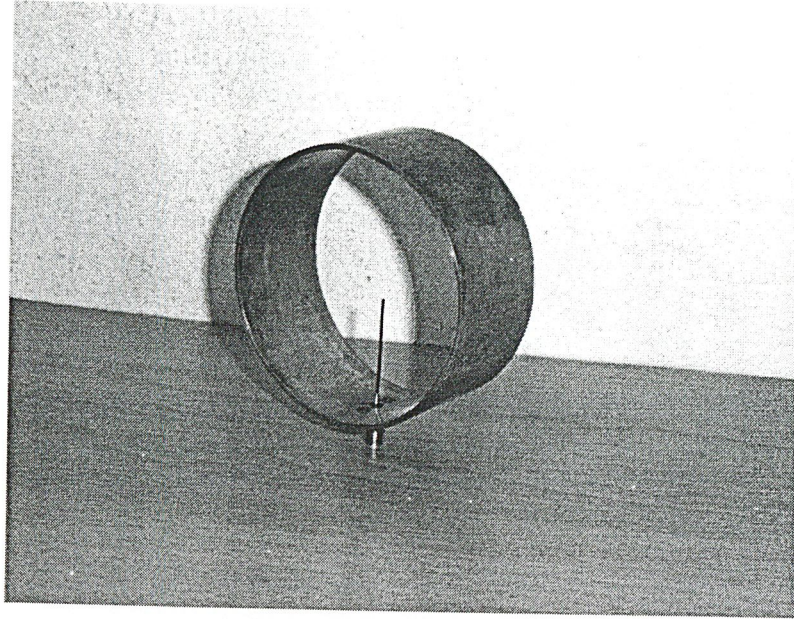
จากผลการวิเคราะห์ร่วมกับโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code : NEC2) ทำให้ได้ค่าขนาดที่เหมาะสมของส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบสร้างสายอากาศโดยกำหนดให้ทำงานที่ความถี่เท่ากับ 2.45 GHz มีรายละเอียดดังนี้

ตัวป้อนสัญญาณวงแหวนแบบวงกลมล้อมรอบโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ (4.92 ซม.) และค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.285λ (3.5 ซม.) มีค่าความยาวโพรบเท่ากับ 0.25λ (3.1 ซม.) และใช้ Connector N - type 50 Ω ที่ได้ทำการสร้างขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.22

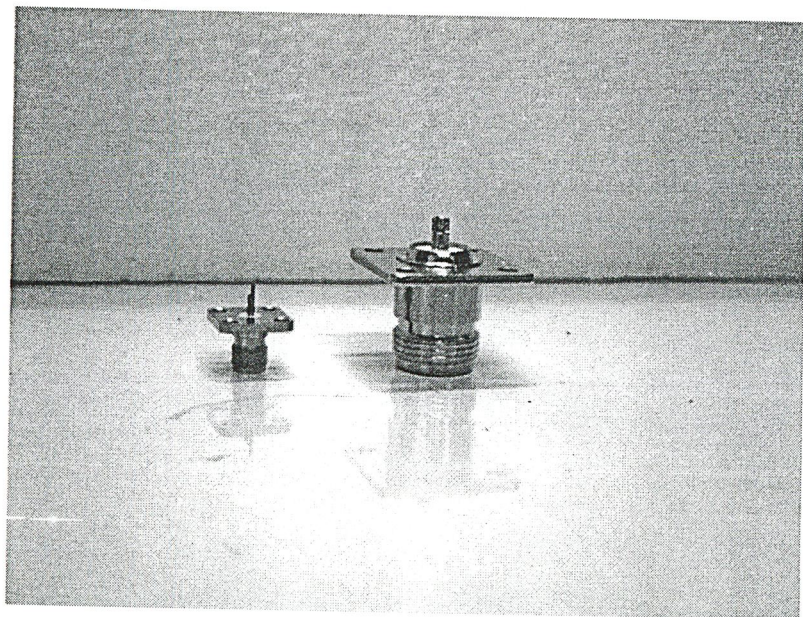


รูปที่ 2.22 สายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ

ส่วนกรณี ตัวป้อนสัญญาณวงแหวนวงกลมล้อมรอบโพรบเชิงเส้นไฟฟ้ามีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ (3.69 ซม.) และค่าความยาวของวงแหวน 0.285λ (3.5 ซม.) มีค่าความยาวโพรบเท่ากับ 0.25λ (3.1 ซม.) และใช้ Connector SMA 50 Ω ที่ได้ทำการสร้างขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.23 ส่วนในรูปที่ 2.24 เป็นการแสดงลักษณะของ Connector SMA 50 Ω และ Connector N - type 50 Ω ตามลำดับ

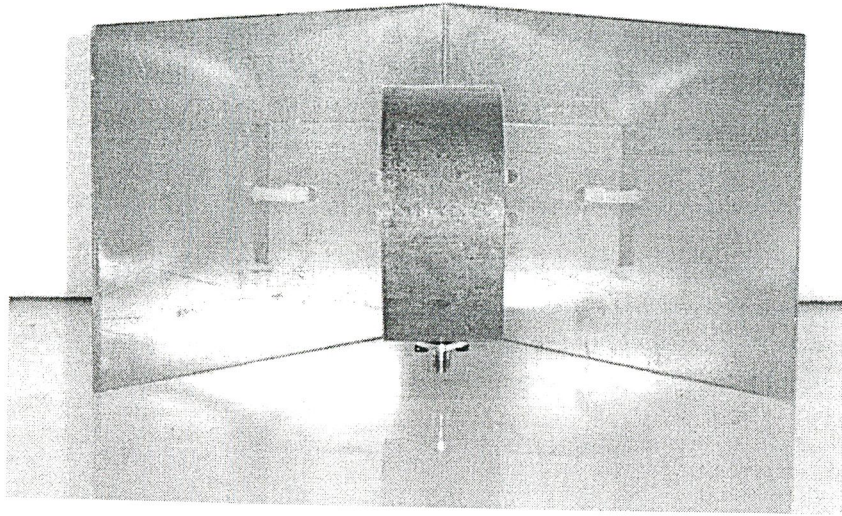


รูปที่ 2.23 สายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ



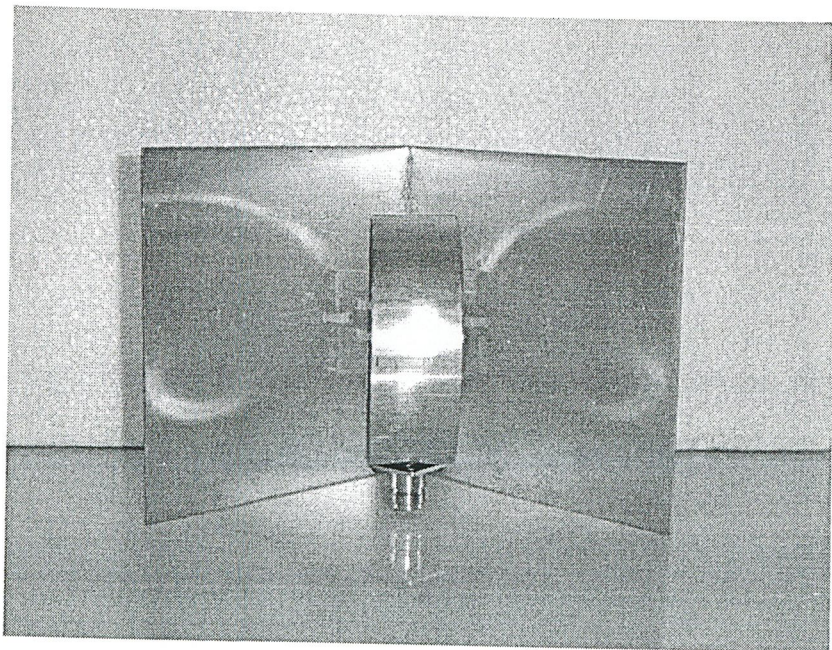
รูปที่ 2.24 ลักษณะของ Connector SMA 50Ω และ Connector N - type 50Ω

เมื่อทำการพิจารณาจากคุณสมบัติที่เหมาะสมต่างๆของตัวป้อนสัญญาณวงแหวนแบบวงกลมทั้ง 2 ขนาดพบว่าขนาดที่เหมาะสมจะนำมาสร้างสายอากาศ ที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยใช้ตัวสะท้อนแบบมุม 90° ของตัวป้อนสัญญาณวงแหวนแบบวงกลมที่มีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ มีความยาวของตัวสะท้อน (l_c) เท่ากับ 0.906λ (11ซ.ม.) และ ความสูงของตัวสะท้อน (h) เท่ากับ 0.906λ (11ซ.ม.) โดยที่ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นกับตัวป้อนสัญญาณเท่ากับ 0.7λ (8.5ซ.ม.) ได้แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมที่มีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ

ส่วนที่ค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ มีความยาวของตัวสะท้อน (l_c) เท่ากับ 1.225λ (15ซ.ม.) และ ความสูงของตัวสะท้อน (h) เท่ากับ 1.225λ (15ซ.ม.) โดยที่ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นกับตัวป้อนสัญญาณเท่ากับ 0.6125λ (7.5ซ.ม.) ได้แสดงดังรูปที่ 2.26



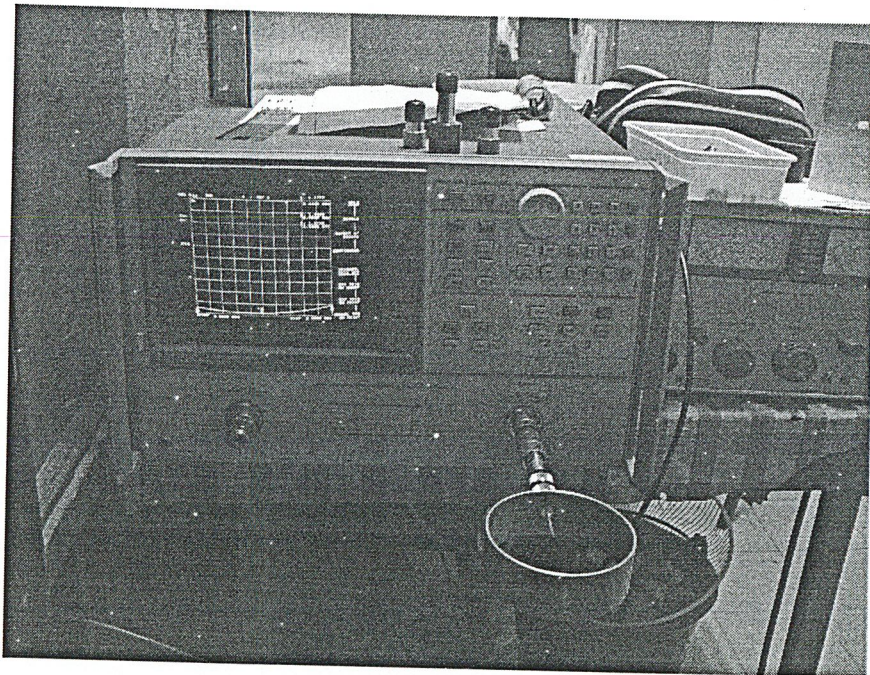
รูปที่ 2.26 สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมที่มีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ

2.7 การทดสอบ

2.7.1 การทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ในทางปฏิบัตินั้นสายอากาศที่ออกแบบไม่สามารถที่จะปรับให้มีค่าอิมพีแดนซ์ (ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากขั้วของสายอากาศ) ให้มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องรับหรือเครื่องส่งได้ ดังนั้นเมื่อมีการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่ง ผลก็จะทำให้กำลังงานส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับที่จุดอินพุตของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อเป็นการบ่งบอกแก่ผู้นำสายอากาศไปใช้งานว่าสายอากาศตัวนี้ หากนำไปใช้งานแล้ว จะสามารถรับกำลังงานที่ส่งมาจากเครื่องส่งได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถบอกได้ด้วยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)

โดยทั่วไปแล้วค่า VSWR ที่จะนำมาใช้งานจะต้องมีค่าไม่เกิน 2:1 แต่ถ้านำไปใช้งานจริงๆควรมีค่าไม่เกิน 1.5:1 และค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศควรมีค่าใกล้เคียง 50Ω ซึ่งการทดสอบค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ สามารถทดสอบได้โดยเครื่อง Network Analyzer ดังแสดงในรูป 2.27 ส่วนอุปกรณ์และลำดับขั้นตอนการทดสอบนั้นได้แสดงไว้ที่ภาคผนวก ค



รูปที่ 2.27 แสดงการต่อสายอากาศที่จะทำการวัดค่าพารามิเตอร์เข้ากับเครื่อง Network Analyzer

2.7.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

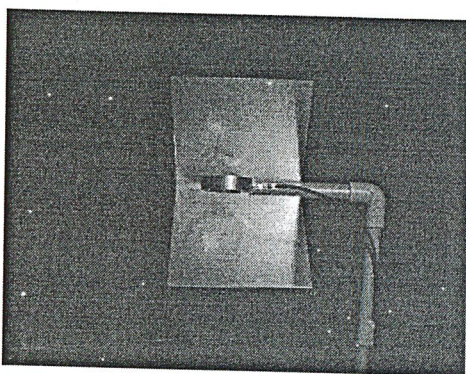
การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะทำการวัดการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก ในการวัดจะพิจารณาที่ค่าสนามระยะไกล (Far field) ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและตัวรับมีค่าเท่ากับ

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{เมตร} \quad (2.8)$$

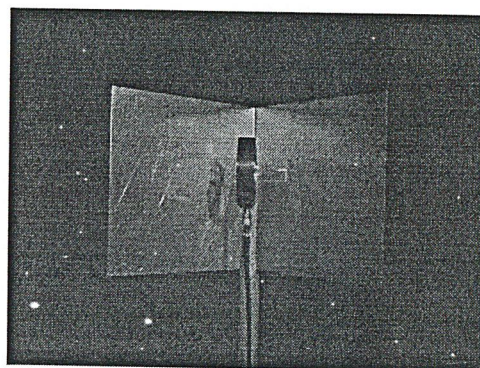
โดยที่ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศรับกับสายอากาศส่ง

D คือมิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศรับบวกมิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศส่ง

โดยทำการทดสอบในห้องทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น แสดงได้ดังรูปที่ 2.28 , 2.29 และรูปที่ 2.30 ส่วนอุปกรณ์และลำดับขั้นตอนการทดสอบนั้นได้แสดงไว้ที่ภาคผนวก

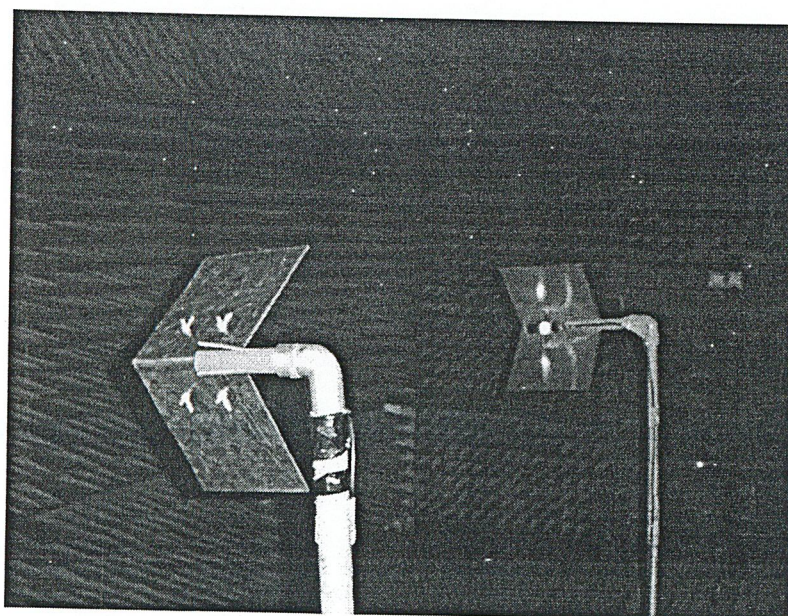


ก). ระบายสนามไฟฟ้า

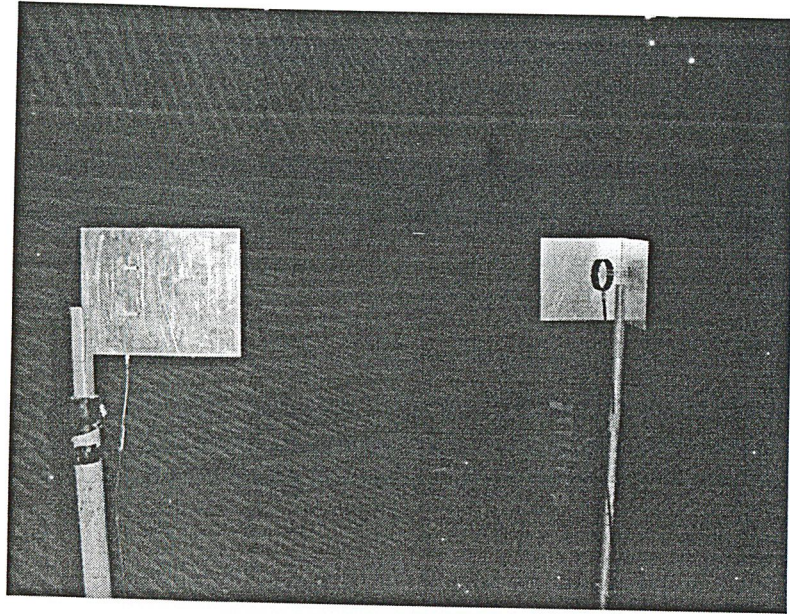


ข). ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.28 การจัดวางสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม ภายในห้องทดสอบโดยสายอากาศที่สร้างขึ้นทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ

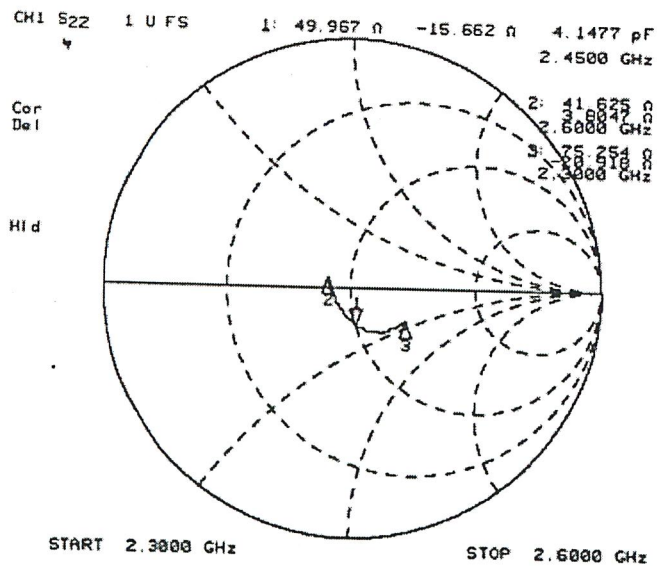


รูปที่ 2.29 การวางสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมในระบายสนามไฟฟ้าภายในห้องทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

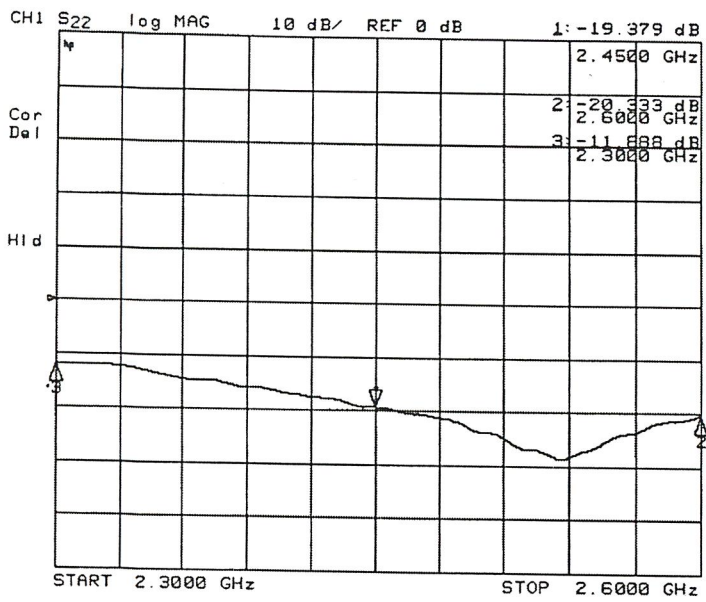


รูปที่ 2.30 การวางสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมในระนาบสนามแม่เหล็กภายในห้องทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ผลที่ได้จากการทดสอบตามวิธีการทั้งหมดนี้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อพิจารณาว่าผลที่ได้จากการทดสอบนั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์หรือไม่

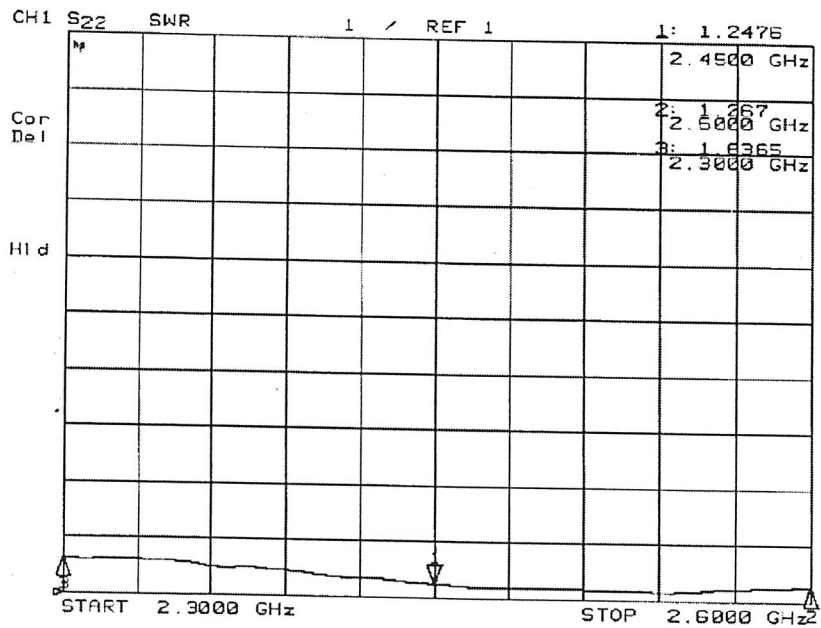
2.8 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม



รูปที่ 2.32 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม



รูปที่ 2.33 ตัวอย่างผลการทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบ กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ของ สายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ

สายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ			
ผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์	VSWR	Impedance (Ω)	Band Width (%)
ผลการทดสอบ	1.12	$42.24 - j2.05 \Omega$	12.24
ผลการวิเคราะห์	1.71	$44 + j24.7 \Omega$	10.61

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบ กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ของ สายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ

สายอากาศที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ			
ผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์	VSWR	Impedance (Ω)	Band Width (%)
ผลการทดสอบ	1.13	$44.54 - j1.40 \Omega$	12.24
ผลการวิเคราะห์	1.93	$52.4 + j34.2 \Omega$	14.28

ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบ กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ

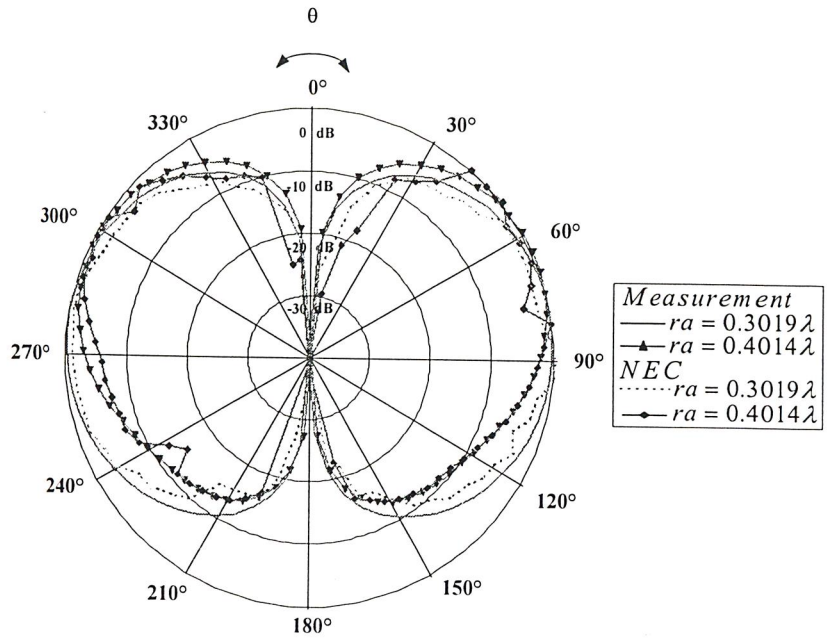
สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม			
ผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์	VSWR	Impedance (Ω)	Band Width (%)
ผลการทดสอบ	1.02	$49.02 - j10.23 \Omega$	12.24
ผลการวิเคราะห์	1.86	$52.4 + j34.2 \Omega$	16.32

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบ กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมมีค่ารัศมีของวงแหวนเท่ากับ 0.4014λ

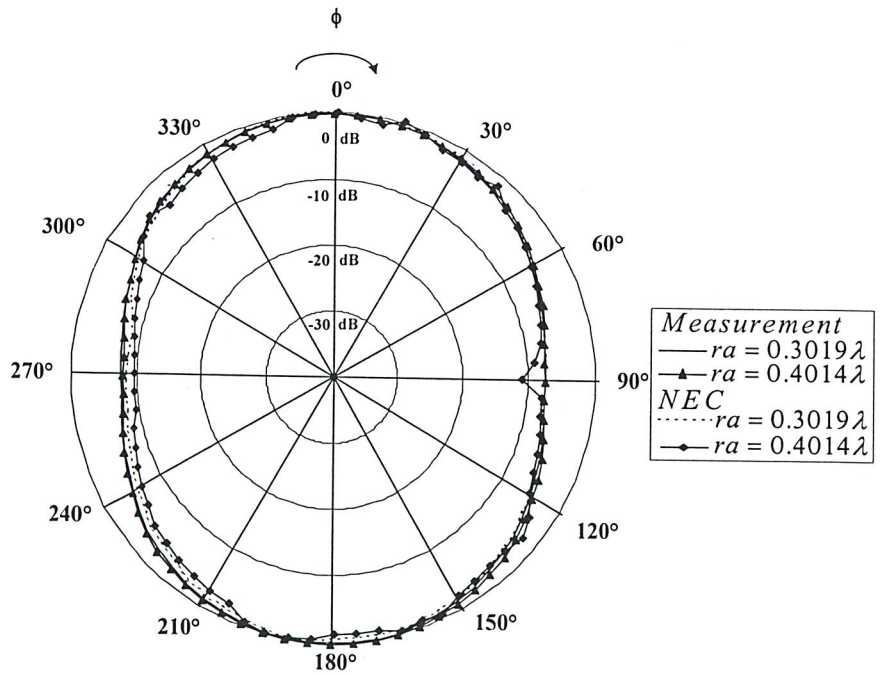
สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม			
ผลการทดสอบ และ ผลการวิเคราะห์	VSWR	Impedance (Ω)	Band Width (%)
ผลการทดสอบ	1.26	$44.24 - j3.02\Omega$	12.24
ผลการวิเคราะห์	1.73	$46.02 + j45.23 \Omega$	10.61

2.9 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

2.9.1 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนแบบวงกลม



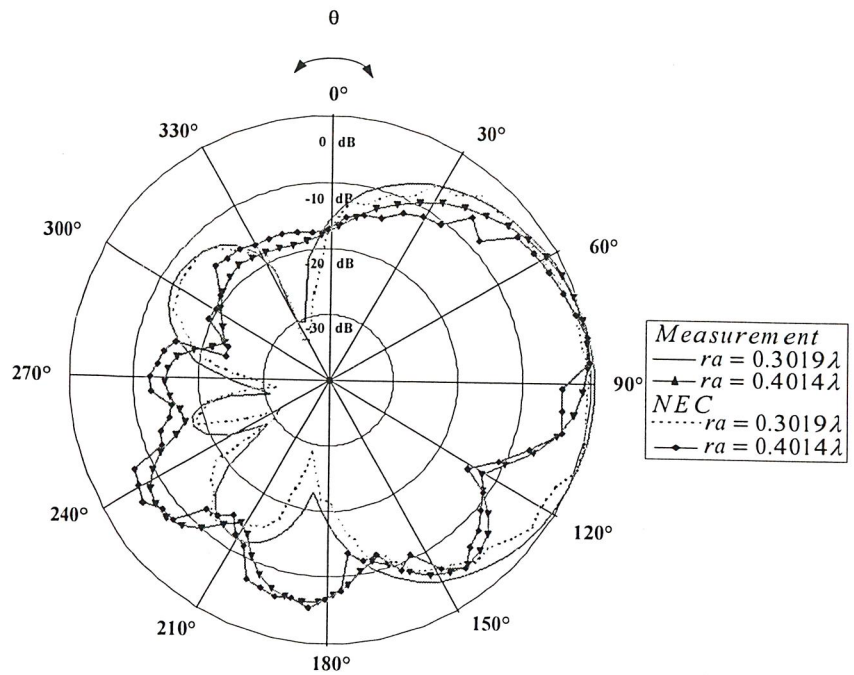
ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



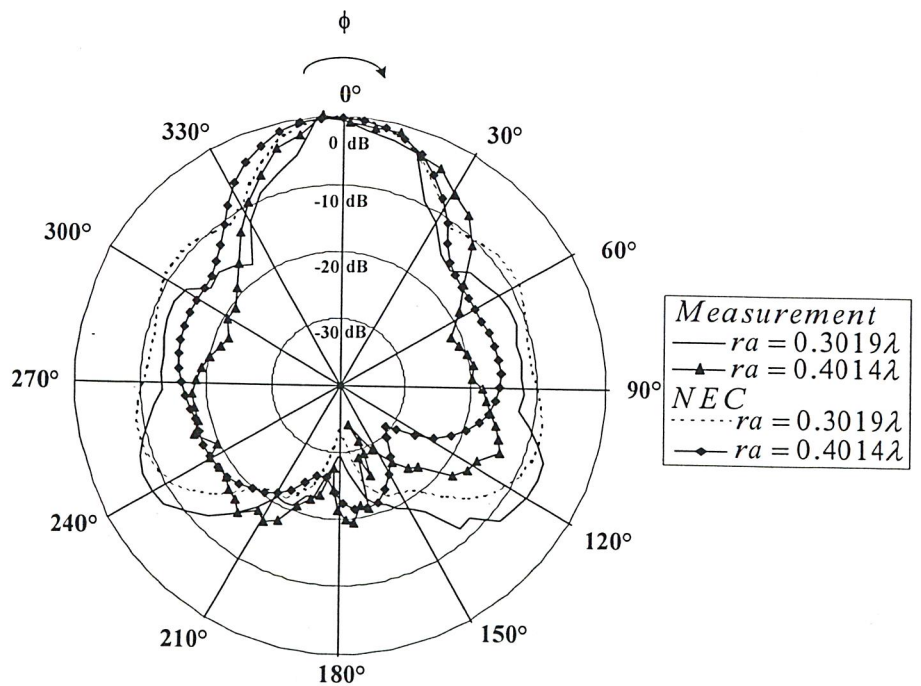
ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.34 ผลการทดสอบสายอากาศวงแหวนแบบวงกลมเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

2.9.2 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลม



ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

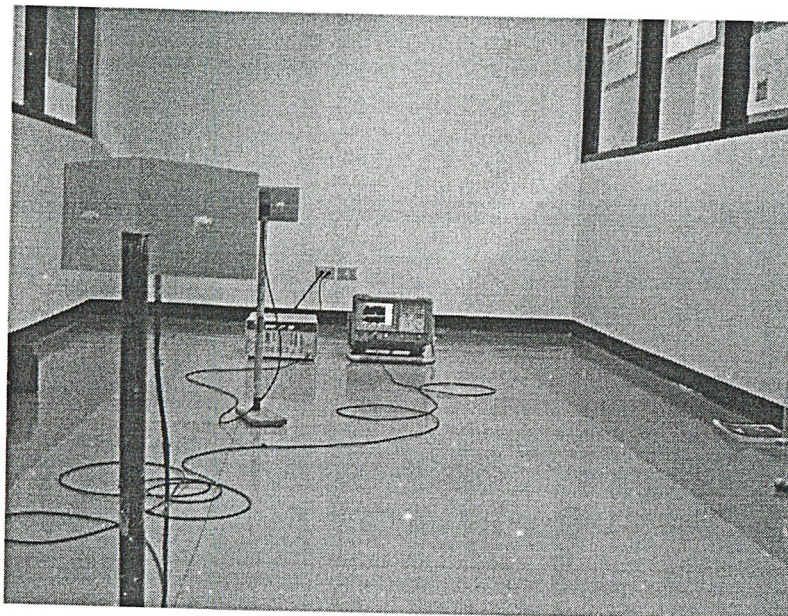


ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2.35 ผลการทดสอบสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบวงกลมเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

2.10 ผลการทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

หลังจากที่ทำการสร้างและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแล้วขั้นตอนต่อไปคือ การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ



รูปที่ 2.36 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

สูตรในการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศมีสูตรดังนี้

$$G_r \text{ (dBi)} = P_r \text{ (dBm)} - P_t \text{ (dBm)} - G_t \text{ (dBi)} + L_r \text{ (dB)} + L_t \text{ (dB)} + L_s \text{ (dB)} \quad (2.8)$$

โดยที่ P_t มีค่าเท่ากับ 0 dBm และการสูญเสียในอากาศมีค่าเท่ากับ

$$L_s = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (2.9)$$

ซึ่งในการทดสอบใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเท่ากับ 2.16 เมตร จะได้ การสูญเสียในอากาศมีค่าเท่ากับ 46.91 dB โดยมีการสูญเสียในสายที่ใช้ต่อกับสายอากาศรับ (L_r) เท่ากับ 4.112 dB และมีค่าการสูญเสียในสายที่ใช้ต่อกับสายอากาศส่ง (L_t) 13.08 dB โดยใช้กำลังในการส่งเท่ากับ 0 dBm เมื่อทราบค่าต่างแล้วนำอุปกรณ์มาต่อตามรูปที่ 2.36 แล้วทำการวัดค่ากำลังที่รับแล้วนำไป คำนวณ โดยใช้สมการที่ 2.8 ก็จะได้อัตราขยายของสายอากาศ

เมื่อทำการทดสอบสายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนตามที่ได้ออกแบบไว้จะได้อัตราการขยายของสายอากาศดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม

รัศมีของวงแหวน (λ)	อัตราการขยาย (dBi)
ra = 0.3019	9.84
ra = 0.4014	7.91

2.11 สรุป

ดังนั้นสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนด้วยสัญญาณวงแหวนวงกลม สายอากาศชนิดนี้ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวซึ่งมีประโยชน์อย่างมากที่จะนำไปใช้งานเป็นสายอากาศสำหรับการสื่อสารแบบจุดต่อจุด เช่นการเชื่อมโยงของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคารเป็นต้นโดยที่โครงสร้างของสายอากาศไม่ซับซ้อนสามารถทำการออกแบบได้ง่าย อีกทั้งวัสดุยังหาได้ง่ายตามท้องตลาดและมีราคาถูก สายอากาศที่ออกแบบไว้จะทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz จากผลการวิเคราะห์ กับผลการทดสอบ แล้วพบว่าป็นขนาดที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาสร้างใช้งานเพราะเมื่อทำการพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ได้จากการทดสอบพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบอยู่ตรงตามข้อกำหนดของพารามิเตอร์สายอากาศ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นมีค่าคลื่นย่อยด้านข้างและค่าคลื่นย่อยด้านหลังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบนี้มีการผิดพลาดเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นผลมาจาก วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ทำสายอากาศรวมทั้งความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ทำการวัดและเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบนั้นมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 3

การวิเคราะห์แบบจำลองอากาศว่าง และแบบจำลองสองรังสี

3.1 แบบจำลองอากาศว่าง

แบบจำลองนี้ใช้ทำนายความเข้มของสัญญาณในกรณีที่ไม่มีวัตถุใด ๆ ขวางกั้นการเดินทางของคลื่น โดยพิจารณาสัญญาณไซน์ชอยด์ที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดแบบจุดซึ่งแพร่กระจายคลื่นในสูญญากาศ (อากาศว่าง) แหล่งกำเนิดนี้เรียกว่า “ตัวแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิก (Isotropic radiator)” ถ้ากำหนดให้กำลังงานที่แพร่กระจายออกมาและระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแทนด้วย P_{rad} มีหน่วยเป็นวัตต์และ R มีหน่วยเป็นเมตร ตามลำดับ ดังนั้นขนาดของพอยน์ติงเวกเตอร์ของคลื่น (กำลังงานต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย) เขียนได้ดังนี้

$$P_{fs} = \frac{P_{rad}}{4\pi R^2} \quad W/m^2 \quad (3.1)$$

กรณีสายอากาศไม่ใช่ตัวแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิกและระยะห่างมีค่ามากกว่าขนาดของสายอากาศ ดังนั้นสามารถแทน P_{rad} ด้วย $P_t G_t$ โดยที่

$$P_{rad} \text{ คือ กำลังงานที่ขั้วต่อสายอากาศ} \quad (3.2ก)$$

$$G_t \text{ คือ อัตราขยายสายอากาศส่ง} \quad (3.2ข)$$

ความเข้มสนามไฟฟ้าเขียนได้ดังนี้

$$E_{fs} = \sqrt{Z_{fs} P_{fs}} \quad (3.3)$$

โดยที่ Z_{fs} คืออิมพีแดนซ์อากาศว่างซึ่ง

$$Z_{fs} = \sqrt{\mu_{fs} / \epsilon_{fs}} \approx 120\pi = 377\Omega \quad (3.4)$$

เมื่อ μ_{fs} และ ϵ_{fs} คือค่าความซึมซาบแม่เหล็กและค่าสภาพยอมไฟฟ้า ตามลำดับในกรณีอากาศว่าง

$$\mu_{fs} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ v-s/A.m} \quad (3.5ก)$$

$$\epsilon_{fs} \approx (10^{-9} / 36\pi) \text{ F/m} = (10^{-9} / 36\pi) \text{ A-S/V.m} \quad (3.5ข)$$

ความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศว่างสำหรับกรณีที่ไมใช่ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{fs} = \sqrt{120\pi \frac{P_t G_t}{4\pi R^2}} = \frac{\sqrt{30P_t G_t}}{R} \quad \text{V/m} \quad (3.6)$$

การแพร่กระจายคลื่นในสถานะแวลด้อมใดๆ เมื่อ E_{rec} คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า P_{rec} และ G_r คือ กำลังงานรับที่สายอากาศ และ อัตราขยายสายอากาศรับ ตามลำดับ ดังนั้นค่ากำลังงานสูงสุดที่รับจากเครื่องรับโดยใช้ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก คือ

$$E_{fs} = \frac{\lambda^2}{4\pi} P_{rec} G_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{E_{rec}}{Z_{fs}} G_r = \left(\frac{E_{rec} \lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_r}{120} \quad (3.7)$$

อัตราส่วนระหว่างกำลังงานรับและส่ง คือ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{E_{rec} \lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_r}{120} \frac{(E_{fs} R)^2}{30G_t} \quad (3.8)$$

$$= \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t \left(\frac{E_{rec}}{E_{fs}} \right) \quad (\text{กรณีทั่วไป}) \quad (3.9ก)$$

$$= \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_r G_t \quad (\text{กรณีอากาศว่าง}) \quad (3.9ข)$$

จากสมการที่ 3.9 ก และ 3.9 ข แสดงความสัมพันธ์และความแตกต่างความเข้มสนามไฟฟ้ารับ ระหว่างกรณีทั่วไป และแบบอากาศว่าง โดยสมการความสัมพันธ์การแพร่กระจายคลื่นคือ

$$\text{ความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น} = -10 \log \left(\frac{P_r}{P_t} \frac{1}{G_r G_t} \right) \quad (3.10)$$

$$= 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{E_{fs}}{E_{rec}} \right) \quad (3.11)$$

$$= L_{fs} + L_{nfs} \quad (3.12)$$

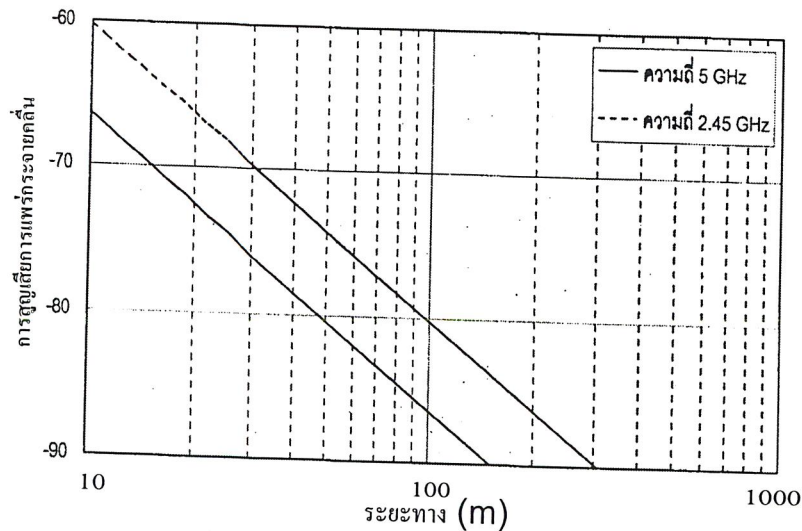
โดยที่ L_{nfs} คือ ความสูญเสียในสถานะที่ไม่ใช่อากาศว่าง ซึ่งความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในกรณีอากาศว่างสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$L_{fs} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi 1,000 R_{km}}{299.8 / f_{MHz}} \right) \quad (3.13)$$

$$= 32.45 \text{ dB} + 20 \log_{10} (R_{km} f_{MHz}) \quad (3.14)$$

$$= 36.58 \text{ dB} + 20 \log_{10} (R_{km} f_{MHz}) \quad (3.15)$$

ความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจากสมการที่ 3.13 ความถี่ใช้งานมีค่าเท่ากับ 2.45 GHz และ 5 GHz แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งพบว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นสิบเท่าแล้วความสูญเสียการแพร่กระจายจะเพิ่มขึ้น 20 dB ถ้าระยะทางเท่ากันแต่ความถี่ใช้งานมีค่าต่างกันแล้ว ความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจะไม่เท่ากัน โดยความถี่สูงกว่าจะมีความสูญเสียมากกว่า



รูปที่ 3.1 การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองอากาศว่างที่ความถี่ 2.45 GHz และ 5 GHz

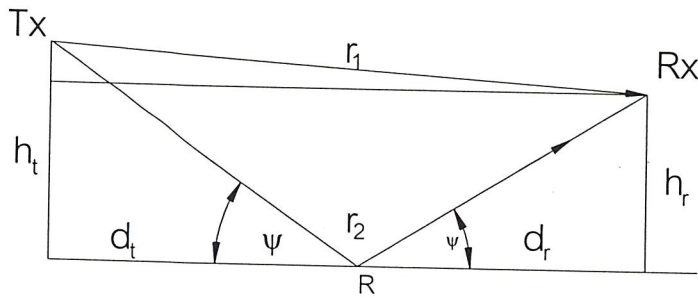
3.2 แบบจำลองสองรังสี

การสื่อสารแบบจุดต่อจุดในสถานะแวดล้อมมีเส้นทางการมองเห็นระดับสายตา (LOS) ดังรูปที่ 3.2 คลื่นเดินทางตามเส้นทางตรง (r_1) และเส้นทางสะท้อน (r_2) จากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ ความแตกต่างระหว่าง r_1 และ r_2 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$r_2 - r_1 = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + R^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + R^2}$$

$$\approx R \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_t + h_r}{R} \right)^2 \right] - R \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_t - h_r}{R} \right)^2 \right] \tag{3.16}$$

$$= \frac{2h_t h_r}{R}$$



รูปที่ 3.2 แบบจำลองสองรังสี

ความแตกต่างของเส้นทางเดินคลื่นทำให้เกิดความต่างเฟส เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda R} = 1.3343 \times 10^{-5} \frac{f_{MHz} h_t h_r}{R_{Km}} \tag{3.17}$$

โดยที่ความสูงของสายอากาศมีหน่วยเป็นเมตร มุมสะท้อน ψ มีค่าเท่ากับ

$$\tan \psi = \frac{h_t}{R_t} = h_t \div \frac{h_t R}{h_t + h_r} = \frac{h_t + h_r}{R} \tag{3.18}$$

ในการสื่อสารย่าน VHF และ UHF สามารถยกเว้นบางสัญญาณที่สะท้อนแล้วมีผลกระทบน้อย ดังนั้นขนาดสนามไฟฟ้าที่สายอากาศรับสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_{rec} = E_{direct} + E_{reflection} = E_{direct} [1 + \eta e^{j\Delta}] \tag{3.19}$$

อัตราส่วนกำลังสองของสนามไฟฟ้ารับและส่ง คือ

$$\left| \frac{E_{rec}}{E_{direct}} \right|^2 \approx |1 + \eta e^{j\Delta}|^2 = 1 + |\eta|^2 + 2|\eta| \cos(\Delta + \xi) \tag{3.20}$$

โดยที่ η คือ สัมประสิทธิ์เชิงซ้อนการสะท้อนและมีความสัมพันธ์กับมุมสะท้อน ψ คือ

$$\eta = \frac{\sin \psi - Z}{\sin \psi + Z} = |\eta| e^{j\xi} \quad (3.21)$$

อิมพีแดนซ์พื้นดินมีความสัมพันธ์กับค่า ϵ_g ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกพื้นดิน มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Z = \sqrt{\epsilon_g - \cos^2 \psi} \approx \sqrt{\epsilon_g - 1} \quad (\text{สำหรับการโพลาริซ์แนวตั้ง}) \quad (3.22)$$

$$Z = \sqrt{\epsilon_g - \cos^2 \psi} / \epsilon_g \approx \sqrt{\epsilon_g - 1} / \epsilon_g \quad (\text{สำหรับการโพลาริซ์แนวนอน}) \quad (3.23)$$

ค่าของ ϵ_g มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมไฟฟ้าของอากาศว่าง (ϵ_{fs}) ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ϵ) และค่าความนำของพื้นดิน (σ) ดังนี้

$$\epsilon_g = \epsilon - j \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_{fs}} = \epsilon - 1.796 \times 10^4 \frac{j\sigma}{f_{MHz}} \quad (3.24)$$

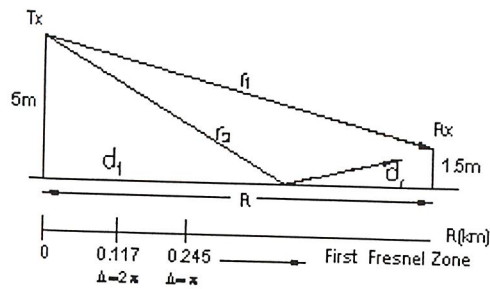
เนื่องจากผิวโลกมีค่า $\sigma = 0.005$ S/m และ $\epsilon = 15$ ได้

$$\epsilon_g = 15 - j90 / f_{MHz} \quad (3.25)$$

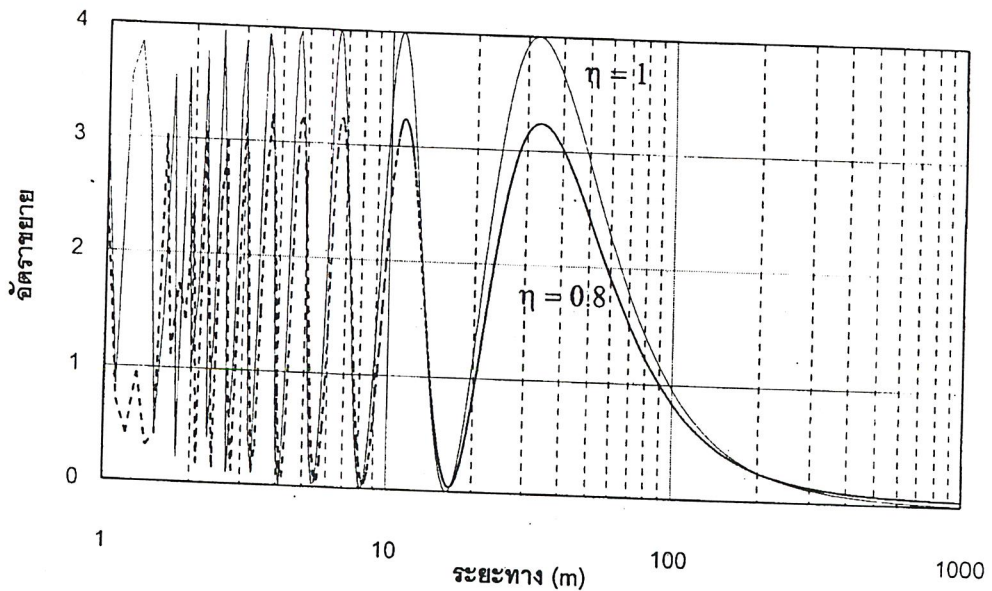
ที่ความถี่ 2.45 GHz ค่า Z เท่ากับ $3.42 \angle -0.075$ และ $0.25 \angle -0.065$ กรณีที่เป็นการโพลาริซ์แนวตั้งและการโพลาริซ์แนวนอน ตามลำดับ ดังนั้นมุมสะท้อนจะมีค่าน้อยมาก $\eta \approx -1$ ดังนั้นเขียนสมการที่ (3.20) ใหม่ได้ดังนี้

$$\left| \frac{E_{rec}}{E_{fs}} \right|^2 \approx 2(1 - \cos \Delta) = 4 \sin^2 \left(\frac{\Delta}{2} \right) = 4 \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} \right) \quad (3.26)$$

จากสมการที่ 3.25 แสดงว่าการแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมมีเส้นทางการเดินแนวสายตาและพื้นมีลักษณะราบเรียบจะมีกำลังงานเพิ่มขึ้น 6 dB เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอากาศว่าง โดยที่ $\Delta/2$ มีค่าเท่ากับ $\pi/2$ คูณกับจำนวนเต็มคี่แล้ว $\sin(\Delta/2) = \pm 1$ ถ้า $\Delta/2$ มีค่าเท่ากับ π คูณกับจำนวนเต็มแล้วคู่แล้ว $\sin(\Delta/2) = 0$ การเปลี่ยนแปลงของมุมขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศและระยะห่าง



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแบบจำลองสองรังสี เมื่อ $f = 2.45 \text{ GHz}$



รูปที่ 3.4 อัตราขยายเมื่อเปรียบเทียบกับความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่างเมื่อ

$$h_t = 5 \text{ m} \quad h_r = 1.5 \text{ m} \quad f = 2.45 \text{ GHz}$$

ถ้าสายอากาศสถานีฐานสูง 5 m สายอากาศลูกข่ายสูง 1.5 m และความถี่ 2.45 GHz จากสมการที่ 3.17 จะได้ $\Delta = 245\pi / R_{km}$ ถ้า $R < 0.245 \text{ km}$ แล้ว ดังนั้นสมการที่ 3.25 $\Delta/2$ มีค่ามากกว่า $\pi/2$ ทำให้เกิดอัตราขยายออสซิลเลต ขณะที่ระยะห่างระหว่างลูกข่ายและสถานีฐานเพิ่มมากขึ้น ถ้า $R > 0.245 \text{ km}$ แล้วมุม $\Delta/2$ มีค่าน้อยกว่า $\pi/2$ เสมอ ทำให้อัตราสูญเสียไม่เกิดการออสซิลเลตเมื่อระยะห่างระหว่างลูกข่ายและสถานีฐานเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 3.4 การเกิดออสซิลเลตน้อยลงถ้าขนาดของ η มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง

ระยะห่างที่ทำให้ $\Delta = n\pi$ หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_n = 4h_t h_r / n\lambda \quad (3.27)$$

ถ้า $R > d_1 = 4h_t h_r / \lambda$ แล้ว $\Delta/2 < \pi/2$ และไม่เกิดการออสซิลเลตในสมการที่ 3.25 ดังนั้นกำลังงานรับลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างลูกข่ายและสถานีฐานเพิ่มขึ้นเสมอ สำหรับตำแหน่งที่ทำให้ $\Delta < n\pi$ มีความสัมพันธ์กับลำดับ n ของเขตเฟรสเนล (Fresnel Zone) เมื่อ $R > d_1$ ทำให้เกิดเขตเฟรสเนลลำดับแรก กรณีที่ $R > d' \triangleq 12h_t h_r / \lambda$ ทำให้ $\Delta/2 < \pi/6$ และ $\sin(\Delta/2) < 0.5$ กำลังงานรับในสภาวะมีเส้นทางเดินแนวสายตานั้นน้อยกว่าสภาวะอากาศว่างเสมอ ดังนั้นฟังก์ชันไซน์ในสมการที่ 3.26 สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left| \frac{E_{rec}}{E_{fs}} \right|^2 \approx \left(\frac{4\pi h_t h_r}{\lambda R} \right)^2, R > d' \quad (3.28)$$

อัตราขยายสำหรับเส้นทางเดินในสมการที่ 3.26 คุณด้วยอัตราการสูญเสียอากาศว่าง

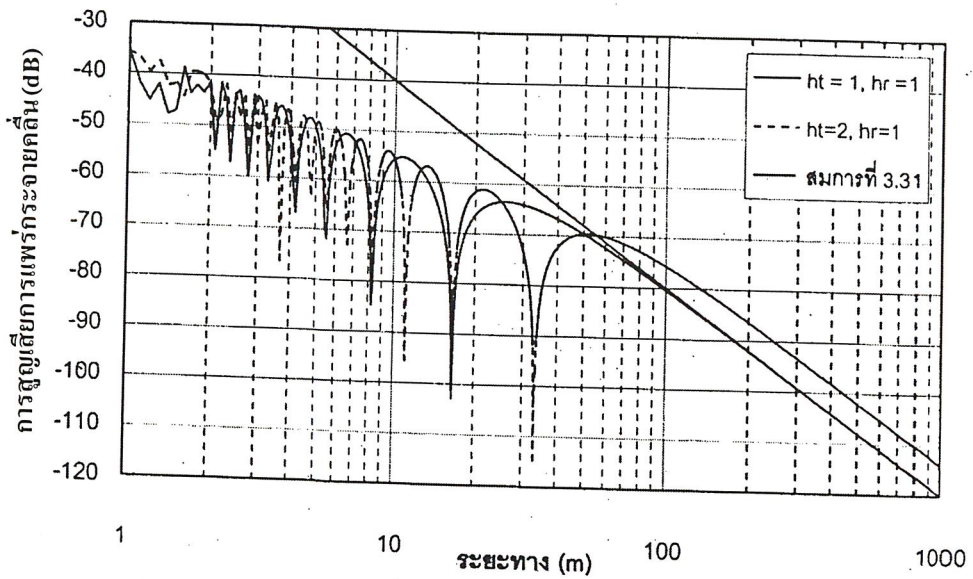
$$\frac{P_r}{P_t} = 4 \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} \right) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (3.29)$$

$$\approx 4 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda R} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \frac{(h_t h_r)^2}{R^4}, R > d' \quad (3.30)$$

จากสมการที่ 3.30 แสดงให้เห็นว่ากำลังงานลดลงด้วยอัตราขยายกำลังสี่ เมื่อระยะ $R > d'$ ความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในภาวะมีเส้นทางเดินแนวสายตา สามารถเขียนในหน่วย dB ได้ดังนี้

$$L_{los} = 10 \log_{10} \left[\frac{(h_t h_r)^2}{R^4} \right] = 120 + 40 \log_{10} R_{Km} - 20 \log_{10} (h_{tm} h_{rm}) \quad (3.31)$$

โดยที่ R_{Km} คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร h_{tm} และ h_{rm} คือความสูงสายอากาศด้านส่งและด้านรับ มีหน่วยเป็นเมตร ถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์เดียวกับรูปที่ 3.2 อัตราขยายในสมการที่ 3.29 เขียนกราฟได้ดังรูปที่ 3.5 ภายในรูปแสดงเขตเฟรสเนลลำดับที่ 1 และที่ 2 รวมถึงผลกระทบเมื่อค่า η เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.5 การสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองสองรังสี

โดยปกติเขตเฟรสเนลลำดับที่ 1 กำหนดโดยปริมาณวงรีซึ่งมีจุดสะท้อนที่ทำให้เส้นทางเดินตรงและเส้นทางสะท้อนมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่าครึ่งของความยาวคลื่น ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 รัศมีของ h_0 ของเขตเฟรสเนลลำดับที่ 1 ที่ตำแหน่งเส้นทางเดิน R ที่ตำแหน่ง d_t และ d_r คือระยะห่างของเครื่องส่งและเครื่องรับ ตามลำดับ เขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

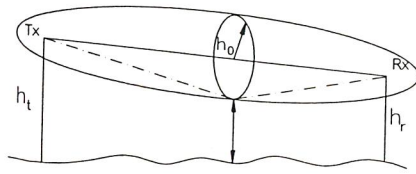
$$\lambda/2 = \text{เส้นทางสะท้อน} - R$$

$$= \text{ระยะห่างจากจุดสะท้อนถึงเครื่องส่ง} + \text{ระยะห่างจากจุดสะท้อนถึงเครื่องรับ} - R$$

$$= \sqrt{d_t^2 + h_0^2} + \sqrt{d_r^2 + h_0^2} - R$$

$$= d_t \left[1 + \frac{h_0^2}{2d_t^2} + \dots \right] + d_r \left[1 + \frac{h_0^2}{2d_r^2} + \dots \right] - (d_t + d_r)$$

$$\approx \frac{h_0^2}{2} \frac{d_t + d_r}{d_t d_r} \Rightarrow h_0 (m) = \sqrt{\frac{\lambda d_t d_r}{d}} = 548 \sqrt{\frac{d_{tkm} d_{rkm}}{d_{km} f_{MHz}}} \tag{3.32}$$



รูปที่ 3.6 เขตเฟรสเนล

3.3 สรุป

ในบทนี้นำเสนอแบบจำลองอากาศว่าง แบบจำลองสองรังสี เพื่อใช้ทำนายความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่น แบบจำลองอากาศว่างเหมาะสมที่ใช้กับระบบสื่อสารดาวเทียมหรือไมโครเวฟที่ไม่มีวัตถุใดๆมาขวางกั้นระหว่างเครื่องรับและส่ง แบบจำลองสองรังสีใช้อธิบายผลกระทบจากการสะท้อนคลื่นของพื้นดิน การศึกษาแบบจำลองและการแจกแจงในบทนี้เป็นพื้นฐานที่นำไปใช้ในการคำนวณระยะบริการ และประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายในบทต่อไป

บทที่ 4

การประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11

4.1 บทนำ

เนื้อหาบทนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ซึ่งมีความจำเป็นต่อการออกแบบและใช้งานโครงข่าย เริ่มจากศึกษาพื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายซึ่งประกอบด้วย โทโปโลยี การควบคุมการเข้าถึงสื่อ รูปแบบเฟรม ชั้นสื่อสารกายภาพ และค่าวิสัยสามารถตามอุดมคติสูงสุด แล้ววิเคราะห์การหาค่าระยะบริการสูงสุด อัตราผิดพลาดแพ็คเก็ต และค่าวิสัยสามารถ โดยเน้นผลกระทบเนื่องจากประสิทธิภาพสายอากาศต่อประสิทธิภาพ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย เพื่อนำผลคำนวณไปใช้ในการออกแบบสายอากาศเพื่อให้ได้คุณภาพการบริการ(Quality of Service) ตามที่กำหนดไว้

4.2 พื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11

พื้นฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 ประกาศครั้งแรกในปี 1997 สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นที่ใช้สายอากาศเป็นช่องสื่อสาร IEEE 802.11 เป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐานโครงข่ายท้องถิ่นและเมืองโดยแสดงดังรูปที่ 4.1 สำหรับชั้นสื่อสาร IEEE 802.11 แบ่งออกเป็นสองชั้นคือ ชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control : MAC) และชั้นกายภาพ (Physical Layer)

4.2.1 โทโปโลยี (Topology)

มาตรฐาน IEEE 802.11 ประกอบด้วยกลุ่มสื่อสารได้แก่ สถานีฐาน (Access Point) และลูกข่าย (Client) โดยที่กลุ่มสื่อสารนี้เรียกว่า กลุ่มบริการพื้นฐาน (Basic Service Set : BSS) โปโตคอลชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ การรวมตัวแบบแอดฮอค (Ad-Hoc) หมายถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างลูกข่ายโดยไม่ต้องใช้สถานีฐานและการรวมตัวแบบโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) คือการติดต่อสื่อสารโดยใช้สถานีฐานเป็นศูนย์กลางการควบคุม กลุ่มสถานีฐานที่สื่อสารกันโดยการส่งต่อเฟรมข้อมูลจากกลุ่มบริการพื้นฐานหนึ่งไปยังกลุ่มอื่นเพื่ออำนวยความสะดวกเมื่อลูกข่ายเคลื่อนย้ายไปยังสถานีฐานอื่นซึ่งเรียกกลุ่มบริการขยาย(Extended Service Set : ESS) ถ้าสถานีฐานหนึ่งสื่อสารกับสถานีอื่นเพื่อส่งต่อเฟรมข้อมูลให้กับสถานีฐานอื่น เพื่อให้ลูกข่ายสามารถเคลื่อนที่จากสถานีหนึ่งไปยังสถานีอื่นและแลกเปลี่ยนเฟรมข้อมูลผ่านทางเครือข่ายไร้สายซึ่งเรียกกลไกนี้ว่า ระบบกระจาย(Distribution System :DS) แสดงดังรูปที่ 4.2

4.2.2 การควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Medium Access Control)

เครือข่ายไร้สายใช้อากาศเป็นสื่อสัญญาณทำให้เกิดปัญหาการชนตัวของลูกข่ายซึ่งปัญหานี้ไม่เกิดขึ้นกับเครือข่ายใช้สาย การชนตัวเกิดจากภาระงานที่จำกัดทำให้ลูกข่ายไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้อย่างทั่วถึงทั้งกลุ่ม ตัวอย่างเช่น ลูกข่าย A และ C จะไม่สามารถติดต่อกันได้เนื่องจากเกินระยะทำการแล้ว ถ้า A และ C ส่งเฟรมไปยัง B พร้อมๆกันทำให้เกิดการชนกัน การส่งเฟรมข้อมูลพร้อมๆกันของ A และ C เนื่องจาก A และ C ไม่ทราบว่ามี B ติดต่อกับสถานีอื่นๆด้วยแสดงดังรูปที่ 4.3 IEEE 802.11 ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้โดยใช้กลไก RTS/CTS

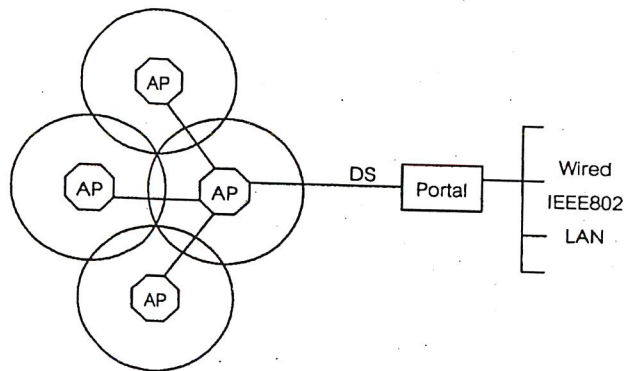
การควบคุมการเข้าถึงสื่อใช้กลไกซึ่งเรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance) ใช้หลักการตรวจสอบสื่อการส่งข้อมูล ถ้าสื่อว่างแล้วจะทำการส่งข้อมูล เมื่อส่งแล้วฝ่ายรับได้รับข้อมูลถูกต้องจะส่งเฟรมตอบรับกลับมา ถ้าไม่มีเฟรมตอบกลับให้ถือว่าการส่งนั้นเกิดการชนกัน จากนั้นฝ่ายส่งจะทำการส่งใหม่โดยหน่วงเวลาก่อนส่ง การหน่วงเวลาเป็นแบบสุ่มและถ้ายังมีการชนกันเวลาที่ใช้หน่วงจะเพิ่มขึ้น

4.2.3 รูปแบบเฟรม

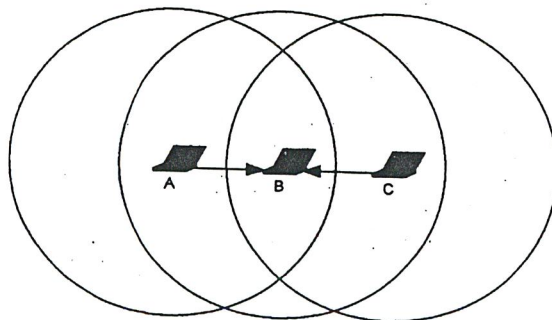
รูปแบบเฟรมในชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ (MSDU) IEEE 802.11 แสดงดังรูปที่ 4.4 ข้อมูลเฟรมประกอบด้วย ข้อมูลที่อยู่ ข้อมูลโปรโตคอล IEEE 802.11 ข้อมูล NAV (Network Allocation Vector) และข้อมูลการจัดลำดับเพื่อความถูกต้องของเฟรม

FC	D/ID	Addr.1	Addr.2	Addr.3	Seq Cont.	Addr.4	Data	FCS
2	2	6	6	6	2	6	0-2312	4
Byte								

รูปที่ 4.1 เฟรมชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ



รูปที่ 4.2 กลุ่มบริการพื้นฐาน (BSS) กลุ่มบริการขยาย (ESS) และระบบกระจาย (DS)



รูปที่ 4.3 ปรากฏการณ์การซ้อนตัวในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

4.2.4 ชั้นสื่อสารกายภาพ

IEEE 802.11 กำหนดให้ก่อนส่งเฟรมข้อมูลจากชั้นควบคุมการเข้าถึงจะต้องเติมข้อมูลที่เรียกว่า ฟรี้แอมเบิล-PLCP และส่วนหัว-PLCP ดังรูปที่ 4.5 ฟรี้แอมเบิล-PLCP ประกอบด้วยฟิลด์ Sync และ SFD เพื่อบรรจุข้อมูลเพื่อการซิงโครไนส์และบอกจุดเริ่มต้นเฟรม ตามลำดับส่วนหัว-PLCP ประกอบด้วยฟิลด์ Signal ซึ่งแสดงการมอดูเลตที่ใช้ฟิลด์ Service คือฟิลด์ที่สงวนไว้ฟิลด์ Length แสดงค่าที่ใช้คำนวณจุดสิ้นสุดของเฟรม ฟิลด์ CRC คือฟิลด์ที่บรรจุข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้องของเฟรม

การมอดูเลตสำหรับมาตรฐาน IEEE 802.11 เป็นแบบโคเร็กซ์ิเคชั่นส์มีอัตราเร็วบิต 1 Mbps และ 2 Mbps ซึ่งอัตราชีพเท่ากับ 11 MHz และใช้การเข้ารหัสแบบเบเคอร์ (Baker) แสดงได้ดังนี้

$$B_n = [-1, +1, -1, -1, +1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1,] \quad (4.1)$$

4.2.5 ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด

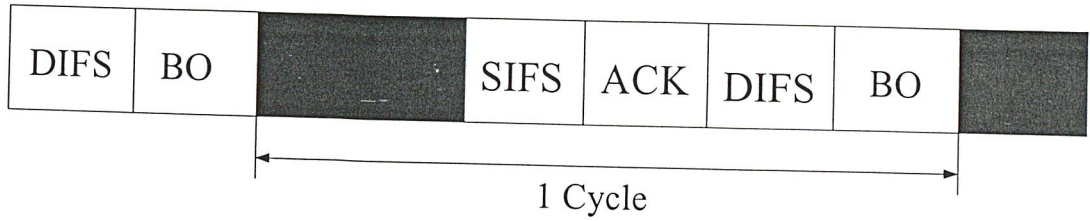
ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุด (Theoretical Maximum Throughput) สำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 คืออัตราส่วนข้อมูล MSDU กับเวลาที่ใช้ส่งทั้งหมดเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$TMT = \frac{MSDU}{T_{MSDU}} \quad (4.2)$$

โดยที่ MSDU คือขนาดข้อมูลจากชั้นควบคุมการเข้าถึงคือส่วน T_{MSDU} คือเวลารวมจากการส่งข้อมูล 1 รอบแสดงดังรูปที่ 4.6 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{MSDU} = (T_{DIFS} + T_{SIFS} + T_{BO} + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{ACK} + T_{Data}) \times 10^{-6} \quad (4.3)$$

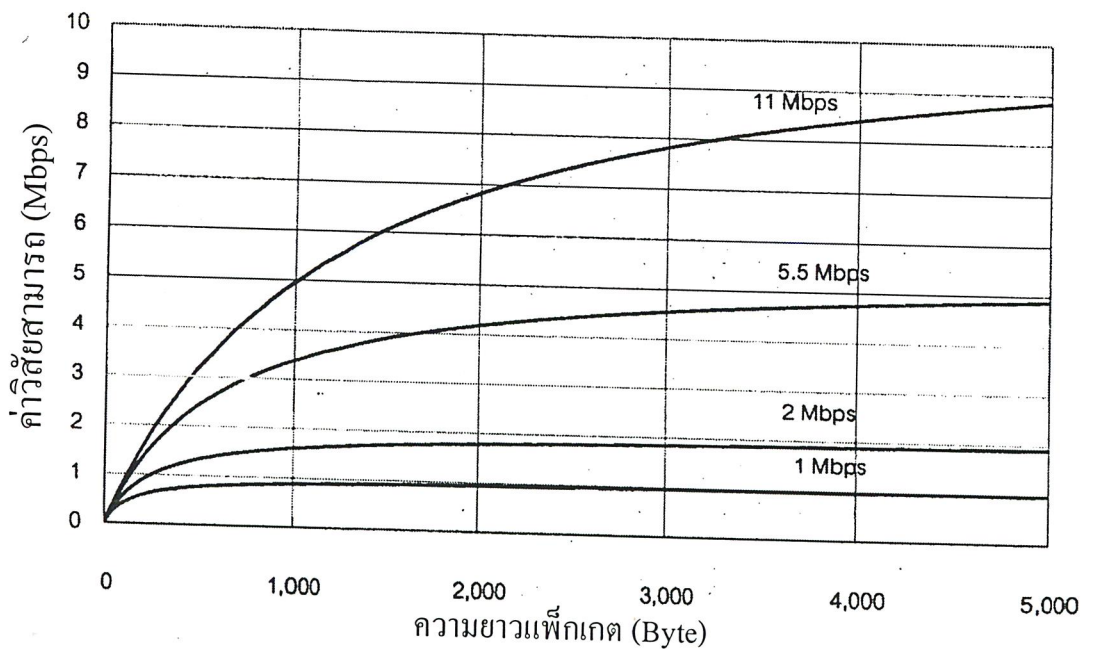
โดยที่ค่าใน(4.3) ได้จากตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.7 แสดงค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดเปรียบเทียบกับขนาด MSDU ที่ อัตราบิต 1 2 5.5 และ 11 Mbps ซึ่งพบว่าเมื่อขนาด MSDU เพิ่มขึ้นค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามถ้าขนาด MSDU มากเกินไปทำให้ค่าความผิดพลาดแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง ปกติแล้วขนาดของ MSDU มีค่าประมาณไม่เกิน 1500 ไบต์



รูปที่ 4.4 ฝั่งเวลาการส่งข้อมูล IEEE 802.11

ตารางที่ 4.1 ค่าเวลาต่างๆที่ใช้ในการส่งข้อมูล

อัตราบิต	T_{DIFS}	T_{SIFS}	T_{ACK}	T_{RTS}	T_{CTS}	T_{Data}
1Mbps	50	10	304	-	-	$192+8(34+MSDU)/1$
2Mbps	50	10	304	-	-	$192+8(34+MSDU)/2$
5.5 Mbps	50	10	304	-	-	$192+8(34+MSDU)/5.5$
11 Mbps	50	10	304	-	-	$192+8(34+MSDU)/11$



รูปที่ 4.5 ค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของขนาด MSDU ที่อัตราบิต 1, 2, 5.5 และ 11 Mbps

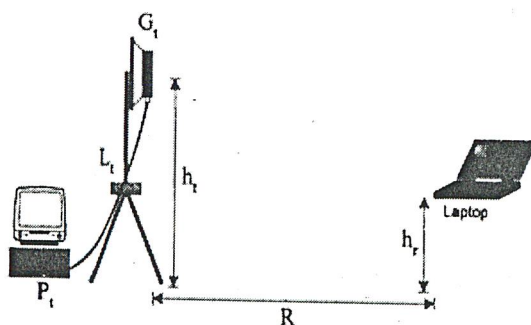
4.3 ระยะเวลาบริการสูงสุด

จุดประสงค์หลักของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่กล่าวมาถึงในบทที่ 3 คือการทำนายค่าความสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายให้มีความแม่นยำที่สุดเพื่อหาระยะทำงานของระบบสื่อสารก่อนการติดตั้งระยะทำงานไกลสุดของระบบเกิดขึ้นเมื่อระดับกำลังงานรับเท่ากับระดับที่ให้คุณภาพการสื่อสารตามที่กำหนดไว้ ซึ่งระดับนี้เรียกว่า ความไวเครื่องรับ (Receiver Sensitivity) อัตราการสูญเสียการแพร่กระจายที่ให้ค่ากำลังงานรับเท่ากับความไวเครื่องรับเรียกว่า ค่าอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Acceptable Path Loss) แสดงเป็นหน่วยเดซิเบลได้ดังนี้

$$L_{\max} = P_t - L_t + G_t - L_r + G_r - S \quad (4.4)$$

เมื่อ P_t คือ กำลังงานส่ง G_t และ G_r คืออัตราการขยายของสายอากาศส่งและรับ ตามลำดับ L_t และ L_r คือ อัตราการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านส่งและรับ S คือ ความไวของเครื่องรับซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีหน่วยเป็นเดซิเบล ซึ่งจากทฤษฎีย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ได้นิยามว่าความสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการสลับหน้าที่รับส่งระหว่างสายอากาศส่งและรับ แต่อย่างไรก็ตามการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่ยอมรับได้ระหว่างสองทิศทางอาจมีความแตกต่างกันเนื่องจากความไวของเครื่องรับด้านรับและด้านส่งต่างกัน เช่นเครื่องรับที่สถานีฐานถูกออกแบบให้มีความไวเครื่องรับมากกว่าลูกข่ายเพื่อลดกำลังงานส่งจากลูกข่าย

การหาระยะบริการสูงสุดระหว่างสถานีฐานและลูกข่ายที่มีคุณสมบัติตามภาคผนวก ง นั้นใช้ค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.6 การทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศวงแหวนเหนือระนาบสะท้อนวงกลมในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

4.4 อัตราผิดพลาดแพ็กเก็ตและค่าวิสัยสามารถ

การสื่อสารข้อมูลแบบแพ็กเก็ตคือ การแบ่งข้อมูลสื่อสารออกเป็นกลุ่มๆ โดยแต่ละกลุ่มบิตเรียกว่า แพ็กเก็ต ถ้าหนึ่งแพ็กเก็ตมีจำนวนบิต N ตัวให้พิจารณาเป็นข้อมูลหนึ่งเดียว เมื่อเกิดบิตผิดพลาดอย่างน้อยหนึ่งบิตแล้วข้อมูลทั้งแพ็กเก็ตให้ถือว่าผิดพลาดทั้งหมด คุณภาพการให้บริการของระบบโทรคมนาคมสามารถแสดงได้โดยอัตราความผิดพลาดบิตหรืออัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ต ความน่าจะเป็นที่มีอย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาดเขียนได้ดังนี้

$$P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) = 1 - P(\text{ทุกบิตถูกต้อง}) \quad (4.11)$$

เมื่อสมมุติให้ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิตแต่ละบิตเป็นอิสระต่อกันแล้ว

$$\begin{aligned} P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) &= 1 - P(\text{บิตลำดับที่หนึ่งผิดพลาด}) \\ &\quad \cdot P(\text{บิตลำดับที่สองผิดพลาด}, \dots) \\ &\quad \cdot P(\text{บิตลำดับที่ } N \text{ ผิดพลาด}) \\ P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) &= 1 - P(\text{บิตไม่ผิดพลาด}) \end{aligned} \quad (4.12)$$

ความน่าจะเป็นที่บิตไม่ผิดพลาดเขียนได้ดังนี้

$$P(\text{บิตไม่ผิดพลาด}) = 1 - BER \quad (4.13)$$

แทนสมการที่ 4.13 ในสมการที่ 4.12 ดังนั้นจะได้

$$P(\text{อย่างน้อยหนึ่งบิตผิดพลาด}) = 1 - (1 - BER)^N \quad (4.14)$$

เมื่อ N คือจำนวนบิตของแพ็กเก็ต

ค่าวิสัยสามารถคือ อัตราเฉลี่ยข้อมูลต่อเวลาที่สามารถส่งหรือรับได้จริง ปกติแล้วมีหน่วยเป็น Kbps หรือ Mbps ค่าวิสัยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Throughput} = R(1 - PER) \quad (4.15)$$

เมื่อ R คืออัตราบิตซึ่งเป็นอัตราเร็วส่งข้อมูลทั้งหมดซึ่งรวมข้อมูลอื่นนอกเหนือจากข้อมูลจริงตัวอย่างเช่น ข้อมูลส่วนหัวที่บรรจุข้อมูลที่อยู่ ฯลฯ ดังนั้นข้อมูลที่ส่งหรือรับได้จริงไม่ตรงกับค่าอัตราบิต จากหัวข้อที่ 4.2.5 สามารถแทนอัตราบิตด้วยค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดเพื่อใช้ทำนายค่าวิสัยสามารถที่ระบบรับหรือส่งได้จริงดังนี้

$$Throughput_{real} = TMT(1 - PER) \quad (4.16)$$

โดยที่ TMT คือค่าวิสัยสามารถตามอุดมคติสูงสุด ถ้าให้ค่า TMT เท่ากับ 1 ดังนั้นการออกแบบให้ระบบ มีค่าวิสัยสามารถสูงสุดนั้นควรเลือกติดตั้งให้กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นอยู่ในระดับแนวสายตามีมากที่สุด

4.5 สรุป

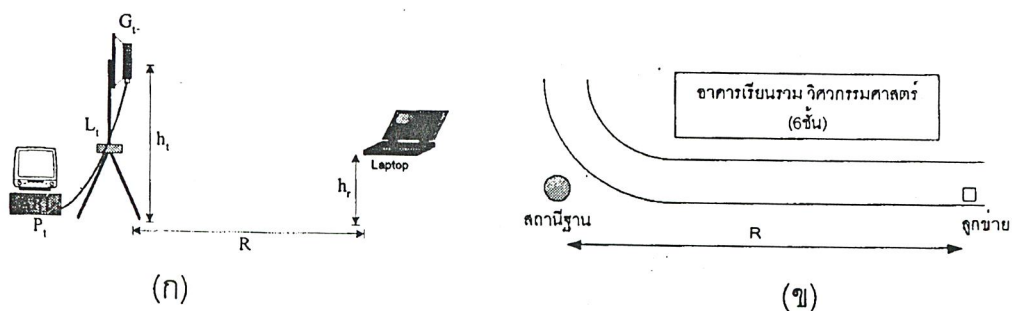
เนื้อหาบทนี้กล่าวถึง การประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยพิจารณาจากระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถ ซึ่งเริ่มจากการศึกษาพื้นฐานระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 โทโพลยี การควบคุมการเข้าถึงสื่อ รูปแบบเฟรม ชั้นสื่อสารกายภาพ และค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดและการคำนวณระยะบริการสูงสุดหาได้จากอัตราสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่ยอมรับได้ จากนั้นแปลงกับเป็นระยะทาง วิธีการคำนวณระยะบริการสูงสุดที่อัตราขยายสายอากาศแต่ละตัว สามารถนำไปใช้ประเมินประสิทธิภาพสายอากาศและออกแบบสายอากาศเพื่อให้โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายมีคุณภาพการบริการตามที่กำหนดได้

บทที่ 5

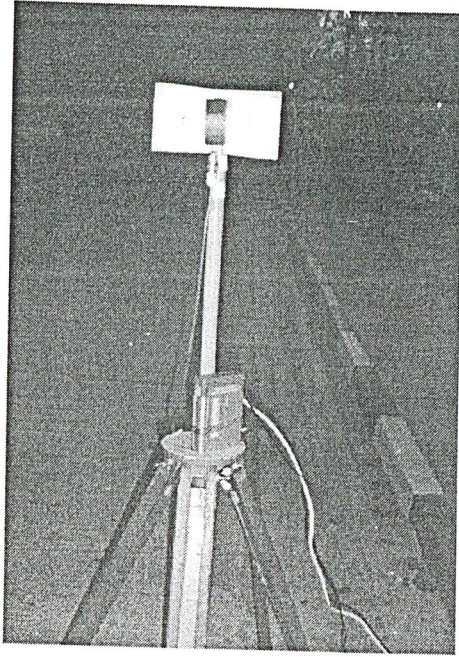
การประเมินประสิทธิภาพและผลการทดสอบ

5.1 การทดสอบประสิทธิภาพ

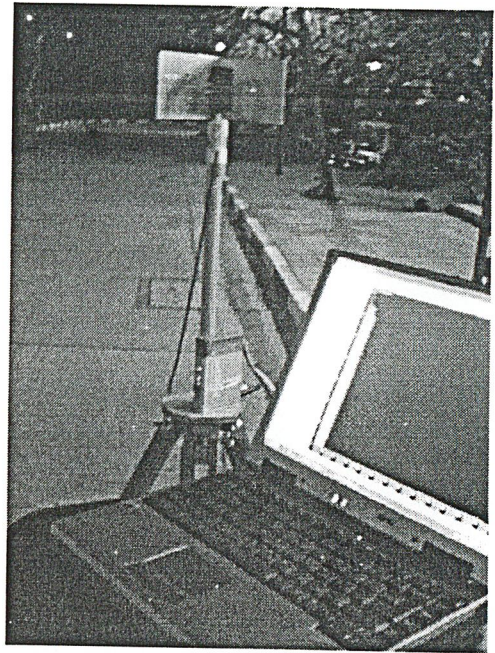
การสื่อสารแบบจุดต่อจุดสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายซึ่งโดยทั่วไปใช้เชื่อมต่อสองเครือข่ายที่อยู่ระหว่างอาคารเข้าด้วยกันซึ่งเป็นการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานกับสถานีฐานการทดสอบด้วยเงื่อนไขนี้ทำได้ยาก เนื่องจากมีระยะบริการสูงสุดไกลมาก และการวัดกำลังงานรับที่สถานีฐานทำได้ยาก ดังนั้นปริญญาโทนิพนธ์นี้จึงสมมติให้ลูกข่ายทำหน้าที่แทนสถานีฐานด้านรับเพื่อให้การทดสอบทำได้ง่าย และลดความผิดพลาดลง ซึ่งการสื่อสารแบบจุดต่อจุดส่วนมาก คือแนวเส้นระดับสายตาระหว่าง เครื่องรับและเครื่องส่ง ดังนั้น จึงเลือกสถานที่ทดสอบคือริมถนนหน้าอาคารเรียนรวมวิศวกรรมศาสตร์ (6 ชั้น) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นถนนคอนกรีต มีลักษณะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 5.1 (ก) สถานีฐานติดตั้งบริเวณหน้าอาคารซึ่งเป็นช่วงต้นถนน การวัดเริ่มต้นจากต้นถนนจนถึงระยะสูงสุดที่สามารถวัดได้ อุปกรณ์ทดสอบทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 5.1 (ข) ด้านสถานีฐานประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ ส่วนบุคคลซึ่งติดตั้งโปรแกรมทดสอบ และเชื่อมต่อกับสถานีฐานด้วยโครงข่ายท้องถิ่น (LAN) สถานีฐานเชื่อมต่อกับสายอากาศทดสอบด้วยสายนำสัญญาณยาว 1 เมตร สายอากาศทดสอบติดตั้งบนขาตั้งมีความสูงจากพื้น 1.5 เมตร ทางด้านลูกข่ายประกอบด้วยคอมพิวเตอร์พกพาติดตั้งการ์ดโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายวางอยู่บนรถเข็นมีความสูงจากพื้น 1 เมตร ดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ในการทดสอบเป็นจุดไม่ต่อเนื่อง โดยแต่ละจุดห่างกัน 10 เมตรตามความยาวถนน การทดสอบแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ การวัดกำลังงานรับและค่าวิสัยสามารถมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 5.1 การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศ (ก) พารามิเตอร์การทดสอบ (ข) แผนผังการทดสอบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ (ก) ด้านสถานีฐาน (ข) ด้านลูกข่าย

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ

พารามิเตอร์	ด้านสถานีฐาน	ด้านลูกข่าย
กำลังงานส่ง (P_t)	15 dBm	-
การสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ (L_t)	0.6 dB (LRM-195)	0 dB
อัตราขยายสายอากาศ (G_t)	ไดโพล = 2 dBi วงแหวน $0.3019\lambda = 9.84$ dBi วงแหวน $0.4014\lambda = 7.91$ dBi	0 dBi
ความสูงสายอากาศ	$h_t = 1.5$ m	$h_r = 1$ m
เครื่องรับส่ง	D-Link DWL-2000 AP+	Cisco Aironet 350 Series Client Adapter
ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับลูกข่าย (R)	10 – 500 m	

5.2 การวัดกำลังงานรับและผลการทดสอบระยะบริการ

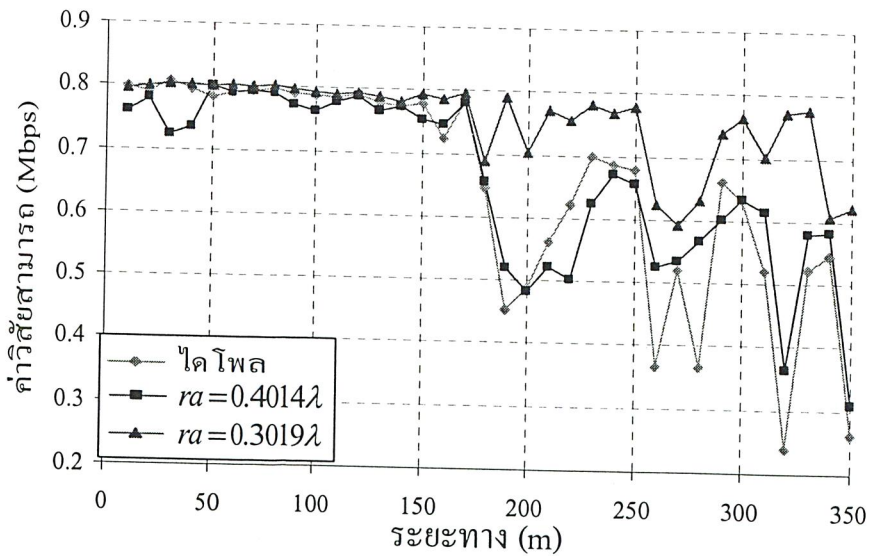
กำลังงานรับทดสอบจากค่า RSSI (Received Signal Strength Intensity) จากการ์ดด้านลูกข่าย ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.11 กำหนดให้กำลังงานรับจากการ์ดแทนด้วยตัวเลข 0 - 255 ซึ่งผู้ผลิตแต่ละรายกำหนดค่าไม่เหมือนกัน โปรแกรมทดสอบกำลังงานรับมีชื่อว่า NetStumbler ค่าที่ได้จากโปรแกรมแสดงกำลังงานรับในหน่วย dBm ซึ่งได้จากการเปลี่ยนค่า RSSI เป็นกำลังงานรับ แต่ละจุดทดสอบ โปรแกรมทำการบันทึกค่ากำลังงานรับไม่ต่ำกว่า 100 ครั้ง ซึ่งบันทึกระยะเวลาห่างกัน 1 วินาที

ตารางที่ 5.2 ระยะบริการสูงสุด

แบบจำลอง	ระยะบริการสูงสุด(m)		
	ไดโพล	วงแหวน $ra = 0.3019\lambda$	วงแหวน $ra = 0.4014\lambda$
ผลการทดสอบ	300	320	400
สองรังสี	704	1106	990
อากาศว่าง	3227	7690	6374

5.3 การทดสอบค่าวิสัยสามารถ

การทดสอบค่าวิสัยสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม Chariot ซึ่งขั้นตอนการทำทดสอบเริ่มจากลูกข่ายส่งไฟล์คำสั่ง (Scrip) ไปยังคอมพิวเตอร์ด้านสถานีฐาน เพื่อเตรียมความพร้อมของโปรแกรมทั้งด้านรับและด้านส่ง จากนั้นคอมพิวเตอร์ด้านส่งทำการส่งไฟล์ขนาด 100,000 ไบต์ผ่านสถานีฐานไปยังลูกข่ายแล้วทำการคำนวณค่าวิสัยสามารถ ในการทดสอบแต่ละครั้งทำการวัดไม่ต่ำกว่า 50 ครั้ง



รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศ

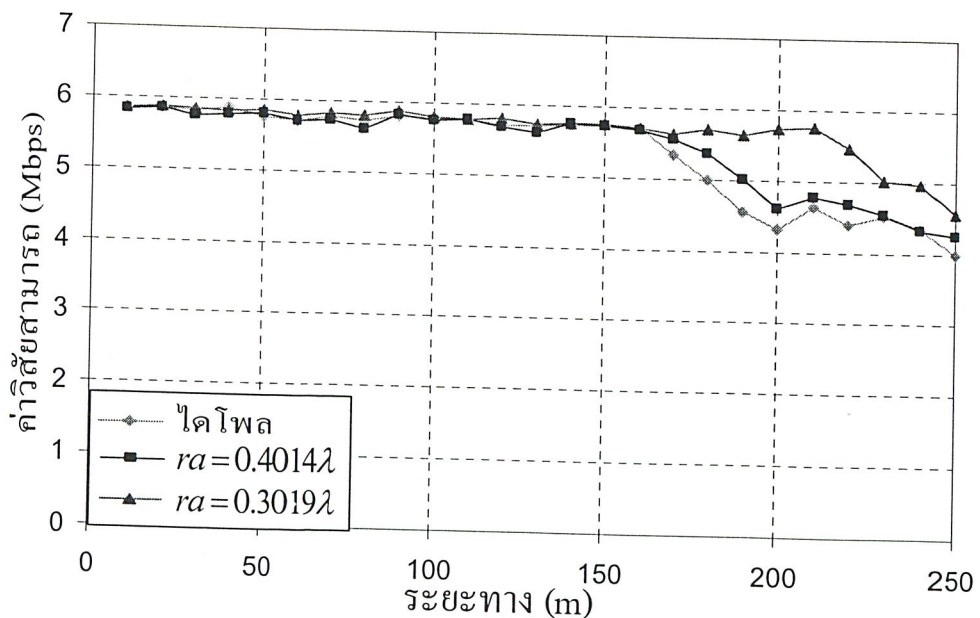
ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศไดโพลและวงแหวนวงกลมแสดงดังรูปที่ 5.3 โดยค่าวิสัยสามารถอุดมคติสูงสุดที่มีค่าเท่ากับ 0.91 Mbps ที่ความยาวบิตเท่ากับ 1500 ไบต์ จากผลการทดสอบสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ค่ารัศมี $ra=0.3019\lambda$ ให้ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยสูงกว่าสายอากาศไดโพลตลอดระยะทางทดสอบ ดังรูปที่ 5.3 เนื่องจากอัตราการขยายสูงกว่าและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแคบกว่า

ผลจากการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศเมื่อพิจารณาจากค่าวิสัยสามารถพบว่าสายอากาศไดโพลและสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ค่ารัศมี $ra=0.3019\lambda$ ให้ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อระยะทดสอบเท่ากับ 0.652 และ 0.754 Mbps ตามลำดับ

5.4 ผลการทดสอบระยะบริการและค่าวิสัยสามารถที่ Transmission Data Rate 11 Mbps

การทดสอบระยะบริการและค่าวิสัยสามารถที่ Transmission Data Rate 11 Mbps ของมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งเป็นการพัฒนามาตรฐานต่อเนื่องจากมาตรฐานกลาง IEEE 802.11 DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้สูงถึง 11 Mbps ในคลื่นความถี่ 2.4 GHz โดยใช้เทคโนโลยี CCK (Complementary Code Keying) โดยได้รับการยอมรับให้เป็นมาตรฐานกลางของเครือข่ายไร้สายซึ่งรับรองมาตรฐานโดย Wi-Fi Alliance

ผลการทดสอบระยะบริการพบว่าสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ค่ารัศมี $ra=0.3019\lambda$ ระยะบริการสูงสุดมากกว่าสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ค่ารัศมี $ra=0.4014\lambda$ และสายอากาศไดโพล โดยมีระยะบริการสูงสุดเท่ากับ 350 m 300 m และ 250 m ตามลำดับ



รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบค่าวิสัยสามารถของสายอากาศที่ Transmission Data Rate 11 Mbps

ผลจากการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศเมื่อพิจารณาจากค่าวิสัยสามารถพบว่าสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ค่ารัศมี $ra=0.3019\lambda$ สายอากาศวงแหวนวงกลมที่ค่ารัศมี $ra=0.4014\lambda$ และสายอากาศไดโพล แต่ละตัวให้ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยต่อระยะทดสอบเท่ากับ 5.657 Mbps 5.403 Mbps และ 5.337 Mbps ตามลำดับ

5.5 สรุป

เนื้อหาบทนี้กล่าวถึง การทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ค่ารัศมี $ra=0.3019\lambda$ สายอากาศวงแหวนวงกลมที่ค่ารัศมี $ra=0.4014\lambda$ และสายอากาศไดโพล พบว่าผลการประเมินประสิทธิภาพสายอากาศจากระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถคือ สายอากาศวงแหวนวงกลมที่ค่ารัศมี $ra=0.3019\lambda$ ให้ค่าวิสัยสามารถเฉลี่ยสูงกว่าสายอากาศไดโพลตลอดระยะทางการทดสอบ การประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในบทนี้แสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีของสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ค่ารัศมี $ra=0.3019\lambda$ เหนือตัวสะท้อนแบบมุม 90° ซึ่งมีความเหมาะสมนำไปประยุกต์ใช้กับ โครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุด

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

ปฏิญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบ สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนด้วยสัญญาณวงแหวนวงกลม สายอากาศชนิดนี้ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวซึ่งมีประโยชน์อย่างมากที่จะนำไปใช้งานเป็นสายอากาศสำหรับการสื่อสารแบบจุดต่อจุด เช่น การเชื่อมโยงของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคารเป็นต้น โดยที่โครงสร้างของสายอากาศไม่ซับซ้อนสามารถทำการออกแบบได้ง่าย อีกทั้งวัสดุยังหาได้ง่ายตามท้องตลาดและมีราคาถูก สายอากาศที่ออกแบบไว้จะทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยที่ค่าขนาดต่างๆของสายอากาศชนิดนี้เป็นขนาดที่ได้จากการพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 2 แล้วพบว่า เป็นขนาดที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาสร้างใช้งาน เพราะเมื่อทำการพิจารณาจากค่าพารามิเตอร์และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ได้จากการทดสอบพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบอยู่ตรงตามข้อกำหนดของพารามิเตอร์สายอากาศ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นมีลำคลื่นย่อยด้านข้างและลำคลื่นย่อยด้านหลังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

การทดสอบค่าระยะบริการสูงสุดและค่าวิสัยสามารถของระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายที่ใช้สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนและสายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศของสถานีฐานวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลค่านวนกับผลการทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศวงแหวนให้ระยะบริการสูงสุดเท่ากับ 400 เมตร

การประเมินประสิทธิภาพสายอากาศในโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย จากผลการทดสอบและผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าสายอากาศวงแหวนวงกลมมีประสิทธิภาพดีกว่าสายอากาศไดโพล โดยให้ระยะบริการสูงสุดดีกว่า การวิเคราะห์และการทดสอบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบสายอากาศสำหรับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคารได้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ (Essential Antenna Parameters)

- แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น คือ รูปกราฟหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงความเข้มของสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของทิศทางหรือมุม โดยรูปกราฟนี้แบ่งเป็น กราฟเชิงเส้นมุมฉาก (Linear Plot) และ กราฟวงกลม (Polar Plot) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แอมพลิจูด (Amplitude) ของกำลังงาน (Power) หรือ สนาม (Field) กับทิศทาง (Direction) ของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของมุมในหน่วยองศา (degree) หรือเรเดียน (radian)

- ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth : HPBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด โดยจะวัดในหน่วยองศา

- ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก (First Null Beamwidth : FNBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าลดลงเป็นศูนย์ โดยจะวัดในหน่วยองศา

- อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio : SLR)

คือ อัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

$$SLR = \text{Main lobe level (dB)} - \text{Side lobe level (dB)}$$

- ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คือกำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน (ตลอดพื้นผิวทรงกลม) แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มการแผ่กระจายคลื่นกับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล ได้ดังนี้

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2 \cdot \eta} \cdot [|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2]$$

เมื่อ E_θ, E_ϕ คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าในระยะไกล

η คือ อินทริเนติกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง มีค่าประมาณ $120\pi \Omega$

- ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางต่างๆ เทียบกับสายอากาศไอโซทรอปิก ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_0(\text{dBi}) = 10 \cdot \log \left(\frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \right)$$

เมื่อ U_{\max} คือ ค่าสูงสุดของความเข้มการแผ่กระจายคลื่น

P_{rad} คือ กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin(\theta) d\theta d\phi$$

- อัตราขยาย (Gain)

คือความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทางโดยคูณประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ประสิทธิภาพของสายอากาศจะประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับ ประสิทธิภาพของตัวนำและประสิทธิภาพของฉนวน

$$Gain = \text{Efficiency of antenna} \times \text{Directivity}$$

(ไม่มีหน่วย)

$$(Gain(dBi) = \text{Efficiency}(dB) + \text{Directivity}(dBi))$$

- ช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth : Δf)

คือ ช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด หรือช่วงความถี่ที่สายอากาศยังคงมีคุณสมบัติต่างๆ อยู่ในช่วงที่ใช้งานได้เหมือนกับที่ออกแบบไว้ที่ความถี่กลาง

$$\Delta f(Hz) = f_H(Hz) - f_L(Hz)$$

$$\Delta f(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100$$

ภาคผนวก ข

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ จะใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code : NEC2) ซึ่งเป็นที่ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอเรนซ์ลิเวอร์มอร์ (Lawrence Livermore National Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา และเป็นโปรแกรมประเภทฟรีแวร์ (Freeware) ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลด (Download) มาใช้ได้โดยง่าย การจะสั่งให้โปรแกรมทำงานนั้น ผู้ใช้จะต้องจัดเรียงรหัสทางคอมพิวเตอร์ (User - Oriented Computer Code) ให้กับโปรแกรม เพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศ และโครงสร้างที่เป็นโลหะ ใดๆ ที่มีรูปทรงไม่เจาะจง รหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้จะต้องใส่เข้าไปนั้น คือ การสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ (Wire) หรือ พื้นผิว (Surface) จำนวนมาก ซึ่งในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation : EFIE) ในการหากระแสเหนี่ยวนำ (Inducted Current) บนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด (Source) หรือ สนามที่ตกกระทบ (Incident Field) และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Integral Equation : MFIE) ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ้นสามารถที่จะเป็นได้ทั้งแหล่งที่กำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป (Applied Voltage Source) หรือ คลื่นระนาบที่ตกกระทบ (Incident Plane Wave) NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และไกล ภาค คัดขวางเป้าเรดาร์ (Radar Cross Section : RCS) อิมพีแดนซ์ แอดมิตแตนซ์ (Admittance) อัตราขยาย (Gain) และสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) การใช้กำลังงาน (Power Budget) และการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ (Mutual Coupling)

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในปริณิญาฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของสายอากาศ โดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศเส้นลวดขนาดเล็ก ดังนั้น สมการที่ใช้จึงเป็นสมการอินทิกรัล เชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้านี้เหมาะที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นผิวที่มีความหนาไม่มาก และไม่มีลักษณะเป็นตัวนำปิดทึบได้ดีกว่า การใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก รูปแบบของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่ใช้ใน NEC2 มีรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

สมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง

รูปแบบของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่ใช้ใน NEC2 สำหรับสนามไฟฟ้าของการกระจายกระแส \vec{J} คือ

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_V \vec{J}(\vec{r}') \cdot \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') dV' \quad (1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}\bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') &= (k^2 \bar{\bar{I}} + \nabla \nabla) g(\bar{r}, \bar{r}') \\ g(\bar{r}, \bar{r}') &= \exp(-jk|\bar{r} - \bar{r}'|) / |\bar{r} - \bar{r}'| \\ k &= \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \\ \eta &= \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}\end{aligned}$$

และ แบบแผนทางเวลา (Time Convention) คือ $\exp(j\omega t)$ $\bar{\bar{I}}$ คือ เอกลักษณ์ไดแอด (Identity Dyad) $\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z}$ เมื่อการกระจายกระแสถูกจำกัดให้อยู่บนพื้นผิวของตัวนำที่มีค่าความนำสมบรูณ์สมบูรณ์ (1) จะกลายเป็น

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_S \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot \bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') dA' \quad (2)$$

เมื่อ \bar{J}_s เป็นความหนาแน่นกระแสพื้นผิว จุดสังเกต \bar{r} จะถูกกำหนดให้อยู่นอกพื้นผิว S ดังนั้น $\bar{r} = \bar{r}'$ ถ้า \bar{r} เข้าใกล้ S ในลักษณะคล้ายลิมิต สมการ (2) จะเป็น

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_S \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot \bar{\bar{G}}(\bar{r}, \bar{r}') dA' \quad (3)$$

เมื่ออินทิกรัลค่าหลัก \int ถูกใช้ เพราะว่า $g(\bar{r}, \bar{r}')$ ไม่จำกัดขอบเขต

สมการอินทิกรัลของกระแสเหนี่ยวนำ S โดยสนามตกกระทบ \bar{E}' สามารถหาได้จากสมการ (3) และ เงื่อนไขขอบเขต สำหรับ \bar{r} ที่แปรผันตาม S

$$\hat{n}\bar{r} \times [\bar{E}^S(\bar{r}) + \bar{E}'(\bar{r})] = 0 \quad (4)$$

เมื่อ $\hat{n}\bar{r}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิวที่ \bar{r} และ \bar{E}^S เป็นสนามเนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำ \bar{J}_s เมื่อแทนค่า \bar{E}^S ในสมการ (4) ด้วยสมการ (3) สามารถเขียนสมการ (4) ได้เป็น

$$-\hat{n}(\bar{r}) \times \bar{E}'(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{n}(\bar{r}) \int_S \bar{J}_s(\bar{r}') \cdot (k^2 \bar{\bar{I}} + \nabla \nabla) g(\bar{r}, \bar{r}') dA' \quad (5)$$

สมการอินทิกรัลเวกเตอร์ในสมการ (5) สามารถถูกลดให้กลายเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสเกลาร์ เมื่อพื้นผิวตัวนำ S ถูกแทนที่ด้วยเส้นลวดทรงกระบอกบาง ๆ ซึ่งจะทำให้วิธีการแก้ปัญหาทางง่ายขึ้นมาก การสมมติที่ประยุกต์ใช้กับเส้นลวดบาง เรียกว่า วิธีการประมาณเส้นลวดบาง (Thin-Wire Approximation) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- (1) กระแสตามขวางที่สัมพันธ์กับกระแสตามแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา

- (2) การเปลี่ยนแปลงโดยรอบในกระแสดำแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
- (3) กระแสสามารถแทนได้ด้วยกระแสเชิงเส้น (Filament) บนแกนเส้นลวด
- (4) เงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าจะถูกบังคับให้มีเฉพาะในทิศทางตามแนวแกนเท่านั้น

การประมาณนี้สามารถนำมาใช้ได้เมื่อ รัศมีของเส้นลวดมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่น และความยาวเส้นลวดมีค่ามาก ๆ นอกจากนี้ สมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ในกรณีที่รัศมีของเส้นลวดมีขนาดใหญ่มาก จนไม่สามารถใช้วิธีการประมาณเส้นลวดบางได้นั้น ก็ได้ถูกรวมไว้ใน NEC2 ด้วย ซึ่งการประมาณแบบนี้ มีชื่อเรียกว่า การขยายออกของการประมาณเส้นลวดบาง (Extended Thin Wire Approximation)

จากการสมมติในข้อ (1) (2) และ (3) กระแสพื้นผิว $\bar{J}_s(\bar{r})$ บนเส้นลวดที่มีรัศมี a สามารถแทนด้วยกระแสของเชิงเส้น (Filament Current) I เมื่อ

$$I(s)\hat{s} = 2\pi a \bar{J}_s(\bar{r})$$

s = ระยะทางตามแกนเส้นลวดที่ \bar{r} และ

\hat{s} = เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสกับแกนเส้นลวดที่ \bar{r}

สมการ (5) จะกลายเป็น

$$-\hat{n}(\bar{r}) \times \bar{E}'(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{n}(\bar{r}) \int_L \bar{I}(s') \cdot \left(k^2 \hat{s}' + \nabla \frac{\partial}{\partial s'} \right) g(\bar{r}, \bar{r}') dS' \quad (6)$$

เมื่อการอินทิเกรตกระทำตามความยาวของเส้นลวด การบังคับเงื่อนไขขอบเขตให้มีเฉพาะทิศทางในแนวแกน ทำให้สมการ (6) ลดรูปลงเป็นสมการสเกลาร์

$$-\hat{s}(\bar{r}) \times \bar{E}'(\bar{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_L \bar{I}(s') \cdot \left(k^2 \hat{s}' \cdot \hat{s}' - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'} \right) g(\bar{r}, \bar{r}') dS' \quad (7)$$

\bar{r} เป็นจุดที่ s' บนแกนเส้นลวด ในขณะที่ \bar{r} เป็นจุดที่ s บนพื้นผิวเส้นลวด $|\bar{r} - \bar{r}'| \geq a$ และการอินทิเกรตก็จะมีขอบเขต

วิธีการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมสำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

สำหรับการจำลองโครงสร้างด้วยเส้นลวดลายนั้น อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยรหัส NEC2 คือ เซกเมนต์ที่มีลักษณะตรงและสั้น การกำหนดเซกเมนต์สำหรับการออกแบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ จำนวนของเซกเมนต์ควรจะมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะต้องการสำหรับความถูกต้อง เพราะโปรแกรมจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเซกเมนต์เพิ่มขึ้น

เซกเมนต์เส้นลวดหลายจะถูกกำหนดโดยระบบพิกัด (Co-ordinate) ของจุดปลายทั้งสองของเซกเมนต์ และขนาดของรัศมี การกำหนดความยาวเซกเมนต์ (Segment Length : Δ) จะสัมพันธ์กับค่าของความยาวคลื่น λ โดยปกติ Δ ควรจะมีค่าน้อยกว่า 0.1λ ที่ความถี่ที่ต้องการ ในบางครั้งอาจมีการใช้เซกเมนต์ที่ยาวมากกว่านั้นบนเส้นลวดหลายที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ในขณะที่เซกเมนต์ที่สั้นกว่า เช่น 0.05λ หรือน้อยกว่านี้ อาจจะต้องใช้ในการจำลองบริเวณที่มีความสำคัญของสายอากาศ ขนาดของเซกเมนต์จะเป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนแบบจำลอง เนื่องจากกระแสจะถูกคำนวณที่ตรงกลางของแต่ละเซกเมนต์ เซกเมนต์ที่มีขนาดสั้นมาก ๆ เช่น น้อยกว่า $10^{-3}\lambda$ ไม่ควรนำมาใช้ เพราะความเหมือนกันขององค์ประกอบค่าคงที่และโคไซน์ของการกระจายกระแสจะทำให้ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไม่แม่นยำ

รัศมีของเส้นลวด (Wire Radius : a) ซึ่งสัมพันธ์กับ λ จะถูกจำกัดโดยการประมาณที่ใช้ในการเคอร์เนล (Kernel) ของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งมีการประมาณ 2 แบบด้วยกันที่ใช้ในการ NEC2 คือ เคอร์เนลแบบเส้นลวดบาง และเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.1 สำหรับเคอร์เนลแบบเส้นลวดบางนั้น กระแสบนพื้นผิวของแต่ละเซกเมนต์จะถูกลดกลายเป็นเส้นลวดนำไฟฟ้าเล็ก ๆ ของกระแสบนแกนเซกเมนต์ ส่วนในเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง กระแสจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบพื้นผิวของเซกเมนต์นั้น

การกระจายกระแสที่ใช้ใน NEC2 จะบังคับเงื่อนไขกระแสและความหนาแน่นประจุตามแนวเส้นลวด ที่จุดเชื่อมต่อ และที่ปลายเส้นลวด จากเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้เซกเมนต์จะต้องต่อกันทางไฟฟ้าที่จุดปลาย ถ้าเซกเมนต์มีการซ้อนทับกันเกิดขึ้นที่ปลายของแต่ละอัน NEC2 จะไม่ยอมให้กระแสไหลจากเซกเมนต์หนึ่งไปยังเซกเมนต์อื่น ๆ เซกเมนต์จะเหมือนกับต่อกันเมื่อระยะห่างของจุดหลายของแต่ละด้านมีค่าน้อยกว่า 10^{-3} เท่าของความยาวเซกเมนต์ที่สั้นที่สุด ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้ควรเชื่อมต่อเซกเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดระบบพิกัดที่เหมือนกัน

ข้อจำกัดของการจำลองโครงสร้างค้ำยันสายลวด (Wire-grid) มีดังต่อไปนี้

(1) เซกเมนต์จะต้องไม่ซ้อนทับกัน เนื่องจากการแบ่งกระแสระหว่างสองเซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันนั้น ไม่สามารถสรุปได้ เซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันอาจจะมีผลในสมการเมตริกซ์เอกฐาน (Singular Matrix Equation)

(2) การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเซกเมนต์ที่เชื่อมต่อกัน อาจจะมีผลทำให้ความแม่นยำลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ค่า Δ/a มีค่าน้อย ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการให้รัศมีลดลงตามลำดับตลอดหลายเซกเมนต์

(3) จำเป็นที่จะต้องมีเซกเมนต์ที่จุดซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโครงข่าย (Network) หรือ แหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage Source) สำหรับช่องว่างการกระตุ้น (Excitation Gap) ก็จำเป็นต้องมีเส้นลวดต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่ต้องการสามารถระบุให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

(4) จำนวนเส้นลวดที่จะนำมาต่อที่จุดเชื่อมต่อใด ๆ นั้น ไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้ เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส NEC2

ข้อมูลที่ใช้อธิบายสายอากาศและสภาพแวดล้อม และคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการจะคำนวณ จะเป็นอินพุตที่จะใส่เข้าไป คล้ายกับบัตรเจาะรูที่เป็นข้อมูลใส่ให้กับคอมพิวเตอร์เมนเฟรมในสมัยก่อน กลุ่มของรหัสข้อมูลในการทำงานครั้งหนึ่งจะประกอบไปด้วย รหัสข้อมูล 3 ประเภท ด้วยกัน ส่วนแรกเริ่มต้นด้วยรหัสหนึ่งชุดหรือมากกว่านั้นซึ่งบรรยายละเอียดของการทำงาน ซึ่งพิมพ์เป็นตัวหนังสือที่จุดเริ่มต้นของไฟล์เอาต์พุต ต่อมาจะตามด้วยรหัสข้อมูลระบุรูปแบบทางเรขาคณิต ซึ่งจะระบุรูปทรงของสายอากาศ และสุดท้ายจะเป็นส่วนของรหัสควบคุมโปรแกรมซึ่งจะระบุตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ความถี่ การโหลด (Loading) และการกระตุ้น (Excitation) รวมทั้งความต้องการให้คำนวณกระแสและสนามของสายอากาศ

รหัสข้อมูลทุก ๆ รหัส จะมีตัวอักษร 2 ตัว ในคอลัมน์ที่หนึ่งและสอง เพื่อเป็นการระบุรหัสให้กับโปรแกรม ตัวอย่างเช่น รหัสข้อมูลระบุเส้นลวด (Wire Specification : GW) ซึ่งจะเป็นรหัสที่ใช้ในการกำหนดเส้นลวดขึ้นมาระหว่างจุดสองจุด ซึ่งมีลักษณะของข้อมูลที่จะต้องใส่ลงไป ดังนี้

GW	I1	I2	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
	ITG	NS	XW1	YW1	ZW1	XW2	YW2	ZW2	RAD

ความหมายของตัวแปรแต่ละตัวที่จะต้องใส่ลงไป คือ

ITG (I1) คือ ป้ายแสดงหมายเลข (Tag) ที่จะกำหนดให้เส้นลวดมีหมายเลขประจำเส้นลวดเป็นค่าใด รวมทั้งเซกเมนต์ทุกเซกเมนต์ของเส้นลวดก็จะมีหมายเลขตามหมายเลขเส้นลวดนั้นด้วย

NS (I2) คือ จำนวนเซกเมนต์ที่จะแบ่งให้กับเส้นลวด

XW1 (F1) คือ พิกัด x ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

YW1 (F2) คือ พิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

ZW1 (F3) คือ พิกัด z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

XW2 (F4) คือ พิกัด x ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

YW2 (F5) คือ พิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

ZW2 (F6) คือ พิกัด z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

RAD (F7) คือ รัศมีของเส้นลวด

การกำหนดรัศมีของเส้นลวดนั้นจะต้องเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดที่ทำให้พื้นที่ผิวรวมของเส้นลวดทั้งหมดมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวของตัวนำของสายอากาศ

จากรหัสตัวอย่างข้างต้น เมื่อทำการใส่ตัวแปรต่าง ๆ ลงไปแล้ว จะสั่งให้โปรแกรมทำงาน NEC2 จะสร้างเส้นลวดให้ 1 เส้น ซึ่งเส้นลวดนี้จะถูกแบ่งเป็นเซกเมนต์เล็ก ๆ จำนวน NS เซกเมนต์ การสร้างแบบจำลองของสายอากาศสามารถทำได้โดยการใส่รหัสที่มีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างข้างบนนี้ไปเรื่อย ๆ ก็จะทำให้สามารถสร้างโครงสร้างสายอากาศและหาคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการได้ นอกจากนี้โครงสร้างที่สร้างขึ้นโดย NEC2 ยังสามารถกำหนดสภาพนำ (Conductivity) ให้เท่ากับสภาพนำของโลหะที่จะใช้ทำสายอากาศได้ เช่น ในกรณีนี้สายอากาศต้นแบบจะสร้างขึ้นโดยใช้ทองเหลือง ดังนั้นในการคำนวณโดยใช้ NEC2 ก็จะทำการกำหนดสภาพของโครงสร้างด้วยค่าสภาพนำของทองเหลือง คือ $2.56 \times 10^{-7} \text{ S/m}$ โดยการใช้คำสั่ง โหลด (Load)

ในการตรวจสอบโครงสร้างของสายอากาศว่าได้สร้างถูกต้องเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่นั้น สามารถดูได้โดยใช้โปรแกรม Necview ซึ่งจะแสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ใส่รหัสใน NEC2 ออกมาเป็นตาข่ายเส้นลวด ตามที่กำหนดในระบบพิกัด x, y และ z นอกจากนี้โปรแกรม Necview ยังใช้ในการดูผลแบบรูปการแผ่พลังงาน ในระบบพิกัด x, y และ z ของสายอากาศที่ NEC2 คำนวณ ออกมาได้ด้วย สำหรับไฟล์เอาต์พุตที่ได้ออกมาจากการรันโปรแกรม NEC2 นั้น จะเป็นไปตามรูปแบบของข้อมูลที่ใส่เข้าไป เริ่มต้นด้วยการอธิบาย ตามมาด้วยข้อมูลทางเรขาคณิต และจากนั้นเป็นผลของตัวแปรที่ต้องการจะคำนวณ

ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม NEC2

กรณีสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม 90° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมที่มีรัศมี (r_a) เท่ากับ 0.3019λ ค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ $d = 0.285\lambda$ ค่าความยาวโพรบเท่ากับ 0.25λ มีความยาวของตัวสะท้อน (l_c) และ ความสูงของตัวสะท้อน (h) เท่ากับ 0.906λ และมีระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นกับตัวป้อนสัญญาณ เท่ากับ 0.7λ จากค่าที่ได้ทำการที่ออกแบบ

CM Corner Reflector 90° fed by Circular Ring

CE

Card	Tag	Segs	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	wire-rad
GW	1	1	0.0857	-0.0175	-0.0370	0.0857	-0.0125	-0.0370	0.00018
GW	2	1	0.0857	-0.0125	-0.0370	0.0857	-0.0075	-0.0370	0.00018
GW	3	1	0.0857	-0.0075	-0.0370	0.0857	-0.0025	-0.0370	0.00018
GW	4	1	0.0857	-0.0025	-0.0370	0.0857	0.0025	-0.0370	0.00018
GW	5	1	0.0857	0.0025	-0.0370	0.0857	0.0075	-0.0370	0.00018
GW	6	1	0.0857	0.0075	-0.0370	0.0857	0.0125	-0.0370	0.00018
GW	7	1	0.0857	0.0125	-0.0370	0.0857	0.0175	-0.0370	0.00018
GW	8	1	0.0825	-0.0175	-0.0369	0.0825	-0.0125	-0.0369	0.00018
GW	9	1	0.0825	-0.0125	-0.0369	0.0825	-0.0075	-0.0369	0.00018
GW	10	1	0.0825	-0.0075	-0.0369	0.0825	-0.0025	-0.0369	0.00018
GW	11	1	0.0825	-0.0025	-0.0369	0.0825	0.0025	-0.0369	0.00018
GW	12	1	0.0825	0.0025	-0.0369	0.0825	0.0075	-0.0369	0.00018
GW	13	1	0.0825	0.0075	-0.0369	0.0825	0.0125	-0.0369	0.00018
GW	14	1	0.0825	0.0125	-0.0369	0.0825	0.0175	-0.0369	0.00018
GW	15	1	0.0793	-0.0175	-0.0364	0.0793	-0.0125	-0.0364	0.00018

GW	16	1	0.0793	-0.0125	-0.0364	0.0793	-0.0075	-0.0364	0.00018
GW	17	1	0.0793	-0.0075	-0.0364	0.0793	-0.0025	-0.0364	0.00018
GW	18	1	0.0793	-0.0025	-0.0364	0.0793	0.0025	-0.0364	0.00018
GW	19	1	0.0793	0.0025	-0.0364	0.0793	0.0075	-0.0364	0.00018
GW	20	1	0.0793	0.0075	-0.0364	0.0793	0.0125	-0.0364	0.00018
GW	21	1	0.0793	0.0125	-0.0364	0.0793	0.0175	-0.0364	0.00018
GW	22	1	0.0761	-0.0175	-0.0357	0.0761	-0.0125	-0.0357	0.00018
GW	23	1	0.0761	-0.0125	-0.0357	0.0761	-0.0075	-0.0357	0.00018
GW	24	1	0.0761	-0.0075	-0.0357	0.0761	-0.0025	-0.0357	0.00018
GW	25	1	0.0761	-0.0025	-0.0357	0.0761	0.0025	-0.0357	0.00018
GW	26	1	0.0761	0.0025	-0.0357	0.0761	0.0075	-0.0357	0.00018
GW	27	1	0.0761	0.0075	-0.0357	0.0761	0.0125	-0.0357	0.00018
GW	28	1	0.0761	0.0125	-0.0357	0.0761	0.0175	-0.0357	0.00018
GW	29	1	0.0730	-0.0175	-0.0348	0.0730	-0.0125	-0.0348	0.00018
GW	30	1	0.0730	-0.0125	-0.0348	0.0730	-0.0075	-0.0348	0.00018
GW	31	1	0.0730	-0.0075	-0.0348	0.0730	-0.0025	-0.0348	0.00018
GW	32	1	0.0730	-0.0025	-0.0348	0.0730	0.0025	-0.0348	0.00018
GW	33	1	0.0730	0.0025	-0.0348	0.0730	0.0075	-0.0348	0.00018
GW	34	1	0.0730	0.0075	-0.0348	0.0730	0.0125	-0.0348	0.00018
GW	35	1	0.0730	0.0125	-0.0348	0.0730	0.0175	-0.0348	0.00018
GW	36	1	0.0701	-0.0175	-0.0335	0.0701	-0.0125	-0.0335	0.00018
GW	37	1	0.0701	-0.0125	-0.0335	0.0701	-0.0075	-0.0335	0.00018
GW	38	1	0.0701	-0.0075	-0.0335	0.0701	-0.0025	-0.0335	0.00018
GW	39	1	0.0701	-0.0025	-0.0335	0.0701	0.0025	-0.0335	0.00018
GW	40	1	0.0701	0.0025	-0.0335	0.0701	0.0075	-0.0335	0.00018
GW	41	1	0.0701	0.0075	-0.0335	0.0701	0.0125	-0.0335	0.00018
GW	42	1	0.0701	0.0125	-0.0335	0.0701	0.0175	-0.0335	0.00018
GW	43	1	0.0672	-0.0175	-0.0320	0.0672	-0.0125	-0.0320	0.00018
GW	44	1	0.0672	-0.0125	-0.0320	0.0672	-0.0075	-0.0320	0.00018
GW	45	1	0.0672	-0.0075	-0.0320	0.0672	-0.0025	-0.0320	0.00018
GW	46	1	0.0672	-0.0025	-0.0320	0.0672	0.0025	-0.0320	0.00018
GW	47	1	0.0672	0.0025	-0.0320	0.0672	0.0075	-0.0320	0.00018
GW	48	1	0.0672	0.0075	-0.0320	0.0672	0.0125	-0.0320	0.00018

GW	49	1	0.0672	0.0125	-0.0320	0.0672	0.0175	-0.0320	0.00018
GW	50	1	0.0645	-0.0175	-0.0303	0.0645	-0.0125	-0.0303	0.00018
GW	51	1	0.0645	-0.0125	-0.0303	0.0645	-0.0075	-0.0303	0.00018
GW	52	1	0.0645	-0.0075	-0.0303	0.0645	-0.0025	-0.0303	0.00018
GW	53	1	0.0645	-0.0025	-0.0303	0.0645	0.0025	-0.0303	0.00018
GW	54	1	0.0645	0.0025	-0.0303	0.0645	0.0075	-0.0303	0.00018
GW	55	1	0.0645	0.0075	-0.0303	0.0645	0.0125	-0.0303	0.00018
GW	56	1	0.0645	0.0125	-0.0303	0.0645	0.0175	-0.0303	0.00018
GW	57	1	0.0619	-0.0175	-0.0283	0.0619	-0.0125	-0.0283	0.00018
GW	58	1	0.0619	-0.0125	-0.0283	0.0619	-0.0075	-0.0283	0.00018
GW	59	1	0.0619	-0.0075	-0.0283	0.0619	-0.0025	-0.0283	0.00018
GW	60	1	0.0619	-0.0025	-0.0283	0.0619	0.0025	-0.0283	0.00018
GW	61	1	0.0619	0.0025	-0.0283	0.0619	0.0075	-0.0283	0.00018
GW	62	1	0.0619	0.0075	-0.0283	0.0619	0.0125	-0.0283	0.00018
GW	63	1	0.0619	0.0125	-0.0283	0.0619	0.0175	-0.0283	0.00018
GW	64	1	0.0595	-0.0175	-0.0262	0.0595	-0.0125	-0.0262	0.00018
GW	65	1	0.0595	-0.0125	-0.0262	0.0595	-0.0075	-0.0262	0.00018
GW	66	1	0.0595	-0.0075	-0.0262	0.0595	-0.0025	-0.0262	0.00018
GW	67	1	0.0595	-0.0025	-0.0262	0.0595	0.0025	-0.0262	0.00018
GW	68	1	0.0595	0.0025	-0.0262	0.0595	0.0075	-0.0262	0.00018
GW	69	1	0.0595	0.0075	-0.0262	0.0595	0.0125	-0.0262	0.00018
GW	70	1	0.0595	0.0125	-0.0262	0.0595	0.0175	-0.0262	0.00018
GW	71	1	0.0574	-0.0175	-0.0238	0.0574	-0.0125	-0.0238	0.00018
GW	72	1	0.0574	-0.0125	-0.0238	0.0574	-0.0075	-0.0238	0.00018
GW	73	1	0.0574	-0.0075	-0.0238	0.0574	-0.0025	-0.0238	0.00018
GW	74	1	0.0574	-0.0025	-0.0238	0.0574	0.0025	-0.0238	0.00018
GW	75	1	0.0574	0.0025	-0.0238	0.0574	0.0075	-0.0238	0.00018
GW	76	1	0.0574	0.0075	-0.0238	0.0574	0.0125	-0.0238	0.00018
GW	77	1	0.0574	0.0125	-0.0238	0.0574	0.0175	-0.0238	0.00018
GW	78	1	0.0554	-0.0175	-0.0212	0.0554	-0.0125	-0.0212	0.00018
GW	79	1	0.0554	-0.0125	-0.0212	0.0554	-0.0075	-0.0212	0.00018
GW	80	1	0.0554	-0.0075	-0.0212	0.0554	-0.0025	-0.0212	0.00018
GW	81	1	0.0554	-0.0025	-0.0212	0.0554	0.0025	-0.0212	0.00018

GW	82	1	0.0554	0.0025	-0.0212	0.0554	0.0075	-0.0212	0.00018
GW	83	1	0.0554	0.0075	-0.0212	0.0554	0.0125	-0.0212	0.00018
GW	84	1	0.0554	0.0125	-0.0212	0.0554	0.0175	-0.0212	0.00018
GW	85	1	0.0537	-0.0175	-0.0185	0.0537	-0.0125	-0.0185	0.00018
GW	86	1	0.0537	-0.0125	-0.0185	0.0537	-0.0075	-0.0185	0.00018
GW	87	1	0.0537	-0.0075	-0.0185	0.0537	-0.0025	-0.0185	0.00018
GW	88	1	0.0537	-0.0025	-0.0185	0.0537	0.0025	-0.0185	0.00018
GW	89	1	0.0537	0.0025	-0.0185	0.0537	0.0075	-0.0185	0.00018
GW	90	1	0.0537	0.0075	-0.0185	0.0537	0.0125	-0.0185	0.00018
GW	91	1	0.0537	0.0125	-0.0185	0.0537	0.0175	-0.0185	0.00018
GW	92	1	0.0522	-0.0175	-0.0156	0.0522	-0.0125	-0.0156	0.00018
GW	93	1	0.0522	-0.0125	-0.0156	0.0522	-0.0075	-0.0156	0.00018
GW	94	1	0.0522	-0.0075	-0.0156	0.0522	-0.0025	-0.0156	0.00018
GW	95	1	0.0522	-0.0025	-0.0156	0.0522	0.0025	-0.0156	0.00018
GW	96	1	0.0522	0.0025	-0.0156	0.0522	0.0075	-0.0156	0.00018
GW	97	1	0.0522	0.0075	-0.0156	0.0522	0.0125	-0.0156	0.00018
GW	98	1	0.0522	0.0125	-0.0156	0.0522	0.0175	-0.0156	0.00018
GW	99	1	0.0509	-0.0175	-0.0127	0.0509	-0.0125	-0.0127	0.00018
GW	100	1	0.0509	-0.0125	-0.0127	0.0509	-0.0075	-0.0127	0.00018
GW	101	1	0.0509	-0.0075	-0.0127	0.0509	-0.0025	-0.0127	0.00018
GW	102	1	0.0509	-0.0025	-0.0127	0.0509	0.0025	-0.0127	0.00018
GW	103	1	0.0509	0.0025	-0.0127	0.0509	0.0075	-0.0127	0.00018
GW	104	1	0.0509	0.0075	-0.0127	0.0509	0.0125	-0.0127	0.00018
GW	105	1	0.0509	0.0125	-0.0127	0.0509	0.0175	-0.0127	0.00018
GW	106	1	0.0500	-0.0175	-0.0096	0.0500	-0.0125	-0.0096	0.00018
GW	107	1	0.0500	-0.0125	-0.0096	0.0500	-0.0075	-0.0096	0.00018
GW	108	1	0.0500	-0.0075	-0.0096	0.0500	-0.0025	-0.0096	0.00018
GW	109	1	0.0500	-0.0025	-0.0096	0.0500	0.0025	-0.0096	0.00018
GW	110	1	0.0500	0.0025	-0.0096	0.0500	0.0075	-0.0096	0.00018
GW	111	1	0.0500	0.0075	-0.0096	0.0500	0.0125	-0.0096	0.00018
GW	112	1	0.0500	0.0125	-0.0096	0.0500	0.0175	-0.0096	0.00018
GW	113	1	0.0493	-0.0175	-0.0064	0.0493	-0.0125	-0.0064	0.00018
GW	114	1	0.0493	-0.0125	-0.0064	0.0493	-0.0075	-0.0064	0.00018

GW	115	1	0.0493	-0.0075	-0.0064	0.0493	-0.0025	-0.0064	0.00018
GW	116	1	0.0493	-0.0025	-0.0064	0.0493	0.0025	-0.0064	0.00018
GW	117	1	0.0493	0.0025	-0.0064	0.0493	0.0075	-0.0064	0.00018
GW	118	1	0.0493	0.0075	-0.0064	0.0493	0.0125	-0.0064	0.00018
GW	119	1	0.0493	0.0125	-0.0064	0.0493	0.0175	-0.0064	0.00018
GW	120	1	0.0488	-0.0175	-0.0032	0.0488	-0.0125	-0.0032	0.00018
GW	121	1	0.0488	-0.0125	-0.0032	0.0488	-0.0075	-0.0032	0.00018
GW	122	1	0.0488	-0.0075	-0.0032	0.0488	-0.0025	-0.0032	0.00018
GW	123	1	0.0488	-0.0025	-0.0032	0.0488	0.0025	-0.0032	0.00018
GW	124	1	0.0488	0.0025	-0.0032	0.0488	0.0075	-0.0032	0.00018
GW	125	1	0.0488	0.0075	-0.0032	0.0488	0.0125	-0.0032	0.00018
GW	126	1	0.0488	0.0125	-0.0032	0.0488	0.0175	-0.0032	0.00018
GW	127	1	0.0487	-0.0175	0.0000	0.0487	-0.0125	0.0000	0.00018
GW	128	1	0.0487	-0.0125	0.0000	0.0487	-0.0075	0.0000	0.00018
GW	129	1	0.0487	-0.0075	0.0000	0.0487	-0.0025	0.0000	0.00018
GW	130	1	0.0487	-0.0025	0.0000	0.0487	0.0025	0.0000	0.00018
GW	131	1	0.0487	0.0025	0.0000	0.0487	0.0075	0.0000	0.00018
GW	132	1	0.0487	0.0075	0.0000	0.0487	0.0125	0.0000	0.00018
GW	133	1	0.0487	0.0125	0.0000	0.0487	0.0175	0.0000	0.00018
GW	134	1	0.0488	-0.0175	0.0032	0.0488	-0.0125	0.0032	0.00018
GW	135	1	0.0488	-0.0125	0.0032	0.0488	-0.0075	0.0032	0.00018
GW	136	1	0.0488	-0.0075	0.0032	0.0488	-0.0025	0.0032	0.00018
GW	137	1	0.0488	-0.0025	0.0032	0.0488	0.0025	0.0032	0.00018
GW	138	1	0.0488	0.0025	0.0032	0.0488	0.0075	0.0032	0.00018
GW	139	1	0.0488	0.0075	0.0032	0.0488	0.0125	0.0032	0.00018
GW	140	1	0.0488	0.0125	0.0032	0.0488	0.0175	0.0032	0.00018
GW	141	1	0.0493	-0.0175	0.0064	0.0493	-0.0125	0.0064	0.00018
GW	142	1	0.0493	-0.0125	0.0064	0.0493	-0.0075	0.0064	0.00018
GW	143	1	0.0493	-0.0075	0.0064	0.0493	-0.0025	0.0064	0.00018
GW	144	1	0.0493	-0.0025	0.0064	0.0493	0.0025	0.0064	0.00018
GW	145	1	0.0493	0.0025	0.0064	0.0493	0.0075	0.0064	0.00018
GW	146	1	0.0493	0.0075	0.0064	0.0493	0.0125	0.0064	0.00018
GW	147	1	0.0493	0.0125	0.0064	0.0493	0.0175	0.0064	0.00018

GW	148	1	0.0500	-0.0175	0.0096	0.0500	-0.0125	0.0096	0.00018
GW	149	1	0.0500	-0.0125	0.0096	0.0500	-0.0075	0.0096	0.00018
GW	150	1	0.0500	-0.0075	0.0096	0.0500	-0.0025	0.0096	0.00018
GW	151	1	0.0500	-0.0025	0.0096	0.0500	0.0025	0.0096	0.00018
GW	152	1	0.0500	0.0025	0.0096	0.0500	0.0075	0.0096	0.00018
GW	153	1	0.0500	0.0075	0.0096	0.0500	0.0125	0.0096	0.00018
GW	154	1	0.0500	0.0125	0.0096	0.0500	0.0175	0.0096	0.00018
GW	155	1	0.0509	-0.0175	0.0127	0.0509	-0.0125	0.0127	0.00018
GW	156	1	0.0509	-0.0125	0.0127	0.0509	-0.0075	0.0127	0.00018
GW	157	1	0.0509	-0.0075	0.0127	0.0509	-0.0025	0.0127	0.00018
GW	158	1	0.0509	-0.0025	0.0127	0.0509	0.0025	0.0127	0.00018
GW	159	1	0.0509	0.0025	0.0127	0.0509	0.0075	0.0127	0.00018
GW	160	1	0.0509	0.0075	0.0127	0.0509	0.0125	0.0127	0.00018
GW	161	1	0.0509	0.0125	0.0127	0.0509	0.0175	0.0127	0.00018
GW	162	1	0.0522	-0.0175	0.0156	0.0522	-0.0125	0.0156	0.00018
GW	163	1	0.0522	-0.0125	0.0156	0.0522	-0.0075	0.0156	0.00018
GW	164	1	0.0522	-0.0075	0.0156	0.0522	-0.0025	0.0156	0.00018
GW	165	1	0.0522	-0.0025	0.0156	0.0522	0.0025	0.0156	0.00018
GW	166	1	0.0522	0.0025	0.0156	0.0522	0.0075	0.0156	0.00018
GW	167	1	0.0522	0.0075	0.0156	0.0522	0.0125	0.0156	0.00018
GW	168	1	0.0522	0.0125	0.0156	0.0522	0.0175	0.0156	0.00018
GW	169	1	0.0537	-0.0175	0.0185	0.0537	-0.0125	0.0185	0.00018
GW	170	1	0.0537	-0.0125	0.0185	0.0537	-0.0075	0.0185	0.00018
GW	171	1	0.0537	-0.0075	0.0185	0.0537	-0.0025	0.0185	0.00018
GW	172	1	0.0537	-0.0025	0.0185	0.0537	0.0025	0.0185	0.00018
GW	173	1	0.0537	0.0025	0.0185	0.0537	0.0075	0.0185	0.00018
GW	174	1	0.0537	0.0075	0.0185	0.0537	0.0125	0.0185	0.00018
GW	175	1	0.0537	0.0125	0.0185	0.0537	0.0175	0.0185	0.00018
GW	176	1	0.0554	-0.0175	0.0212	0.0554	-0.0125	0.0212	0.00018
GW	177	1	0.0554	-0.0125	0.0212	0.0554	-0.0075	0.0212	0.00018
GW	178	1	0.0554	-0.0075	0.0212	0.0554	-0.0025	0.0212	0.00018
GW	179	1	0.0554	-0.0025	0.0212	0.0554	0.0025	0.0212	0.00018
GW	180	1	0.0554	0.0025	0.0212	0.0554	0.0075	0.0212	0.00018

GW	181	1	0.0554	0.0075	0.0212	0.0554	0.0125	0.0212	0.00018
GW	182	1	0.0554	0.0125	0.0212	0.0554	0.0175	0.0212	0.00018
GW	183	1	0.0574	-0.0175	0.0238	0.0574	-0.0125	0.0238	0.00018
GW	184	1	0.0574	-0.0125	0.0238	0.0574	-0.0075	0.0238	0.00018
GW	185	1	0.0574	-0.0075	0.0238	0.0574	-0.0025	0.0238	0.00018
GW	186	1	0.0574	-0.0025	0.0238	0.0574	0.0025	0.0238	0.00018
GW	187	1	0.0574	0.0025	0.0238	0.0574	0.0075	0.0238	0.00018
GW	188	1	0.0574	0.0075	0.0238	0.0574	0.0125	0.0238	0.00018
GW	189	1	0.0574	0.0125	0.0238	0.0574	0.0175	0.0238	0.00018
GW	190	1	0.0595	-0.0175	0.0262	0.0595	-0.0125	0.0262	0.00018
GW	191	1	0.0595	-0.0125	0.0262	0.0595	-0.0075	0.0262	0.00018
GW	192	1	0.0595	-0.0075	0.0262	0.0595	-0.0025	0.0262	0.00018
GW	193	1	0.0595	-0.0025	0.0262	0.0595	0.0025	0.0262	0.00018
GW	194	1	0.0595	0.0025	0.0262	0.0595	0.0075	0.0262	0.00018
GW	195	1	0.0595	0.0075	0.0262	0.0595	0.0125	0.0262	0.00018
GW	196	1	0.0595	0.0125	0.0262	0.0595	0.0175	0.0262	0.00018
GW	197	1	0.0619	-0.0175	0.0283	0.0619	-0.0125	0.0283	0.00018
GW	198	1	0.0619	-0.0125	0.0283	0.0619	-0.0075	0.0283	0.00018
GW	199	1	0.0619	-0.0075	0.0283	0.0619	-0.0025	0.0283	0.00018
GW	200	1	0.0619	-0.0025	0.0283	0.0619	0.0025	0.0283	0.00018
GW	201	1	0.0619	0.0025	0.0283	0.0619	0.0075	0.0283	0.00018
GW	202	1	0.0619	0.0075	0.0283	0.0619	0.0125	0.0283	0.00018
GW	203	1	0.0619	0.0125	0.0283	0.0619	0.0175	0.0283	0.00018
GW	204	1	0.0645	-0.0175	0.0303	0.0645	-0.0125	0.0303	0.00018
GW	205	1	0.0645	-0.0125	0.0303	0.0645	-0.0075	0.0303	0.00018
GW	206	1	0.0645	-0.0075	0.0303	0.0645	-0.0025	0.0303	0.00018
GW	207	1	0.0645	-0.0025	0.0303	0.0645	0.0025	0.0303	0.00018
GW	208	1	0.0645	0.0025	0.0303	0.0645	0.0075	0.0303	0.00018
GW	209	1	0.0645	0.0075	0.0303	0.0645	0.0125	0.0303	0.00018
GW	210	1	0.0645	0.0125	0.0303	0.0645	0.0175	0.0303	0.00018
GW	211	1	0.0672	-0.0175	0.0320	0.0672	-0.0125	0.0320	0.00018
GW	212	1	0.0672	-0.0125	0.0320	0.0672	-0.0075	0.0320	0.00018
GW	213	1	0.0672	-0.0075	0.0320	0.0672	-0.0025	0.0320	0.00018

GW	214	1	0.0672	-0.0025	0.0320	0.0672	0.0025	0.0320	0.00018
GW	215	1	0.0672	0.0025	0.0320	0.0672	0.0075	0.0320	0.00018
GW	216	1	0.0672	0.0075	0.0320	0.0672	0.0125	0.0320	0.00018
GW	217	1	0.0672	0.0125	0.0320	0.0672	0.0175	0.0320	0.00018
GW	218	1	0.0701	-0.0175	0.0335	0.0701	-0.0125	0.0335	0.00018
GW	219	1	0.0701	-0.0125	0.0335	0.0701	-0.0075	0.0335	0.00018
GW	220	1	0.0701	-0.0075	0.0335	0.0701	-0.0025	0.0335	0.00018
GW	221	1	0.0701	-0.0025	0.0335	0.0701	0.0025	0.0335	0.00018
GW	222	1	0.0701	0.0025	0.0335	0.0701	0.0075	0.0335	0.00018
GW	223	1	0.0701	0.0075	0.0335	0.0701	0.0125	0.0335	0.00018
GW	224	1	0.0701	0.0125	0.0335	0.0701	0.0175	0.0335	0.00018
GW	225	1	0.0730	-0.0175	0.0348	0.0730	-0.0125	0.0348	0.00018
GW	226	1	0.0730	-0.0125	0.0348	0.0730	-0.0075	0.0348	0.00018
GW	227	1	0.0730	-0.0075	0.0348	0.0730	-0.0025	0.0348	0.00018
GW	228	1	0.0730	-0.0025	0.0348	0.0730	0.0025	0.0348	0.00018
GW	229	1	0.0730	0.0025	0.0348	0.0730	0.0075	0.0348	0.00018
GW	230	1	0.0730	0.0075	0.0348	0.0730	0.0125	0.0348	0.00018
GW	231	1	0.0730	0.0125	0.0348	0.0730	0.0175	0.0348	0.00018
GW	232	1	0.0761	-0.0175	0.0357	0.0761	-0.0125	0.0357	0.00018
GW	233	1	0.0761	-0.0125	0.0357	0.0761	-0.0075	0.0357	0.00018
GW	234	1	0.0761	-0.0075	0.0357	0.0761	-0.0025	0.0357	0.00018
GW	235	1	0.0761	-0.0025	0.0357	0.0761	0.0025	0.0357	0.00018
GW	236	1	0.0761	0.0025	0.0357	0.0761	0.0075	0.0357	0.00018
GW	237	1	0.0761	0.0075	0.0357	0.0761	0.0125	0.0357	0.00018
GW	238	1	0.0761	0.0125	0.0357	0.0761	0.0175	0.0357	0.00018
GW	239	1	0.0793	-0.0175	0.0364	0.0793	-0.0125	0.0364	0.00018
GW	240	1	0.0793	-0.0125	0.0364	0.0793	-0.0075	0.0364	0.00018
GW	241	1	0.0793	-0.0075	0.0364	0.0793	-0.0025	0.0364	0.00018
GW	242	1	0.0793	-0.0025	0.0364	0.0793	0.0025	0.0364	0.00018
GW	243	1	0.0793	0.0025	0.0364	0.0793	0.0075	0.0364	0.00018
GW	244	1	0.0793	0.0075	0.0364	0.0793	0.0125	0.0364	0.00018
GW	245	1	0.0793	0.0125	0.0364	0.0793	0.0175	0.0364	0.00018
GW	246	1	0.0825	-0.0175	0.0369	0.0825	-0.0125	0.0369	0.00018

GW	247	1	0.0825	-0.0125	0.0369	0.0825	-0.0075	0.0369	0.00018
GW	248	1	0.0825	-0.0075	0.0369	0.0825	-0.0025	0.0369	0.00018
GW	249	1	0.0825	-0.0025	0.0369	0.0825	0.0025	0.0369	0.00018
GW	250	1	0.0825	0.0025	0.0369	0.0825	0.0075	0.0369	0.00018
GW	251	1	0.0825	0.0075	0.0369	0.0825	0.0125	0.0369	0.00018
GW	252	1	0.0825	0.0125	0.0369	0.0825	0.0175	0.0369	0.00018
GW	253	1	0.0857	-0.0175	0.0370	0.0857	-0.0125	0.0370	0.00018
GW	254	1	0.0857	-0.0125	0.0370	0.0857	-0.0075	0.0370	0.00018
GW	255	1	0.0857	-0.0075	0.0370	0.0857	-0.0025	0.0370	0.00018
GW	256	1	0.0857	-0.0025	0.0370	0.0857	0.0025	0.0370	0.00018
GW	257	1	0.0857	0.0025	0.0370	0.0857	0.0075	0.0370	0.00018
GW	258	1	0.0857	0.0075	0.0370	0.0857	0.0125	0.0370	0.00018
GW	259	1	0.0857	0.0125	0.0370	0.0857	0.0175	0.0370	0.00018
GW	260	1	0.0889	-0.0175	0.0369	0.0889	-0.0125	0.0369	0.00018
GW	261	1	0.0889	-0.0125	0.0369	0.0889	-0.0075	0.0369	0.00018
GW	262	1	0.0889	-0.0075	0.0369	0.0889	-0.0025	0.0369	0.00018
GW	263	1	0.0889	-0.0025	0.0369	0.0889	0.0025	0.0369	0.00018
GW	264	1	0.0889	0.0025	0.0369	0.0889	0.0075	0.0369	0.00018
GW	265	1	0.0889	0.0075	0.0369	0.0889	0.0125	0.0369	0.00018
GW	266	1	0.0889	0.0125	0.0369	0.0889	0.0175	0.0369	0.00018
GW	267	1	0.0921	-0.0175	0.0364	0.0921	-0.0125	0.0364	0.00018
GW	268	1	0.0921	-0.0125	0.0364	0.0921	-0.0075	0.0364	0.00018
GW	269	1	0.0921	-0.0075	0.0364	0.0921	-0.0025	0.0364	0.00018
GW	270	1	0.0921	-0.0025	0.0364	0.0921	0.0025	0.0364	0.00018
GW	271	1	0.0921	0.0025	0.0364	0.0921	0.0075	0.0364	0.00018
GW	272	1	0.0921	0.0075	0.0364	0.0921	0.0125	0.0364	0.00018
GW	273	1	0.0921	0.0125	0.0364	0.0921	0.0175	0.0364	0.00018
GW	274	1	0.0953	-0.0175	0.0357	0.0953	-0.0125	0.0357	0.00018
GW	275	1	0.0953	-0.0125	0.0357	0.0953	-0.0075	0.0357	0.00018
GW	276	1	0.0953	-0.0075	0.0357	0.0953	-0.0025	0.0357	0.00018
GW	277	1	0.0953	-0.0025	0.0357	0.0953	0.0025	0.0357	0.00018
GW	278	1	0.0953	0.0025	0.0357	0.0953	0.0075	0.0357	0.00018
GW	279	1	0.0953	0.0075	0.0357	0.0953	0.0125	0.0357	0.00018

GW	280	1	0.0953	0.0125	0.0357	0.0953	0.0175	0.0357	0.00018
GW	281	1	0.0984	-0.0175	0.0348	0.0984	-0.0125	0.0348	0.00018
GW	282	1	0.0984	-0.0125	0.0348	0.0984	-0.0075	0.0348	0.00018
GW	283	1	0.0984	-0.0075	0.0348	0.0984	-0.0025	0.0348	0.00018
GW	284	1	0.0984	-0.0025	0.0348	0.0984	0.0025	0.0348	0.00018
GW	285	1	0.0984	0.0025	0.0348	0.0984	0.0075	0.0348	0.00018
GW	286	1	0.0984	0.0075	0.0348	0.0984	0.0125	0.0348	0.00018
GW	287	1	0.0984	0.0125	0.0348	0.0984	0.0175	0.0348	0.00018
GW	288	1	0.1013	-0.0175	0.0335	0.1013	-0.0125	0.0335	0.00018
GW	289	1	0.1013	-0.0125	0.0335	0.1013	-0.0075	0.0335	0.00018
GW	290	1	0.1013	-0.0075	0.0335	0.1013	-0.0025	0.0335	0.00018
GW	291	1	0.1013	-0.0025	0.0335	0.1013	0.0025	0.0335	0.00018
GW	292	1	0.1013	0.0025	0.0335	0.1013	0.0075	0.0335	0.00018
GW	293	1	0.1013	0.0075	0.0335	0.1013	0.0125	0.0335	0.00018
GW	294	1	0.1013	0.0125	0.0335	0.1013	0.0175	0.0335	0.00018
GW	295	1	0.1042	-0.0175	0.0320	0.1042	-0.0125	0.0320	0.00018
GW	296	1	0.1042	-0.0125	0.0320	0.1042	-0.0075	0.0320	0.00018
GW	297	1	0.1042	-0.0075	0.0320	0.1042	-0.0025	0.0320	0.00018
GW	298	1	0.1042	-0.0025	0.0320	0.1042	0.0025	0.0320	0.00018
GW	299	1	0.1042	0.0025	0.0320	0.1042	0.0075	0.0320	0.00018
GW	300	1	0.1042	0.0075	0.0320	0.1042	0.0125	0.0320	0.00018
GW	301	1	0.1042	0.0125	0.0320	0.1042	0.0175	0.0320	0.00018
GW	302	1	0.1069	-0.0175	0.0303	0.1069	-0.0125	0.0303	0.00018
GW	303	1	0.1069	-0.0125	0.0303	0.1069	-0.0075	0.0303	0.00018
GW	304	1	0.1069	-0.0075	0.0303	0.1069	-0.0025	0.0303	0.00018
GW	305	1	0.1069	-0.0025	0.0303	0.1069	0.0025	0.0303	0.00018
GW	306	1	0.1069	0.0025	0.0303	0.1069	0.0075	0.0303	0.00018
GW	307	1	0.1069	0.0075	0.0303	0.1069	0.0125	0.0303	0.00018
GW	308	1	0.1069	0.0125	0.0303	0.1069	0.0175	0.0303	0.00018
GW	309	1	0.1095	-0.0175	0.0283	0.1095	-0.0125	0.0283	0.00018
GW	310	1	0.1095	-0.0125	0.0283	0.1095	-0.0075	0.0283	0.00018
GW	311	1	0.1095	-0.0075	0.0283	0.1095	-0.0025	0.0283	0.00018
GW	312	1	0.1095	-0.0025	0.0283	0.1095	0.0025	0.0283	0.00018

GW	313	1	0.1095	0.0025	0.0283	0.1095	0.0075	0.0283	0.00018
GW	314	1	0.1095	0.0075	0.0283	0.1095	0.0125	0.0283	0.00018
GW	315	1	0.1095	0.0125	0.0283	0.1095	0.0175	0.0283	0.00018
GW	316	1	0.1119	-0.0175	0.0262	0.1119	-0.0125	0.0262	0.00018
GW	317	1	0.1119	-0.0125	0.0262	0.1119	-0.0075	0.0262	0.00018
GW	318	1	0.1119	-0.0075	0.0262	0.1119	-0.0025	0.0262	0.00018
GW	319	1	0.1119	-0.0025	0.0262	0.1119	0.0025	0.0262	0.00018
GW	320	1	0.1119	0.0025	0.0262	0.1119	0.0075	0.0262	0.00018
GW	321	1	0.1119	0.0075	0.0262	0.1119	0.0125	0.0262	0.00018
GW	322	1	0.1119	0.0125	0.0262	0.1119	0.0175	0.0262	0.00018
GW	323	1	0.1140	-0.0175	0.0238	0.1140	-0.0125	0.0238	0.00018
GW	324	1	0.1140	-0.0125	0.0238	0.1140	-0.0075	0.0238	0.00018
GW	325	1	0.1140	-0.0075	0.0238	0.1140	-0.0025	0.0238	0.00018
GW	326	1	0.1140	-0.0025	0.0238	0.1140	0.0025	0.0238	0.00018
GW	327	1	0.1140	0.0025	0.0238	0.1140	0.0075	0.0238	0.00018
GW	328	1	0.1140	0.0075	0.0238	0.1140	0.0125	0.0238	0.00018
GW	329	1	0.1140	0.0125	0.0238	0.1140	0.0175	0.0238	0.00018
GW	330	1	0.1160	-0.0175	0.0212	0.1160	-0.0125	0.0212	0.00018
GW	331	1	0.1160	-0.0125	0.0212	0.1160	-0.0075	0.0212	0.00018
GW	332	1	0.1160	-0.0075	0.0212	0.1160	-0.0025	0.0212	0.00018
GW	333	1	0.1160	-0.0025	0.0212	0.1160	0.0025	0.0212	0.00018
GW	334	1	0.1160	0.0025	0.0212	0.1160	0.0075	0.0212	0.00018
GW	335	1	0.1160	0.0075	0.0212	0.1160	0.0125	0.0212	0.00018
GW	336	1	0.1160	0.0125	0.0212	0.1160	0.0175	0.0212	0.00018
GW	337	1	0.1177	-0.0175	0.0185	0.1177	-0.0125	0.0185	0.00018
GW	338	1	0.1177	-0.0125	0.0185	0.1177	-0.0075	0.0185	0.00018
GW	339	1	0.1177	-0.0075	0.0185	0.1177	-0.0025	0.0185	0.00018
GW	340	1	0.1177	-0.0025	0.0185	0.1177	0.0025	0.0185	0.00018
GW	341	1	0.1177	0.0025	0.0185	0.1177	0.0075	0.0185	0.00018
GW	342	1	0.1177	0.0075	0.0185	0.1177	0.0125	0.0185	0.00018
GW	343	1	0.1177	0.0125	0.0185	0.1177	0.0175	0.0185	0.00018
GW	344	1	0.1192	-0.0175	0.0156	0.1192	-0.0125	0.0156	0.00018
GW	345	1	0.1192	-0.0125	0.0156	0.1192	-0.0075	0.0156	0.00018
GW	346	1	0.1192	-0.0075	0.0156	0.1192	-0.0025	0.0156	0.00018

GW	347	1	0.1192	-0.0025	0.0156	0.1192	0.0025	0.0156	0.00018
GW	348	1	0.1192	0.0025	0.0156	0.1192	0.0075	0.0156	0.00018
GW	349	1	0.1192	0.0075	0.0156	0.1192	0.0125	0.0156	0.00018
GW	350	1	0.1192	0.0125	0.0156	0.1192	0.0175	0.0156	0.00018
GW	351	1	0.1205	-0.0175	0.0127	0.1205	-0.0125	0.0127	0.00018
GW	352	1	0.1205	-0.0125	0.0127	0.1205	-0.0075	0.0127	0.00018
GW	353	1	0.1205	-0.0075	0.0127	0.1205	-0.0025	0.0127	0.00018
GW	354	1	0.1205	-0.0025	0.0127	0.1205	0.0025	0.0127	0.00018
GW	355	1	0.1205	0.0025	0.0127	0.1205	0.0075	0.0127	0.00018
GW	356	1	0.1205	0.0075	0.0127	0.1205	0.0125	0.0127	0.00018
GW	357	1	0.1205	0.0125	0.0127	0.1205	0.0175	0.0127	0.00018
GW	358	1	0.1214	-0.0175	0.0096	0.1214	-0.0125	0.0096	0.00018
GW	359	1	0.1214	-0.0125	0.0096	0.1214	-0.0075	0.0096	0.00018
GW	360	1	0.1214	-0.0075	0.0096	0.1214	-0.0025	0.0096	0.00018
GW	361	1	0.1214	-0.0025	0.0096	0.1214	0.0025	0.0096	0.00018
GW	362	1	0.1214	0.0025	0.0096	0.1214	0.0075	0.0096	0.00018
GW	363	1	0.1214	0.0075	0.0096	0.1214	0.0125	0.0096	0.00018
GW	364	1	0.1214	0.0125	0.0096	0.1214	0.0175	0.0096	0.00018
GW	365	1	0.1221	-0.0175	0.0064	0.1221	-0.0125	0.0064	0.00018
GW	366	1	0.1221	-0.0125	0.0064	0.1221	-0.0075	0.0064	0.00018
GW	367	1	0.1221	-0.0075	0.0064	0.1221	-0.0025	0.0064	0.00018
GW	368	1	0.1221	-0.0025	0.0064	0.1221	0.0025	0.0064	0.00018
GW	369	1	0.1221	0.0025	0.0064	0.1221	0.0075	0.0064	0.00018
GW	370	1	0.1221	0.0075	0.0064	0.1221	0.0125	0.0064	0.00018
GW	371	1	0.1221	0.0125	0.0064	0.1221	0.0175	0.0064	0.00018
GW	372	1	0.1226	-0.0175	0.0032	0.1226	-0.0125	0.0032	0.00018
GW	373	1	0.1226	-0.0125	0.0032	0.1226	-0.0075	0.0032	0.00018
GW	374	1	0.1226	-0.0075	0.0032	0.1226	-0.0025	0.0032	0.00018
GW	375	1	0.1226	-0.0025	0.0032	0.1226	0.0025	0.0032	0.00018
GW	376	1	0.1226	0.0025	0.0032	0.1226	0.0075	0.0032	0.00018
GW	377	1	0.1226	0.0075	0.0032	0.1226	0.0125	0.0032	0.00018
GW	378	1	0.1226	0.0125	0.0032	0.1226	0.0175	0.0032	0.00018
GW	379	1	0.1227	-0.0175	0.0000	0.1227	-0.0125	0.0000	0.00018
GW	380	1	0.1227	-0.0125	0.0000	0.1227	-0.0075	0.0000	0.00018

GW	381	1	0.1227	-0.0075	0.0000	0.1227	-0.0025	0.0000	0.00018
GW	382	1	0.1227	-0.0025	0.0000	0.1227	0.0025	0.0000	0.00018
GW	383	1	0.1227	0.0025	0.0000	0.1227	0.0075	0.0000	0.00018
GW	384	1	0.1227	0.0075	0.0000	0.1227	0.0125	0.0000	0.00018
GW	385	1	0.1227	0.0125	0.0000	0.1227	0.0175	0.0000	0.00018
GW	386	1	0.1226	-0.0175	-0.0032	0.1226	-0.0125	-0.0032	0.00018
GW	387	1	0.1226	-0.0125	-0.0032	0.1226	-0.0075	-0.0032	0.00018
GW	388	1	0.1226	-0.0075	-0.0032	0.1226	-0.0025	-0.0032	0.00018
GW	389	1	0.1226	-0.0025	-0.0032	0.1226	0.0025	-0.0032	0.00018
GW	390	1	0.1226	0.0025	-0.0032	0.1226	0.0075	-0.0032	0.00018
GW	391	1	0.1226	0.0075	-0.0032	0.1226	0.0125	-0.0032	0.00018
GW	392	1	0.1226	0.0125	-0.0032	0.1226	0.0175	-0.0032	0.00018
GW	393	1	0.1221	-0.0175	-0.0064	0.1221	-0.0125	-0.0064	0.00018
GW	394	1	0.1221	-0.0125	-0.0064	0.1221	-0.0075	-0.0064	0.00018
GW	395	1	0.1221	-0.0075	-0.0064	0.1221	-0.0025	-0.0064	0.00018
GW	396	1	0.1221	-0.0025	-0.0064	0.1221	0.0025	-0.0064	0.00018
GW	397	1	0.1221	0.0025	-0.0064	0.1221	0.0075	-0.0064	0.00018
GW	398	1	0.1221	0.0075	-0.0064	0.1221	0.0125	-0.0064	0.00018
GW	399	1	0.1221	0.0125	-0.0064	0.1221	0.0175	-0.0064	0.00018
GW	400	1	0.1214	-0.0175	-0.0096	0.1214	-0.0125	-0.0096	0.00018
GW	401	1	0.1214	-0.0125	-0.0096	0.1214	-0.0075	-0.0096	0.00018
GW	402	1	0.1214	-0.0075	-0.0096	0.1214	-0.0025	-0.0096	0.00018
GW	403	1	0.1214	-0.0025	-0.0096	0.1214	0.0025	-0.0096	0.00018
GW	404	1	0.1214	0.0025	-0.0096	0.1214	0.0075	-0.0096	0.00018
GW	405	1	0.1214	0.0075	-0.0096	0.1214	0.0125	-0.0096	0.00018
GW	406	1	0.1214	0.0125	-0.0096	0.1214	0.0175	-0.0096	0.00018
GW	407	1	0.1205	-0.0175	-0.0127	0.1205	-0.0125	-0.0127	0.00018
GW	408	1	0.1205	-0.0125	-0.0127	0.1205	-0.0075	-0.0127	0.00018
GW	409	1	0.1205	-0.0075	-0.0127	0.1205	-0.0025	-0.0127	0.00018
GW	410	1	0.1205	-0.0025	-0.0127	0.1205	0.0025	-0.0127	0.00018
GW	411	1	0.1205	0.0025	-0.0127	0.1205	0.0075	-0.0127	0.00018
GW	412	1	0.1205	0.0075	-0.0127	0.1205	0.0125	-0.0127	0.00018
GW	413	1	0.1205	0.0125	-0.0127	0.1205	0.0175	-0.0127	0.00018
GW	414	1	0.1192	-0.0175	-0.0156	0.1192	-0.0125	-0.0156	0.00018

GW	415	1	0.1192	-0.0125	-0.0156	0.1192	-0.0075	-0.0156	0.00018
GW	416	1	0.1192	-0.0075	-0.0156	0.1192	-0.0025	-0.0156	0.00018
GW	417	1	0.1192	-0.0025	-0.0156	0.1192	0.0025	-0.0156	0.00018
GW	418	1	0.1192	0.0025	-0.0156	0.1192	0.0075	-0.0156	0.00018
GW	419	1	0.1192	0.0075	-0.0156	0.1192	0.0125	-0.0156	0.00018
GW	420	1	0.1192	0.0125	-0.0156	0.1192	0.0175	-0.0156	0.00018
GW	421	1	0.1177	-0.0175	-0.0185	0.1177	-0.0125	-0.0185	0.00018
GW	422	1	0.1177	-0.0125	-0.0185	0.1177	-0.0075	-0.0185	0.00018
GW	423	1	0.1177	-0.0075	-0.0185	0.1177	-0.0025	-0.0185	0.00018
GW	424	1	0.1177	-0.0025	-0.0185	0.1177	0.0025	-0.0185	0.00018
GW	425	1	0.1177	0.0025	-0.0185	0.1177	0.0075	-0.0185	0.00018
GW	426	1	0.1177	0.0075	-0.0185	0.1177	0.0125	-0.0185	0.00018
GW	427	1	0.1177	0.0125	-0.0185	0.1177	0.0175	-0.0185	0.00018
GW	428	1	0.1160	-0.0175	-0.0212	0.1160	-0.0125	-0.0212	0.00018
GW	429	1	0.1160	-0.0125	-0.0212	0.1160	-0.0075	-0.0212	0.00018
GW	430	1	0.1160	-0.0075	-0.0212	0.1160	-0.0025	-0.0212	0.00018
GW	431	1	0.1160	-0.0025	-0.0212	0.1160	0.0025	-0.0212	0.00018
GW	432	1	0.1160	0.0025	-0.0212	0.1160	0.0075	-0.0212	0.00018
GW	433	1	0.1160	0.0075	-0.0212	0.1160	0.0125	-0.0212	0.00018
GW	434	1	0.1160	0.0125	-0.0212	0.1160	0.0175	-0.0212	0.00018
GW	435	1	0.1140	-0.0175	-0.0238	0.1140	-0.0125	-0.0238	0.00018
GW	436	1	0.1140	-0.0125	-0.0238	0.1140	-0.0075	-0.0238	0.00018
GW	437	1	0.1140	-0.0075	-0.0238	0.1140	-0.0025	-0.0238	0.00018
GW	438	1	0.1140	-0.0025	-0.0238	0.1140	0.0025	-0.0238	0.00018
GW	439	1	0.1140	0.0025	-0.0238	0.1140	0.0075	-0.0238	0.00018
GW	440	1	0.1140	0.0075	-0.0238	0.1140	0.0125	-0.0238	0.00018
GW	441	1	0.1140	0.0125	-0.0238	0.1140	0.0175	-0.0238	0.00018
GW	442	1	0.1119	-0.0175	-0.0262	0.1119	-0.0125	-0.0262	0.00018
GW	443	1	0.1119	-0.0125	-0.0262	0.1119	-0.0075	-0.0262	0.00018
GW	444	1	0.1119	-0.0075	-0.0262	0.1119	-0.0025	-0.0262	0.00018
GW	445	1	0.1119	-0.0025	-0.0262	0.1119	0.0025	-0.0262	0.00018
GW	446	1	0.1119	0.0025	-0.0262	0.1119	0.0075	-0.0262	0.00018
GW	447	1	0.1119	0.0075	-0.0262	0.1119	0.0125	-0.0262	0.00018
GW	448	1	0.1119	0.0125	-0.0262	0.1119	0.0175	-0.0262	0.00018

GW	449	1	0.1095	-0.0175	-0.0283	0.1095	-0.0125	-0.0283	0.00018
GW	450	1	0.1095	-0.0125	-0.0283	0.1095	-0.0075	-0.0283	0.00018
GW	451	1	0.1095	-0.0075	-0.0283	0.1095	-0.0025	-0.0283	0.00018
GW	452	1	0.1095	-0.0025	-0.0283	0.1095	0.0025	-0.0283	0.00018
GW	453	1	0.1095	0.0025	-0.0283	0.1095	0.0075	-0.0283	0.00018
GW	454	1	0.1095	0.0075	-0.0283	0.1095	0.0125	-0.0283	0.00018
GW	455	1	0.1095	0.0125	-0.0283	0.1095	0.0175	-0.0283	0.00018
GW	456	1	0.1069	-0.0175	-0.0303	0.1069	-0.0125	-0.0303	0.00018
GW	457	1	0.1069	-0.0125	-0.0303	0.1069	-0.0075	-0.0303	0.00018
GW	458	1	0.1069	-0.0075	-0.0303	0.1069	-0.0025	-0.0303	0.00018
GW	459	1	0.1069	-0.0025	-0.0303	0.1069	0.0025	-0.0303	0.00018
GW	460	1	0.1069	0.0025	-0.0303	0.1069	0.0075	-0.0303	0.00018
GW	461	1	0.1069	0.0075	-0.0303	0.1069	0.0125	-0.0303	0.00018
GW	462	1	0.1069	0.0125	-0.0303	0.1069	0.0175	-0.0303	0.00018
GW	463	1	0.1042	-0.0175	-0.0320	0.1042	-0.0125	-0.0320	0.00018
GW	464	1	0.1042	-0.0125	-0.0320	0.1042	-0.0075	-0.0320	0.00018
GW	465	1	0.1042	-0.0075	-0.0320	0.1042	-0.0025	-0.0320	0.00018
GW	466	1	0.1042	-0.0025	-0.0320	0.1042	0.0025	-0.0320	0.00018
GW	467	1	0.1042	0.0025	-0.0320	0.1042	0.0075	-0.0320	0.00018
GW	468	1	0.1042	0.0075	-0.0320	0.1042	0.0125	-0.0320	0.00018
GW	469	1	0.1042	0.0125	-0.0320	0.1042	0.0175	-0.0320	0.00018
GW	470	1	0.1013	-0.0175	-0.0335	0.1013	-0.0125	-0.0335	0.00018
GW	471	1	0.1013	-0.0125	-0.0335	0.1013	-0.0075	-0.0335	0.00018
GW	472	1	0.1013	-0.0075	-0.0335	0.1013	-0.0025	-0.0335	0.00018
GW	473	1	0.1013	-0.0025	-0.0335	0.1013	0.0025	-0.0335	0.00018
GW	474	1	0.1013	0.0025	-0.0335	0.1013	0.0075	-0.0335	0.00018
GW	475	1	0.1013	0.0075	-0.0335	0.1013	0.0125	-0.0335	0.00018
GW	476	1	0.1013	0.0125	-0.0335	0.1013	0.0175	-0.0335	0.00018
GW	477	1	0.0984	-0.0175	-0.0348	0.0984	-0.0125	-0.0348	0.00018
GW	478	1	0.0984	-0.0125	-0.0348	0.0984	-0.0075	-0.0348	0.00018
GW	479	1	0.0984	-0.0075	-0.0348	0.0984	-0.0025	-0.0348	0.00018
GW	480	1	0.0984	-0.0025	-0.0348	0.0984	0.0025	-0.0348	0.00018
GW	481	1	0.0984	0.0025	-0.0348	0.0984	0.0075	-0.0348	0.00018
GW	482	1	0.0984	0.0075	-0.0348	0.0984	0.0125	-0.0348	0.00018

GW	483	1	0.0984	0.0125	-0.0348	0.0984	0.0175	-0.0348	0.00018
GW	484	1	0.0953	-0.0175	-0.0357	0.0953	-0.0125	-0.0357	0.00018
GW	485	1	0.0953	-0.0125	-0.0357	0.0953	-0.0075	-0.0357	0.00018
GW	486	1	0.0953	-0.0075	-0.0357	0.0953	-0.0025	-0.0357	0.00018
GW	487	1	0.0953	-0.0025	-0.0357	0.0953	0.0025	-0.0357	0.00018
GW	488	1	0.0953	0.0025	-0.0357	0.0953	0.0075	-0.0357	0.00018
GW	489	1	0.0953	0.0075	-0.0357	0.0953	0.0125	-0.0357	0.00018
GW	490	1	0.0953	0.0125	-0.0357	0.0953	0.0175	-0.0357	0.00018
GW	491	1	0.0921	-0.0175	-0.0364	0.0921	-0.0125	-0.0364	0.00018
GW	492	1	0.0921	-0.0125	-0.0364	0.0921	-0.0075	-0.0364	0.00018
GW	493	1	0.0921	-0.0075	-0.0364	0.0921	-0.0025	-0.0364	0.00018
GW	494	1	0.0921	-0.0025	-0.0364	0.0921	0.0025	-0.0364	0.00018
GW	495	1	0.0921	0.0025	-0.0364	0.0921	0.0075	-0.0364	0.00018
GW	496	1	0.0921	0.0075	-0.0364	0.0921	0.0125	-0.0364	0.00018
GW	497	1	0.0921	0.0125	-0.0364	0.0921	0.0175	-0.0364	0.00018
GW	498	1	0.0889	-0.0175	-0.0369	0.0889	-0.0125	-0.0369	0.00018
GW	499	1	0.0889	-0.0125	-0.0369	0.0889	-0.0075	-0.0369	0.00018
GW	500	1	0.0889	-0.0075	-0.0369	0.0889	-0.0025	-0.0369	0.00018
GW	501	1	0.0889	-0.0025	-0.0369	0.0889	0.0025	-0.0369	0.00018
GW	502	1	0.0889	0.0025	-0.0369	0.0889	0.0075	-0.0369	0.00018
GW	503	1	0.0889	0.0075	-0.0369	0.0889	0.0125	-0.0369	0.00018
GW	504	1	0.0889	0.0125	-0.0369	0.0889	0.0175	-0.0369	0.00018
GW	505	1	0.0857	-0.0175	-0.0370	0.0857	-0.0125	-0.0370	0.00018
GW	506	1	0.0857	-0.0125	-0.0370	0.0857	-0.0075	-0.0370	0.00018
GW	507	1	0.0857	-0.0075	-0.0370	0.0857	-0.0025	-0.0370	0.00018
GW	508	1	0.0857	-0.0025	-0.0370	0.0857	0.0025	-0.0370	0.00018
GW	509	1	0.0857	0.0025	-0.0370	0.0857	0.0075	-0.0370	0.00018
GW	510	1	0.0857	0.0075	-0.0370	0.0857	0.0125	-0.0370	0.00018
GW	511	1	0.0857	0.0125	-0.0370	0.0857	0.0175	-0.0370	0.00018
GW	512	1	0.0857	-0.0175	-0.0370	0.0825	-0.0175	-0.0369	0.00018
GW	513	1	0.0825	-0.0175	-0.0369	0.0793	-0.0175	-0.0364	0.00018
GW	514	1	0.0793	-0.0175	-0.0364	0.0761	-0.0175	-0.0357	0.00018
GW	515	1	0.0761	-0.0175	-0.0357	0.0730	-0.0175	-0.0348	0.00018
GW	516	1	0.0730	-0.0175	-0.0348	0.0701	-0.0175	-0.0335	0.00018

GW	517	1	0.0701	-0.0175	-0.0335	0.0672	-0.0175	-0.0320	0.00018
GW	518	1	0.0672	-0.0175	-0.0320	0.0645	-0.0175	-0.0303	0.00018
GW	519	1	0.0645	-0.0175	-0.0303	0.0619	-0.0175	-0.0283	0.00018
GW	520	1	0.0619	-0.0175	-0.0283	0.0595	-0.0175	-0.0262	0.00018
GW	521	1	0.0595	-0.0175	-0.0262	0.0574	-0.0175	-0.0238	0.00018
GW	522	1	0.0574	-0.0175	-0.0238	0.0554	-0.0175	-0.0212	0.00018
GW	523	1	0.0554	-0.0175	-0.0212	0.0537	-0.0175	-0.0185	0.00018
GW	524	1	0.0537	-0.0175	-0.0185	0.0522	-0.0175	-0.0156	0.00018
GW	525	1	0.0522	-0.0175	-0.0156	0.0509	-0.0175	-0.0127	0.00018
GW	526	1	0.0509	-0.0175	-0.0127	0.0500	-0.0175	-0.0096	0.00018
GW	527	1	0.0500	-0.0175	-0.0096	0.0493	-0.0175	-0.0064	0.00018
GW	528	1	0.0493	-0.0175	-0.0064	0.0488	-0.0175	-0.0032	0.00018
GW	529	1	0.0488	-0.0175	-0.0032	0.0487	-0.0175	0.0000	0.00018
GW	530	1	0.0487	-0.0175	0.0000	0.0488	-0.0175	0.0032	0.00018
GW	531	1	0.0488	-0.0175	0.0032	0.0493	-0.0175	0.0064	0.00018
GW	532	1	0.0493	-0.0175	0.0064	0.0500	-0.0175	0.0096	0.00018
GW	533	1	0.0500	-0.0175	0.0096	0.0509	-0.0175	0.0127	0.00018
GW	534	1	0.0509	-0.0175	0.0127	0.0522	-0.0175	0.0156	0.00018
GW	535	1	0.0522	-0.0175	0.0156	0.0537	-0.0175	0.0185	0.00018
GW	536	1	0.0537	-0.0175	0.0185	0.0554	-0.0175	0.0212	0.00018
GW	537	1	0.0554	-0.0175	0.0212	0.0574	-0.0175	0.0238	0.00018
GW	538	1	0.0574	-0.0175	0.0238	0.0595	-0.0175	0.0262	0.00018
GW	539	1	0.0595	-0.0175	0.0262	0.0619	-0.0175	0.0283	0.00018
GW	540	1	0.0619	-0.0175	0.0283	0.0645	-0.0175	0.0303	0.00018
GW	541	1	0.0645	-0.0175	0.0303	0.0672	-0.0175	0.0320	0.00018
GW	542	1	0.0672	-0.0175	0.0320	0.0701	-0.0175	0.0335	0.00018
GW	543	1	0.0701	-0.0175	0.0335	0.0730	-0.0175	0.0348	0.00018
GW	544	1	0.0730	-0.0175	0.0348	0.0761	-0.0175	0.0357	0.00018
GW	545	1	0.0761	-0.0175	0.0357	0.0793	-0.0175	0.0364	0.00018
GW	546	1	0.0793	-0.0175	0.0364	0.0825	-0.0175	0.0369	0.00018
GW	547	1	0.0825	-0.0175	0.0369	0.0857	-0.0175	0.0370	0.00018
GW	548	1	0.0857	-0.0175	0.0370	0.0889	-0.0175	0.0369	0.00018
GW	549	1	0.0889	-0.0175	0.0369	0.0921	-0.0175	0.0364	0.00018
GW	550	1	0.0921	-0.0175	0.0364	0.0953	-0.0175	0.0357	0.00018

GW	551	1	0.0953	-0.0175	0.0357	0.0984	-0.0175	0.0348	0.00018
GW	552	1	0.0984	-0.0175	0.0348	0.1013	-0.0175	0.0335	0.00018
GW	553	1	0.1013	-0.0175	0.0335	0.1042	-0.0175	0.0320	0.00018
GW	554	1	0.1042	-0.0175	0.0320	0.1069	-0.0175	0.0303	0.00018
GW	555	1	0.1069	-0.0175	0.0303	0.1095	-0.0175	0.0283	0.00018
GW	556	1	0.1095	-0.0175	0.0283	0.1119	-0.0175	0.0262	0.00018
GW	557	1	0.1119	-0.0175	0.0262	0.1140	-0.0175	0.0238	0.00018
GW	558	1	0.1140	-0.0175	0.0238	0.1160	-0.0175	0.0212	0.00018
GW	559	1	0.1160	-0.0175	0.0212	0.1177	-0.0175	0.0185	0.00018
GW	560	1	0.1177	-0.0175	0.0185	0.1192	-0.0175	0.0156	0.00018
GW	561	1	0.1192	-0.0175	0.0156	0.1205	-0.0175	0.0127	0.00018
GW	562	1	0.1205	-0.0175	0.0127	0.1214	-0.0175	0.0096	0.00018
GW	563	1	0.1214	-0.0175	0.0096	0.1221	-0.0175	0.0064	0.00018
GW	564	1	0.1221	-0.0175	0.0064	0.1226	-0.0175	0.0032	0.00018
GW	565	1	0.1226	-0.0175	0.0032	0.1227	-0.0175	0.0000	0.00018
GW	566	1	0.1227	-0.0175	0.0000	0.1226	-0.0175	-0.0032	0.00018
GW	567	1	0.1226	-0.0175	-0.0032	0.1221	-0.0175	-0.0064	0.00018
GW	568	1	0.1221	-0.0175	-0.0064	0.1214	-0.0175	-0.0096	0.00018
GW	569	1	0.1214	-0.0175	-0.0096	0.1205	-0.0175	-0.0127	0.00018
GW	570	1	0.1205	-0.0175	-0.0127	0.1192	-0.0175	-0.0156	0.00018
GW	571	1	0.1192	-0.0175	-0.0156	0.1177	-0.0175	-0.0185	0.00018
GW	572	1	0.1177	-0.0175	-0.0185	0.1160	-0.0175	-0.0212	0.00018
GW	573	1	0.1160	-0.0175	-0.0212	0.1140	-0.0175	-0.0238	0.00018
GW	574	1	0.1140	-0.0175	-0.0238	0.1119	-0.0175	-0.0262	0.00018
GW	575	1	0.1119	-0.0175	-0.0262	0.1095	-0.0175	-0.0283	0.00018
GW	576	1	0.1095	-0.0175	-0.0283	0.1069	-0.0175	-0.0303	0.00018
GW	577	1	0.1069	-0.0175	-0.0303	0.1042	-0.0175	-0.0320	0.00018
GW	578	1	0.1042	-0.0175	-0.0320	0.1013	-0.0175	-0.0335	0.00018
GW	579	1	0.1013	-0.0175	-0.0335	0.0984	-0.0175	-0.0348	0.00018
GW	580	1	0.0984	-0.0175	-0.0348	0.0953	-0.0175	-0.0357	0.00018
GW	581	1	0.0953	-0.0175	-0.0357	0.0921	-0.0175	-0.0364	0.00018
GW	582	1	0.0921	-0.0175	-0.0364	0.0889	-0.0175	-0.0369	0.00018
GW	583	1	0.0889	-0.0175	-0.0369	0.0857	-0.0175	-0.0370	0.00018
GW	584	1	0.0857	-0.0125	-0.0370	0.0825	-0.0125	-0.0369	0.00018

GW	585	1	0.0825	-0.0125	-0.0369	0.0793	-0.0125	-0.0364	0.00018
GW	586	1	0.0793	-0.0125	-0.0364	0.0761	-0.0125	-0.0357	0.00018
GW	587	1	0.0761	-0.0125	-0.0357	0.0730	-0.0125	-0.0348	0.00018
GW	588	1	0.0730	-0.0125	-0.0348	0.0701	-0.0125	-0.0335	0.00018
GW	589	1	0.0701	-0.0125	-0.0335	0.0672	-0.0125	-0.0320	0.00018
GW	590	1	0.0672	-0.0125	-0.0320	0.0645	-0.0125	-0.0303	0.00018
GW	591	1	0.0645	-0.0125	-0.0303	0.0619	-0.0125	-0.0283	0.00018
GW	592	1	0.0619	-0.0125	-0.0283	0.0595	-0.0125	-0.0262	0.00018
GW	593	1	0.0595	-0.0125	-0.0262	0.0574	-0.0125	-0.0238	0.00018
GW	594	1	0.0574	-0.0125	-0.0238	0.0554	-0.0125	-0.0212	0.00018
GW	595	1	0.0554	-0.0125	-0.0212	0.0537	-0.0125	-0.0185	0.00018
GW	596	1	0.0537	-0.0125	-0.0185	0.0522	-0.0125	-0.0156	0.00018
GW	597	1	0.0522	-0.0125	-0.0156	0.0509	-0.0125	-0.0127	0.00018
GW	598	1	0.0509	-0.0125	-0.0127	0.0500	-0.0125	-0.0096	0.00018
GW	599	1	0.0500	-0.0125	-0.0096	0.0493	-0.0125	-0.0064	0.00018
GW	600	1	0.0493	-0.0125	-0.0064	0.0488	-0.0125	-0.0032	0.00018
GW	601	1	0.0488	-0.0125	-0.0032	0.0487	-0.0125	0.0000	0.00018
GW	602	1	0.0487	-0.0125	0.0000	0.0488	-0.0125	0.0032	0.00018
GW	603	1	0.0488	-0.0125	0.0032	0.0493	-0.0125	0.0064	0.00018
GW	604	1	0.0493	-0.0125	0.0064	0.0500	-0.0125	0.0096	0.00018
GW	605	1	0.0500	-0.0125	0.0096	0.0509	-0.0125	0.0127	0.00018
GW	606	1	0.0509	-0.0125	0.0127	0.0522	-0.0125	0.0156	0.00018
GW	607	1	0.0522	-0.0125	0.0156	0.0537	-0.0125	0.0185	0.00018
GW	608	1	0.0537	-0.0125	0.0185	0.0554	-0.0125	0.0212	0.00018
GW	609	1	0.0554	-0.0125	0.0212	0.0574	-0.0125	0.0238	0.00018
GW	610	1	0.0574	-0.0125	0.0238	0.0595	-0.0125	0.0262	0.00018
GW	611	1	0.0595	-0.0125	0.0262	0.0619	-0.0125	0.0283	0.00018
GW	612	1	0.0619	-0.0125	0.0283	0.0645	-0.0125	0.0303	0.00018
GW	613	1	0.0645	-0.0125	0.0303	0.0672	-0.0125	0.0320	0.00018
GW	614	1	0.0672	-0.0125	0.0320	0.0701	-0.0125	0.0335	0.00018
GW	615	1	0.0701	-0.0125	0.0335	0.0730	-0.0125	0.0348	0.00018
GW	616	1	0.0730	-0.0125	0.0348	0.0761	-0.0125	0.0357	0.00018
GW	617	1	0.0761	-0.0125	0.0357	0.0793	-0.0125	0.0364	0.00018
GW	618	1	0.0793	-0.0125	0.0364	0.0825	-0.0125	0.0369	0.00018

GW	619	1	0.0825	-0.0125	0.0369	0.0857	-0.0125	0.0370	0.00018
GW	620	1	0.0857	-0.0125	0.0370	0.0889	-0.0125	0.0369	0.00018
GW	621	1	0.0889	-0.0125	0.0369	0.0921	-0.0125	0.0364	0.00018
GW	622	1	0.0921	-0.0125	0.0364	0.0953	-0.0125	0.0357	0.00018
GW	623	1	0.0953	-0.0125	0.0357	0.0984	-0.0125	0.0348	0.00018
GW	624	1	0.0984	-0.0125	0.0348	0.1013	-0.0125	0.0335	0.00018
GW	625	1	0.1013	-0.0125	0.0335	0.1042	-0.0125	0.0320	0.00018
GW	626	1	0.1042	-0.0125	0.0320	0.1069	-0.0125	0.0303	0.00018
GW	627	1	0.1069	-0.0125	0.0303	0.1095	-0.0125	0.0283	0.00018
GW	628	1	0.1095	-0.0125	0.0283	0.1119	-0.0125	0.0262	0.00018
GW	629	1	0.1119	-0.0125	0.0262	0.1140	-0.0125	0.0238	0.00018
GW	630	1	0.1140	-0.0125	0.0238	0.1160	-0.0125	0.0212	0.00018
GW	631	1	0.1160	-0.0125	0.0212	0.1177	-0.0125	0.0185	0.00018
GW	632	1	0.1177	-0.0125	0.0185	0.1192	-0.0125	0.0156	0.00018
GW	633	1	0.1192	-0.0125	0.0156	0.1205	-0.0125	0.0127	0.00018
GW	634	1	0.1205	-0.0125	0.0127	0.1214	-0.0125	0.0096	0.00018
GW	635	1	0.1214	-0.0125	0.0096	0.1221	-0.0125	0.0064	0.00018
GW	636	1	0.1221	-0.0125	0.0064	0.1226	-0.0125	0.0032	0.00018
GW	637	1	0.1226	-0.0125	0.0032	0.1227	-0.0125	0.0000	0.00018
GW	638	1	0.1227	-0.0125	0.0000	0.1226	-0.0125	-0.0032	0.00018
GW	639	1	0.1226	-0.0125	-0.0032	0.1221	-0.0125	-0.0064	0.00018
GW	640	1	0.1221	-0.0125	-0.0064	0.1214	-0.0125	-0.0096	0.00018
GW	641	1	0.1214	-0.0125	-0.0096	0.1205	-0.0125	-0.0127	0.00018
GW	642	1	0.1205	-0.0125	-0.0127	0.1192	-0.0125	-0.0156	0.00018
GW	643	1	0.1192	-0.0125	-0.0156	0.1177	-0.0125	-0.0185	0.00018
GW	644	1	0.1177	-0.0125	-0.0185	0.1160	-0.0125	-0.0212	0.00018
GW	645	1	0.1160	-0.0125	-0.0212	0.1140	-0.0125	-0.0238	0.00018
GW	646	1	0.1140	-0.0125	-0.0238	0.1119	-0.0125	-0.0262	0.00018
GW	647	1	0.1119	-0.0125	-0.0262	0.1095	-0.0125	-0.0283	0.00018
GW	648	1	0.1095	-0.0125	-0.0283	0.1069	-0.0125	-0.0303	0.00018
GW	649	1	0.1069	-0.0125	-0.0303	0.1042	-0.0125	-0.0320	0.00018
GW	650	1	0.1042	-0.0125	-0.0320	0.1013	-0.0125	-0.0335	0.00018
GW	651	1	0.1013	-0.0125	-0.0335	0.0984	-0.0125	-0.0348	0.00018
GW	652	1	0.0984	-0.0125	-0.0348	0.0953	-0.0125	-0.0357	0.00018

GW	653	1	0.0953	-0.0125	-0.0357	0.0921	-0.0125	-0.0364	0.00018
GW	654	1	0.0921	-0.0125	-0.0364	0.0889	-0.0125	-0.0369	0.00018
GW	655	1	0.0889	-0.0125	-0.0369	0.0857	-0.0125	-0.0370	0.00018
GW	656	1	0.0857	-0.0075	-0.0370	0.0825	-0.0075	-0.0369	0.00018
GW	657	1	0.0825	-0.0075	-0.0369	0.0793	-0.0075	-0.0364	0.00018
GW	658	1	0.0793	-0.0075	-0.0364	0.0761	-0.0075	-0.0357	0.00018
GW	659	1	0.0761	-0.0075	-0.0357	0.0730	-0.0075	-0.0348	0.00018
GW	660	1	0.0730	-0.0075	-0.0348	0.0701	-0.0075	-0.0335	0.00018
GW	661	1	0.0701	-0.0075	-0.0335	0.0672	-0.0075	-0.0320	0.00018
GW	662	1	0.0672	-0.0075	-0.0320	0.0645	-0.0075	-0.0303	0.00018
GW	663	1	0.0645	-0.0075	-0.0303	0.0619	-0.0075	-0.0283	0.00018
GW	664	1	0.0619	-0.0075	-0.0283	0.0595	-0.0075	-0.0262	0.00018
GW	665	1	0.0595	-0.0075	-0.0262	0.0574	-0.0075	-0.0238	0.00018
GW	666	1	0.0574	-0.0075	-0.0238	0.0554	-0.0075	-0.0212	0.00018
GW	667	1	0.0554	-0.0075	-0.0212	0.0537	-0.0075	-0.0185	0.00018
GW	668	1	0.0537	-0.0075	-0.0185	0.0522	-0.0075	-0.0156	0.00018
GW	669	1	0.0522	-0.0075	-0.0156	0.0509	-0.0075	-0.0127	0.00018
GW	670	1	0.0509	-0.0075	-0.0127	0.0500	-0.0075	-0.0096	0.00018
GW	671	1	0.0500	-0.0075	-0.0096	0.0493	-0.0075	-0.0064	0.00018
GW	672	1	0.0493	-0.0075	-0.0064	0.0488	-0.0075	-0.0032	0.00018
GW	673	1	0.0488	-0.0075	-0.0032	0.0487	-0.0075	0.0000	0.00018
GW	674	1	0.0487	-0.0075	0.0000	0.0488	-0.0075	0.0032	0.00018
GW	675	1	0.0488	-0.0075	0.0032	0.0493	-0.0075	0.0064	0.00018
GW	676	1	0.0493	-0.0075	0.0064	0.0500	-0.0075	0.0096	0.00018
GW	677	1	0.0500	-0.0075	0.0096	0.0509	-0.0075	0.0127	0.00018
GW	678	1	0.0509	-0.0075	0.0127	0.0522	-0.0075	0.0156	0.00018
GW	679	1	0.0522	-0.0075	0.0156	0.0537	-0.0075	0.0185	0.00018
GW	680	1	0.0537	-0.0075	0.0185	0.0554	-0.0075	0.0212	0.00018
GW	681	1	0.0554	-0.0075	0.0212	0.0574	-0.0075	0.0238	0.00018
GW	682	1	0.0574	-0.0075	0.0238	0.0595	-0.0075	0.0262	0.00018
GW	683	1	0.0595	-0.0075	0.0262	0.0619	-0.0075	0.0283	0.00018
GW	684	1	0.0619	-0.0075	0.0283	0.0645	-0.0075	0.0303	0.00018
GW	685	1	0.0645	-0.0075	0.0303	0.0672	-0.0075	0.0320	0.00018
GW	686	1	0.0672	-0.0075	0.0320	0.0701	-0.0075	0.0335	0.00018

GW	687	1	0.0701	-0.0075	0.0335	0.0730	-0.0075	0.0348	0.00018
GW	688	1	0.0730	-0.0075	0.0348	0.0761	-0.0075	0.0357	0.00018
GW	689	1	0.0761	-0.0075	0.0357	0.0793	-0.0075	0.0364	0.00018
GW	690	1	0.0793	-0.0075	0.0364	0.0825	-0.0075	0.0369	0.00018
GW	691	1	0.0825	-0.0075	0.0369	0.0857	-0.0075	0.0370	0.00018
GW	692	1	0.0857	-0.0075	0.0370	0.0889	-0.0075	0.0369	0.00018
GW	693	1	0.0889	-0.0075	0.0369	0.0921	-0.0075	0.0364	0.00018
GW	694	1	0.0921	-0.0075	0.0364	0.0953	-0.0075	0.0357	0.00018
GW	695	1	0.0953	-0.0075	0.0357	0.0984	-0.0075	0.0348	0.00018
GW	696	1	0.0984	-0.0075	0.0348	0.1013	-0.0075	0.0335	0.00018
GW	697	1	0.1013	-0.0075	0.0335	0.1042	-0.0075	0.0320	0.00018
GW	698	1	0.1042	-0.0075	0.0320	0.1069	-0.0075	0.0303	0.00018
GW	699	1	0.1069	-0.0075	0.0303	0.1095	-0.0075	0.0283	0.00018
GW	700	1	0.1095	-0.0075	0.0283	0.1119	-0.0075	0.0262	0.00018
GW	701	1	0.1119	-0.0075	0.0262	0.1140	-0.0075	0.0238	0.00018
GW	702	1	0.1140	-0.0075	0.0238	0.1160	-0.0075	0.0212	0.00018
GW	703	1	0.1160	-0.0075	0.0212	0.1177	-0.0075	0.0185	0.00018
GW	704	1	0.1177	-0.0075	0.0185	0.1192	-0.0075	0.0156	0.00018
GW	705	1	0.1192	-0.0075	0.0156	0.1205	-0.0075	0.0127	0.00018
GW	706	1	0.1205	-0.0075	0.0127	0.1214	-0.0075	0.0096	0.00018
GW	707	1	0.1214	-0.0075	0.0096	0.1221	-0.0075	0.0064	0.00018
GW	708	1	0.1221	-0.0075	0.0064	0.1226	-0.0075	0.0032	0.00018
GW	709	1	0.1226	-0.0075	0.0032	0.1227	-0.0075	0.0000	0.00018
GW	710	1	0.1227	-0.0075	0.0000	0.1226	-0.0075	-0.0032	0.00018
GW	711	1	0.1226	-0.0075	-0.0032	0.1221	-0.0075	-0.0064	0.00018
GW	712	1	0.1221	-0.0075	-0.0064	0.1214	-0.0075	-0.0096	0.00018
GW	713	1	0.1214	-0.0075	-0.0096	0.1205	-0.0075	-0.0127	0.00018
GW	714	1	0.1205	-0.0075	-0.0127	0.1192	-0.0075	-0.0156	0.00018
GW	715	1	0.1192	-0.0075	-0.0156	0.1177	-0.0075	-0.0185	0.00018
GW	716	1	0.1177	-0.0075	-0.0185	0.1160	-0.0075	-0.0212	0.00018
GW	717	1	0.1160	-0.0075	-0.0212	0.1140	-0.0075	-0.0238	0.00018
GW	718	1	0.1140	-0.0075	-0.0238	0.1119	-0.0075	-0.0262	0.00018
GW	719	1	0.1119	-0.0075	-0.0262	0.1095	-0.0075	-0.0283	0.00018
GW	720	1	0.1095	-0.0075	-0.0283	0.1069	-0.0075	-0.0303	0.00018

GW	721	1	0.1069	-0.0075	-0.0303	0.1042	-0.0075	-0.0320	0.00018
GW	722	1	0.1042	-0.0075	-0.0320	0.1013	-0.0075	-0.0335	0.00018
GW	723	1	0.1013	-0.0075	-0.0335	0.0984	-0.0075	-0.0348	0.00018
GW	724	1	0.0984	-0.0075	-0.0348	0.0953	-0.0075	-0.0357	0.00018
GW	725	1	0.0953	-0.0075	-0.0357	0.0921	-0.0075	-0.0364	0.00018
GW	726	1	0.0921	-0.0075	-0.0364	0.0889	-0.0075	-0.0369	0.00018
GW	727	1	0.0889	-0.0075	-0.0369	0.0857	-0.0075	-0.0370	0.00018
GW	728	1	0.0857	-0.0025	-0.0370	0.0825	-0.0025	-0.0369	0.00018
GW	729	1	0.0825	-0.0025	-0.0369	0.0793	-0.0025	-0.0364	0.00018
GW	730	1	0.0793	-0.0025	-0.0364	0.0761	-0.0025	-0.0357	0.00018
GW	731	1	0.0761	-0.0025	-0.0357	0.0730	-0.0025	-0.0348	0.00018
GW	732	1	0.0730	-0.0025	-0.0348	0.0701	-0.0025	-0.0335	0.00018
GW	733	1	0.0701	-0.0025	-0.0335	0.0672	-0.0025	-0.0320	0.00018
GW	734	1	0.0672	-0.0025	-0.0320	0.0645	-0.0025	-0.0303	0.00018
GW	735	1	0.0645	-0.0025	-0.0303	0.0619	-0.0025	-0.0283	0.00018
GW	736	1	0.0619	-0.0025	-0.0283	0.0595	-0.0025	-0.0262	0.00018
GW	737	1	0.0595	-0.0025	-0.0262	0.0574	-0.0025	-0.0238	0.00018
GW	738	1	0.0574	-0.0025	-0.0238	0.0554	-0.0025	-0.0212	0.00018
GW	739	1	0.0554	-0.0025	-0.0212	0.0537	-0.0025	-0.0185	0.00018
GW	740	1	0.0537	-0.0025	-0.0185	0.0522	-0.0025	-0.0156	0.00018
GW	741	1	0.0522	-0.0025	-0.0156	0.0509	-0.0025	-0.0127	0.00018
GW	742	1	0.0509	-0.0025	-0.0127	0.0500	-0.0025	-0.0096	0.00018
GW	743	1	0.0500	-0.0025	-0.0096	0.0493	-0.0025	-0.0064	0.00018
GW	744	1	0.0493	-0.0025	-0.0064	0.0488	-0.0025	-0.0032	0.00018
GW	745	1	0.0488	-0.0025	-0.0032	0.0487	-0.0025	0.0000	0.00018
GW	746	1	0.0487	-0.0025	0.0000	0.0488	-0.0025	0.0032	0.00018
GW	747	1	0.0488	-0.0025	0.0032	0.0493	-0.0025	0.0064	0.00018
GW	748	1	0.0493	-0.0025	0.0064	0.0500	-0.0025	0.0096	0.00018
GW	749	1	0.0500	-0.0025	0.0096	0.0509	-0.0025	0.0127	0.00018
GW	750	1	0.0509	-0.0025	0.0127	0.0522	-0.0025	0.0156	0.00018
GW	751	1	0.0522	-0.0025	0.0156	0.0537	-0.0025	0.0185	0.00018
GW	752	1	0.0537	-0.0025	0.0185	0.0554	-0.0025	0.0212	0.00018
GW	753	1	0.0554	-0.0025	0.0212	0.0574	-0.0025	0.0238	0.00018
GW	754	1	0.0574	-0.0025	0.0238	0.0595	-0.0025	0.0262	0.00018

GW	755	1	0.0595	-0.0025	0.0262	0.0619	-0.0025	0.0283	0.00018
GW	756	1	0.0619	-0.0025	0.0283	0.0645	-0.0025	0.0303	0.00018
GW	757	1	0.0645	-0.0025	0.0303	0.0672	-0.0025	0.0320	0.00018
GW	758	1	0.0672	-0.0025	0.0320	0.0701	-0.0025	0.0335	0.00018
GW	759	1	0.0701	-0.0025	0.0335	0.0730	-0.0025	0.0348	0.00018
GW	760	1	0.0730	-0.0025	0.0348	0.0761	-0.0025	0.0357	0.00018
GW	761	1	0.0761	-0.0025	0.0357	0.0793	-0.0025	0.0364	0.00018
GW	762	1	0.0793	-0.0025	0.0364	0.0825	-0.0025	0.0369	0.00018
GW	763	1	0.0825	-0.0025	0.0369	0.0857	-0.0025	0.0370	0.00018
GW	764	1	0.0857	-0.0025	0.0370	0.0889	-0.0025	0.0369	0.00018
GW	765	1	0.0889	-0.0025	0.0369	0.0921	-0.0025	0.0364	0.00018
GW	766	1	0.0921	-0.0025	0.0364	0.0953	-0.0025	0.0357	0.00018
GW	767	1	0.0953	-0.0025	0.0357	0.0984	-0.0025	0.0348	0.00018
GW	768	1	0.0984	-0.0025	0.0348	0.1013	-0.0025	0.0335	0.00018
GW	769	1	0.1013	-0.0025	0.0335	0.1042	-0.0025	0.0320	0.00018
GW	770	1	0.1042	-0.0025	0.0320	0.1069	-0.0025	0.0303	0.00018
GW	771	1	0.1069	-0.0025	0.0303	0.1095	-0.0025	0.0283	0.00018
GW	772	1	0.1095	-0.0025	0.0283	0.1119	-0.0025	0.0262	0.00018
GW	773	1	0.1119	-0.0025	0.0262	0.1140	-0.0025	0.0238	0.00018
GW	774	1	0.1140	-0.0025	0.0238	0.1160	-0.0025	0.0212	0.00018
GW	775	1	0.1160	-0.0025	0.0212	0.1177	-0.0025	0.0185	0.00018
GW	776	1	0.1177	-0.0025	0.0185	0.1192	-0.0025	0.0156	0.00018
GW	777	1	0.1192	-0.0025	0.0156	0.1205	-0.0025	0.0127	0.00018
GW	778	1	0.1205	-0.0025	0.0127	0.1214	-0.0025	0.0096	0.00018
GW	779	1	0.1214	-0.0025	0.0096	0.1221	-0.0025	0.0064	0.00018
GW	780	1	0.1221	-0.0025	0.0064	0.1226	-0.0025	0.0032	0.00018
GW	781	1	0.1226	-0.0025	0.0032	0.1227	-0.0025	0.0000	0.00018
GW	782	1	0.1227	-0.0025	0.0000	0.1226	-0.0025	-0.0032	0.00018
GW	783	1	0.1226	-0.0025	-0.0032	0.1221	-0.0025	-0.0064	0.00018
GW	784	1	0.1221	-0.0025	-0.0064	0.1214	-0.0025	-0.0096	0.00018
GW	785	1	0.1214	-0.0025	-0.0096	0.1205	-0.0025	-0.0127	0.00018
GW	786	1	0.1205	-0.0025	-0.0127	0.1192	-0.0025	-0.0156	0.00018
GW	787	1	0.1192	-0.0025	-0.0156	0.1177	-0.0025	-0.0185	0.00018
GW	788	1	0.1177	-0.0025	-0.0185	0.1160	-0.0025	-0.0212	0.00018

GW	789	1	0.1160	-0.0025	-0.0212	0.1140	-0.0025	-0.0238	0.00018
GW	790	1	0.1140	-0.0025	-0.0238	0.1119	-0.0025	-0.0262	0.00018
GW	791	1	0.1119	-0.0025	-0.0262	0.1095	-0.0025	-0.0283	0.00018
GW	792	1	0.1095	-0.0025	-0.0283	0.1069	-0.0025	-0.0303	0.00018
GW	793	1	0.1069	-0.0025	-0.0303	0.1042	-0.0025	-0.0320	0.00018
GW	794	1	0.1042	-0.0025	-0.0320	0.1013	-0.0025	-0.0335	0.00018
GW	795	1	0.1013	-0.0025	-0.0335	0.0984	-0.0025	-0.0348	0.00018
GW	796	1	0.0984	-0.0025	-0.0348	0.0953	-0.0025	-0.0357	0.00018
GW	797	1	0.0953	-0.0025	-0.0357	0.0921	-0.0025	-0.0364	0.00018
GW	798	1	0.0921	-0.0025	-0.0364	0.0889	-0.0025	-0.0369	0.00018
GW	799	1	0.0889	-0.0025	-0.0369	0.0857	-0.0025	-0.0370	0.00018
GW	800	1	0.0857	0.0025	-0.0370	0.0825	0.0025	-0.0369	0.00018
GW	801	1	0.0825	0.0025	-0.0369	0.0793	0.0025	-0.0364	0.00018
GW	802	1	0.0793	0.0025	-0.0364	0.0761	0.0025	-0.0357	0.00018
GW	803	1	0.0761	0.0025	-0.0357	0.0730	0.0025	-0.0348	0.00018
GW	804	1	0.0730	0.0025	-0.0348	0.0701	0.0025	-0.0335	0.00018
GW	805	1	0.0701	0.0025	-0.0335	0.0672	0.0025	-0.0320	0.00018
GW	806	1	0.0672	0.0025	-0.0320	0.0645	0.0025	-0.0303	0.00018
GW	807	1	0.0645	0.0025	-0.0303	0.0619	0.0025	-0.0283	0.00018
GW	808	1	0.0619	0.0025	-0.0283	0.0595	0.0025	-0.0262	0.00018
GW	809	1	0.0595	0.0025	-0.0262	0.0574	0.0025	-0.0238	0.00018
GW	810	1	0.0574	0.0025	-0.0238	0.0554	0.0025	-0.0212	0.00018
GW	811	1	0.0554	0.0025	-0.0212	0.0537	0.0025	-0.0185	0.00018
GW	812	1	0.0537	0.0025	-0.0185	0.0522	0.0025	-0.0156	0.00018
GW	813	1	0.0522	0.0025	-0.0156	0.0509	0.0025	-0.0127	0.00018
GW	814	1	0.0509	0.0025	-0.0127	0.0500	0.0025	-0.0096	0.00018
GW	815	1	0.0500	0.0025	-0.0096	0.0493	0.0025	-0.0064	0.00018
GW	816	1	0.0493	0.0025	-0.0064	0.0488	0.0025	-0.0032	0.00018
GW	817	1	0.0488	0.0025	-0.0032	0.0487	0.0025	0.0000	0.00018
GW	818	1	0.0487	0.0025	0.0000	0.0488	0.0025	0.0032	0.00018
GW	819	1	0.0488	0.0025	0.0032	0.0493	0.0025	0.0064	0.00018
GW	820	1	0.0493	0.0025	0.0064	0.0500	0.0025	0.0096	0.00018
GW	821	1	0.0500	0.0025	0.0096	0.0509	0.0025	0.0127	0.00018
GW	822	1	0.0509	0.0025	0.0127	0.0522	0.0025	0.0156	0.00018

GW	823	1	0.0522	0.0025	0.0156	0.0537	0.0025	0.0185	0.00018
GW	824	1	0.0537	0.0025	0.0185	0.0554	0.0025	0.0212	0.00018
GW	825	1	0.0554	0.0025	0.0212	0.0574	0.0025	0.0238	0.00018
GW	826	1	0.0574	0.0025	0.0238	0.0595	0.0025	0.0262	0.00018
GW	827	1	0.0595	0.0025	0.0262	0.0619	0.0025	0.0283	0.00018
GW	828	1	0.0619	0.0025	0.0283	0.0645	0.0025	0.0303	0.00018
GW	829	1	0.0645	0.0025	0.0303	0.0672	0.0025	0.0320	0.00018
GW	830	1	0.0672	0.0025	0.0320	0.0701	0.0025	0.0335	0.00018
GW	831	1	0.0701	0.0025	0.0335	0.0730	0.0025	0.0348	0.00018
GW	832	1	0.0730	0.0025	0.0348	0.0761	0.0025	0.0357	0.00018
GW	833	1	0.0761	0.0025	0.0357	0.0793	0.0025	0.0364	0.00018
GW	834	1	0.0793	0.0025	0.0364	0.0825	0.0025	0.0369	0.00018
GW	835	1	0.0825	0.0025	0.0369	0.0857	0.0025	0.0370	0.00018
GW	836	1	0.0857	0.0025	0.0370	0.0889	0.0025	0.0369	0.00018
GW	837	1	0.0889	0.0025	0.0369	0.0921	0.0025	0.0364	0.00018
GW	838	1	0.0921	0.0025	0.0364	0.0953	0.0025	0.0357	0.00018
GW	839	1	0.0953	0.0025	0.0357	0.0984	0.0025	0.0348	0.00018
GW	840	1	0.0984	0.0025	0.0348	0.1013	0.0025	0.0335	0.00018
GW	841	1	0.1013	0.0025	0.0335	0.1042	0.0025	0.0320	0.00018
GW	842	1	0.1042	0.0025	0.0320	0.1069	0.0025	0.0303	0.00018
GW	843	1	0.1069	0.0025	0.0303	0.1095	0.0025	0.0283	0.00018
GW	844	1	0.1095	0.0025	0.0283	0.1119	0.0025	0.0262	0.00018
GW	845	1	0.1119	0.0025	0.0262	0.1140	0.0025	0.0238	0.00018
GW	846	1	0.1140	0.0025	0.0238	0.1160	0.0025	0.0212	0.00018
GW	847	1	0.1160	0.0025	0.0212	0.1177	0.0025	0.0185	0.00018
GW	848	1	0.1177	0.0025	0.0185	0.1192	0.0025	0.0156	0.00018
GW	849	1	0.1192	0.0025	0.0156	0.1205	0.0025	0.0127	0.00018
GW	850	1	0.1205	0.0025	0.0127	0.1214	0.0025	0.0096	0.00018
GW	851	1	0.1214	0.0025	0.0096	0.1221	0.0025	0.0064	0.00018
GW	852	1	0.1221	0.0025	0.0064	0.1226	0.0025	0.0032	0.00018
GW	853	1	0.1226	0.0025	0.0032	0.1227	0.0025	0.0000	0.00018
GW	854	1	0.1227	0.0025	0.0000	0.1226	0.0025	-0.0032	0.00018
GW	855	1	0.1226	0.0025	-0.0032	0.1221	0.0025	-0.0064	0.00018
GW	856	1	0.1221	0.0025	-0.0064	0.1214	0.0025	-0.0096	0.00018

GW	857	1	0.1214	0.0025	-0.0096	0.1205	0.0025	-0.0127	0.00018
GW	858	1	0.1205	0.0025	-0.0127	0.1192	0.0025	-0.0156	0.00018
GW	859	1	0.1192	0.0025	-0.0156	0.1177	0.0025	-0.0185	0.00018
GW	860	1	0.1177	0.0025	-0.0185	0.1160	0.0025	-0.0212	0.00018
GW	861	1	0.1160	0.0025	-0.0212	0.1140	0.0025	-0.0238	0.00018
GW	862	1	0.1140	0.0025	-0.0238	0.1119	0.0025	-0.0262	0.00018
GW	863	1	0.1119	0.0025	-0.0262	0.1095	0.0025	-0.0283	0.00018
GW	864	1	0.1095	0.0025	-0.0283	0.1069	0.0025	-0.0303	0.00018
GW	865	1	0.1069	0.0025	-0.0303	0.1042	0.0025	-0.0320	0.00018
GW	866	1	0.1042	0.0025	-0.0320	0.1013	0.0025	-0.0335	0.00018
GW	867	1	0.1013	0.0025	-0.0335	0.0984	0.0025	-0.0348	0.00018
GW	868	1	0.0984	0.0025	-0.0348	0.0953	0.0025	-0.0357	0.00018
GW	869	1	0.0953	0.0025	-0.0357	0.0921	0.0025	-0.0364	0.00018
GW	870	1	0.0921	0.0025	-0.0364	0.0889	0.0025	-0.0369	0.00018
GW	871	1	0.0889	0.0025	-0.0369	0.0857	0.0025	-0.0370	0.00018
GW	872	1	0.0857	0.0075	-0.0370	0.0825	0.0075	-0.0369	0.00018
GW	873	1	0.0825	0.0075	-0.0369	0.0793	0.0075	-0.0364	0.00018
GW	874	1	0.0793	0.0075	-0.0364	0.0761	0.0075	-0.0357	0.00018
GW	875	1	0.0761	0.0075	-0.0357	0.0730	0.0075	-0.0348	0.00018
GW	876	1	0.0730	0.0075	-0.0348	0.0701	0.0075	-0.0335	0.00018
GW	877	1	0.0701	0.0075	-0.0335	0.0672	0.0075	-0.0320	0.00018
GW	878	1	0.0672	0.0075	-0.0320	0.0645	0.0075	-0.0303	0.00018
GW	879	1	0.0645	0.0075	-0.0303	0.0619	0.0075	-0.0283	0.00018
GW	880	1	0.0619	0.0075	-0.0283	0.0595	0.0075	-0.0262	0.00018
GW	881	1	0.0595	0.0075	-0.0262	0.0574	0.0075	-0.0238	0.00018
GW	882	1	0.0574	0.0075	-0.0238	0.0554	0.0075	-0.0212	0.00018
GW	883	1	0.0554	0.0075	-0.0212	0.0537	0.0075	-0.0185	0.00018
GW	884	1	0.0537	0.0075	-0.0185	0.0522	0.0075	-0.0156	0.00018
GW	885	1	0.0522	0.0075	-0.0156	0.0509	0.0075	-0.0127	0.00018
GW	886	1	0.0509	0.0075	-0.0127	0.0500	0.0075	-0.0096	0.00018
GW	887	1	0.0500	0.0075	-0.0096	0.0493	0.0075	-0.0064	0.00018
GW	888	1	0.0493	0.0075	-0.0064	0.0488	0.0075	-0.0032	0.00018
GW	889	1	0.0488	0.0075	-0.0032	0.0487	0.0075	0.0000	0.00018
GW	890	1	0.0487	0.0075	0.0000	0.0488	0.0075	0.0032	0.00018

GW	891	1	0.0488	0.0075	0.0032	0.0493	0.0075	0.0064	0.00018
GW	892	1	0.0493	0.0075	0.0064	0.0500	0.0075	0.0096	0.00018
GW	893	1	0.0500	0.0075	0.0096	0.0509	0.0075	0.0127	0.00018
GW	894	1	0.0509	0.0075	0.0127	0.0522	0.0075	0.0156	0.00018
GW	895	1	0.0522	0.0075	0.0156	0.0537	0.0075	0.0185	0.00018
GW	896	1	0.0537	0.0075	0.0185	0.0554	0.0075	0.0212	0.00018
GW	897	1	0.0554	0.0075	0.0212	0.0574	0.0075	0.0238	0.00018
GW	898	1	0.0574	0.0075	0.0238	0.0595	0.0075	0.0262	0.00018
GW	899	1	0.0595	0.0075	0.0262	0.0619	0.0075	0.0283	0.00018
GW	900	1	0.0619	0.0075	0.0283	0.0645	0.0075	0.0303	0.00018
GW	901	1	0.0645	0.0075	0.0303	0.0672	0.0075	0.0320	0.00018
GW	902	1	0.0672	0.0075	0.0320	0.0701	0.0075	0.0335	0.00018
GW	903	1	0.0701	0.0075	0.0335	0.0730	0.0075	0.0348	0.00018
GW	904	1	0.0730	0.0075	0.0348	0.0761	0.0075	0.0357	0.00018
GW	905	1	0.0761	0.0075	0.0357	0.0793	0.0075	0.0364	0.00018
GW	906	1	0.0793	0.0075	0.0364	0.0825	0.0075	0.0369	0.00018
GW	907	1	0.0825	0.0075	0.0369	0.0857	0.0075	0.0370	0.00018
GW	908	1	0.0857	0.0075	0.0370	0.0889	0.0075	0.0369	0.00018
GW	909	1	0.0889	0.0075	0.0369	0.0921	0.0075	0.0364	0.00018
GW	910	1	0.0921	0.0075	0.0364	0.0953	0.0075	0.0357	0.00018
GW	911	1	0.0953	0.0075	0.0357	0.0984	0.0075	0.0348	0.00018
GW	912	1	0.0984	0.0075	0.0348	0.1013	0.0075	0.0335	0.00018
GW	913	1	0.1013	0.0075	0.0335	0.1042	0.0075	0.0320	0.00018
GW	914	1	0.1042	0.0075	0.0320	0.1069	0.0075	0.0303	0.00018
GW	915	1	0.1069	0.0075	0.0303	0.1095	0.0075	0.0283	0.00018
GW	916	1	0.1095	0.0075	0.0283	0.1119	0.0075	0.0262	0.00018
GW	917	1	0.1119	0.0075	0.0262	0.1140	0.0075	0.0238	0.00018
GW	918	1	0.1140	0.0075	0.0238	0.1160	0.0075	0.0212	0.00018
GW	919	1	0.1160	0.0075	0.0212	0.1177	0.0075	0.0185	0.00018
GW	920	1	0.1177	0.0075	0.0185	0.1192	0.0075	0.0156	0.00018
GW	921	1	0.1192	0.0075	0.0156	0.1205	0.0075	0.0127	0.00018
GW	922	1	0.1205	0.0075	0.0127	0.1214	0.0075	0.0096	0.00018
GW	923	1	0.1214	0.0075	0.0096	0.1221	0.0075	0.0064	0.00018
GW	924	1	0.1221	0.0075	0.0064	0.1226	0.0075	0.0032	0.00018

GW	925	1	0.1226	0.0075	0.0032	0.1227	0.0075	0.0000	0.00018
GW	926	1	0.1227	0.0075	0.0000	0.1226	0.0075	-0.0032	0.00018
GW	927	1	0.1226	0.0075	-0.0032	0.1221	0.0075	-0.0064	0.00018
GW	928	1	0.1221	0.0075	-0.0064	0.1214	0.0075	-0.0096	0.00018
GW	929	1	0.1214	0.0075	-0.0096	0.1205	0.0075	-0.0127	0.00018
GW	930	1	0.1205	0.0075	-0.0127	0.1192	0.0075	-0.0156	0.00018
GW	931	1	0.1192	0.0075	-0.0156	0.1177	0.0075	-0.0185	0.00018
GW	932	1	0.1177	0.0075	-0.0185	0.1160	0.0075	-0.0212	0.00018
GW	933	1	0.1160	0.0075	-0.0212	0.1140	0.0075	-0.0238	0.00018
GW	934	1	0.1140	0.0075	-0.0238	0.1119	0.0075	-0.0262	0.00018
GW	935	1	0.1119	0.0075	-0.0262	0.1095	0.0075	-0.0283	0.00018
GW	936	1	0.1095	0.0075	-0.0283	0.1069	0.0075	-0.0303	0.00018
GW	937	1	0.1069	0.0075	-0.0303	0.1042	0.0075	-0.0320	0.00018
GW	938	1	0.1042	0.0075	-0.0320	0.1013	0.0075	-0.0335	0.00018
GW	939	1	0.1013	0.0075	-0.0335	0.0984	0.0075	-0.0348	0.00018
GW	940	1	0.0984	0.0075	-0.0348	0.0953	0.0075	-0.0357	0.00018
GW	941	1	0.0953	0.0075	-0.0357	0.0921	0.0075	-0.0364	0.00018
GW	942	1	0.0921	0.0075	-0.0364	0.0889	0.0075	-0.0369	0.00018
GW	943	1	0.0889	0.0075	-0.0369	0.0857	0.0075	-0.0370	0.00018
GW	944	1	0.0857	0.0125	-0.0370	0.0825	0.0125	-0.0369	0.00018
GW	945	1	0.0825	0.0125	-0.0369	0.0793	0.0125	-0.0364	0.00018
GW	946	1	0.0793	0.0125	-0.0364	0.0761	0.0125	-0.0357	0.00018
GW	947	1	0.0761	0.0125	-0.0357	0.0730	0.0125	-0.0348	0.00018
GW	948	1	0.0730	0.0125	-0.0348	0.0701	0.0125	-0.0335	0.00018
GW	949	1	0.0701	0.0125	-0.0335	0.0672	0.0125	-0.0320	0.00018
GW	950	1	0.0672	0.0125	-0.0320	0.0645	0.0125	-0.0303	0.00018
GW	951	1	0.0645	0.0125	-0.0303	0.0619	0.0125	-0.0283	0.00018
GW	952	1	0.0619	0.0125	-0.0283	0.0595	0.0125	-0.0262	0.00018
GW	953	1	0.0595	0.0125	-0.0262	0.0574	0.0125	-0.0238	0.00018
GW	954	1	0.0574	0.0125	-0.0238	0.0554	0.0125	-0.0212	0.00018
GW	955	1	0.0554	0.0125	-0.0212	0.0537	0.0125	-0.0185	0.00018
GW	956	1	0.0537	0.0125	-0.0185	0.0522	0.0125	-0.0156	0.00018
GW	957	1	0.0522	0.0125	-0.0156	0.0509	0.0125	-0.0127	0.00018
GW	958	1	0.0509	0.0125	-0.0127	0.0500	0.0125	-0.0096	0.00018

GW	959	1	0.0500	0.0125	-0.0096	0.0493	0.0125	-0.0064	0.00018
GW	960	1	0.0493	0.0125	-0.0064	0.0488	0.0125	-0.0032	0.00018
GW	961	1	0.0488	0.0125	-0.0032	0.0487	0.0125	0.0000	0.00018
GW	962	1	0.0487	0.0125	0.0000	0.0488	0.0125	0.0032	0.00018
GW	963	1	0.0488	0.0125	0.0032	0.0493	0.0125	0.0064	0.00018
GW	964	1	0.0493	0.0125	0.0064	0.0500	0.0125	0.0096	0.00018
GW	965	1	0.0500	0.0125	0.0096	0.0509	0.0125	0.0127	0.00018
GW	966	1	0.0509	0.0125	0.0127	0.0522	0.0125	0.0156	0.00018
GW	967	1	0.0522	0.0125	0.0156	0.0537	0.0125	0.0185	0.00018
GW	968	1	0.0537	0.0125	0.0185	0.0554	0.0125	0.0212	0.00018
GW	969	1	0.0554	0.0125	0.0212	0.0574	0.0125	0.0238	0.00018
GW	970	1	0.0574	0.0125	0.0238	0.0595	0.0125	0.0262	0.00018
GW	971	1	0.0595	0.0125	0.0262	0.0619	0.0125	0.0283	0.00018
GW	972	1	0.0619	0.0125	0.0283	0.0645	0.0125	0.0303	0.00018
GW	973	1	0.0645	0.0125	0.0303	0.0672	0.0125	0.0320	0.00018
GW	974	1	0.0672	0.0125	0.0320	0.0701	0.0125	0.0335	0.00018
GW	975	1	0.0701	0.0125	0.0335	0.0730	0.0125	0.0348	0.00018
GW	976	1	0.0730	0.0125	0.0348	0.0761	0.0125	0.0357	0.00018
GW	977	1	0.0761	0.0125	0.0357	0.0793	0.0125	0.0364	0.00018
GW	978	1	0.0793	0.0125	0.0364	0.0825	0.0125	0.0369	0.00018
GW	979	1	0.0825	0.0125	0.0369	0.0857	0.0125	0.0370	0.00018
GW	980	1	0.0857	0.0125	0.0370	0.0889	0.0125	0.0369	0.00018
GW	981	1	0.0889	0.0125	0.0369	0.0921	0.0125	0.0364	0.00018
GW	982	1	0.0921	0.0125	0.0364	0.0953	0.0125	0.0357	0.00018
GW	983	1	0.0953	0.0125	0.0357	0.0984	0.0125	0.0348	0.00018
GW	984	1	0.0984	0.0125	0.0348	0.1013	0.0125	0.0335	0.00018
GW	985	1	0.1013	0.0125	0.0335	0.1042	0.0125	0.0320	0.00018
GW	986	1	0.1042	0.0125	0.0320	0.1069	0.0125	0.0303	0.00018
GW	987	1	0.1069	0.0125	0.0303	0.1095	0.0125	0.0283	0.00018
GW	988	1	0.1095	0.0125	0.0283	0.1119	0.0125	0.0262	0.00018
GW	989	1	0.1119	0.0125	0.0262	0.1140	0.0125	0.0238	0.00018
GW	990	1	0.1140	0.0125	0.0238	0.1160	0.0125	0.0212	0.00018
GW	991	1	0.1160	0.0125	0.0212	0.1177	0.0125	0.0185	0.00018
GW	992	1	0.1177	0.0125	0.0185	0.1192	0.0125	0.0156	0.00018

GW	993	1	0.1192	0.0125	0.0156	0.1205	0.0125	0.0127	0.00018
GW	994	1	0.1205	0.0125	0.0127	0.1214	0.0125	0.0096	0.00018
GW	995	1	0.1214	0.0125	0.0096	0.1221	0.0125	0.0064	0.00018
GW	996	1	0.1221	0.0125	0.0064	0.1226	0.0125	0.0032	0.00018
GW	997	1	0.1226	0.0125	0.0032	0.1227	0.0125	0.0000	0.00018
GW	998	1	0.1227	0.0125	0.0000	0.1226	0.0125	-0.0032	0.00018
GW	999	1	0.1226	0.0125	-0.0032	0.1221	0.0125	-0.0064	0.00018
GW	1000	1	0.1221	0.0125	-0.0064	0.1214	0.0125	-0.0096	0.00018
GW	1001	1	0.1214	0.0125	-0.0096	0.1205	0.0125	-0.0127	0.00018
GW	1002	1	0.1205	0.0125	-0.0127	0.1192	0.0125	-0.0156	0.00018
GW	1003	1	0.1192	0.0125	-0.0156	0.1177	0.0125	-0.0185	0.00018
GW	1004	1	0.1177	0.0125	-0.0185	0.1160	0.0125	-0.0212	0.00018
GW	1005	1	0.1160	0.0125	-0.0212	0.1140	0.0125	-0.0238	0.00018
GW	1006	1	0.1140	0.0125	-0.0238	0.1119	0.0125	-0.0262	0.00018
GW	1007	1	0.1119	0.0125	-0.0262	0.1095	0.0125	-0.0283	0.00018
GW	1008	1	0.1095	0.0125	-0.0283	0.1069	0.0125	-0.0303	0.00018
GW	1009	1	0.1069	0.0125	-0.0303	0.1042	0.0125	-0.0320	0.00018
GW	1010	1	0.1042	0.0125	-0.0320	0.1013	0.0125	-0.0335	0.00018
GW	1011	1	0.1013	0.0125	-0.0335	0.0984	0.0125	-0.0348	0.00018
GW	1012	1	0.0984	0.0125	-0.0348	0.0953	0.0125	-0.0357	0.00018
GW	1013	1	0.0953	0.0125	-0.0357	0.0921	0.0125	-0.0364	0.00018
GW	1014	1	0.0921	0.0125	-0.0364	0.0889	0.0125	-0.0369	0.00018
GW	1015	1	0.0889	0.0125	-0.0369	0.0857	0.0125	-0.0370	0.00018
GW	1016	1	0.0857	0.0175	-0.0370	0.0825	0.0175	-0.0369	0.00018
GW	1017	1	0.0825	0.0175	-0.0369	0.0793	0.0175	-0.0364	0.00018
GW	1018	1	0.0793	0.0175	-0.0364	0.0761	0.0175	-0.0357	0.00018
GW	1019	1	0.0761	0.0175	-0.0357	0.0730	0.0175	-0.0348	0.00018
GW	1020	1	0.0730	0.0175	-0.0348	0.0701	0.0175	-0.0335	0.00018
GW	1021	1	0.0701	0.0175	-0.0335	0.0672	0.0175	-0.0320	0.00018
GW	1022	1	0.0672	0.0175	-0.0320	0.0645	0.0175	-0.0303	0.00018
GW	1023	1	0.0645	0.0175	-0.0303	0.0619	0.0175	-0.0283	0.00018
GW	1024	1	0.0619	0.0175	-0.0283	0.0595	0.0175	-0.0262	0.00018
GW	1025	1	0.0595	0.0175	-0.0262	0.0574	0.0175	-0.0238	0.00018
GW	1026	1	0.0574	0.0175	-0.0238	0.0554	0.0175	-0.0212	0.00018

GW	1027	1	0.0554	0.0175	-0.0212	0.0537	0.0175	-0.0185	0.00018
GW	1028	1	0.0537	0.0175	-0.0185	0.0522	0.0175	-0.0156	0.00018
GW	1029	1	0.0522	0.0175	-0.0156	0.0509	0.0175	-0.0127	0.00018
GW	1030	1	0.0509	0.0175	-0.0127	0.0500	0.0175	-0.0096	0.00018
GW	1031	1	0.0500	0.0175	-0.0096	0.0493	0.0175	-0.0064	0.00018
GW	1032	1	0.0493	0.0175	-0.0064	0.0488	0.0175	-0.0032	0.00018
GW	1033	1	0.0488	0.0175	-0.0032	0.0487	0.0175	0.0000	0.00018
GW	1034	1	0.0487	0.0175	0.0000	0.0488	0.0175	0.0032	0.00018
GW	1035	1	0.0488	0.0175	0.0032	0.0493	0.0175	0.0064	0.00018
GW	1036	1	0.0493	0.0175	0.0064	0.0500	0.0175	0.0096	0.00018
GW	1037	1	0.0500	0.0175	0.0096	0.0509	0.0175	0.0127	0.00018
GW	1038	1	0.0509	0.0175	0.0127	0.0522	0.0175	0.0156	0.00018
GW	1039	1	0.0522	0.0175	0.0156	0.0537	0.0175	0.0185	0.00018
GW	1040	1	0.0537	0.0175	0.0185	0.0554	0.0175	0.0212	0.00018
GW	1041	1	0.0554	0.0175	0.0212	0.0574	0.0175	0.0238	0.00018
GW	1042	1	0.0574	0.0175	0.0238	0.0595	0.0175	0.0262	0.00018
GW	1043	1	0.0595	0.0175	0.0262	0.0619	0.0175	0.0283	0.00018
GW	1044	1	0.0619	0.0175	0.0283	0.0645	0.0175	0.0303	0.00018
GW	1045	1	0.0645	0.0175	0.0303	0.0672	0.0175	0.0320	0.00018
GW	1046	1	0.0672	0.0175	0.0320	0.0701	0.0175	0.0335	0.00018
GW	1047	1	0.0701	0.0175	0.0335	0.0730	0.0175	0.0348	0.00018
GW	1048	1	0.0730	0.0175	0.0348	0.0761	0.0175	0.0357	0.00018
GW	1049	1	0.0761	0.0175	0.0357	0.0793	0.0175	0.0364	0.00018
GW	1050	1	0.0793	0.0175	0.0364	0.0825	0.0175	0.0369	0.00018
GW	1051	1	0.0825	0.0175	0.0369	0.0857	0.0175	0.0370	0.00018
GW	1052	1	0.0857	0.0175	0.0370	0.0889	0.0175	0.0369	0.00018
GW	1053	1	0.0889	0.0175	0.0369	0.0921	0.0175	0.0364	0.00018
GW	1054	1	0.0921	0.0175	0.0364	0.0953	0.0175	0.0357	0.00018
GW	1055	1	0.0953	0.0175	0.0357	0.0984	0.0175	0.0348	0.00018
GW	1056	1	0.0984	0.0175	0.0348	0.1013	0.0175	0.0335	0.00018
GW	1057	1	0.1013	0.0175	0.0335	0.1042	0.0175	0.0320	0.00018
GW	1058	1	0.1042	0.0175	0.0320	0.1069	0.0175	0.0303	0.00018
GW	1059	1	0.1069	0.0175	0.0303	0.1095	0.0175	0.0283	0.00018
GW	1060	1	0.1095	0.0175	0.0283	0.1119	0.0175	0.0262	0.00018

GW	1061	1	0.1119	0.0175	0.0262	0.1140	0.0175	0.0238	0.00018
GW	1062	1	0.1140	0.0175	0.0238	0.1160	0.0175	0.0212	0.00018
GW	1063	1	0.1160	0.0175	0.0212	0.1177	0.0175	0.0185	0.00018
GW	1064	1	0.1177	0.0175	0.0185	0.1192	0.0175	0.0156	0.00018
GW	1065	1	0.1192	0.0175	0.0156	0.1205	0.0175	0.0127	0.00018
GW	1066	1	0.1205	0.0175	0.0127	0.1214	0.0175	0.0096	0.00018
GW	1067	1	0.1214	0.0175	0.0096	0.1221	0.0175	0.0064	0.00018
GW	1068	1	0.1221	0.0175	0.0064	0.1226	0.0175	0.0032	0.00018
GW	1069	1	0.1226	0.0175	0.0032	0.1227	0.0175	0.0000	0.00018
GW	1070	1	0.1227	0.0175	0.0000	0.1226	0.0175	-0.0032	0.00018
GW	1071	1	0.1226	0.0175	-0.0032	0.1221	0.0175	-0.0064	0.00018
GW	1072	1	0.1221	0.0175	-0.0064	0.1214	0.0175	-0.0096	0.00018
GW	1073	1	0.1214	0.0175	-0.0096	0.1205	0.0175	-0.0127	0.00018
GW	1074	1	0.1205	0.0175	-0.0127	0.1192	0.0175	-0.0156	0.00018
GW	1075	1	0.1192	0.0175	-0.0156	0.1177	0.0175	-0.0185	0.00018
GW	1076	1	0.1177	0.0175	-0.0185	0.1160	0.0175	-0.0212	0.00018
GW	1077	1	0.1160	0.0175	-0.0212	0.1140	0.0175	-0.0238	0.00018
GW	1078	1	0.1140	0.0175	-0.0238	0.1119	0.0175	-0.0262	0.00018
GW	1079	1	0.1119	0.0175	-0.0262	0.1095	0.0175	-0.0283	0.00018
GW	1080	1	0.1095	0.0175	-0.0283	0.1069	0.0175	-0.0303	0.00018
GW	1081	1	0.1069	0.0175	-0.0303	0.1042	0.0175	-0.0320	0.00018
GW	1082	1	0.1042	0.0175	-0.0320	0.1013	0.0175	-0.0335	0.00018
GW	1083	1	0.1013	0.0175	-0.0335	0.0984	0.0175	-0.0348	0.00018
GW	1084	1	0.0984	0.0175	-0.0348	0.0953	0.0175	-0.0357	0.00018
GW	1085	1	0.0953	0.0175	-0.0357	0.0921	0.0175	-0.0364	0.00018
GW	1086	1	0.0921	0.0175	-0.0364	0.0889	0.0175	-0.0369	0.00018
GW	1087	1	0.0889	0.0175	-0.0369	0.0857	0.0175	-0.0370	0.00018
GW	1088	3	0.0889	0.0025	-0.0369	0.0857	0.0000	-0.0370	0.00018
GW	1089	3	0.0825	-0.0025	-0.0369	0.0857	0.0000	-0.0370	0.00018
GW	1090	3	0.0889	-0.0025	-0.0369	0.0857	0.0000	-0.0370	0.00018
GW	1091	3	0.0825	0.0025	-0.0369	0.0857	0.0000	-0.0370	0.00018
GW	1092	11	0.0857	0.0000	-0.0370	0.0857	0.0000	-0.0062	0.00018
GW	1093	37	0.0000	0.0000	0.0550	0.0000	0.0000	-0.0550	0.00048
GW	1094	51	0.0000	0.0000	0.0550	0.1061	0.1061	0.0550	0.00048

GW	1095	51	0.0000	0.0000	0.0500	0.1061	0.1061	0.0500	0.00048
GW	1096	51	0.0000	0.0000	0.0450	0.1061	0.1061	0.0450	0.00048
GW	1097	51	0.0000	0.0000	0.0400	0.1061	0.1061	0.0400	0.00048
GW	1098	51	0.0000	0.0000	0.0350	0.1061	0.1061	0.0350	0.00048
GW	1099	51	0.0000	0.0000	0.0300	0.1061	0.1061	0.0300	0.00048
GW	1100	51	0.0000	0.0000	0.0250	0.1061	0.1061	0.0250	0.00048
GW	1101	51	0.0000	0.0000	0.0200	0.1061	0.1061	0.0200	0.00048
GW	1102	51	0.0000	0.0000	0.0150	0.1061	0.1061	0.0150	0.00048
GW	1103	51	0.0000	0.0000	0.0100	0.1061	0.1061	0.0100	0.00048
GW	1104	51	0.0000	0.0000	0.0050	0.1061	0.1061	0.0050	0.00048
GW	1105	51	0.0000	0.0000	0.0000	0.1061	0.1061	0.0000	0.00048
GW	1106	51	0.0000	0.0000	-0.0050	0.1061	0.1061	-0.0050	0.00048
GW	1107	51	0.0000	0.0000	-0.0100	0.1061	0.1061	-0.0100	0.00048
GW	1108	51	0.0000	0.0000	-0.0150	0.1061	0.1061	-0.0150	0.00048
GW	1109	51	0.0000	0.0000	-0.0200	0.1061	0.1061	-0.0200	0.00048
GW	1110	51	0.0000	0.0000	-0.0250	0.1061	0.1061	-0.0250	0.00048
GW	1111	51	0.0000	0.0000	-0.0300	0.1061	0.1061	-0.0300	0.00048
GW	1112	51	0.0000	0.0000	-0.0350	0.1061	0.1061	-0.0350	0.00048
GW	1113	51	0.0000	0.0000	-0.0400	0.1061	0.1061	-0.0400	0.00048
GW	1114	51	0.0000	0.0000	-0.0450	0.1061	0.1061	-0.0450	0.00048
GW	1115	51	0.0000	0.0000	-0.0500	0.1061	0.1061	-0.0500	0.00048
GW	1116	51	0.0000	0.0000	-0.0550	0.1061	0.1061	-0.0550	0.00048
GW	1117	51	0.0000	0.0000	0.0550	0.1061	-0.1061	0.0550	0.00048
GW	1118	51	0.0000	0.0000	0.0500	0.1061	-0.1061	0.0500	0.00048
GW	1119	51	0.0000	0.0000	0.0450	0.1061	-0.1061	0.0450	0.00048
GW	1120	51	0.0000	0.0000	0.0400	0.1061	-0.1061	0.0400	0.00048
GW	1121	51	0.0000	0.0000	0.0350	0.1061	-0.1061	0.0350	0.00048
GW	1122	51	0.0000	0.0000	0.0300	0.1061	-0.1061	0.0300	0.00048
GW	1123	51	0.0000	0.0000	0.0250	0.1061	-0.1061	0.0250	0.00048
GW	1124	51	0.0000	0.0000	0.0200	0.1061	-0.1061	0.0200	0.00048
GW	1125	51	0.0000	0.0000	0.0150	0.1061	-0.1061	0.0150	0.00048
GW	1126	51	0.0000	0.0000	0.0100	0.1061	-0.1061	0.0100	0.00048
GW	1127	51	0.0000	0.0000	0.0050	0.1061	-0.1061	0.0050	0.00048
GW	1128	51	0.0000	0.0000	0.0000	0.1061	-0.1061	0.0000	0.00048

GW	1129	51	0.0000	0.0000	-0.0050	0.1061	-0.1061	-0.0050	0.00048
GW	1130	51	0.0000	0.0000	-0.0100	0.1061	-0.1061	-0.0100	0.00048
GW	1131	51	0.0000	0.0000	-0.0150	0.1061	-0.1061	-0.0150	0.00048
GW	1132	51	0.0000	0.0000	-0.0200	0.1061	-0.1061	-0.0200	0.00048
GW	1133	51	0.0000	0.0000	-0.0250	0.1061	-0.1061	-0.0250	0.00048
GW	1134	51	0.0000	0.0000	-0.0300	0.1061	-0.1061	-0.0300	0.00048
GW	1135	51	0.0000	0.0000	-0.0350	0.1061	-0.1061	-0.0350	0.00048
GW	1136	51	0.0000	0.0000	-0.0400	0.1061	-0.1061	-0.0400	0.00048
GW	1137	51	0.0000	0.0000	-0.0450	0.1061	-0.1061	-0.0450	0.00048
GW	1138	51	0.0000	0.0000	-0.0500	0.1061	-0.1061	-0.0500	0.00048
GW	1139	51	0.0000	0.0000	-0.0550	0.1061	-0.1061	-0.0550	0.00048
GW	1140	37	0.0071	-0.0071	0.0550	0.0071	-0.0071	-0.0550	0.00048
GW	1141	37	0.0142	-0.0142	0.0550	0.0142	-0.0142	-0.0550	0.00048
GW	1142	37	0.0212	-0.0212	0.0550	0.0212	-0.0212	-0.0550	0.00048
GW	1143	37	0.0283	-0.0283	0.0550	0.0283	-0.0283	-0.0550	0.00048
GW	1144	37	0.0353	-0.0353	0.0550	0.0353	-0.0353	-0.0550	0.00048
GW	1145	37	0.0424	-0.0424	0.0550	0.0424	-0.0424	-0.0550	0.00048
GW	1146	37	0.0494	-0.0494	0.0550	0.0494	-0.0494	-0.0550	0.00048
GW	1147	37	0.0565	-0.0565	0.0550	0.0565	-0.0565	-0.0550	0.00048
GW	1148	37	0.0635	-0.0635	0.0550	0.0635	-0.0635	-0.0550	0.00048
GW	1149	37	0.0706	-0.0706	0.0550	0.0706	-0.0706	-0.0550	0.00048
GW	1150	37	0.0776	-0.0776	0.0550	0.0776	-0.0776	-0.0550	0.00048
GW	1151	37	0.0847	-0.0847	0.0550	0.0847	-0.0847	-0.0550	0.00048
GW	1152	37	0.0917	-0.0917	0.0550	0.0917	-0.0917	-0.0550	0.00048
GW	1153	37	0.0988	-0.0988	0.0550	0.0988	-0.0988	-0.0550	0.00048
GW	1154	37	0.1061	-0.1061	0.0550	0.1061	-0.1061	-0.0550	0.00048
GW	1155	37	0.0071	0.0071	0.0550	0.0071	0.0071	-0.0550	0.00048
GW	1156	37	0.0142	0.0142	0.0550	0.0142	0.0142	-0.0550	0.00048
GW	1157	37	0.0212	0.0212	0.0550	0.0212	0.0212	-0.0550	0.00048
GW	1158	37	0.0283	0.0283	0.0550	0.0283	0.0283	-0.0550	0.00048
GW	1159	37	0.0353	0.0353	0.0550	0.0353	0.0353	-0.0550	0.00048
GW	1160	37	0.0424	0.0424	0.0550	0.0424	0.0424	-0.0550	0.00048
GW	1161	37	0.0494	0.0494	0.0550	0.0494	0.0494	-0.0550	0.00048
GW	1162	37	0.0565	0.0565	0.0550	0.0565	0.0565	-0.0550	0.00048

ภาคผนวก ก

วิธีการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิธีการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

- อุปกรณ์การทดสอบ

1. Network Analyzer
2. สายอากาศที่ออกแบบ
3. N-Type 50 Ω Calibration Kit
4. เครื่อง Plotter

- ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการปรับสถานะเครื่อง Network Analyzer เป็นแบบ Two Port (S22)
2. กดปุ่ม Start ป้อนความถี่เริ่มต้น ตามหน่วยของความถี่
3. กดปุ่ม Stop ป้อนความถี่สุดท้ายตามด้วยหน่วยของความถี่
4. กดปุ่ม MRK (marker)
 - 4.1 ให้ Marker 1 อยู่ที่ความถี่เริ่มต้น (2.3GHz)
 - 4.2 ให้ Marker 2 อยู่ที่ความถี่ใช้งาน (2.45GHz)
 - 4.3 ให้ Marker 3 อยู่ที่ความถี่สิ้นสุด (2.6 GHz)
5. กดปุ่ม CAL (Calibration) เลือกที่ S22 เป็นการทำการ calibrate เครื่องโดยจะขึ้นข้อความ OPEN, SHORT, LOAD
6. นำตัว Calibrator แบบ OPEN มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม OPEN แล้วทำการถอดตัว Calibrator
7. นำตัว Calibrator แบบ SHORT มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม SHORT แล้วทำการถอดตัว Calibrator
8. นำตัว Calibrator แบบ Broadband Load มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม Broadband แล้วกด Done Load 2 ครั้งทางจอภาพจะแสดงตัวหนังสือ “ Cor ” (Calibration) แล้วทำการถอดตัว Load ออก
9. ทำการกดปุ่ม Format จะมีเมนูให้เลือกทำการเลือกที่ Smith Chart
10. นำตัว Calibrator แบบ SHORT มาต่อกับสายนำสัญญาณอีกครั้งหนึ่งเพื่อทำการปรับสเกลอ้างอิงโดยทำการปรับที่ Electrical Delay เลื่อนไปที่ตำแหน่งของลูกศรไปที่ตำแหน่งขวามือสุดของ Smith Chart
11. ขั้นตอนที่ 1-10 เป็นขั้นตอนการ Calibration เครื่อง
12. นำคลื่นปลายเปิดหนึ่งด้านมาทำการต่อเครื่อง Network Analyzer
13. กดปุ่ม Format เครื่องจะแสดงค่า LOG MAG, Smith Chart , SWR, PHASE และ DELAY

14. เลือกที่ SWR เครื่องจะแสดงค่า SWR ของท่อนำคลื่นที่วัดออกมาได้ค่าที่วัดต้องมีค่าน้อยกว่า 2 เข้าใกล้ 1 ให้โดยหาค่าที่ได้ยังมีค่ามากกว่า 2 ให้ทำการปรับแต่งค่า ความยาวของ โพรบ สายอากาศตัวกระตุ้นจนกว่าจะได้ค่า SWR เข้าใกล้ 1 มากที่สุด เท่าที่จะสามารถทำได้ หลังจากนั้นทำการกดปุ่มcopy เพื่อทำการพิมพ์รูปออกมา
15. ทำการเลือกที่ LOG MAG และ Smith Chart ทำการกดปุ่มcopy เพื่อทำการพิมพ์รูปออกมา

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

1. เครื่อง Network Analyzer
2. สายนำสัญญาณ
3. Connector แบบ N-Type และ แบบ SMA
4. ขาดังสำหรับการติดตั้งสายอากาศ
5. เครื่อง TURN TABLE ที่ใช้ในการหมุนสายอากาศตัวรับ
6. สายอากาศที่ทำการออกแบบ

- วิธีการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

1. เครื่อง Network Analyzer ตั้งไว้ที่ความถี่ Center 2.45GHz
2. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศตัวส่งเข้ากับ Signal Generator Channel :Port 1 เพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณ
3. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศตัวรับเข้ากับ Signal Generator Channel :Port 2 เพื่อเป็นตัวรับสัญญาณ
4. ซึ่งระยะห่างของสายอากาศตัวส่งและตัวรับต้องมีระยะห่างไม่น้อยกว่า

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{เมตร}$$

โดยที่ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศรับกับสายอากาศส่ง

D คือมิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศรับ + มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศส่ง

5. ทำการหมุนสายอากาศตัวรับที่ติดตั้งบนเครื่อง TURN TABLE มาที่ 0 องศา ปรับเครื่อง TURN TABLE ให้หมุนทีละ 5 องศา จนครบ 360 องศาพร้อมทำการบันทึกผลที่ได้จากเครื่อง Network Analyzer
6. ทำการเปลี่ยนระนาบการวัด
7. นำค่าที่วัดได้จากการทดสอบสายอากาศแต่ละค่ามาทำการ Normalize แล้วนำไปทำการ Plot กราฟ ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC กับผลการทดลองที่ได้จากการวัด

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 คุณสมบัติสถานีฐาน D-Link DWL – 2000AP + [14]

มาตรฐาน	IEEE 802. 11, 802.11b,802.11G
อัตราบิต	1,2,5.5,11,12,18,24,36,48,54 Mbps
ความถี่ใช้งาน	2.4 – 2.4897 GHZ
กำลังงานส่ง	15 bBm
ความไวเครื่องรับ	54 Mbps OFDM, 10% PER, -68 dBm 48 Mbps OFDM, 10% PER, -68 dBm 36 Mbps OFDM, 10% PER, -75 dBm 24 Mbps OFDM, 10% PER, -79 dBm 18 Mbps OFDM, 10% PER, -82 dBm 12 Mbps OFDM, 10% PER, -84 dBm 11 Mbps CCK, 8% PER, -82 dBm 9 Mbps OFDM, 10% PER, -87 dBm 6 Mbps OFDM, 10% PER, -88 dBm 5.5 Mbps CCK, 8% PER, -85 dBm 2 Mbps QPSK, 8% PER, -86 dBm 1 Mbps BPSK, 8% PER, -89 dBm

ตารางที่ ง.2 คุณสมบัติการ์ดเครือข่ายไร้สาย Cisco Aironet 350 Series Client Adapter [13]

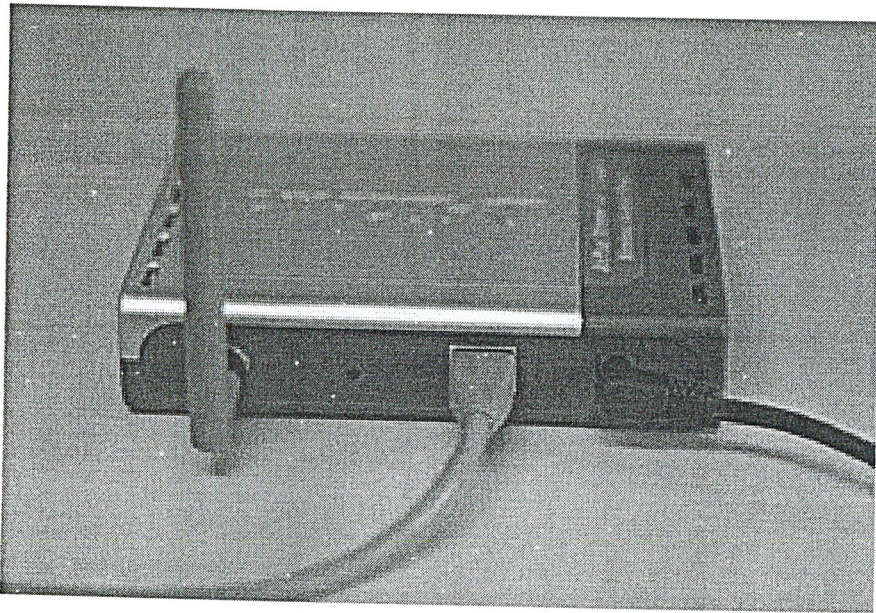
มาตรฐาน	IEEE 802.11, 802.11b
อัตราบิต	1,2,5.5,11 Mbps
ความถี่ใช้งาน	2.4 – 2.4897 GHz
กำลังงานส่ง	15 dBm
ความไวเครื่องรับ	1 Mbps BPSK , -94 dBm 2 Mbps QPSK , -91 dBm 5.5 Mbps CCK , -89 dBm 11 Mbps CCK , -85 dBm

ภาคผนวก จ

วิธีการติดตั้ง Wireless Access Point ของ D-Link DWL-2000AP+

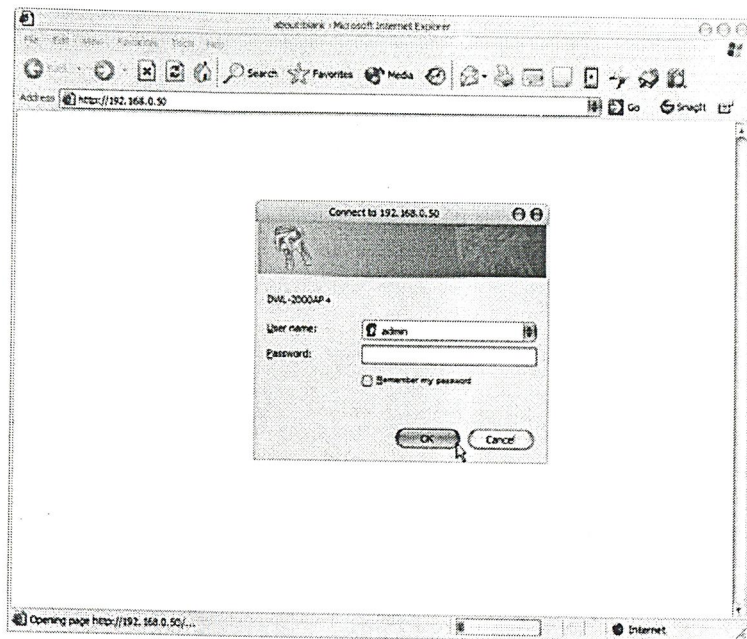
การ setup เพื่อการเชื่อมต่อ ระหว่างอุปกรณ์ชิ้นต่างๆ โดยการใช้ Setup Wizard ของ D-Link DWL-2000AP+ เป็นอีกทางหนึ่งที่ไม่ต้องลง software สำหรับการ setup โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเสียบสาย Power เข้ากับตัว Wireless Access Point พร้อมทั้งเสียบสาย LAN เพื่อการเชื่อมต่อระหว่าง Wireless Access Point กับเครื่องคอมพิวเตอร์



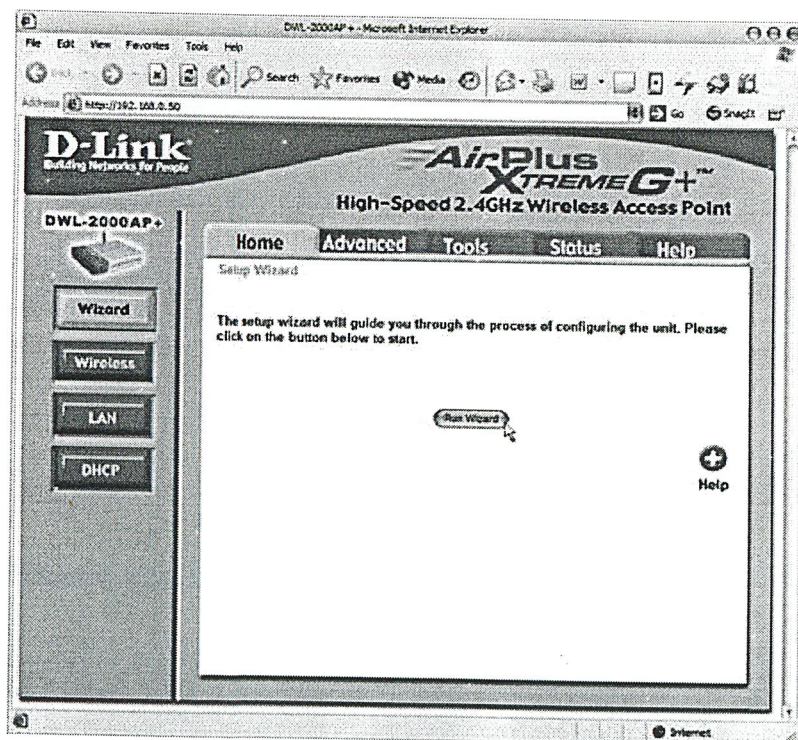
รูปที่ จ.1 การติดตั้ง Hardware ของตัว Wireless Access Point

2. เมื่อติดตั้ง Hardware เรียบร้อยแล้ว จึงทำการตั้งค่าตัว Wireless Access Point ขั้นแรกให้เปิด Web Browser ขึ้นมา ในที่นี้ขอใช้ Microsoft Internet Explorer จากนั้นก็พิมพ์ 192.168.0.50 (IP Address ของ Wireless Access Point) ไปที่ช่อง Address ตามรูปแล้วก็กด Enter หลังจากนั้นก็จะมี Windows เล็กๆ โผล่ขึ้นมา ถาม User name และ password สำหรับ Wireless Access Point ของ D-Link ที่เพิ่งแกะกล่องออกมา จะตั้งค่า User name เป็น admin แต่ไม่มี password ที่นี้ก็ป้อน admin ไปในช่อง User name แล้วก็คลิกปุ่ม OK



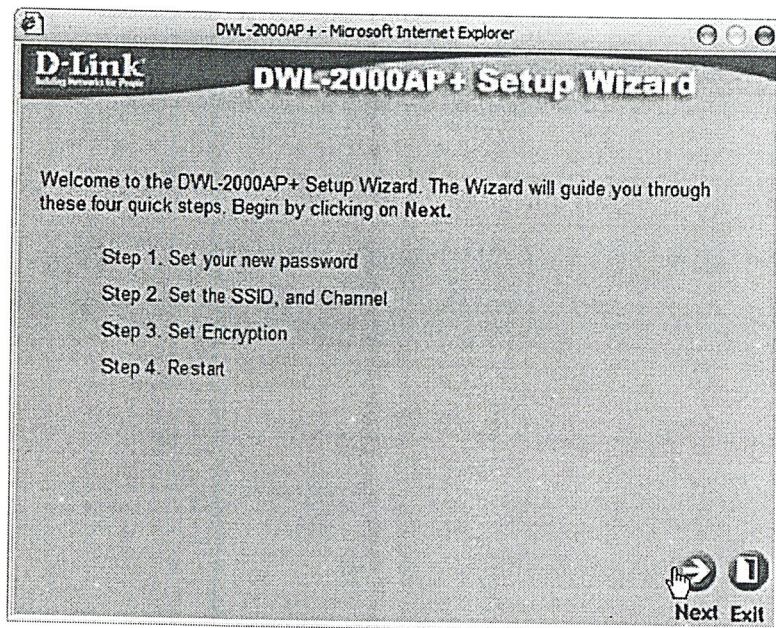
รูปที่ จ.2 การตั้งค่าตัว Wireless Access Point

3. เริ่มทำการ Setup ขั้นแรกให้คลิกที่ Setup Wizard



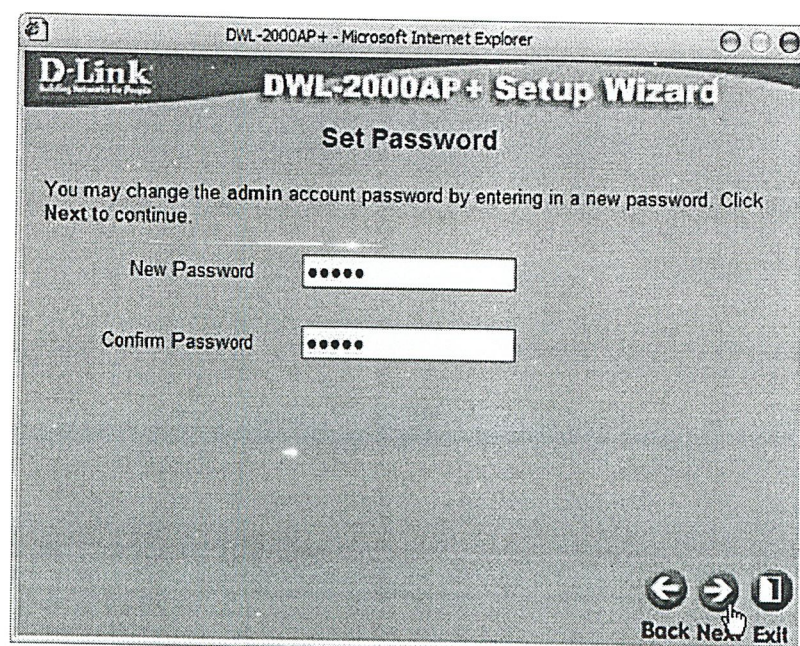
รูปที่ จ.3 การ Setup Wizard ของ Wireless Access Point

4. หน้าจอ Setup Wizard จะบอกว่า อย่างน้อยควรที่จะผ่าน 4 ขั้นตอนในการ Setup คือ เปลี่ยน Password, การตั้งชื่อ SSID และ Channel, ตั้งการเข้ารหัสข้อมูล หลังจากนั้นก็ restart



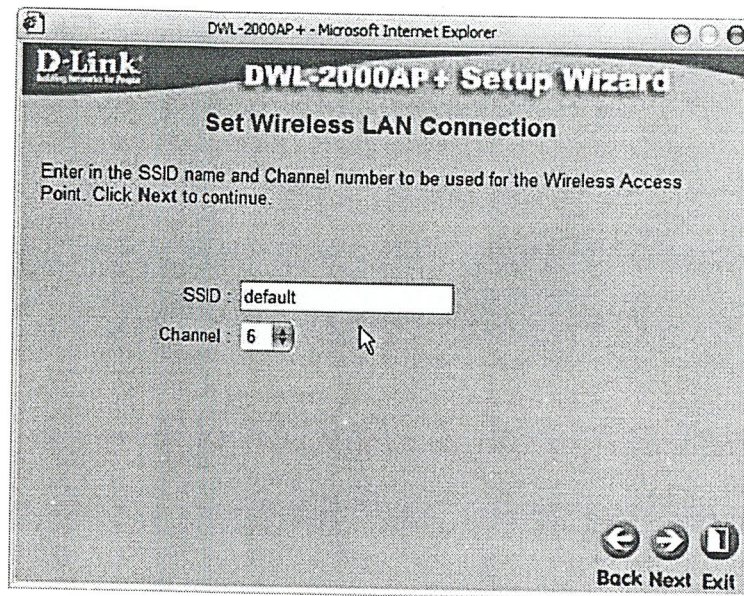
รูปที่ จ.4 แสดงขั้นตอนในการ Setup ของ Wireless Access Point

5. ขั้นแรก ที่จะต้องทำคือ เปลี่ยน Password โดยพยายามเลือก Password ที่ไม่ง่ายในการเดาเกินไปนัก ใช้คำที่ไม่มีใน Dictionary ยิ่งปลอดภัย



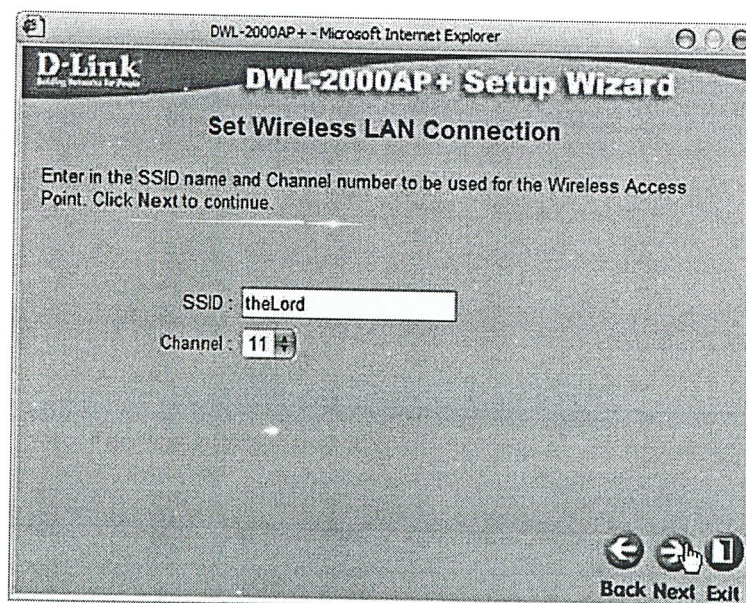
รูปที่ จ.5 แสดงขั้นตอนในการ Set Password

6. หลังจากนั้นก็คือการเปลี่ยนชื่อ SSID ซึ่งก็คือระบบ Network ไร้สาย หรือเรียกย่อๆว่า WLAN (Wireless Local Area Network) การตั้งชื่อ SSID นี้ สามารถตั้งเป็นอะไรก็ได้ แต่ต้องไม่เกิน 32 ตัวอักษร



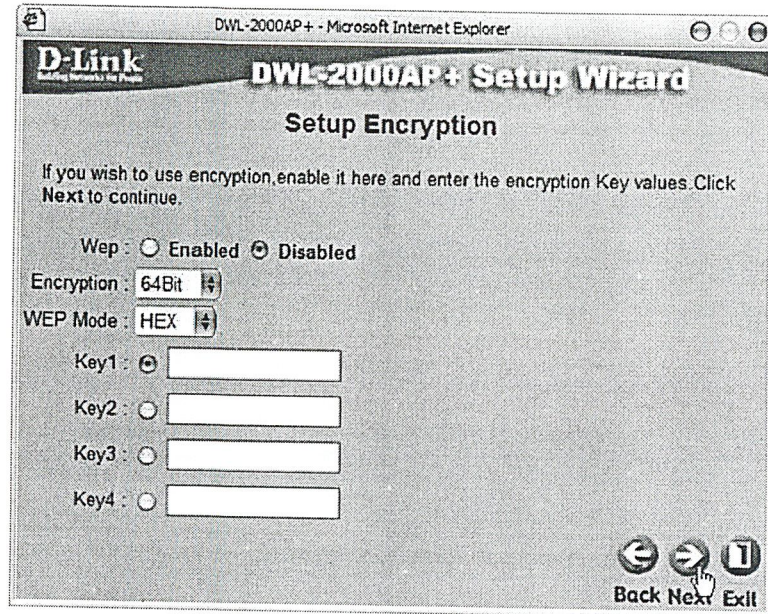
รูปที่ จ.6 แสดงการเปลี่ยนชื่อ SSID

7. การเลือก Channel ซึ่งมีทั้งหมด 13 Channel ให้เลือก ค่าที่ตั้งมาจากโรงงานก็คือ Channel ที่ 6 โดยที่จะสามารถเปลี่ยนเป็น Channel อะไรก็ได้ในภายหลัง เมื่อมีสัญญาณรบกวนจาก Wireless Network ข้างเคียงที่บังเอิญมาใช้ Channel เดียวกัน



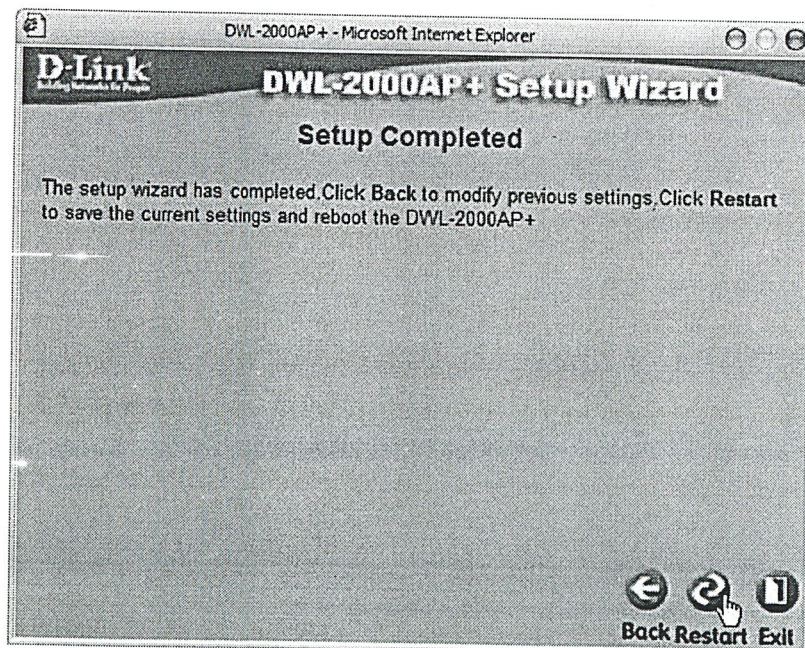
รูปที่ จ.7 แสดงการเลือก Channel

8. การ set ค่า WEP ซึ่ง WEP ย่อมาจาก Wired Equivalent Privacy แปลเป็นไทยได้ว่า ความปลอดภัยหรือความเป็นส่วนตัวเหมือนระบบที่ใช้สาย นั่นเอง ในขั้นตอนนี้จะปล่อยให้ค่า Default ที่ตั้งมาจากโรงงาน คือ Disabled



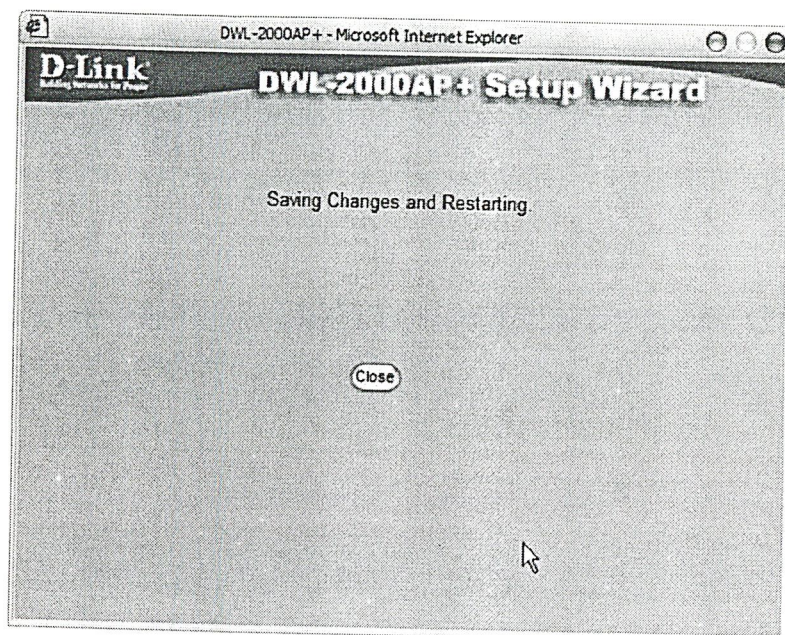
รูปที่ จ.8 แสดงการ set ค่า WEP

9. จากนั้นคลิก Apply แล้วจะมีหน้าจอขึ้นมาบอกว่า กำลัง restart Wireless Access Point อยู่



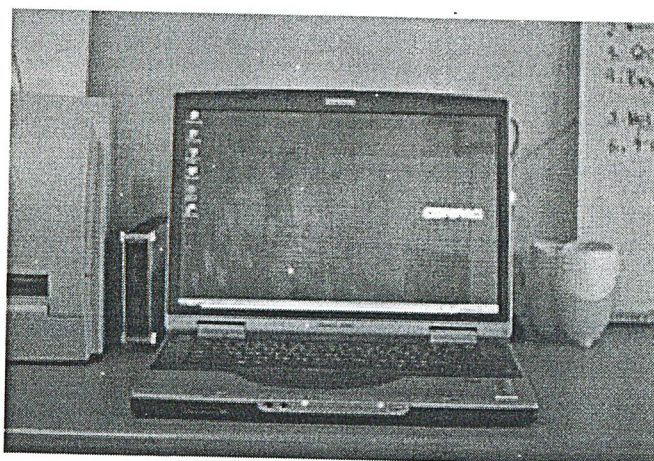
รูปที่ จ.9 แสดงการ restart Wireless Access Point

10. คลิก Continue จากนั้นก็ให้เปิด Web Browser

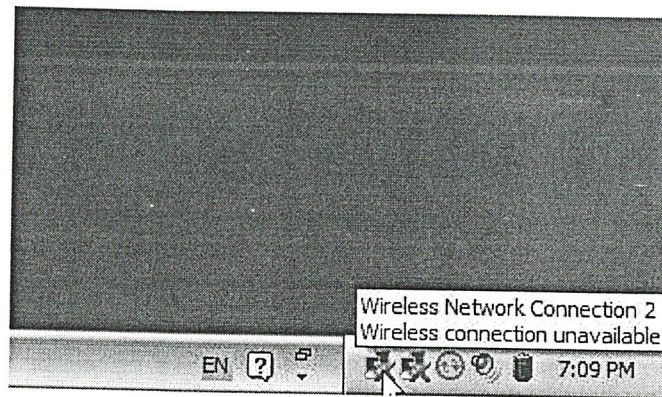


รูปที่ จ.10 แสดงการปิด Web Browser

11. การ setup ตัวเครื่องลูกข่าย โดยใช้เครื่อง Notebook เป็นตัวทดลอง โดยต่อเข้ากับอุปกรณ์ Wireless LAN จากรูป จ.12 พบว่าทางมุมขวาล่างของหน้าจอจะเห็นรูปจอซ้อนกันสองจอ ซึ่งเป็น icon ของ Wireless LAN และของ LAN แบบมีสาย

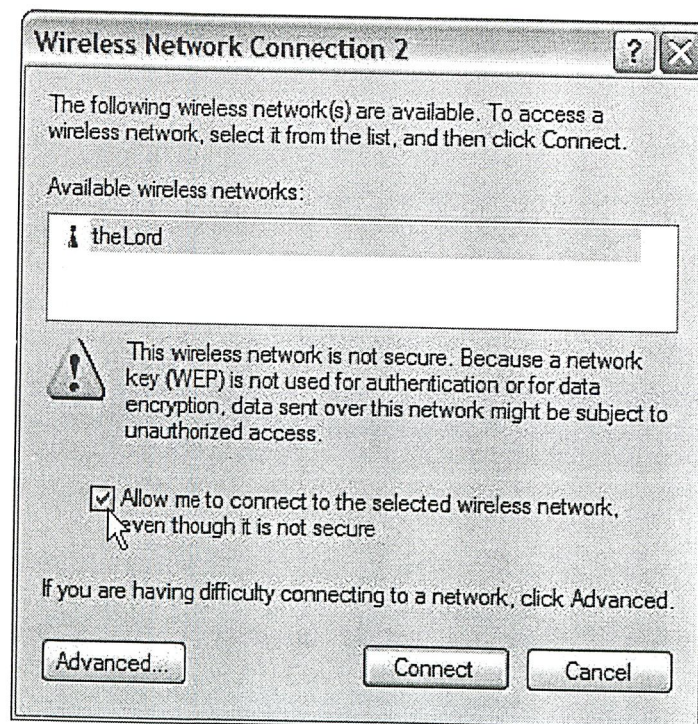


รูปที่ จ.11 แสดงตัวเครื่องลูกข่ายโดยใช้เครื่อง Notebook



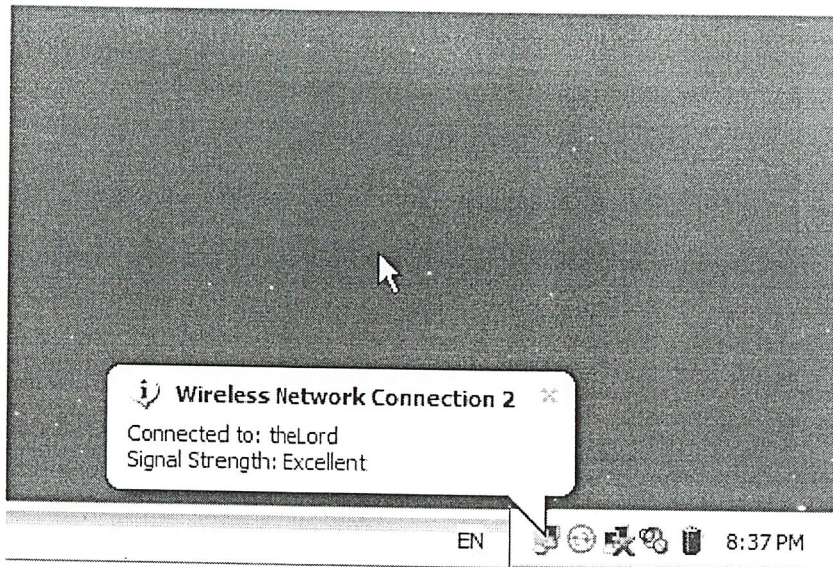
รูปที่ จ.12 แสดง icon ของ Wireless LAN และของ LAN แบบมีสาย

12. เปิดสวิตช์ Wireless LAN ที่ตัว Notebook อย่างในรูปที่ จ.13 จะเห็นว่า Notebook ได้เจอระบบ Wireless LAN แล้ว แต่ก็จะต้องเห็นว่าระบบยังไม่ปลอดภัย พร้อมทั้งถามว่า แน่ใจที่จะ connect ตอนนี้



รูปที่ จ.12 แสดงการ connect ของระบบ Wireless LAN

13. จากรูปที่จ.13 จะเห็นว่า icon ได้เปลี่ยนไป พร้อมทั้งแจ้งว่าการเชื่อมต่อสมบูรณ์และควรที่จะ setup Wireless Access Point ให้มีระบบการรักษาความปลอดภัยที่ดีด้วย



รูปที่ จ.13 แสดงการเชื่อมต่อระบบ Wireless LAN ที่สมบูรณ์

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สมผล โกศลวิตร ซึ่งเป็นที่อาจารย์ปรึกษาของพวกข้าพเจ้า โดยเป็นผู้ให้ความช่วยเหลือแนะนำแนวทางการศึกษาและอบรมสั่งสอน ตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษา

ตลอดจนคำแนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น และให้คำชี้แนะความรู้ทางด้านต่างๆ จากคุณสุธาณี ละมุลตรี คุณไพโรจน์ วุ่นชุ่ม คุณกฤตยา นาคประสิทธิ์ รวมทั้งคุณวิเชษฐ์ อ่อนรำพรรณ ที่ให้ความรู้ทางทฤษฎีและแนะนำแนวทางการทดสอบเกี่ยวกับระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายภายนอกอาคาร

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.Kosulvit, "A Bidirectional Antenna using a Probe Excited Ring," Doctoral Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2001.
- [2] C. Phongcharoenpanich, I. Rattanachote, P. Wounchoum, S. Kosulvit and M. Krairiksh, "Design of a probe excited circular ring above the reflector for bridging outdoor wireless LAN applications," 2003 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 2, June 2003, pp. 950-953.
- [3] K.F. Sander and G.A.L. Reed, "Transmission and Propagation of Electromagnetic Waves," Cambridge University Press, 1986
- [4] C.A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design," 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [5] C.A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics," John Wiley & Sons, Inc., 1998
- [6] Y.R. Sami, "Useful coordinate transformations for antenna applications." IEEE Trans. Antennas Propagat. Vol.27, Jul. 1997.pp.571-574
- [7] John D. Kraus, Ronald J. Marhefka, "Antennas for All Applications," 3rd ed. McGraw – Hill, 2003
- [8] T. S. Rappaport, Wireless Communication : Principles and Practice, Prentice Hall, 1999
- [9] M. Nakagami, "The m-Distribution--- A General Formular of Intensity Distribution of Rapid Fading", "Statistical Method in Wave Propagation", W.C. Hoffman, ed., Oxford: Pergamon, 1960, pp.3-36.
- [10] IEEE 802.11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Standard, IEEE, Aug.1999.
- [11] J. Jangeun, P. Peddabachagari and M. Sichertiu, "Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications", Network Computing and Applications, 2003. NCA 2003. Second IEEE International Symposium on, 16-18 April 2003.
- [12] S. R. Saunders, Antenna and Propagation for Wireless Communication Systems, New York : John Wiley and Sons. 1999.
- [13] Product Data Sheet for CISCO (Aironet) Series 340 Adapters, Cisco Systems of San Jose, CA, 2001, http://www.cisco.com/warp/public/cc/pd/witc/ao340ap/prodlit/airoi_ds.pdf.
- [14] Product Data Sheet D-Link DWL-2000AP+, D-Link Co., Ltd., 2004.