

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แบบแผนการจำลองช่องสัญญาณบนพื้นฐาน RAY-TRACING สำหรับระบบการสื่อสาร  
แบบไร้สาย

RAY-TRACING CHANNEL MODELING SCHEME FOR WIRELESS  
COMMUNICATION

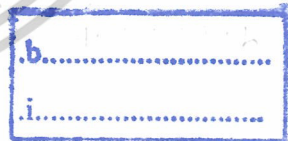


T104176

โดย

นาย ฐานิช เปรุณาวิน  
นาย ธนกร สติภาโกมล  
นาย ปัญญา กิตติพิพัฒนถาวร  
นาย พิระพงศ์ ศรีคำ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 104176  
วัน,เดือน,ปี 3.0 ต.ค. 2552



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RAY-TRACING CHANNEL MODELING SCHEME FOR WIRELESS  
COMMUNICATION



BY

Mr. Thanich Parunawin

Mr. Tanakorn Sineepakomol

Mr. Panya Kittipattanathaworn

Mr. Peerapong Srikum

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**หัวข้อวิทยานิพนธ์** แบบแผนการจำลองช่องสัญญาณบนพื้นฐาน Ray-Tracing สำหรับระบบการสื่อสารแบบไร้สาย

**ชื่อนักศึกษา** นาย ฐานิช เปรมาวิน รหัสประจำตัว 48012084  
นาย ธนกร สนิภาโกมล รหัสประจำตัว 48012090  
นาย ปัญญา กิตติพิพัฒนถาวร รหัสประจำตัว 48012100  
นาย พีระพงศ์ ศรีคำ รหัสประจำตัว 48012103

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ. พิชญ์ สุพรรณกุล

อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์

**ระดับการศึกษา** ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

**ภาควิชา** วิศวกรรมสารสนเทศ

**ปีการศึกษา** 2551

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นสัญญาณต่างๆมากมาย เช่น Wireless, GPS, Bluetooth เป็นต้น ในบางพื้นที่อาจมีสัญญาณน้อย บางพื้นที่อาจสัญญาณมาก จึงต้องทำการวัดสัญญาณ Ray-Tracing คือการวัดสัญญาณและช่องสัญญาณการแพร่กระจายของคลื่น โดยใช้โปรแกรมในการ Simulate สัญญาณและช่องสัญญาณ ผลของการใช้โปรแกรมจะเป็นข้อมูลเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดคลื่นสัญญาณจริงจากสถานที่ที่ต้องทำการวัดคลื่นสัญญาณและช่องสัญญาณการแพร่กระจายของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title** Ray-Tracing Channel Modeling Scheme for Wireless Communication

**Student** Mr. Thanich Parunawin ID. 48012084  
Mr. Tanakorn Sineepakomol ID. 48012090  
Mr. Panya Kittipattanathaworn ID. 48012100  
Mr. Peerapong Srikum ID. 48012103

**Advisor** Asst. Prof. Pichaya Supanakoon  
Mr. Sathaporn Promwong

**Graduate Level** Bachelor Degree of Information Engineering

**Department** Information Engineering

**Academic Year** 2008

### Abstract

In these modern times, there are many tools relying on various signal waves, Wireless, GPS and Bluetooth, for instance. In different areas the signal's intensity also varies, hence, Ray-Tracing methods are required to measure the signal and it's channel, by using a simulation program. The program will return the data which will be compared to the results from the actual data from the required location.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงจะไม่สำเร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความร่วมมือจากอาจารย์ทุกท่าน รุ่นพี่ และเพื่อนๆทุกคน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านข้อมูล อุปกรณ์ คำแนะนำติชมต่างๆอันเป็นประโยชน์ ขอขอบพระคุณ Associate Professor Jun-ichi Takada เจ้าของทฤษฎี Ray-Tracing อาจารย์สถาพร พรหมวงส์ และผศ.พิชญ์ สุพรรณกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำให้ได้มีความคิดและแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการทำโครงการ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ซึ่งเป็นกำลังใจและให้ความห่วงใยในทุกๆด้าน และสุดท้ายขอขอบคุณ ภาควิศวกรรมสารสนเทศ ที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นาย ฐานิช เปรุณาวิน

นาย ธนกร สนิภาโกมล

นาย ปัญญา กิตติพิพัฒน์ถาวร

นาย พิระพงษ์ ศรีคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

## เรื่อง

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ญ

## บทที่ 1 บทนำ

1.1 แนวคิดและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 โครงประกอบของปริญญาานิพนธ์	4

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ขอบข่ายของทฤษฎีสายอากาศ	5
2.1.1 ประเภทของสายอากาศ	5
2.1.2 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain: dB)	8
2.1.3 กำลังส่ง	8
2.1.4 ตำแหน่งความสูงของสายอากาศ	9
2.1.5 สิ่งบดบัง	9
2.1.6 เสา (Tower)	9
2.2 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	9
2.2.1 Surface wave หรือ ground wave	9
2.2.2 Effect of frequency	10
2.2.3 Effect of the ground	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง

หน้า

2.2.4 Effect of polarization	11
2.2.5 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ	11
2.2.6 การพิจารณาปัญหาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	12
2.2.7 กลไกเบื้องต้นของการแพร่กระจาย	12
2.2.8 สัญญาณที่ทะลุผ่านเข้าไปในอาคาร	12
2.3 การสะท้อน (Reflection)	13
2.3.1 การสะท้อนจากวัตถุชนิดไดอิเล็กตริก	14
2.3.2 การสะท้อนจากตัวนำสมบูรณ์	18
2.4 การเลี้ยวเบน (Diffraction)	18
2.5 การกระจัดกระจาย (Scattering)	19
2.6 การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss)	21
2.7 แบบจำลองช่องสัญญาณ (Model Channel)	21
2.7.1 Statistical Modeling	22
2.7.2 Deterministic Modeling	22
2.7.3 Geometry-based Modeling	22
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการของ Ray-tracing	
3.1 ประเภทของ Ray-Tracing	23
3.1.1 Ray-launching Method	23
3.1.2 Image Method	24
3.2 ปัญหาของ Ray launching	25
3.3 ปัญหาของ Image Method	26
3.4 บทความเกี่ยวกับ Local Scattering Local	26
3.5 ข้อดีข้อเสียของ Ray-Tracing	26
3.6 การจำลองสัญญาณ โดยโปรแกรม Raplab 4.0	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 การออกแบบ	
4.1 การทำแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม SketchUp	33
4.1.1 แบบจำลอง	36
4.2 การแสดงผลในโปรแกรม Raplab	39
บทที่ 5 การทดลอง และผลการทดลอง	
5.1 การวิเคราะห์สัญญาณ	40
5.2 ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณ	40
บทที่ 6 สรุปผล ปัญหา และแนวทางการพัฒนา	
6.1 สรุปผล	68
6.2 ปัญหาที่พบ	68
6.3 แนวทางการพัฒนา	68
บรรณานุกรม	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนในการทำปริญญาณิพนธ์	3
รูปที่ 2.1 สายอากาศแบบ Omni-Directional	7
รูปที่ 2.2 การแพร่กระจายคลื่นแบบ Ground wave	10
รูปที่ 2.3 การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ	11
รูปที่ 2.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เกิดจากการสะท้อน	14
รูปที่ 2.5a การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและ 2.5b การสะท้อนของสนามไฟฟ้า	15
รูปที่ 2.6 ลักษณะการเลี้ยวเบนของการแพร่กระจายคลื่น	19
รูปที่ 2.7 ลักษณะการสะท้อนบนพื้นขรุขระ	20
รูปที่ 3.1 การแพร่กระจายคลื่นในสถานะแวกด็อมของระบบการสื่อสาร	24
รูปที่ 3.2 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับ	27
รูปที่ 3.3 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับ ในรูปแบบ 3D	27
รูปที่ 3.4 แบบจำลองการส่งสัญญาณในแบบแนวตั้ง	28
รูปที่ 3.5 ค่าจากโปรแกรม Raplab	30
รูปที่ 3.6 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx	31
รูปที่ 3.7 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx	31
รูปที่ 3.8 Power Delay Profile	32
รูปที่ 4.1 หน้าจอหลักของโปรแกรม SketchUp	33
รูปที่ 4.2 ภาพจากโปรแกรม Google Earth	35
รูปที่ 4.3 Plan คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์	35
รูปที่ 4.4 แบบจำลองในมุมมองแบบ Top View	36
รูปที่ 4.5 แบบจำลองในมุมมองแบบ Isometric View	36
รูปที่ 4.6 ภาพจากโปรแกรม Google Earth	37
รูปที่ 4.7 Plan คณะวิศวกรรมศาสตร์	37
รูปที่ 4.8 แบบจำลองในมุมมองแบบ Top View	38
รูปที่ 4.9 แบบจำลองในมุมมองแบบ Isometric View	38
รูปที่ 4.9 แบบจำลองที่ออกแบบแสดงในโปรแกรม Raplab (คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์)	39
รูปที่ 4.10 แบบจำลองที่ออกแบบแสดงในโปรแกรม Raplab (คณะวิศวกรรมศาสตร์)	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 5.1 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับแบบมีค่า การสะท้อนกับตัวอาคารได้ แต่ไม่มีการ Diffraction	40
รูปที่ 5.2 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx	41
รูปที่ 5.3 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx	41
รูปที่ 5.4 Power Delay Profile	42
รูปที่ 5.5 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	43
รูปที่ 5.6 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	43
รูปที่ 5.7 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับในรูปแบบ Side-View 3D	44
รูปที่ 5.8 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับแบบ ไม่มีการสะท้อนกับตัวอาคาร แต่มีการ Diffraction	45
รูปที่ 5.9 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx	45
รูปที่ 5.10 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx	46
รูปที่ 5.11 Power Delay Profile	47
รูปที่ 5.12 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	47
รูปที่ 5.13 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	48
รูปที่ 5.14 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับในรูปแบบ Top-View 3D	48
รูปที่ 5.15 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับแบบ มีค่าการสะท้อนกับตัวอาคารได้ และมีการ Diffraction	49
รูปที่ 5.16 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx	50
รูปที่ 5.17 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx	50
รูปที่ 5.18 Power Delay Profile	52
รูปที่ 5.19 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	52
รูปที่ 5.20 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	53
รูปที่ 5.21 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับในรูปแบบ Side-View 3D	53
รูปที่ 5.22 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับในรูปแบบ Top-View 3D	54
รูปที่ 5.23 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับแบบมีค่าการ สะท้อนกับตัวอาคารมากกว่าในแบบจำลองครั้งที่ 1 แต่ไม่มีการ Diffraction	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 5.24 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx	55
รูปที่ 5.25 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx	56
รูปที่ 5.26 Power Delay Profile	57
รูปที่ 5.27 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	58
รูปที่ 5.28 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	58
รูปที่ 5.29 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่ง ไปยังภาครับในรูปแบบ Side-View 3D	59
รูปที่ 5.30 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่ง ไปยังภาครับในรูปแบบ Side-View 3D	59
รูปที่ 5.31 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่ง ไปยังภาครับแบบสายอากาศ มีค่าการสะท้อนกับตัวอาคารได้ แต่ไม่มีการ Diffraction	60
รูปที่ 5.32 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx	61
รูปที่ 5.33 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx	61
รูปที่ 5.34 Power Delay Profile	62
รูปที่ 5.35 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	63
รูปที่ 5.36 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	63
รูปที่ 5.37 Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่ง ไปยังภาครับแบบไม่มีการ สะท้อนกับตัวอาคาร แต่มีการ Diffraction	64
รูปที่ 5.38 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx	65
รูปที่ 5.39 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx	65
รูปที่ 5.40 Power Delay Profile	66
รูปที่ 5.41 Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	67
รูปที่ 5.42 Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าสภาพยอม และค่าสภาพนำของวัสดุไดอิเล็กตริก	16
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างความนำของพื้นผิวต่าง ๆ	20
ตารางที่ 3.1 ระยะห่าง TxRx ,Path loss ,Time of available ของแบบจำลองรูปที่ 3.1	32
ตารางที่ 5.1 ระยะห่าง TxRx ,Path loss ,Time of available ของแบบจำลองที่ 1	42
ตารางที่ 5.2 ระยะห่าง TxRx ,Path loss ,Time of available ของแบบจำลองที่ 2	46
ตารางที่ 5.3 ระยะห่าง TxRx ,Path loss ,Time of available ของแบบจำลองที่ 3	51
ตารางที่ 5.4 ระยะห่าง TxRx ,Path loss ,Time of available ของแบบจำลองที่ 4	56
ตารางที่ 5.5 ระยะห่าง TxRx ,Path loss ,Time of available ของแบบจำลองที่ 5	62
ตารางที่ 5.6 ระยะห่าง TxRx ,Path loss ,Time of available ของแบบจำลองที่ 6	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 แนวคิดและที่มาของโครงการ

การออกแบบและวางแผน โครงข่ายระบบสื่อสารแบบไร้สายที่ดี จะทำให้โครงข่ายระบบสื่อสารแบบไร้สายมีประสิทธิภาพสามารถให้บริการที่มีคุณภาพครอบคลุมพื้นที่บริการ และมีระดับกำลังสัญญาณที่เพียงพอ เพื่อให้เสาสัญญาณภาครับและภาคส่งติดต่อสื่อสารกันได้ ถือเป็นหัวใจสำคัญในการสร้างโครงข่ายระบบสื่อสาร นักวิจัยหลายท่านมุ่งที่จะพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเชิงวิเคราะห์ โดยกรรมวิธีเชิงรังสีให้มีความถูกต้องแม่นยำ เพื่อที่จะสามารถนำผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่น ไปประกอบการวางแผนและออกแบบตำแหน่งที่ตั้งเสาสัญญาณ เพื่อแก้ไขปัญหาพื้นที่ครอบคลุมของ โครงข่ายระบบสื่อสารแบบไร้สาย และพัฒนาให้สามารถนำผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่น ไปช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพสัญญาณ

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายนอกอาคารของระบบสื่อสารแบบไร้สาย เป็นเครื่องมือที่สามารถช่วยในการออกแบบระบบสื่อสารแบบไร้สายที่ให้ครอบคลุมพื้นที่บริการได้อย่างทั่วถึง และมีการใช้ทรัพยากรความถี่ที่มีอยู่จำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อให้ผู้ใช้บริการได้รับบริการที่มีคุณภาพ ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากการใช้โปรแกรม Raplab 4.0 สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการออกแบบระบบสื่อสารแบบไร้สาย ดังนั้นแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจึงได้รับการพัฒนาเรื่อยมา เพื่อให้สามารถแสดงผลได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว โดยใช้ฐานข้อมูลน้อยที่สุด

Ray Tracing เป็นวิธีการที่นำคอมพิวเตอร์กราฟฟิคกับทฤษฎีเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้ามารวมกัน เพื่อที่จะตรวจสอบการทำงานของ การแพร่กระจายคลื่น ในช่องสัญญาณ ไวร์เลส ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยพื้นฐานรังสีเริ่มจากเครื่องส่ง ไปยังเครื่องรับสลับกับการแพร่กระจายของวัตถุ เช่น การสะท้อนของพื้นผิว (Reflection) การแตกกระจายของคลื่น (Diffraction) การกระจัดกระจาย (Scattering) และการส่ง (Transmission) ด้วยรูปแบบข้อมูลของการแพร่กระจายวัตถุ รังสีที่ได้รับอาจถูกตาม และขอบเขตของรังสีจะถูกคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีของ Geometrical Optics (GO) และ Uniform Theory of diffraction (UTD) และอื่นๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นภายในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคาร โดยใช้ Ray-tracing

1.2.2 เพื่อทำการออกแบบ โมเดลและการเลียนแบบด้วย โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.2.3 เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการเลียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์เทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ

1.2.4 เพื่อทำการประเมินผลในการศึกษาทดลองวิจัย

## 1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ทำให้ได้รับความรู้เกี่ยวกับการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ

1.3.2 ทำให้สามารถเปรียบเทียบผลที่ได้จากการเลียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์กับผลที่ได้จากการคำนวณ

1.3.3 สามารถนำผลจากการทดลองจากแบบจำลอง ไปประยุกต์ใช้ในการวางเสาสัญญาณ สำหรับพื้นที่จริง

## 1.4 ขอบเขตของโครงการ

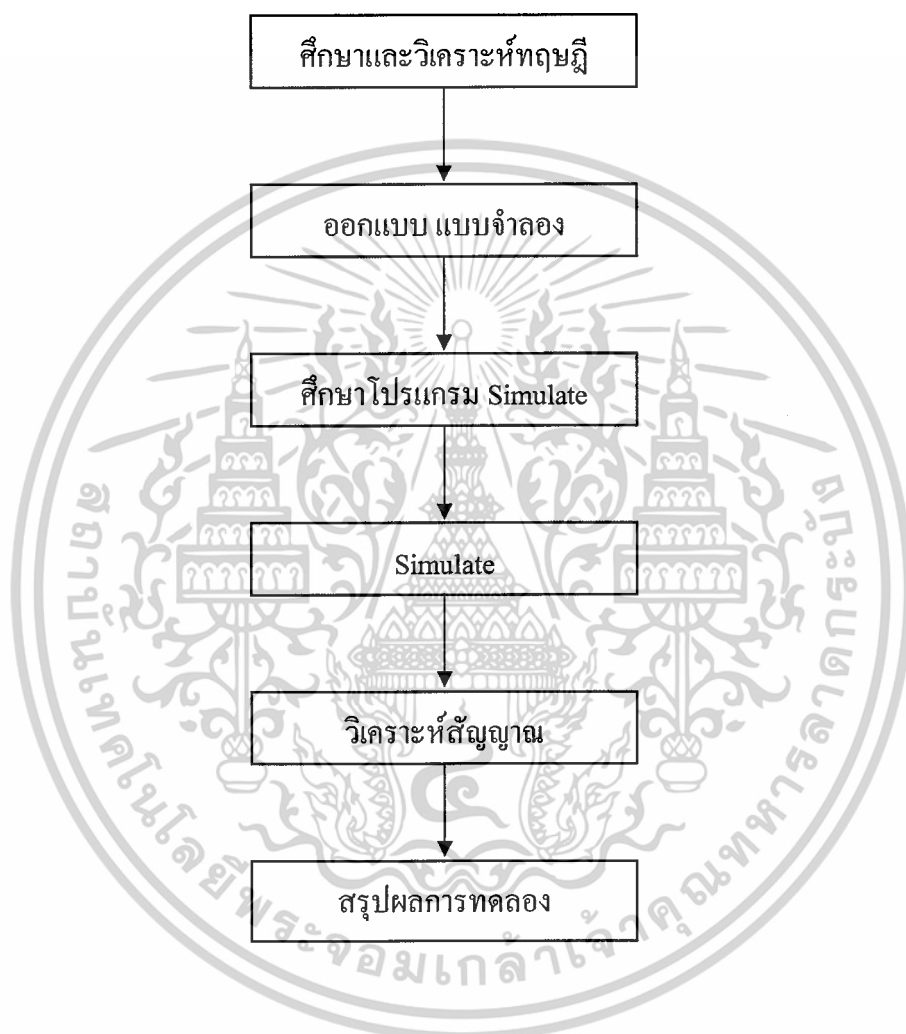
1.4.1 ทำการศึกษาสัญญาณ Wireless ในการวิเคราะห์เส้นทางของคลื่นสัญญาณ โดยใช้วิธี Ray-Tracing

1.4.2 ทำการกำหนดขอบเขตของกรวัดระยะห่างของคลื่นสัญญาณระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งสัญญาณ

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการดำเนินโครงการได้แบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนในการทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 โครงประกอบของปริญญาานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ แนวคิดที่มา วัตถุประสงค์ ผลที่คาดว่าจะได้รับ ขอบเขตของโครงการ และขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีโดยรวมที่นำมาใช้ใน โครงการงานนี้จะประกอบด้วยพื้นฐานทฤษฎี สายอากาศ และการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของ Ray-Tracing และแสดงตัวอย่างการคำนวณด้วย ทฤษฎี

บทที่ 4 กล่าวถึงการทำให้แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม SketchUp

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอผลที่ได้จากการเลียนแบบด้วย โปรแกรม Raplab 4.0 มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยทฤษฎี

บทที่ 6 เป็นการกล่าวถึงบทสรุปของการวิจัยในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมด พร้อมทั้ง ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางในการพัฒนา



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

### สายอากาศและการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ (Antenna and Radio Wave Propagation)

#### ทฤษฎีเบื้องต้น

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยทฤษฎีรังสีมีพื้นฐานอยู่บนหลักการทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเวกเตอร์ ทฤษฎีเหล่านี้ใช้การประมาณเข้ามาประมาณพฤติกรรมของคลื่นวิทยุของย่านความถี่สูง เพื่อลดรูปของปัญหาให้มีความซับซ้อนน้อยลง และสะดวกต่อการแก้ปัญหาที่มากกว่าการใช้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าวิเคราะห์โดยตรง

#### 2.1 ขอบข่ายของทฤษฎีสายอากาศ [2]

สายอากาศหรือเสาอากาศที่เรียกกันโดยทั่วไป เป็นส่วนที่ใช้แพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุออกไปตามการออกแบบใช้งานของสายอากาศ ส่วนความถี่ใช้งานนั้นจะถูกออกแบบให้ใช้ตามย่านความถี่นั้นๆ เฉพาะ ไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้ เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ 2.4 GHz ต้องใช้กับสายอากาศ 2.4 GHz เท่านั้น (ยกเว้นอุปกรณ์ภาครับอย่างเดียว เช่น วิทยุ FM-AM)

คุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ คือ รูปแบบของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งการวัดรูปแบบของการแพร่กระจายคลื่นกับรูปแบบของคลื่นกับขนาดของคลื่น และการออกแบบระยะทางของสายอากาศจะถูกระบุต่อไป

ลักษณะสภาพแวดล้อมที่สายอากาศทำการติดตั้งอยู่ อาจจะทำให้รูปแบบการแพร่กระจายของคลื่นต่างกันไป ในทิศทางการแพร่กระจายคลื่นจะถูกแสดงโดยขนาด เฟส และโพลาไรเซชัน

ข้อมูลของความสัมพันธ์อาจจะถูกเปลี่ยนไปเป็นค่าความสัมพันธ์ผ่านข้อมูลที่ได้รับการวัดแกนของสายอากาศ การตัดสินค่าเกณฑ์และโคเรลติวิตี

พลังงานที่ถ่ายมาจากเครื่องกำเนิดไปยังสายอากาศจะถูกควบคุมโดยค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งค่าอินพุตอิมพีแดนซ์นี้จะถูกใช้ในวงจรจำกัดค่าแบนด์วิธของสายอากาศ

สายอากาศแบบที่วางบนพื้นเพื่อรับสัญญาณ ในกรณีนี้พื้นดินจะถูกพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของสายอากาศด้วย

สายอากาศและวงจรคุณสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดสัญญาณด้านส่งอาจทำให้เกิดผลต่อพลังงาน โดยรวม ไปถึงพลังงานเฉลี่ยหรือพลังงานสูงสุด ซึ่งเป็นความสามารถทางการแพร่กระจายกระบวนการทดสอบ

ข้อพิจารณาอีกข้อหนึ่งของสายอากาศ คือ การแพร่กระจายคลื่นซึ่งเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟถ้ามีความเข้มมากๆ จะทำให้เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อทางชีวภาพได้ ซึ่งเรากำหนดค่าความเข้มไว้ที่ระดับหนึ่ง

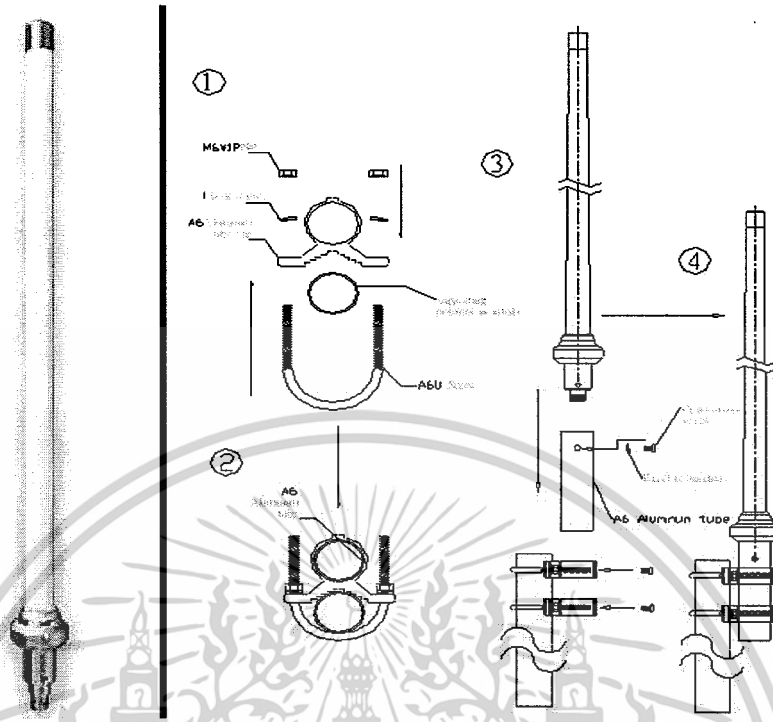
สายอากาศเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการสื่อสารในระบบวิทยุ สายอากาศใช้เพื่อกระจายคลื่นวิทยุออกจากตัวมันทางด้านเครื่องส่งและใช้ดักจับเอาคลื่นวิทยุเข้าสู่ตัวมันทางด้านรับ ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern) ความกว้างลำคลื่น (Bandwidth) อัตราขยาย (Gain) อิมพีแดนซ์ (Impedance) และการโพลาไรซ์ (Polarization) เป็นต้น

### 2.1.1 ประเภทของสายอากาศ

สายอากาศรอบตัว (Omni-directional) จะออกอากาศในแนวอน 360 องศา (เป็นค่าตายตัวของสายอากาศประเภทนี้) ส่วนแนวตั้งขึ้นอยู่กับอัตราขยาย โดยส่วนใหญ่จะอยู่ที่ 2 – 18 dBi สายอากาศทิศทาง (Directional) จะมีทั้งแบบกึ่งทิศทางและแบบทิศทาง

- แบบกึ่งทิศทาง (Dipole, Patch panel, Sector) การแพร่กระจายคลื่นจะออกมารอบทิศทาง แต่จะเน้นออกไปทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราขยาย
- แบบทิศทาง (Yagi-Uda, Helical (Helix), Grid) จะเน้นทิศทางด้านหน้ามากกว่าแบบอื่นๆ และสัญญาณด้านหลังและด้านข้างจะแพร่กระจายออกมาน้อยมาก ส่วนใหญ่อัตราขยายจะสูงกว่า 20 dBi

สายอากาศแบบ Helical (Helix) หรือสายอากาศก้นหอย จะมีความพิเศษอยู่ตรงที่ลักษณะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมา จะมีทั้งแนวตั้งและแนวอน ทำให้สายอากาศภาครับไม่จำเป็นต้องทำแนวเดียวกับสายอากาศต้นทางที่เป็น Helical และค่าสัดส่วนอัตราขยายหน้า/หลัง (Front/back ratio) มีอัตราที่ดีมาก แต่ก็เป็นสายอากาศที่สร้างยากอีกด้วย



รูปที่ 2.1 สายอากาศแบบ Omni-Directional

ค่า SWR (Standing Wave Ratio) หรือ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) เป็นส่วนสำคัญที่สุดในการตรวจสอบว่า สายอากาศที่ใช้อยู่มีประสิทธิภาพเพียงใด โดยค่ามาตรฐานจะอยู่ที่ 1.1:1 – 1.5:1 กรณีเลวร้ายสุดไม่ควรเกิน 2:1

สัดส่วนนี้เป็นสัดส่วนระหว่างกำลังส่งที่ถูกส่งออกไปต่อกำลังส่งที่ถูกสะท้อนกลับมา ตัวอย่างเช่น

สายอากาศใช้ในความถี่ 2.4 – 2.5 GHz ต้องใช้ค่ากึ่งกลางมาคำนวณการทำสายอากาศ คือ 2.45 GHz ซึ่งจะได้ค่าออกมาเป็น  $29980 / 2450 = 12.2367$  เซนติเมตร และถ้าคำนวณความถี่ปลายจะได้ค่าเป็น 2.4 GHz = 12.4917 ซม. และ 2.5 GHz = 11.992 ซม. แต่ในหลักความเป็นจริงสายอากาศไม่สามารถยืดหดความยาวตามความถี่ใช้งานได้ จึงต้องใช้ค่ากึ่งกลางและนำมาคำนวณ เพื่อให้สามารถใช้งานได้ตลอดทั้งย่านความถี่ที่จะใช้งาน โดยค่า SWR อาจจะเป็นลักษณะดังนี้

2.400 GHz = 1.5:1 (Ch. 1)

2.425 GHz = 1.3:1 (Ch. 4)

2.450 GHz = 1.1:1 (Ch. 7)

2.475 GHz = 1.3:1 (Ch. 10)

2.500 GHz = 1.5:1 (Ch. 13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณ ทำให้สามารถอธิบายได้ว่าในจำนวนช่องสัญญาณ 13 ช่อง ทำไมช่องสัญญาณที่ 7 จึงมีความแรงสูงสุด เพราะอยู่ในช่วงที่สายอากาศมีประสิทธิภาพสูงสุดนั่นเอง ซึ่งการคำนวณค่า SWR ที่แท้จริงจะซับซ้อนกว่านี้ ในที่นี้จึงเป็นการอธิบายแบบคร่าวๆ เท่านั้น และเครื่องมือวัด SWR Meter จะระบุย่านความถี่และกำลังส่งที่สามารถวัดได้

### 2.1.2 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain: dB)

เป็นตัวบ่งบอกอัตราขยายของสายอากาศนั้นๆ ว่าสามารถขยายกำลังที่ถูกส่งเข้ามาที่สายอากาศ และแพร่กระจายออกไปได้ไกลเท่าไร โดยหน่วยของอัตราขยายจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

dB<sub>i</sub> เป็นหน่วยของอัตราขยายเทียบกับสายอากาศแบบ Isotropic

dB<sub>d</sub> เป็นหน่วยของอัตราขยายเทียบกับสายอากาศแบบ Dipole

โดยที่  $2.15 \text{ dB}_i = 0 \text{ dB}_d$

อัตราขยายยิ่งสูง ระยะทางยิ่งไปได้ไกลขึ้น แต่องศาในการกระจายคลื่นจะยิ่งแคบลง อธิบายง่ายๆ ด้วยวงแหวนยางยืด อัตราขายน้อย คือ วงแหวนแบบปกติ อัตราขยายสูง คือ วงแหวนที่ถูกจับยืดออก (ระยะทางมากขึ้น แต่องศากระจายคลื่นน้อยลง)

### 2.1.3 กำลังส่ง

เป็นกำลังที่ใช้ผลักดันสัญญาณวิทยุให้ออกไปสู่ปลายทาง มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) ส่วนกำลังส่งย่อยลงไปจะมีหน่วยเป็นมิลลิวัตต์ (mW: 1/1000 W) หน่วยของกำลังส่งอีกแบบหนึ่ง คือ การแปลงค่าจาก mW เป็น dBm เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณค่า E.I.R.P. และค่า E.R.P.

กำลังส่งยิ่งสูง สัญญาณวิทยุยิ่งไปได้ไกล แต่ต้องอยู่ในความสมดุลของอุปกรณ์ เพราะถ้ากำลังส่งสูงเกินไปจนทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ในอุปกรณ์ Wireless เสียหาย เช่น ภาคกรองความถี่อาจจะเกิดคลื่นวิทยุที่ไม่พึงประสงค์ออกมารบกวนอย่างรุนแรงได้

กรณีที่กำลังส่งเท่ากัน สายอากาศประเภทเดียวกันและอัตราขยายเท่ากัน ความถี่วิทยุที่ต่ำกว่าจะไปได้ไกลกว่า เนื่องจากอัตราการสูญเสียสัญญาณน้อยกว่า และการเดินทางของสัญญาณมีลักษณะกระจายมากกว่า เช่น กำลังส่ง 1 วัตต์ที่ความถี่ 7 MHz เสาสูง 20 เมตรจากไทยสามารถส่งไปได้ถึงหมู่เกาะมัลดีฟส์ ฝั่งทะเลตะวันตกของอินเดีย ส่วนกำลังส่ง 1 วัตต์ที่ความถี่ 2.4 GHz เสาสูง 20 เมตรอาจจะไปได้ 20 กิโลเมตร โดยประมาณ (ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น สภาพอากาศ ความชื้น ตำแหน่งความสูงของสายอากาศ เป็นต้น)

### 2.1.4 ตำแหน่งความสูงของสายอากาศ

ตำแหน่งความสูงของสายอากาศจะมีค่าแปรผันตามความถี่วิทยุ ยิ่งความถี่สูงขึ้น ลักษณะการแพร่กระจายจะเข้มข้นขึ้นและกระจายตัวน้อยลง ทำให้ได้รับผลกระทบจากส่วนโค้งของโลกโดยตรง จึงต้องติดตั้งสายอากาศให้สูงขึ้น

### 2.1.5 สิ่งบดบัง

สิ่งบดบังที่อยู่ระหว่างทางจะมีผลกระทบในการรับ-ส่งสัญญาณ โดยเฉพาะความถี่วิทยุที่สูงขึ้น ยิ่งเกิดผลกระทบมากขึ้น วัสดุที่ดูดซับหรือบดบังสัญญาณได้มากที่สุด คือ วัสดุที่มีความชื้นสูงหรือความหนาแน่นสูง เช่น ม่านน้ำตก ต้นไม้ที่ขึ้นหนาแน่น คอนกรีตเสริมเหล็กหนา เป็นต้น

### 2.1.5 เสา (Tower)

มีหลายรูปแบบให้เลือกใช้งานตามพื้นที่ที่ต้องการใช้งาน Guy wired ใช้ลวดสลิงเป็นตัวพุงเสา น้ำหนักเสาเบาแต่จะใช้พื้นที่ค่อนข้างมาก ถ้าใช้แบบท่อเหล็กเดี่ยว ไม่ควรสูงเกิน 12 เมตร เนื่องจากความยากลำบากในการซ่อมบำรุง Self support ใช้ตัวเสาเป็นตัวพุงเสาของมันเอง ใช้พื้นที่น้อยกว่า แต่น้ำหนักมาก เพราะต้องรักษาระดับด้วยตัวมันเอง มีทั้งแบบที่ทำจากเหล็กและอลูมิเนียม และการตั้งเสาสูงต้องอยู่ในกฎข้อบังคับของกรมการขนส่งทางอากาศด้วย

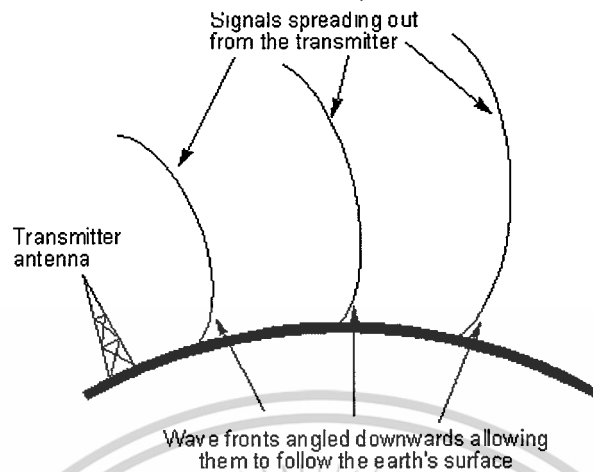
## 2.2 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ [4]

คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น จะมีการแพร่กระจายออกไปทุกทิศทาง คลื่นวิทยุเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเดินทางไปด้วยความเร็วเท่ากับแสง แต่อย่างไรก็ดี คลื่นวิทยุที่มีความถี่ไม่เท่ากัน คุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นก็ไม่เหมือนกัน ในพื้นที่ไกลออกไปสัญญาณที่เครื่องรับจะรับได้ก็อ่อนลงๆ ไปเรื่อยๆ

### 2.2.1 คลื่นพื้นผิว (Surface wave หรือ Ground wave)

คลื่นพื้นผิวเป็นคลื่นวิทยุที่เดินทางไปบนผิวโลก เราสามารถใช้คลื่นพื้นผิวในการติดต่อสื่อสารย่าน LF และ MF ปกติคลื่นพื้นผิวมีความยาวคลื่นที่ยาวมาก จะเดินทางไปได้ไกลกว่า (losses rise with increasing frequency) และจะเดินทางไปได้ไกลกว่าระยะขอบฟ้า คลื่นพื้นผิวที่มีความถี่สูงๆ จะไปไม่ได้ไกล เพราะถูกลดทอนมาก เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศ และสิ่งกีดขวางเห็นผลก็คือ เมื่อความถี่สูงขึ้น ความยาวคลื่นก็จะสั้นลง วัตถุใหญ่ อย่างเช่น ภูเขาจึงมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น เช่น ที่ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การแพร่กระจายคลื่นแบบ Ground wave [4]

การแพร่กระจายคลื่นแบบ Ground wave เราจะใช้สำหรับการสื่อสารระยะสั้น ในเวลากลางวัน เพราะว่าการแพร่กระจายคลื่นแบบ Sky-wave ไม่สามารถที่จะทำได้ในกลางวัน (สำหรับย่านนี้ เพราะมีการดูดกลืน ลดทอนสัญญาณ จากชั้น D)

### 2.2.2 ผลกระทบของความถี่ (Effect of frequency)

ในส่วนของหน้าคลื่น (Wave fronts) ของการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ สัญญาณจะถูกลดทอน โดยพื้นผิวของโลก ระดับของการลดทอนจะมีปัจจัยหลาย ๆ อย่าง สำหรับความถี่ใช้งานก็เป็นส่วนหนึ่งที่จะกำหนดอัตราการลดทอน คือว่า เมื่อความถี่สูงขึ้น การลดทอนสัญญาณก็จะมากขึ้น สำหรับความถี่ 3 MHz จะถูกลดทอนมากกว่าความถี่ 0.5 MHz ถึงประมาณ 20 - 60 dB ความถี่ต่ำมาก หรือ Very low-frequency (VLF ความถี่ต่ำกว่า 300 kHz) ถ้าใช้การแพร่คลื่นแบบ vertically polarized จะมีการลดทอนสัญญาณน้อยมาก สามารถติดต่อได้ไกลหลาย 100 ไมล์ สำหรับย่านความถี่ปานกลาง medium-wave band (300 to 3000 kHz รวมไปถึงวิทยุกระจายเสียง AM) สามารถไปได้ไกลกว่า 1,000 ไมล์ในเวลากลางคืน แต่พอมาถึงย่าน HF จะมีการสูญเสียมาก (reduces drastically) พอถึงความถี่ช่วงปลายๆ ของย่าน HF การแพร่กระจายคลื่นแบบนี้จะหยุดลง (ไปได้แค่ไม่กี่ 10 ไมล์)

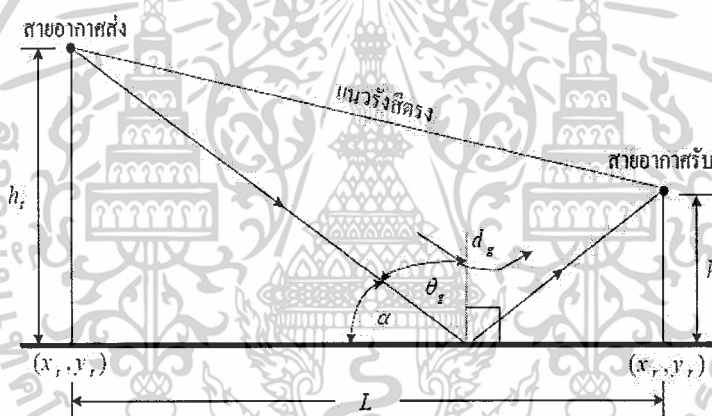
### 2.2.3 ผลกระทบของพื้นผิว (Effect of the ground)

ค่าความเป็นตัวนำ (Ground conductivity) ของพื้นผิวโลก ภูมิประเทศ และความขรุขระของพื้นผิว ล้วนมีผลต่อการลดทอนสัญญาณของความถี่ย่านนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.1 การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ

ในส่วนต่อนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของพื้นผิวต่อการส่งผ่านสัญญาณ โดยเปรียบเทียบกับ การส่งผ่านสัญญาณในอากาศว่าง ทั้งนี้สมมติให้การส่งผ่านสัญญาณนี้เกิดขึ้นในบริเวณที่มีพื้นผิวเรียบ ไม่มีสิ่งก่อสร้างใดๆ หรือเนินเขาในบริเวณนั้นเลย ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จะประกอบด้วยสัญญาณเพียง 2 ส่วน คือ ส่วนที่แพร่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยตรง และส่วนที่สะท้อนจากพื้นผิวดังที่แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างจากในกรณีของการส่งผ่านสัญญาณในอากาศว่างตรงที่ ได้รับสัญญาณเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งสัญญาณจากส่วนที่สะท้อนกับพื้นผิว และเราจะเรียกการสูญเสียของสัญญาณในสภาพแวดล้อมลักษณะนี้ว่า การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ (Plane path loss) ถ้าหากเราสมมติว่าพื้นผิวที่สะท้อนมีลักษณะราบเรียบและมีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดัดคลื่นที่กระทบกับผิวจะสะท้อนออกเกือบทั้งหมด โดยที่มีเฟสเปลี่ยนไป 180 องศา



รูปที่ 2.3 การสูญเสียเชิงวิถีเนื่องจากพื้นผิวเรียบ[4]

### 2.2.4 Effect of polarization

รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศส่งผลกระทบต่อ การลดทอนสัญญาณ สายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบ Vertical polarization จะมีการลดทอนน้อยกว่า การแพร่กระจายคลื่นแบบ horizontally polarization บางครั้งอาจจะดี มากกว่า 10 dB วิทยูกระจายเสียงในย่าน MF (วิทยู AM) จะใช้การแพร่กระจายคลื่นแบบ Vertical polarization แต่ที่โครงสร้างของสายอากาศจะยาว เราแก้ปัญหาโดยการใช้ Loading Coil

### 2.2.5 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ

คุณสมบัติของสายอากาศในทางทฤษฎีจะมีรูปลักษณะการกระจายคลื่นสองแบบ คือ

- แนวตั้ง (Vertical) จะมองการแพร่กระจายคลื่นจากมุมมองด้านข้างของสายอากาศ
- แนวนอน (Horizontal) จะมองการแพร่กระจายคลื่นจากมุมมองด้านบนของสายอากาศ

แต่ในความเป็นจริงการกระจายคลื่นมีหลายรูปแบบทั้งแบบแนวสายตา สะท้อนวัตถุ สะท้อนผิวโลกหรือชั้นเมฆ ขึ้นอยู่กับระยะทาง สิ่งกีดขวาง ฯลฯ

### 2.2.6 การพิจารณาปัญหาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ใช้กรรมวิธี Computer graphic (Ray Tracing) ซึ่งพิจารณาให้ลำรังสีเหล่านี้แพร่กระจายในสภาพแวดล้อมที่เป็นพื้นที่ว่างเปล่า เพื่อตรวจสอบความถูกต้องระหว่างทฤษฎีกับผลการจำลอง และพิจารณาลำรังสีแพร่กระจายในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางเป็นอาคาร

### 2.2.7 กลไกเบื้องต้นของการแพร่กระจาย

การสะท้อน การเลี้ยวเบน และการกระจัดกระจาย เป็นกลไกเบื้องต้นของการแพร่กระจายที่ส่งผลกระทบต่อระบบตัวกลางการเคลื่อนที่ กำลังงานที่รับได้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่ถูกทำนายจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น โดยจะอธิบายได้จากการอ้างอิงกลไกทั้งสามกลไกนี้

- การสะท้อนกลับ (Reflection) เกิดเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางไปตกกระทบกับวัตถุที่มีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับความยาวของคลื่นที่ตกกระทบนั้น จะเกิดกับการสะท้อนกลับที่เกิดจากพื้นผิวของโลก อาคาร หรือจากกำแพง
- การเลี้ยวเบน (Diffraction) เกิดจากเส้นทางของคลื่นระหว่างตัวส่งและตัวรับถูกบดบังด้วยวัตถุที่ซึ่งมีพื้นผิวซึ่งมีขอบแหลม คลื่นรองที่เกิดหลังจากวัตถุนั้นจะมีการเลี้ยวของเส้นทางของคลื่นจะเกิดจากยอดของภูเขา
- การกระจัดกระจาย (Scattering) เกิดจากการที่คลื่นเดินทางไปกระทบวัตถุที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ทำให้เกิดการกระจัดกระจายของคลื่นที่วัตถุนั้นๆ จะเกิดจากป้ายบนถนนเสาไฟฟ้า ซึ่งจะพบมากในระบบตัวกลางสารเคลื่อนที่

### 2.2.8 สัญญาณที่ทะลุผ่านเข้าไปในอาคาร

กำลังงานที่รับได้ในอาคารเนื่องจากตัวส่งภายนอกนั้นสำคัญสำหรับระบบไร้สายที่ใช้ความถี่ร่วมกันกับอาคารใกล้เคียงหรือระบบภายนอก จากการวัดค่าการแพร่กระจายภายในอาคารระหว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นของอาคารนั้นขาดต่อการจำลองแบบจำลองที่แน่นอน จึงมีงานวิจัยเพียงไม่กี่งานที่ออกมาให้ศึกษา ในการวัดจริงที่ผ่านมามีการพบว่ากำลังงานที่รับได้ภายในอาคารนั้นแปรผันตามความสูง ที่ชั้นที่ต่ำกว่ามีสัญญาณที่ถูกลดทอนมากขึ้น และมีสัญญาณทะลุผ่านน้อยลงที่ชั้นที่สูงกว่าอาจะพบ

การทะลุผ่าน RF (RF Penetration) ถูกพบในรูปของฟังก์ชันของความถี่และความสูงภายในอาคาร รูปแบบของสายอากาศในระนาบเอเลเวชันนั้นมีเป็นตัวแปรสำคัญต่อความเข้มของสัญญาณที่ได้รับจากภายนอกด้วย การวัดจริงส่วนใหญ่มักจะพิจารณาตัวส่งที่อยู่ภายนอกด้วยความสูงของสายอากาศที่น้อยกว่าความสูงสูงสุดของอาคารที่ศึกษา การวัดในเมืองลิเวอร์พูลแสดงให้เห็นว่าค่าความสูญเสียที่ทะลุผ่านจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น โดยสามารถวัดค่าการลดทอนการทะลุผ่านที่ชั้นพื้นดินได้มีค่า 16.4 dB, 11.6 dB และ 7.6 dB โดยที่มีความถี่ 441 MHz, 896.5 MHz และ 1400 MHz ตามลำดับ ส่วนการวัดโดย Turkmani โดยสามารถวัดค่าการลดทอนการทะลุผ่านได้ 14.2 dB, 13.4 dB และ 12.8 dB ที่ความถี่ 900 MHz, 1800 MHz และ 2300 MHz ตามลำดับ โดยวัดโดยใช้ค่าการสูญเสียการทะลุ 6 dB โดยเฉลี่ยและจะวัดกับอาคารที่มีหน้าต่าง มากกว่าอาคารที่ไม่มีหน้าต่าง

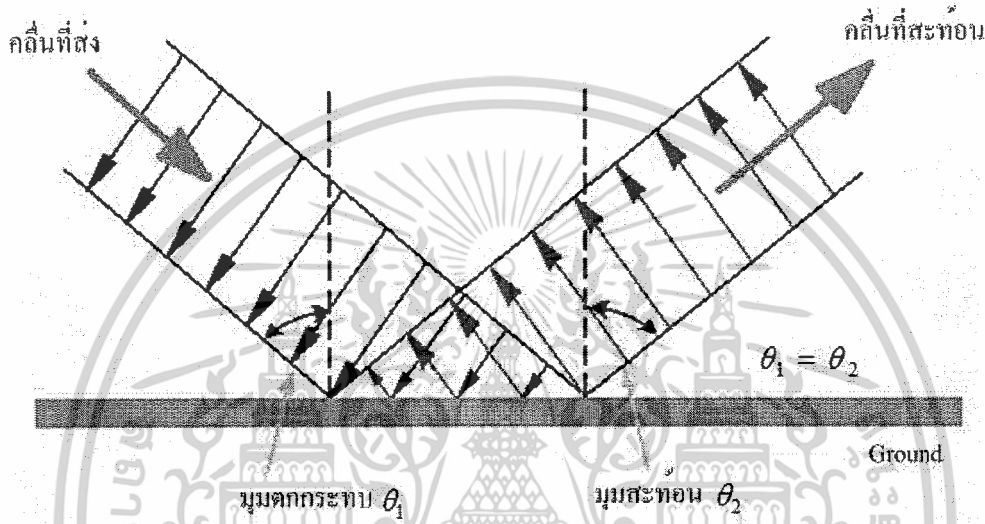
Walker วัดสัญญาณวิทยุจาก 14 อาคารในชิคาโก ได้ จากตัวส่งภายนอกแบบเซลลูลาร์ 7 ตัว ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าการสูญเสียจากการทะลุผ่านลดลงในอัตราประมาณ 1.9 dB ต่อชั้น นับจากชั้นพื้นดินไปจนถึงชั้นที่ 15 และเริ่มเพิ่มขึ้นอีกครั้งจากชั้นที่ 15 การเพิ่มขึ้นของค่าการสูญเสียจากการทะลุผ่านบนชั้นที่สูงกว่าถูกอ้างจากผลจากเงาของอาคารข้างเคียง Turkmani รายงานว่าค่าการสูญเสียจากการทะลุมีอัตราลดลงประมาณ 2 dB ต่อชั้นจากชั้นพื้นดินจนถึงชั้นที่ 9 และเริ่มเพิ่มขึ้นจากชั้นที่ 9 เป็นต้นไป ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันยังถูกรายงาน โดย Durante ด้วย

การวัดแสดงให้เห็นว่าจำนวนของหน้าต่างเมื่อเปรียบเทียบกับผิวหน้าของอาคารมีผลต่อค่าความสูญเสียจากการทะลุผ่านด้วย รวมไปถึงวัสดุที่ใช้ทำหน้าต่างก็ส่งผลเช่นกัน Horishiki อธิบายว่า ส่วนผสมของเหล็กและแก้วส่งผลให้เกิดการลดทอน 3 dB ถึง 30 dB มุมตกกระทบของคลื่นที่ส่งมาก็มีผลอย่างมากต่อค่าความสูญเสียเช่นกัน

### 2.3 การสะท้อน (Reflection) [6]

เมื่อคลื่นวิทยุเดินทางจากตัวกลางหนึ่ง ไปสู่อีกตัวกลางหนึ่งที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คลื่นวิทยุบางส่วนจะเกิดการสะท้อนและบางส่วนจะเกิดการส่งผ่านไป และถ้าระนาบของคลื่นที่ตกกระทบบนวัตถุชนิดไดอิเล็กตริกสมบูรณ์แบบ (Perfect dielectric) จะพบว่าบางส่วนของพลังงานจะเดินทางผ่านไปในตัวกลางที่ 2 และบางส่วนสะท้อนกลับไปในตัวกลางที่ 1 จะไม่มีการสูญเสียพลังงานในการดูดซับพลังงานของตัวกลาง และถ้าตัวกลางที่ 2 เป็นวัตถุชนิดตัวนำสมบูรณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

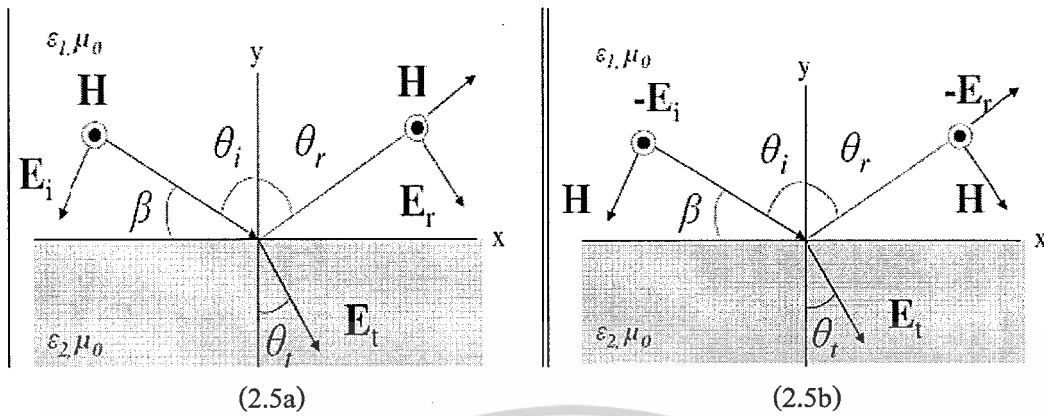
แบบ (Perfect conductor) จะพบว่าพลังงานทั้งหมดที่ตกกระทบจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางที่ 1 โดยไม่มีการสูญเสียกำลังงาน และความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สะท้อนและส่งผ่านนั้นจะมีความสัมพันธ์กับคลื่นที่ตกกระทบและคุณสมบัติของตัวกลางที่ 2 ที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรสเนล (Fresnel reflection coefficient) โดยทั่วไปนั้นขึ้นอยู่กับการโพลาไรซ์เซชัน มุมตกกระทบและความถี่ของคลื่นวิทยุ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เกิดจากการสะท้อน [6]

### 2.3.1 การสะท้อนจากวัตถุนิติโคอีเล็กตริก

จากรูปที่ 2.5 แสดงถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบที่มุม  $\theta_i$  กับระนาบของตัวกลางไดอิเล็กตริกทั้งสองตัว และจากรูปจะพบว่ากำลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางที่ 1 ด้วยมุม  $\theta_r$  และกำลังงานบางส่วนจะส่งผ่านไปในตัวกลางที่ 2 ด้วยมุม  $\theta_t$  โดยธรรมชาติของการสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงตามทิศทางของการโพลาไรซ์เซชันของสนามไฟฟ้า ซึ่งจะพิจารณาของ 2 กรณีดังรูปที่ 2.5a แสดงถึงการโพลาไรซ์เซชันของสนามไฟฟ้าที่ขนานกับระนาบของการตกกระทบ และรูปที่ 2.5b แสดงถึงการโพลาไรซ์เซชันของสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบ



**รูปที่ 2.5a** การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและ **2.5b** การสะท้อนของสนามไฟฟ้า [6]

จากรูปที่ 2.5a และ 2.5b  $i, r, t$  หมายถึงสนามของการตกกระทบ การสะท้อนและการส่งผ่านตามลำดับและค่า  $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$  และ  $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$  หมายถึงค่าสภาพยอม (Permittivity) ความซาบซึมได้ (Permeability) และความนำไฟฟ้า (Conductance) ของตัวกลางทั้งสองตามลำดับ บ่อยครั้งที่ค่าคงที่ทางไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดไดอิเล็กตริกสมบูรณแบบ (ไม่มีการสูญเสีย) จะมีค่าสภาพยอมสัมพันธ์ ( $\epsilon_r$ ) เช่น  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  โดยที่  $\epsilon_0$  คือค่าคงที่  $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  และถ้าวัสดุไดอิเล็กตริกแบบมีการสูญเสียน้อยจะเกิดการสูญเสียพลังงาน และสามารถอธิบายในรูปของค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกที่ซับซ้อน (Complex dielectric)

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r - j\epsilon \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$\epsilon = \frac{\sigma}{2\pi f} \quad (2.2)$$

ซึ่งค่า  $\sigma$  คือ ค่าสภาพนำ (Conductivity) ของวัสดุที่ได้จากการวัดมีหน่วยเป็น Siemens/meter ส่วน  $\epsilon_r$  และ  $\sigma$  โดยทั่วไปจะอ่อนไหวต่อความถี่และเมื่อวัสดุเป็นตัวนำที่ดี ( $f < \sigma/(\epsilon_0 \epsilon_r)$ )

ถ้ากรณีไดอิเล็กตริกแบบมีการสูญเสียน้อย ค่า  $\epsilon_0$  และ  $\epsilon_r$  จะอยู่ในรูปของค่าคงที่ในแต่ละความถี่ แต่  $\sigma$  จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังที่จะแสดงในตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ค่าสภาพยอม และค่าสภาพนำของวัสดุ ไดอิเล็กตริก [6]

Material	Relative permittivity, $\epsilon_r$	Conductivity, $\sigma$ (S/m)	Frequency (MHz)
Poor Ground	4	0.001	100
Typical Ground	1.5	0.005	100
Good Ground	25	0.02	100
Sea water	81	5.0	100
Fresh water	81	0.001	100
Brick	4.4	0.001	4000
Limestone	7.51	0.028	4000
Marble	11.6	-	-
Glass , Corning 707	4	0.00000018	1
Glass , Corning 707	4	0.000027	10
Glass , Corning 707	4	0.005	10000

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากทั้งสองกรณีของการ โพรบ ไรซ์ เซชัน ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางขนานและตั้งฉากในกรณีที่ตัวกลางทั้งสองเป็น ไดอิเล็กตริก

$$\Gamma_h = \frac{\epsilon}{\epsilon_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_i - \eta_1 \sin \theta_i}{\eta_2 \sin \theta_i + \eta_1 \sin \theta_i} \quad (2.3)$$

$$\Gamma_v = \frac{\epsilon}{\epsilon_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_i - \eta_1 \sin \theta_i}{\eta_2 \sin \theta_i + \eta_1 \sin \theta_i} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\eta_i$  คืออินทรินซิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic impedance) ของตัวลําดับที่  $i$  ( $i = 1, 2$ ) ซึ่งคำนวณได้จาก  $\sqrt{\mu_i / \epsilon_i}$  คืออัตราส่วนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสนามแม่เหล็กสำหรับระนาบปกติของคลื่น และความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคำนวณได้จาก  $1/\sqrt{\mu_i / \epsilon_i}$  และจากบริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสองสามารถใช้กฎของ Snell ได้

$$\sqrt{\mu_1 / \epsilon_1} \sin(90 - \theta) = \sqrt{\mu_2 / \epsilon_2} \sin(90 - \theta_i) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น เพื่อการวิจัยเท่านั้น มิฉะนั้นให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากกฎของแมกซ์เวลล์ พบว่า

$$\theta_i = -\theta_t \quad (2.6)$$

และ 
$$E_r = \Gamma E_i \quad (2.7)$$

$$E_t = (1 + \Gamma) E_i \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\Gamma$  แทน  $\Gamma_v$  และ  $\Gamma_h$  ซึ่งขึ้นกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแนวตั้งฉากหรือแนวนอนกับระนาบของการตกกระทบ

สำหรับกรณีในตัวกลางที่หนึ่งเป็นอวกาศว่างและค่า  $\mu_1 = \mu_2$  ถ้าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของทั้งสองกรณีโพลาไรซ์เซชันแนวตั้งและแนวนอน สามารถคำนวณได้ตามสมการด้านล่าง

$$\Gamma_h = \frac{-\epsilon_r \sin \theta + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}}{\epsilon_r \sin \theta + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}} \quad (2.9)$$

$$\Gamma_v = \frac{\sin \theta - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}} \quad (2.10)$$

### Ground Reflection (Two-Ray) Model

กำลังงานที่รับได้ที่ระยะทาง  $d$  สามารถแสดงได้ในเทอมของผลคูณระหว่างความหนาแน่นของกำลังงานฟลักซ์ (power flux density,  $P_d$  ( $W/m^2$ )) และ Effective aperture ของสายอากาศรับ ( $A_e$  ( $m^2$ )) ดังนี้

$$P_d(d) = P_d A_e = \frac{|E|^2}{120\pi} A_e = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (2.11)$$

เมื่อ 
$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} = \frac{|E|^2}{377\Omega} \quad (2.12)$$

และ 
$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (2.13)$$

กำลังงานที่ได้รับได้ที่ระยะทาง  $d$  (ห่างจาก Tx) สำหรับ Two ray ground reflection model ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลนี้ออกไปโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (2.14)$$

ข้อสังเกต เมื่อ  $d$  มีค่ามากๆ แล้วกำลังงานที่รับได้ (received power) และค่าความสูญเสียเชิงวิถี (path loss) จะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่

ค่าความสูญเสียเชิงวิถี (path loss) สำหรับ Two ray model (เมื่อพิจารณาอัตราขยายของสายอากาศ) สามารถแสดงได้ในหน่วย dB ดังนี้

$$PL(dB) = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r) \quad (2.15)$$

### 2.3.2 การสะท้อนจากตัวนำสมบูรณ์

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถเดินทางผ่านไปในวัตถุนำตัวนำสมบูรณ์ ทำให้กำลังงานทั้งหมดสะท้อนกลับไป สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิวของตัวนำจะมีค่าเป็นศูนย์ในตลอดเวลาตามสมการของแมกซ์เวลล์ และคลื่นสะท้อนจะมีค่าเท่ากับขนาดของคลื่นตกกระทบ สำหรับกรณีการโพราไรซ์เซชันของสนามไฟฟ้าในระนาบของการตกกระทบ ดังนั้นที่ขอบเขตของเงื่อนไขจะเป็น

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.16)$$

และ

$$E_i = E_r \quad (2.17)$$

สำหรับกรณีการโพราไรซ์เซชันของสนามไฟฟ้าเป็นแนวอนันต์ ขอบเขตของเงื่อนไขจะเป็นเช่นเดียวกัน

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.18)$$

และ

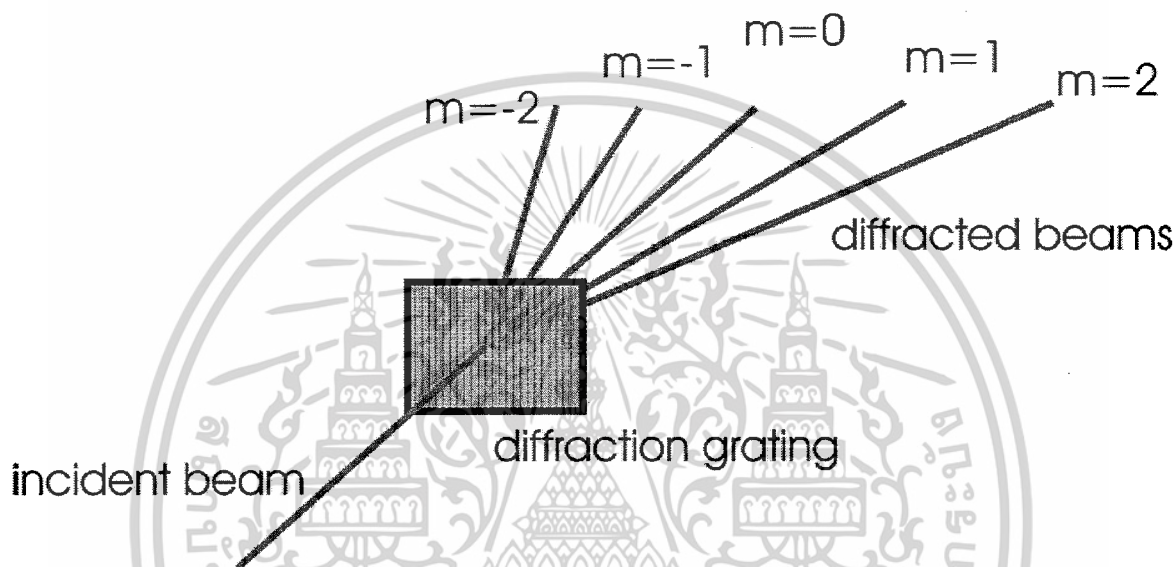
$$E_i = -E_r \quad (2.19)$$

จากสมการทั้งหมด จะพบว่ากรณีที่เป็นตัวนำสมบูรณ์แบบ ค่า  $\Gamma_h = 1$  และ  $\Gamma_v = -1$

## 2.4 การเลี้ยวเบน (Diffraction)[6]

การเลี้ยวเบนของคลื่นเกิดขึ้นในกรณีที่มีวัตถุบางอย่างที่มีขอบกีดขวางทางอยู่ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ ทำให้เกิดการเดินทางของคลื่นระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับผิดไปจากทิศทางในแนวระดับสายตา (LOS) แต่สัญญาณยังสามารถส่งผ่านไปยังเครื่องรับได้ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับความเห็นชอบจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้คือ การเลี้ยวเบน คลื่นจะเดินทางโดยการเลี้ยวอ้อมวัตถุต่างๆ การเลี้ยวเบนของคลื่นนี้เองที่ทำให้เครื่องรับยังสามารถรับสัญญาณได้บางส่วน และบางส่วนก็ถูกลดทอนลงไปบ้าง ในขณะที่เครื่องรับถูกคบบังด้วยสิ่งกีดขวาง จากรูปที่ 2.6 แนวระดับสายตาคือ  $m=0$  และแสดงให้เห็นการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเลี้ยวเบนของการแพร่กระจายคลื่น [6]

## 2.5 การกระจัดกระจาย (Scattering) [6]

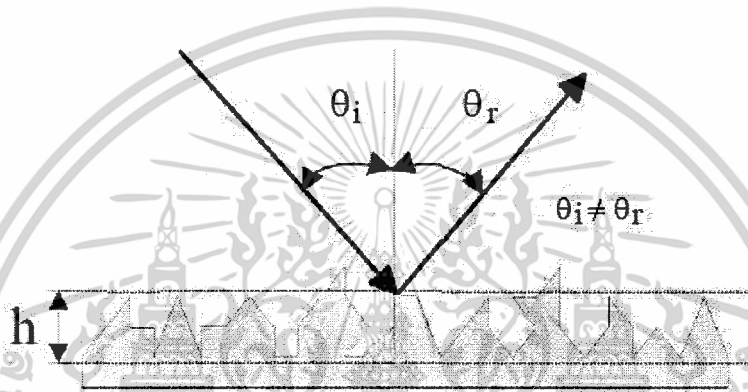
สัญญาณที่ถูกรับซึ่งมีอยู่ในเวลานี้ในสิ่งแวดล้อมของวิทยุเคลื่อนที่ได้แรงกว่าการทำนายสัญญาณที่ถูกระงับและการเลี้ยวเบนของคลื่นเสียงหรือแสงที่ผ่านวัตถุบ่อยๆ เนื่องจากเวลาที่คลื่นวิทยุพุ่งชนบนผิวหยาบพลังงานที่ถูกสะท้อนถูกแพร่กระจายในทิศทางทั้งหมด(ขยายกว้าง)ทำให้เกิดการกระจัดกระจายวัตถุ อย่างเช่นตู้ไปรษณีย์คอมพิวเตอร์ไม้มักจะทำให้การกระจัดกระจายพลังงานในทิศทางทั้งหมด และให้พลังงานวิทยุเพิ่มที่ตัวรับ

ผิวที่ราบเรียบที่มีการขนาดที่ใหญ่กว่าช่วงคลื่นน่าจะถูกสร้างแบบในสถานะผิวที่มีลักษณะสะท้อน อย่างไรก็ตามพื้นผิวที่มีความขรุขระน้อยเช่นนั้น ทำให้เกิดความแตกต่างผลการแพร่กระจายจากการสะท้อน พื้นผิวที่มีความขรุขระน้อยใช้เกณฑ์ของเรย์ลี (Rayleigh) ที่ให้คำจำกัดความความสูงของส่วนที่ยื่นออกหรือความสูงวิกฤต ( $h_c$ ) ในรูปของมุมตกกระทบ ( $\theta_i$ ) บ่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i} \quad (2.20)$$

ดังนั้นถ้าในพื้นผิวไหน มีค่า  $h$  คือระดับความสูงของพื้นผิวมีค่ามากกว่า  $h_c$  จะสามารถกล่าวได้ว่าพื้นผิวนั้นเป็นพื้นผิวที่ขรุขระ แต่ถ้า  $h$  มีค่าน้อยกว่า  $h_c$  จะสามารถกล่าวได้ว่าพื้นผิวนั้นเป็นพื้นผิวที่เรียบ



รูปที่ 2.7 ลักษณะการสะท้อนบนพื้นขรุขระ[6]

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างความนำของพื้นผิวต่างๆ

Type of soil	Dielectric constant	Conductivity (siemens/meter)	Relative quality
Salt water	81	5	Best
Fresh water	80	0.001	Very poor
Pastoral hills	14-20	0.03-0.01	Very good
Marshy, wooded	12	0.0075	Average/poor
Rocky hills	12-14	10	Poor
Sandy	10	0.002	Poor
Cities	3-5	0.001	Very poor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss)

ในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นเป้าหมายหลักของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นคือ การคาดการณ์ถึงค่าความสูญเสียกำลังงานของสัญญาณ  $PL$  เนื่องจากการแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณ โดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างระดับกำลังงานที่ใช้ส่งและระดับกำลังงานที่รับได้ซึ่งโดยทั่วไปมักจะแสดงให้อยู่ในหน่วยของเดซิเบล (Decibel) ดังแสดงในสมการ

$$L_{dB} = 10 \log \left( \frac{4 \pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.21)$$

โดยที่  $\lambda = \frac{c}{f}$

$d$

คือ ความยาวคลื่นในอากาศอิสระ

คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ

## 2.7 แบบจำลองช่องสัญญาณ (Model Channel)

โดยธรรมชาติแล้วการแพร่กระจายหลายส่วนของช่องการส่งสัญญาณ Wireless สามารถทำให้เกิดปัญหาทั้งระบบ High-Speed และระบบ Microwave Band ในระบบ Wireless ได้ ปัญหาเหล่านี้รวมไปถึง Inter Symbol Interference (ISI) ที่เพิ่มขึ้น การแพร่กระจายของ Loss ที่เพิ่มขึ้น เพราะแถบคลื่นวิทยุความถี่ที่สูงขึ้น การแทรกแซงช่องสัญญาณร่วมเพราะขนาดของเซลล์ที่ลดลง

ปัญหาแรกเกิดจากผลกระทบของ Time-domain ของช่องสัญญาณ ที่เหลือเกิดจาก Space-Domain เป็นประเด็นสำคัญ เทคนิคต่อไปนี้จะช่วยแก้ปัญหาได้

- Adaptive Equalizer
- Adaptive interference canceller
- Smart (Adaptive) antenna
- Spread Spectrum (SS) and Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) modulation schemes

สิ่งที่จะต้องมาก่อนที่จะทำการวิเคราะห์และออกแบบเทคนิคพวกนี้คือความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองช่องสัญญาณวิทยุในอุดมคติ

เรามีประเภทของแบบจำลอง 3 ประเภทที่จะสามารถสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณสำหรับประเมินค่าผลของระบบไร้สาย (Wireless) ดังนี้

### 2.7.1 Statistical Modeling

หรือเรียกอีกอย่างว่า Random Model เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพทางการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์มากและยังง่ายในการอนุมานจากข้อเท็จจริง รายละเอียดเกี่ยวกับการสร้างและการจัดวางในพื้นที่เป็นไปอย่างอิสระ และการวัดตัวอย่างของบริเวณพื้นที่ก็มีมาก แบบจำลองนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในเรื่องของการออกแบบเซลล์และการจำลองที่บ่งลักษณะการส่งสัญญาณของระบบ wireless เนื่องจากมีความเรียบง่ายและธรรมชาติของมัน อธิบายได้ง่ายๆว่าเป็นการทำแบบจำลองขึ้นมาจากการช้อนผลข้อมูลทางสถิตินั่นเอง

### 2.7.2 Deterministic Modeling

แบบจำลองนี้คือแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณค่าต่างๆที่แน่นอนแล้วทำการสร้างแบบจำลองขึ้นมา ตัวอย่างในการออกแบบแบบจำลองนี้หาได้ใน Ray Tracing และ FDTD ประโยชน์ คือการคาดเดารายละเอียดของการตอบสนองช่องสัญญาณที่พื้นที่เจาะจง โดยมีหลักการคือแบบจำลองรูปแบบนี้ไม่จำเป็นจะต้องทำการวัดค่าในทางปฏิบัติ ค่าบางค่าที่ได้จากการวัดจำเป็นจะต้องได้รับการตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง และ Model parameter จะต้องมีการกำหนดค่าขึ้นมาเช่น ค่า Conductivity (ลักษณะเป็นสื่อ โดยเฉพาะกับไฟฟ้า) และการอนุญาตให้สร้างวัสดุ เพราะว่ามันเป็นแบบจำลองที่ดัดเฉพาะเจาะจง และสามารถเตรียมการประเมินค่าเสมือนจริงของรังสีที่กระจายในสภาพแวดล้อม มันเป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับแอปพลิเคชันอย่างเช่น Optimum Siting of base station (BS) หรือการวิเคราะห์ระบบโดยใช้สายอากาศแบบ sectored และสายอากาศแบบ Smart อย่างไรก็ตาม มันจะต้องการผลการคำนวณทางคอมพิวเตอร์เยอะมาก ทำให้เสียเวลา

### 2.7.3 Geometry-based Modeling

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่จะใช้ในโครงการ เป็นรูปแบบแบบจำลองที่อ้างอิงจากรูปร่างทางเรขาคณิต หรือจะมองให้เห็นอย่างง่ายคือ เป็นการอ้างอิงจากสถานะแวดล้อมจริง เช่น จากตัวตึกหรือตัวอาคารบ้านเรือน และจากห้องสำหรับทดลองโครงการนั่นเอง

## บทที่ 3

### ทฤษฎีและหลักการของ Ray-Tracing

#### Ray-Tracing [1]

จากการใช้ความถี่มากกว่า 2 GHz สำหรับ IMT-2000 หรือจะมากกว่า 5-8 GHz สำหรับ MMAC และระบบโทรศัพท์มือถือรุ่นที่ 4 โครงสร้างพื้นฐานของ Micro-cell และ Pico-cell เป็นสิ่งที่จะเป็นที่ต้องการมากที่สุดในอนาคต อย่างไรก็ตาม การลดขนาดของเซลล์นี้ ทำให้วิธีการควบคุมแบบแผนของ Statistical Modeling เพื่อที่จะออกแบบเซลล์และเลียนแบบการส่งสัญญาณเป็นไปได้ยาก เพราะวิธีการเหล่านี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในสภาพแวดล้อมที่เป็นแบบ Macro-cellular เราจะโฟกัสที่แบบจำลองแบบ Deterministic ของ Spatio-temporal (ST) wireless channel สำหรับการวิเคราะห์และการประเมินค่าประสิทธิภาพของการทำงานในระบบ wireless ในสภาพแวดล้อมแบบ Macro-, micro- และ Pico-cellular สิ่งสำคัญคือการใส่แบบจำลองลงไป ในสภาพแวดล้อมแบบ Macro- และ Pico-cellular การทำแบบจำลองนี้เราจะใช้วิธี Ray Tracing ซึ่งเป็นวิธีการคิดว่าคลื่นวิทยุคือรังสีที่เดินทางไป เพราะว่าคลื่นนั้นใหญ่กว่าความยาวคลื่นมากในเคสของระบบ wireless ที่ทันสมัย

Ray Tracing ค่อยๆ เป็นที่นิยมมากขึ้นในการเข้าถึงสำหรับการคาดการณ์การแพร่กระจายและการทำแบบจำลองตั้งแต่ปี 1990 Ray Tracing เป็นวิธีการที่นำคอมพิวเตอร์กราฟฟิกกับทฤษฎีเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้ามารวมกัน เพื่อที่จะตรวจสอบการทำงานของการทำงานการแพร่กระจายคลื่นในช่องสัญญาณไวร์เลสได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยพื้นฐานรังสีเริ่มจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับสลับกับการแพร่กระจายของวัตถุ เช่นการสะท้อนของพื้นผิว (Reflection) การแตกกระจายของคลื่น (Diffraction) การกระจัดกระจาย (Scattering) และการส่ง (Transmission) ด้วยรูปแบบข้อมูลของการแพร่กระจายวัตถุ รังสีที่ได้รับอาจถูกตามและขอบเขตของรังสีจะถูกคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของ Geometrical Optics (GO) และ Uniform Theory of diffraction (UTD) และอื่นๆ

### 3.1 ประเภทของ Ray-Tracing

#### 3.1.1 Ray-launching Method

รังสีถูกปล่อยออกไปตามแต่ละทิศทางจากเครื่องส่งและจะถูกติดตามเส้นทางไปจนกว่ามันจะไปถึงเส้นทางที่วนเป็นวงกลม (วนกลับไปที่เดิมหรือเป็น Loop) หรือไปถึงขอบเขตของเครื่องรับ

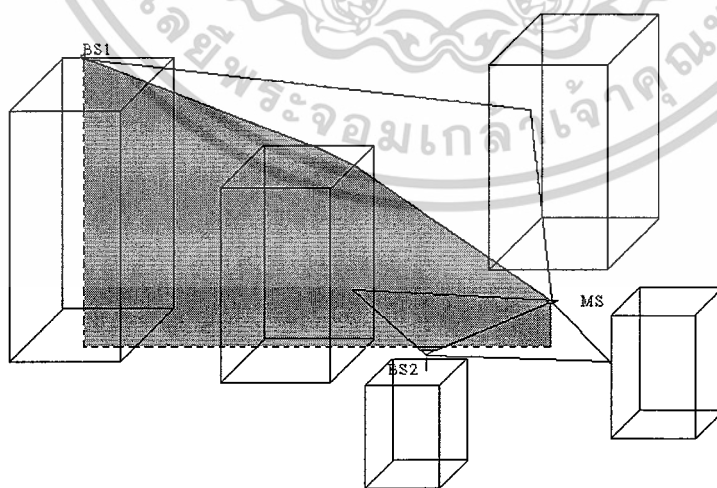
ซึ่งจะใช้ค้กจับรังสีที่ได้รับเข้ามา เมื่อรังสีไปตกกระทบมุมจะเกิดการปล่อยรังสีออกมาอีกครั้ง ปริมาณการคำนวณจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อรังสีที่ปล่อยออกไปเพิ่มขึ้นและเมื่อการตกกระทบเพิ่มขึ้นด้วย

### 3.1.2 Image Method

เราจะใช้วิธีคิดตามรังสีโดยอ้างอิงจาก Image Theory ทำให้สามารถหาแหล่งกำเนิดของรูปจำลองของเครื่องส่งได้ คือจากการที่รังสีตกกระทบวัตถุแล้วแตกกระจายออก ทำให้เราคำนวณหาเส้นทางของรังสีได้ วิธีนี้เมื่อมีรังสีมากก็จะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก และยังต้องใช้หน่วยความจำที่มากอีกด้วย

ในการพัฒนาการคาดเดาการแพร่กระจายและแบบแผนการจำลองช่องสัญญาณแบบ deterministic ST สภาพแวดล้อมการแพร่กระจายของไวร์เลสจะต้องถูกพิจารณาอย่างถี่ถ้วน อย่างเช่นในรูป 3.1 สภาพแวดล้อมการแพร่กระจายถูกแบ่งออกเป็น

1. สภาพแวดล้อมแบบ Macro-cellular ซึ่งสายอากาศแบบ BS ถูกนำมาติดตั้งในที่ที่สูงกว่า สิ่งก่อสร้างรอบๆ เพื่อที่จะให้บริการได้ในระยะกว้างไกล (โดยปกติแล้วเซลล์จะมีรัศมีใหญ่กว่า 1 km เช่น “BS1” ที่ถูกมาร์กไว้ในรูปนี้)
2. สภาพแวดล้อมแบบ Macro- and Pico-cellular ที่ซึ่งสายอากาศแบบ BS จะถูกติดตั้งในที่ที่ต่ำกว่าสิ่งก่อสร้างรอบข้าง (โดยปกติแล้วรัศมีของเซลล์จะเล็กกว่า 1 Km เช่น “BS2” ในรูป)



**รูปที่ 3.1** การแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมของระบบการสื่อสาร [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในความเป็นจริงกลไกการทำงานที่มีลักษณะเฉพาะตัวของการแพร่กระจายไวร์เลสเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม ในสภาพแวดล้อมแบบ Macro-cellular รัศมีของสัญญาณมักจะแพร่กระจายออกไปมากกว่าบริเวณหลังคาโดยการตกกระทบ และตกกระทบลงไปยัง Mobile Station (MS) บนถนน จุดสูงสุดของการเชื่อมต่อระหว่าง BS และ MS อย่างที่แสดงให้ดูในรูป 3.1 แสดงให้เห็นถึงขอบเขตการแพร่กระจายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นเฉพาะตัว การสะท้อนที่ไกลหรือการกระจายของการตกกระทบที่เห็นได้ชัดจากการเพิ่มขึ้นของตึกสูง และผลกระทบของการ scattering รอบๆ MS นั้นสำคัญและจะต้องทำการจำลองขึ้นมาเช่นกัน ในสภาพแวดล้อมแบบ Micro- and pico-cellular การสะท้อนจากกำแพงและการแตกกระจายตามมุมของถนนเป็นกลไกการทำงานเฉพาะตัว ซึ่งมุมของถนนทำให้เกิดผลกระทบเช่นเดียวกับ waveguide ตามที่กล่าวมาเราอาจจะนำได้แนวความคิดใหม่ โดยการนำความแตกต่างของกลไกการทำงานมาวิเคราะห์และสร้างโมเดลสำหรับหลายๆ สภาพแวดล้อมได้ วิธี Ray Tracing ของเรามีทั้งการจำลองโมเดลแบบ 2D และ 3D ผสมกันในการใช้ในสภาพแวดล้อมแบบ micro- and pico-cellular และแบบ Vertical-plane-tracing (VTP) ในสภาพแวดล้อมแบบ Macro-cellular

ในปัจจุบันวิธีการ Ray Tracing จะโฟกัสไปที่การคาดเดา path loss และการคำนวณขนาดของเซลล์แทบจะไม่มีรายงานเกี่ยวกับการตรวจสอบการคาดเดาให้ถูกต้องแม่นยำของมุมตกกระทบและรายละเอียดเกี่ยวกับการจำลองช่องสัญญาณแบบ deterministic spatio-temporal การที่จะหาค่า Angle-of-arrival (AOA) ออกมาได้โดยการวัดนั้นไม่ง่ายเลย สายอากาศที่มีทิศทางที่สูงสามารถหาค่า AOA นี้ออกมาได้ แต่ค่าที่ได้มานั้นจะมีเรื่องเกี่ยวกับ antenna side lobe มาเกี่ยวข้องทำให้ค่าคลาดเคลื่อน เราจะต้องใช้ Fourier Limit ในการคำนวณหาค่าที่แม่นยำออกมา Super Resolution Algorithms (SRA) ได้ถูกเสนอเพื่อให้หาค่า AOA ออกมาได้ ส่วน time-of-arrival (TOA) หาได้จาก array antenna แม้ว่า SRA จะเป็นเทคนิคที่ทำให้เรามีความหวัง โดยต้องการการปรับค่า array ที่แน่นอน และจะต้อง address mutual coupling effect ระหว่างส่วนประกอบของสายอากาศ อย่างไรก็ตาม การได้มาของค่า AOA และ TOA ที่ยากมากนั้น ทำให้ยากต่อการตรวจสอบค่าความแม่นยำของการคาดเดา Ray tracing บนค่าของมุมเป็นประเด็นสำคัญ

### 3.2 ปัญหาของ Ray launching

วิธี 3D Ray launching ปล่อยรังสีจาก Icosahedrons รังสีถูกปล่อยออกมาด้วยมุมที่ไม่เท่ากันสามารถทำให้การคำนวณเกิดการผิดพลาดได้ ขอบเขตที่ได้รับการรับรองมีปัญหา double-counting error ทำให้เกิด error ไป 3 dB ซึ่งเกิดจากกำลังที่สะสมเพิ่มไปเรื่อยๆ ไม่ต่อเนื่องกัน

### 3.3 ปัญหาของ Image Method

วิธีการ image นี้โดยปกติต้องการมาจากหน่วยความจำที่ใหญ่ในการสร้างแหล่งกำเนิด

- เฟสที่คลาดเคลื่อน inaccurate phase

โมเดล Ray Tracing ไม่สามารถคาดเดาเฟสขอบเขตของรังสีที่ถูกต้องแม่นยำได้ โดยที่ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากฐานข้อมูลของสิ่งก่อสร้างที่ไม่แม่นยำและวัสดุที่ใช้สร้างกำแพง

- ความคลาดเคลื่อนทางสถิติ Fading Statistic

โมเดล Ray Tracing สามารถใช้ในการคาดเดาพารามิเตอร์ทางสถิติได้ เช่น Local Fading Statistic อย่างไรก็ตาม การคาดเดานี้ต้องการการสุ่มตัวอย่างในอากาศในหลายๆ จุดของพื้นที่ที่เราต้องการ สิ่งนี้จะต้องใช้เวลาอย่างมาก ทำให้เสียเวลา

### 3.4 บทความเกี่ยวกับ Local Scattering

ส่วนใหญ่โมเดล Ray Tracing จะไม่พิจารณาถึงสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น ยานพาหนะ แสงบนถนน มนุษย์ และอื่นๆ

เนื่องจากเราไม่สามารถหาค่าที่แน่ชัดของ AOA และ TOA ได้ ขณะนี้จึงมีการใช้ Graphical User Interface (GUI) ในการจำลองทางภาคปฏิบัติเพื่อใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันต่อไป

### 3.5 ข้อดีข้อเสียของ Ray-Tracing

#### 3.5.1 ข้อดีของ Ray-Tracing

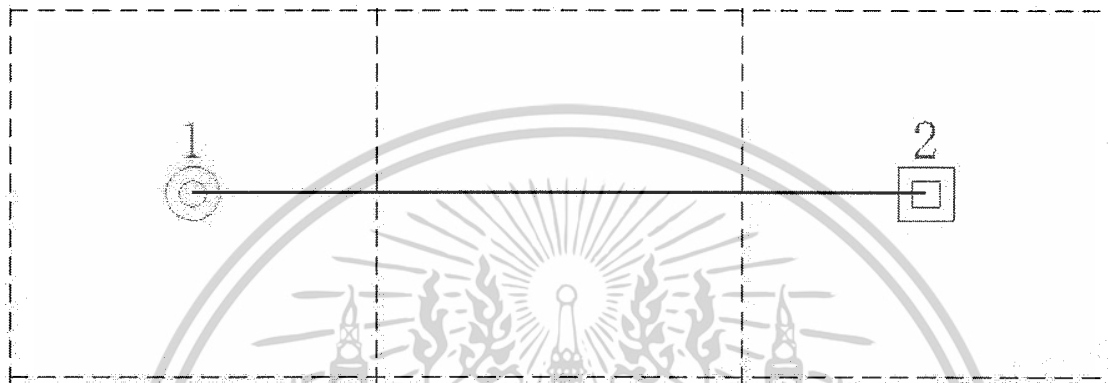
Ray-Tracing เป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์รังสีได้ง่าย และสามารถมองเห็นภาพได้แบบสามมิติ เนื่องจากวิธีนี้เป็นการนำเอา CG เข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ง่ายต่อการพัฒนาโมเดลเพื่อใช้ในการสนับสนุนการทดลอง อีกทั้งยังทำให้ประหยัดเวลาอีกด้วย

#### 3.5.2 ข้อเสียของวิธี Ray-Tracing

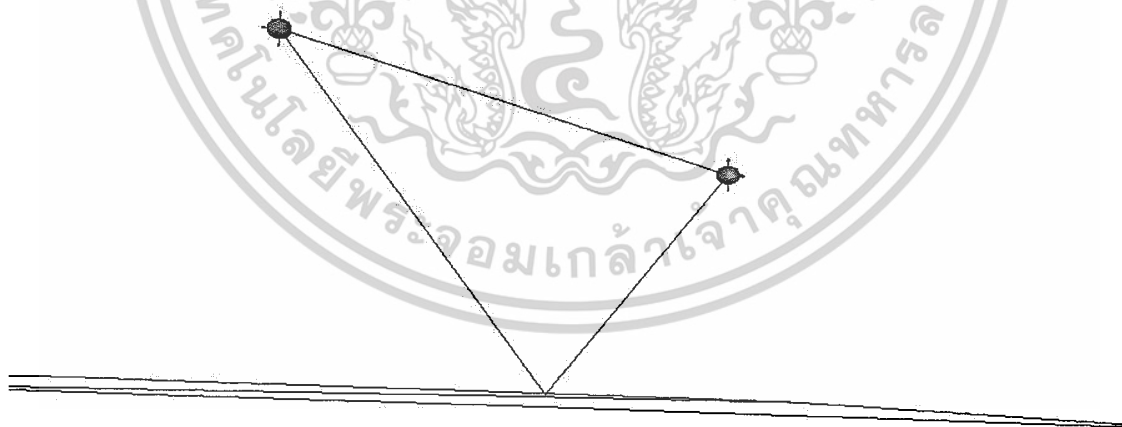
วิธีนี้มีข้อเสียอยู่เล็กน้อย คือ ถ้าเลือกที่จะใช้ Image Method จะทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ความจำ และเนื่องจากไม่สามารถหาค่าที่แน่ชัดของ AOA และ TOA ได้ ขณะนี้จึงมีการใช้ Graphical User Interface (GUI) ในการจำลองทางภาคปฏิบัติเพื่อใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันต่อไป

### 3.6 การจำลองสัญญาณโดยโปรแกรม Raplab 4.0

กำหนดเสาอากาศภาคส่งและรับบนบริเวณพื้นที่โล่ง โดยกำหนดให้มีการสะท้อนให้เสาอากาศภาคส่งสูง 30 เมตร และเสาอากาศภาครับสูง 20 เมตร วางห่างกันเป็นระยะ 40 เมตร โดยใช้ความถี่ 2.4 GHz



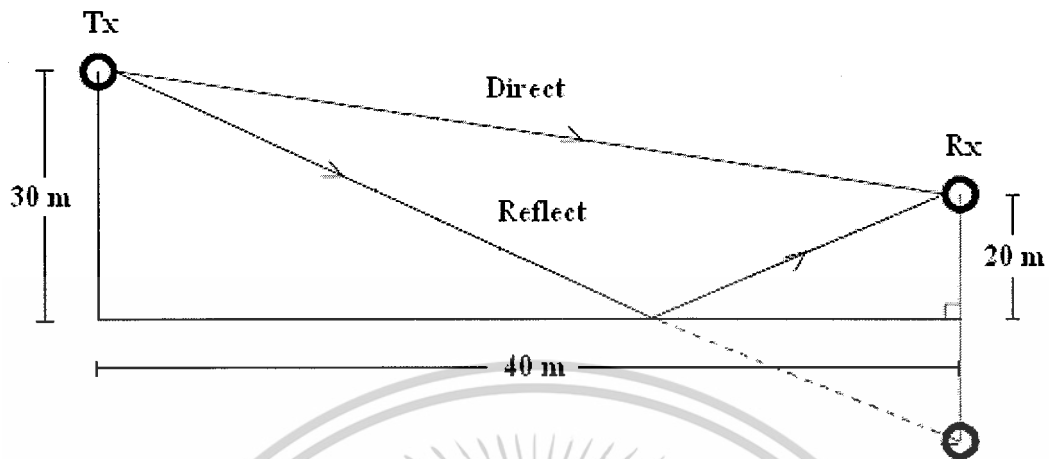
**รูปที่ 3.2** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับ โดยที่ (1) คือ สายอากาศภาคส่ง(Tx ) และ (2) คือ สายอากาศภาครับ(Rx)



**รูปที่ 3.3** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับในรูปแบบ 3D

จากผลการทดลองเราต้องการจะหาค่าระยะห่าง TxRx, ค่า Path loss, Time of available ของแต่ละคลื่นสัญญาณ ซึ่งมีจำนวน 2 เส้น คือ เส้น Direct และเส้น Reflect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ภาพจำลองการส่งสัญญาณในแบบแนวตั้ง

ผลจากการคำนวณเส้นสัญญาณ Direct

$$\begin{aligned} \text{ระยะห่างของเส้นสัญญาณ Direct} &= \sqrt{10^2 + 40^2} \\ &= 41.23 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

จากสูตร Path loss  $= 10 \log \left( \frac{4 \pi d}{\lambda} \right)^2$  เมื่อ  $\lambda = \frac{c}{f}$

$$\begin{aligned} &= 10 \log \left( \frac{4 \pi 41.23}{\frac{2.998 \times 10^8}{2.4 \times 10^9}} \right)^2 \\ &= 72.36 \text{ dB} \end{aligned}$$

จากสูตร  $s = ct$  เมื่อ  $c$  คือ ค่าความเร็วแสง ( $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

$s$  คือ ระยะทาง (m)

$t$  คือ เวลา (sec.)

$$t = s/c$$

$$t = 41.23 / (2.998 \times 10^8)$$

$$t = 137.53 \text{ nsec}$$

จากทฤษฎี Image ระยะห่างของเส้นสัญญาณ reflect  $= \sqrt{50^2 + 40^2}$   
 $= 64.03 \text{ เมตร}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตร  $s = ct$  เมื่อ  $c =$  ค่าความเร็วแสง ( $2.998 \times 10^8$  m/s)  
 $s =$  ระยะทาง (m)  
 $t =$  เวลา (sec.)

$$t = s/c$$

$$t = 64.03 / (2.998 \times 10^8)$$

$$t = 213.59 \text{ nsec}$$

ผลจากการคำนวณเส้นสัญญาณ Reflect

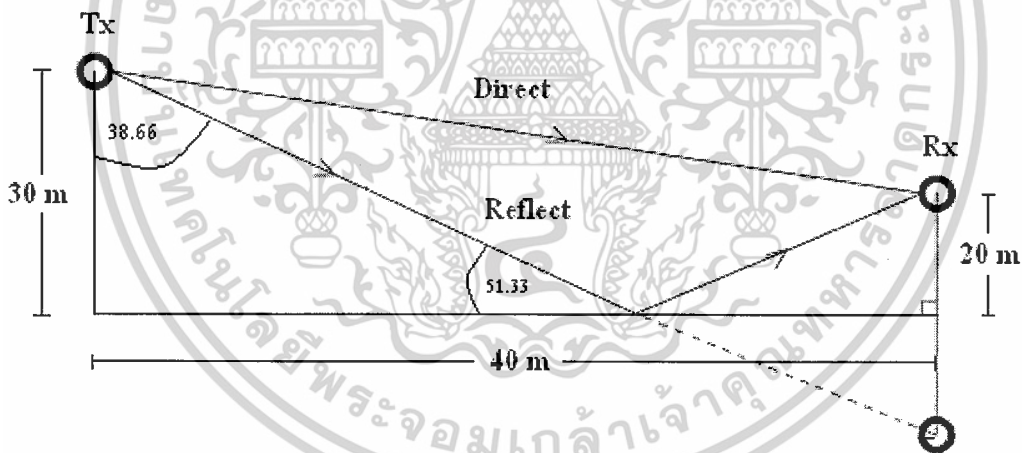
จากสูตร 
$$\Gamma_v = \frac{\sin \theta - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta}}$$

เมื่อ  $\epsilon_r = 4$

$$\tan \theta = \frac{50}{40}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{50}{40}$$

$$\theta = 51.33$$



ค่า Reflection Coefficient 
$$= 10 \log \left| \frac{\sin 51.33 - \sqrt{4 - \cos^2 51.33}}{\sin 51.33 + \sqrt{4 - \cos^2 51.33}} \right|^2$$

$$= -7.01066$$

จากการคำนวณ Path Loss 
$$= 10 \log \left( \frac{4 \pi d}{\lambda} \right)^2$$

$$= 10 \log \left( \frac{4(\pi)(64.03)}{\frac{2.998 \times 10^8}{2.4 \times 10^9}} \right)^2$$

$$= 76.17946 \text{ dB}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการคำนวณค่า Path Loss และค่า Reflection Coefficient = 76.17946+7.01066  
= 83.190 dB

จากผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างทฤษฎีข้างต้นกับผลที่ได้จากโปรแกรม Raplab จะเห็นได้ว่าค่าการคำนวณที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง

The screenshot displays the Raplab software interface with the following sections:

- Tx情報 (Tx Information):**
  - 位置 (Position): No. 1, X[m]: 10.0000, Y[m]: 30.0000, 高さ[m]: 30.0000
  - 周波数 [GHz] (Frequency): 2.400000
- Rx情報 (Rx Information):**
  - Rx指定 (Rx Specification): No. 2, コースNo. 0, X[m]: 50.0000, Y[m]: 30.0000, 高さ[m]: 20.0000
  - Rx情報 (Rx Information):
 

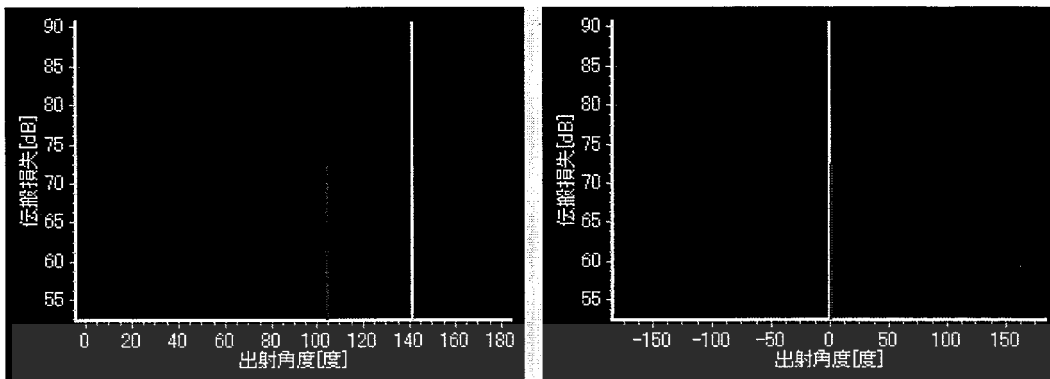
Tx/Rx間距離 [m]	41.2311
受信レベル [dBm]	-39.13
受信レベル (電力加算) [dBm]	-39.81
伝搬損失 [dB]	73.43
伝搬損失 (電力加算) [dB]	72.30
パス数	2
遅延スプレッド [nsec]	2.76
Tx角度スプレッド [度]	0.00
Rx角度スプレッド [度]	0.00
位相 [度]	153.69
- パス情報 (Path Information):**

No	パス長 [m]	伝搬時間 [nsec]	伝搬損失 [dB]
0	41.23	137.53	72.36
1	64.03	213.59	90.90

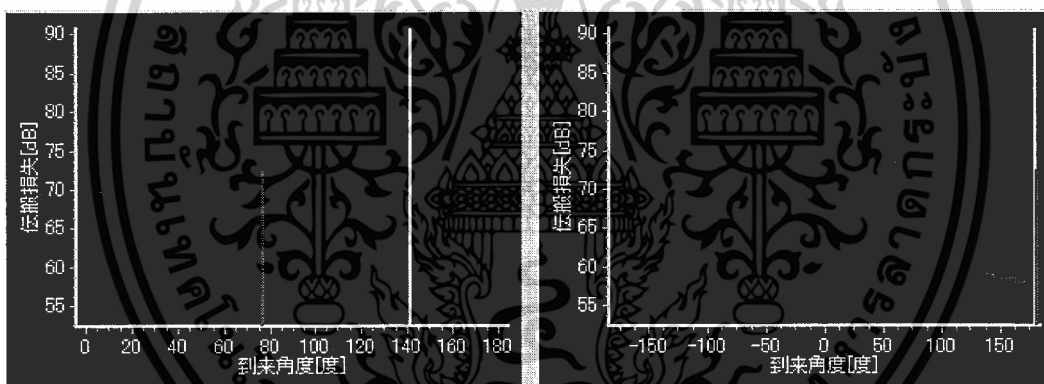
Callouts in the image point to specific values: 'ความถี่' points to 2.400000 GHz; 'ระยะทาง' points to the Tx/Rx distance of 41.2311 m; 'เวลา' points to the propagation time of 137.53 nsec for path 0; and 'Path Loss' points to the propagation loss of 72.30 dB.

รูปที่ 3.5 ค่าจาก โปรแกรม Raplab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.6** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph

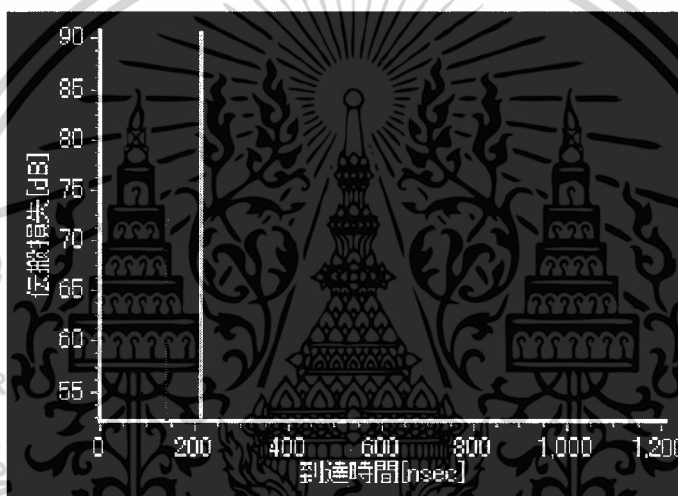


**รูปที่ 3.7** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศรับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.1** แสดงค่า ระยะห่าง TxRx ,Path loss ,Time of arrival ของแบบจำลองรูปที่ 3.2

No.	ระยะห่าง TxRx (m)	Path loss จากการ ทดลอง (dB)	Path loss จากการ คำนวณ (dB)	Time of arrival (nsec)
1	41.23	72.36	72.36	137.53
2	64.03	90.90	83.19	213.59



**รูปที่ 3.8** กราฟแสดงค่า Power Delay Profile แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับเวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec

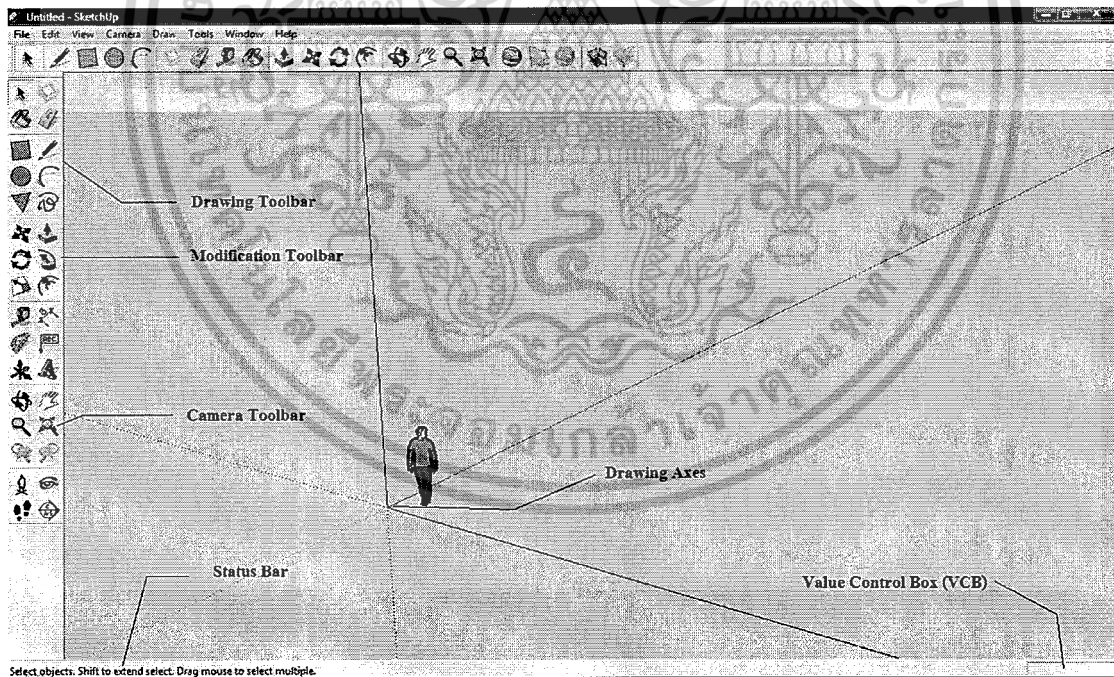
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การออกแบบ

#### 4.1 การทำแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม SketchUp

ในปัจจุบันมี Software ทางด้าน Computer Graphic ออกมาสู่ท้องตลาดอย่างมากมาย โดยเฉพาะทางด้าน CAD (Computer Aided Design) อย่างไรก็ตาม จะสังเกตว่าโปรแกรมทางด้านนี้ส่วนมากจะมีความเข้มข้น ความซับซ้อนของโปรแกรมค่อนข้างมาก เพื่อให้ได้มาซึ่งความถูกต้องของชิ้นงาน ส่วนโปรแกรม SketchUp จะแตกต่างกันออกไป โดยเน้นหนักไปที่ความง่ายในการขึ้นรูป เพื่อช่วยให้นักออกแบบสามารถถ่ายทอดแนวความคิดในการออกแบบออกมาได้อย่างรวดเร็วที่สุด และมีขั้นตอนน้อยที่สุด และสามารถนำเสนองานออกไปยังกลุ่มคนอื่นได้ชัดเจนกว่างานเอกสารธรรมดา ประกอบกับความยืดหยุ่นในการปรับแต่งโดยง่ายด้วยลักษณะคล้ายๆ กับการทำแบบร่างในกระบวนการออกแบบของนักออกแบบทั่วไป



รูปที่ 4.1 แสดงหน้าจอหลักของโปรแกรม SketchUp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

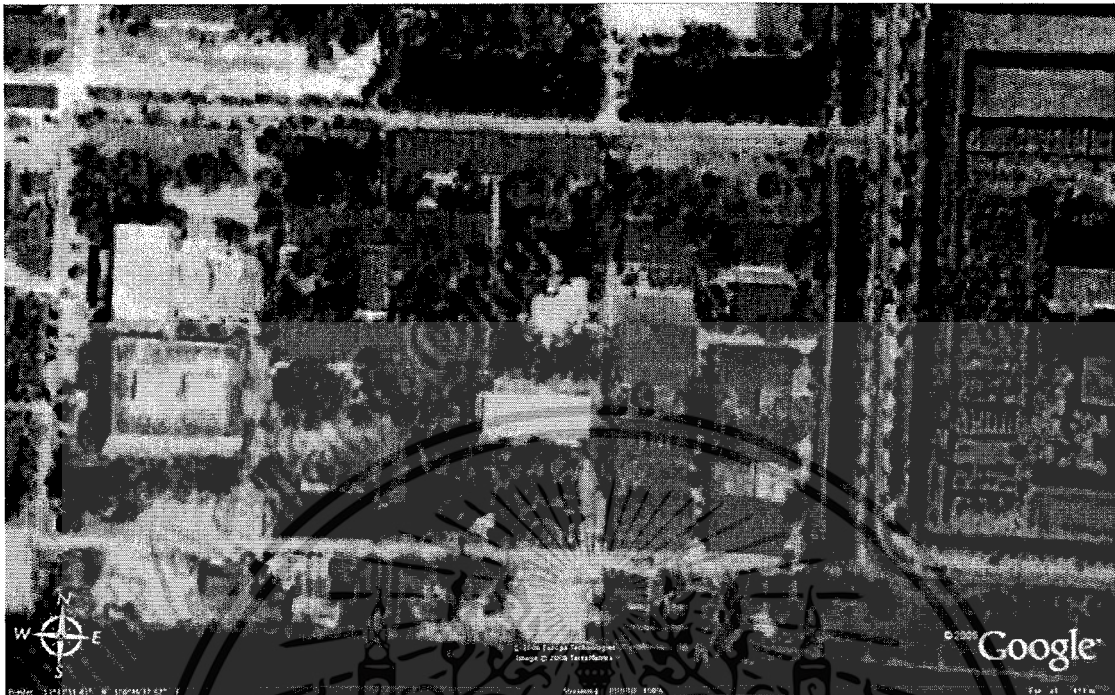
- Menu เป็น Popup Menu แบบมาตรฐานของโปรแกรมบน Windows ทั้งหมดโดยควบคุมหัวข้อหลักๆ ดังนี้ File, Edit, View, Camera, Draw, Tools
- Toolbars จะมีทุลบาร์ที่ใช้การสั่งงานแทนการเรียกใช้จาก Popup Menu ข้างต้น โดยเราสามารถกำหนดว่าจะให้ทุลบาร์ใดบ้างปรากฏบนจอภาพ จากเมนู View -> Toolbar
- Drawing Area เป็นพื้นที่หลักของโปรแกรมในการสร้างชิ้นงานมาตรฐาน ปกติจะแสดงแกนหลัก 3 แกนในระบบ 3 มิติ โดยที่สีแดงหมายถึงแกน X สีเขียวหมายถึงแกน Y และสีน้ำเงินหมายถึงแกน Z
- Status Bar เป็นแถบข้อมูลที่อยู่ตอนล่างของจอภาพ โดยจะแสดงข้อมูลว่าขณะนั้นๆ เรากำลังทำอะไรอยู่ ส่วนด้านขวาของแถบนี้จะเป็นช่องแสดงข้อมูลขนาด ระยะต่างๆ ที่เราเขียน เรียกว่า VCB (Value Control Box) ซึ่งเราสามารถใช้ช่องนี้ในการป้อนค่าที่เราต้องการลงไปจากแป้นพิมพ์โดยตรงเลยก็ได้

### เครื่องมือที่ใช้ในการเขียน

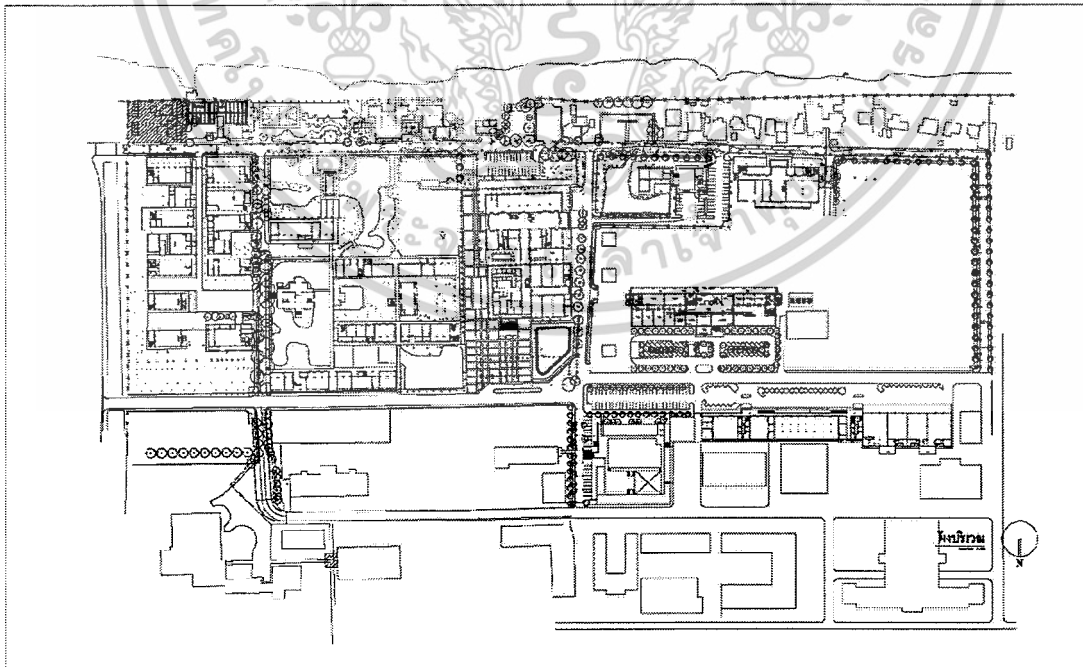
ในส่วนของเครื่องมือในการเขียน จะปรากฏอยู่ในทุลบาร์ของ Drawing ซึ่งประกอบไปด้วย

- Line สำหรับการเขียนเส้นตรง 
- Arc สำหรับการเขียนเส้นโค้ง 
- Rectangle สำหรับการเขียนรูปสี่เหลี่ยม 
- Circle สำหรับการเขียนรูปวงกลม 
- Polygon สำหรับการเขียนรูปหลายเหลี่ยมด้านเท่า 
- Freehand สำหรับการเขียนเส้นอิสระตามการเคลื่อนที่ของ Mouse 

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

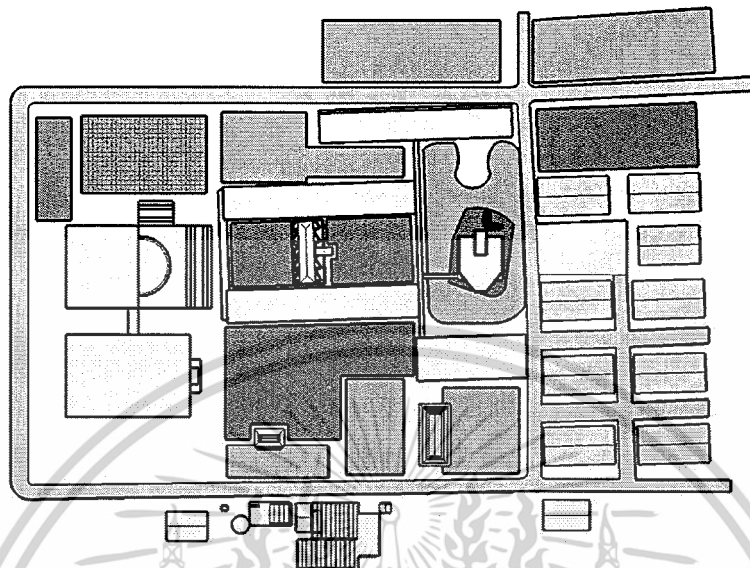


รูปที่ 4.2 ภาพจากโปรแกรม Google Earth

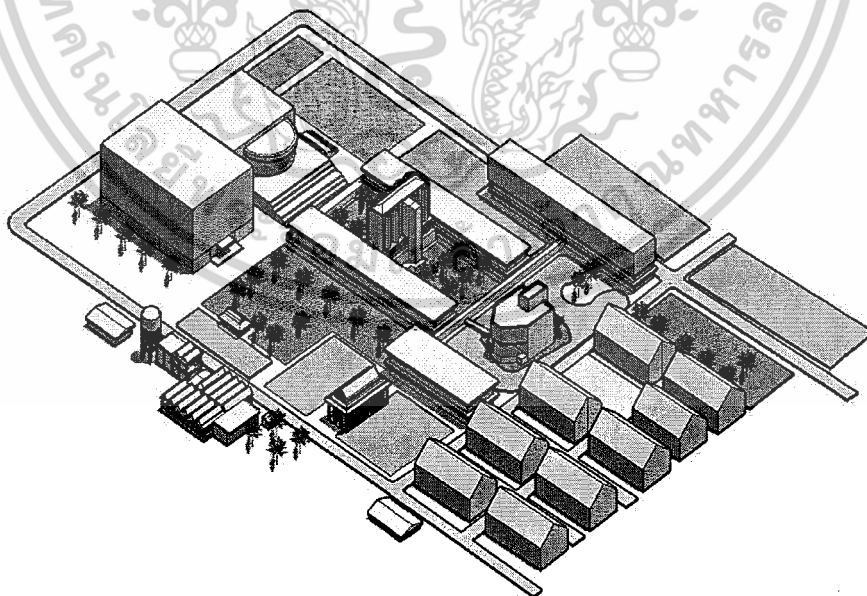


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรมการเชิงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เขาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 แบบจำลอง

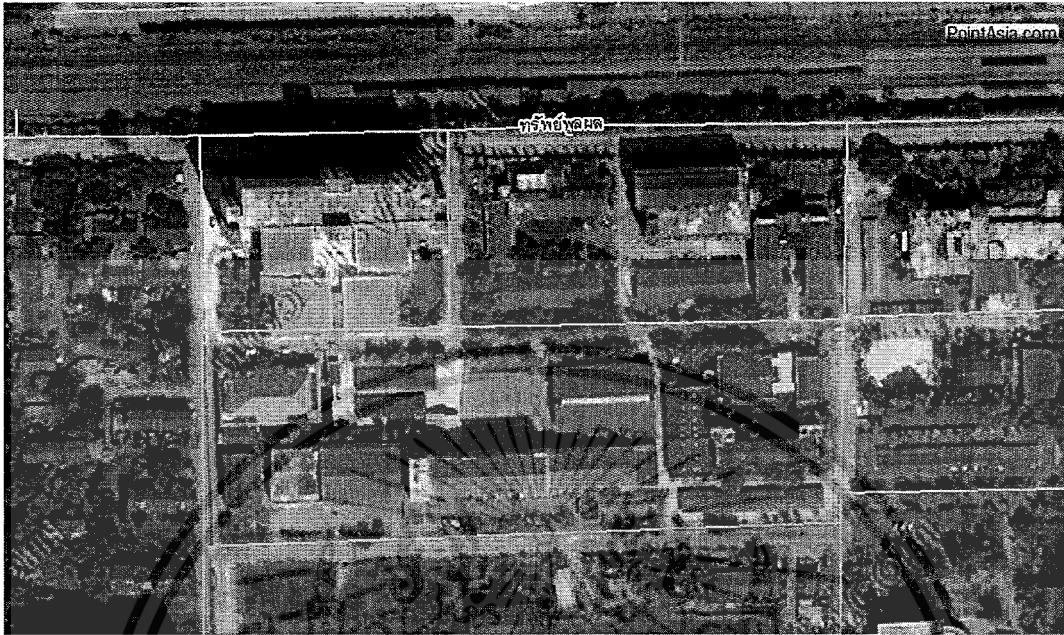


รูปที่ 4.4 แบบจำลองในมุมมองแบบ Top View

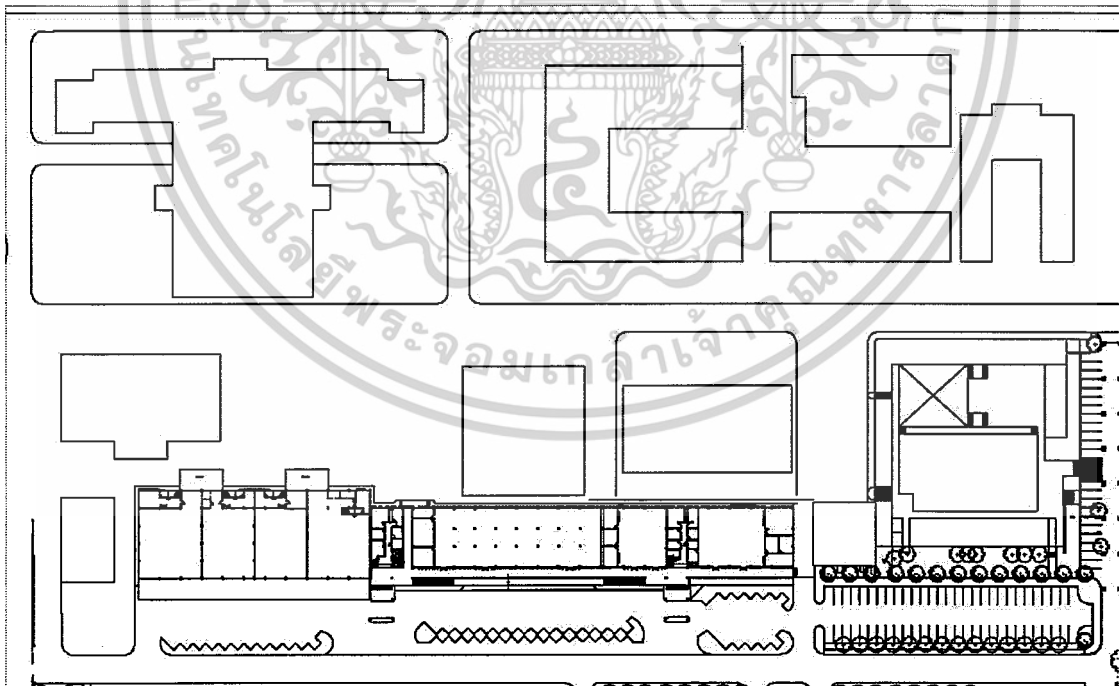


รูปที่ 4.5 แบบจำลองในมุมมองแบบ Isometric View

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

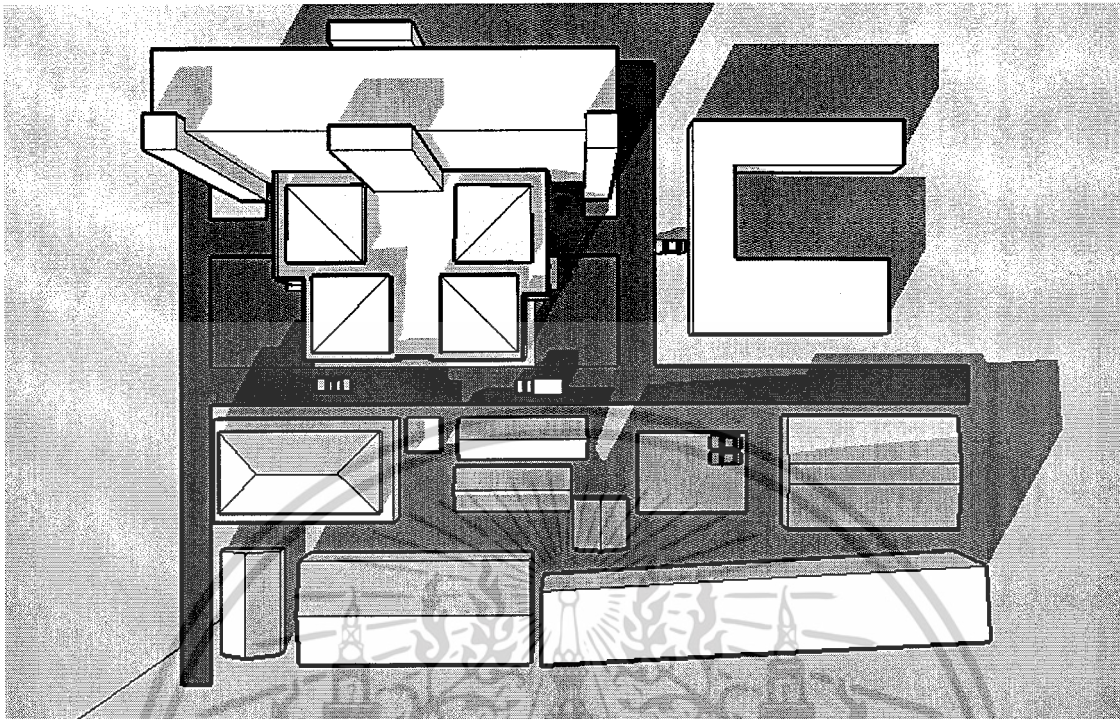


รูปที่ 4.6 ภาพจากโปรแกรม Google Earth

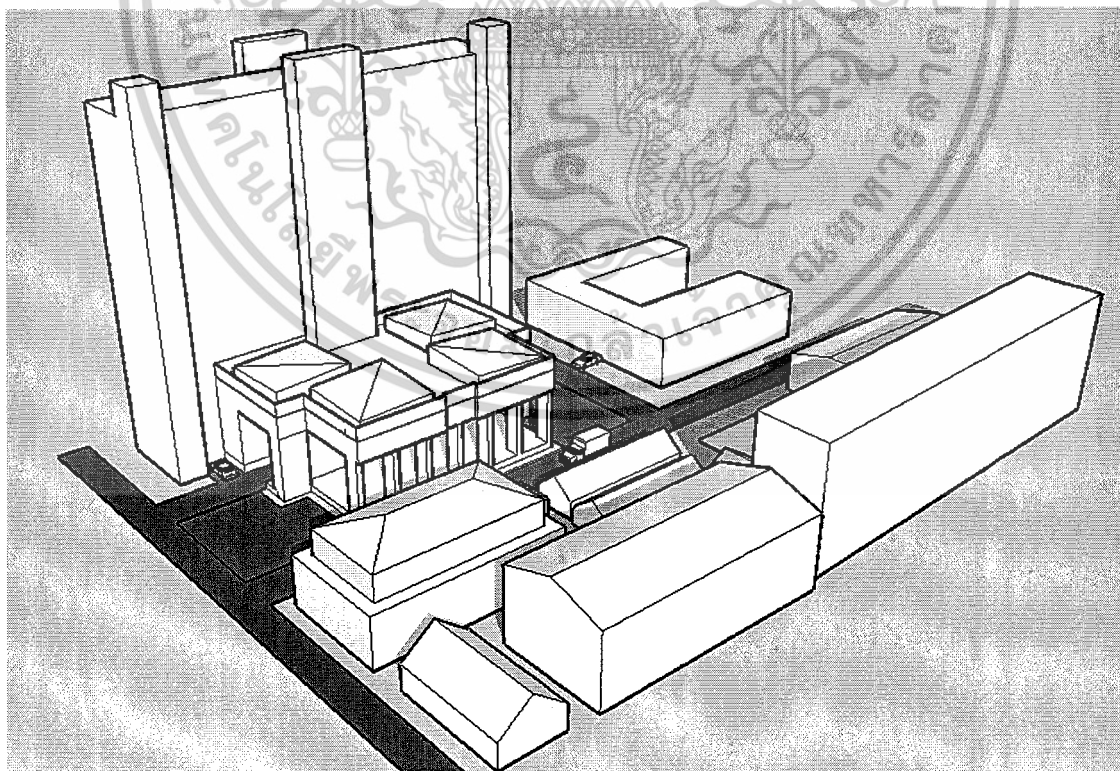


รูปที่ 4.7 Plan คณะวิศวกรรมศาสตร์ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



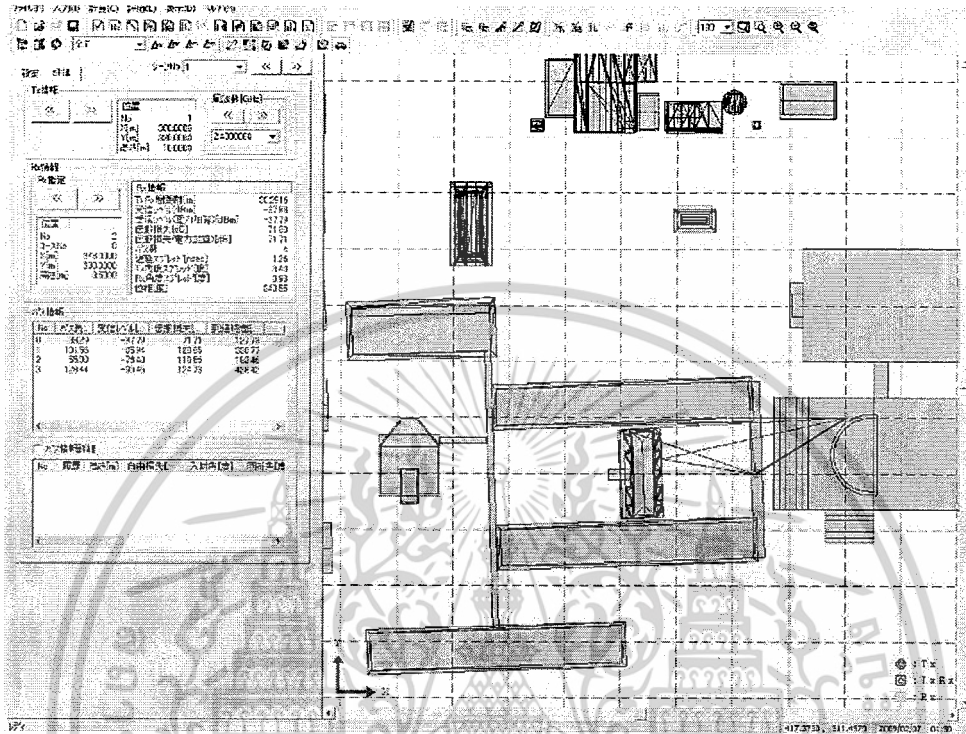
รูปที่ 4.8 แบบจำลองในมุมมองแบบ Top View



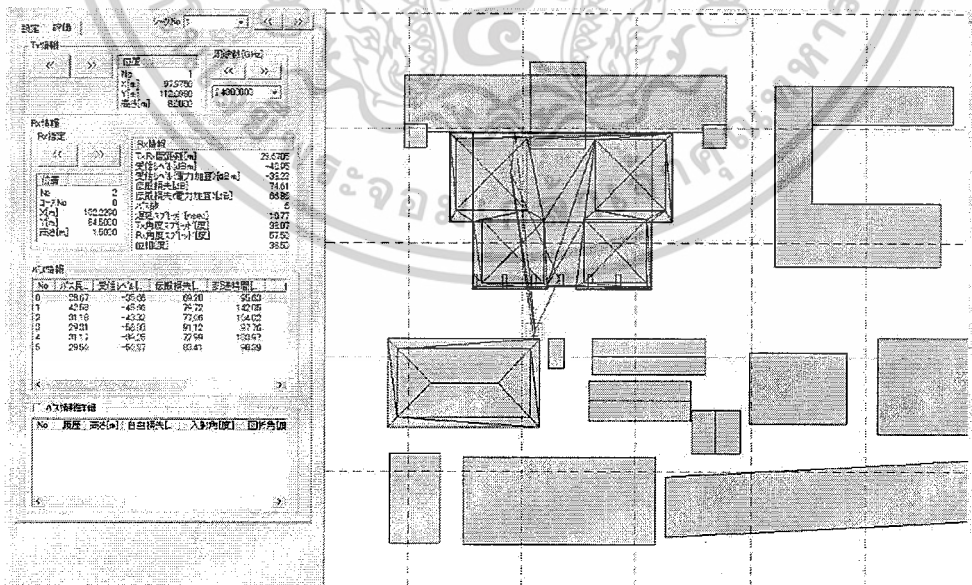
รูปที่ 4.9 แบบจำลองในมุมมองแบบ Isometric View

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การแสดงผลในโปรแกรม Raplab



รูปที่ 4.9 แบบจำลองที่ออกแบบแสดงใน โปรแกรม Raplab (คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์)



รูปที่ 4.10 แบบจำลองที่ออกแบบแสดงใน โปรแกรม Raplab (คณะวิศวกรรมศาสตร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

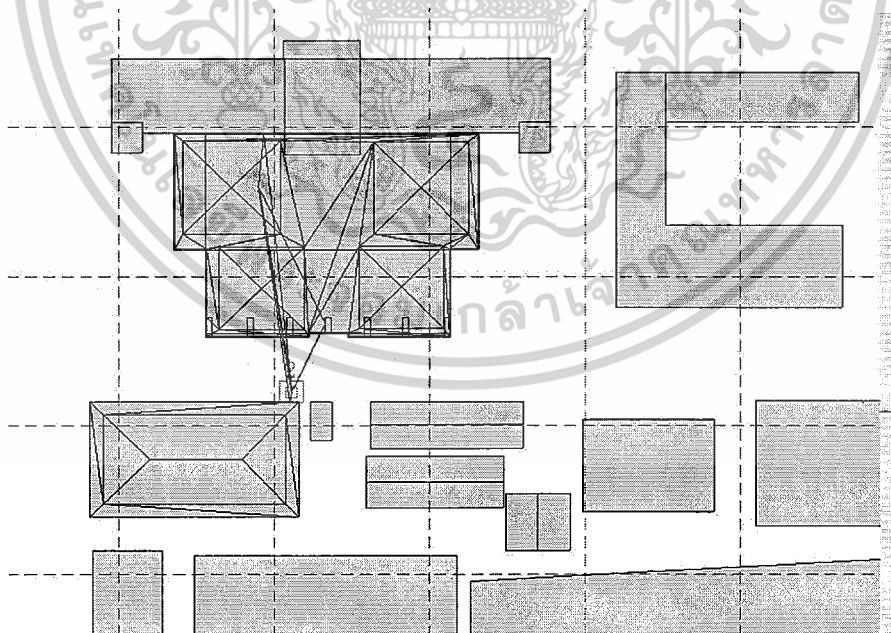
### การทดลอง และผลการทดลอง

#### 5.1 การวิเคราะห์สัญญาณ

สิ่งที่ได้จากการทดลองวัดช่องสัญญาณโดยการจำลองจากโปรแกรม RapLab คือ สามารถรู้ช่องทางการเดินทางของสัญญาณ wireless หลายเส้นทาง โดยใช้ความถี่ที่ 2.4 GHz ผลจากการวิเคราะห์จะแสดงออกมาในรูปแบบของ ค่าการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss), Time of Arrival, ระยะทางของช่องสัญญาณ และ Angle of Arrival ของแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อดูค่าประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณของแต่ละช่องสัญญาณ

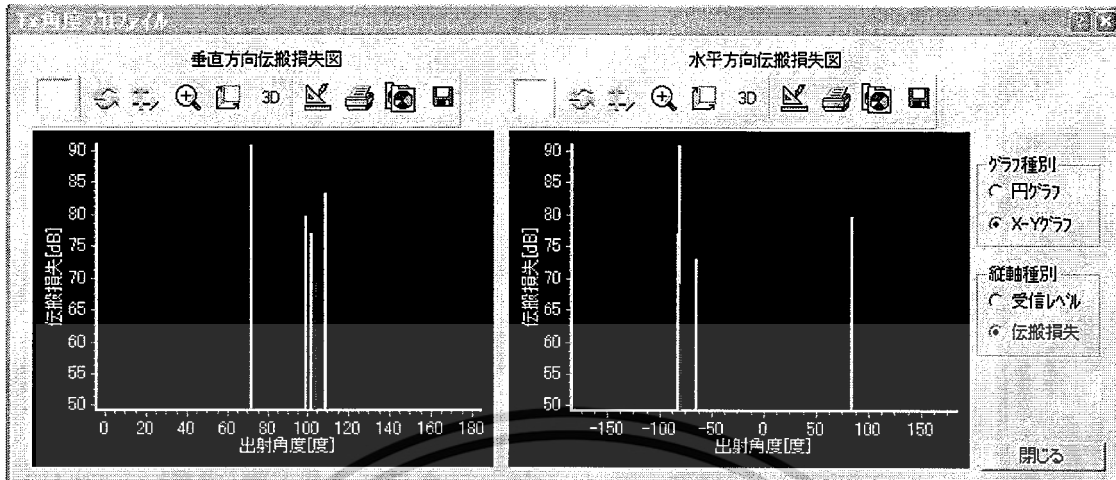
#### 5.2 ผลจากการวิเคราะห์สัญญาณ

ในแบบจำลองครั้งที่ 1 กำหนดให้สายอากาศมีค่าการสะท้อนกับตัวอาคารได้ แต่ไม่มีการ Diffraction โดยใช้แบบจำลองของตึก 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ผลจากการจำลองและวิเคราะห์ได้แสดงตามรูปดังนี้

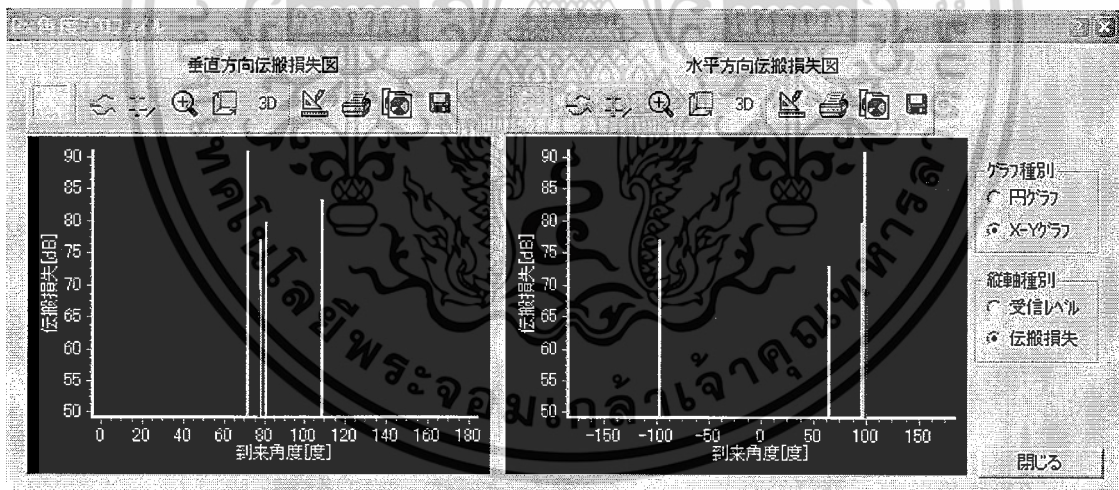


**รูปที่ 5.1** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับแบบมีค่าการสะท้อนกับตัวอาคารได้ แต่ไม่มีการ Diffraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.2** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph



**รูปที่ 5.3** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองดังรูปที่ 5.1 จะได้ผลดังรูปซึ่งเป็นกราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่า path loss และ Angle ของเสาสัญญาณ Tx และ Rx โดยผลการทดลองจะแสดงในตาราง

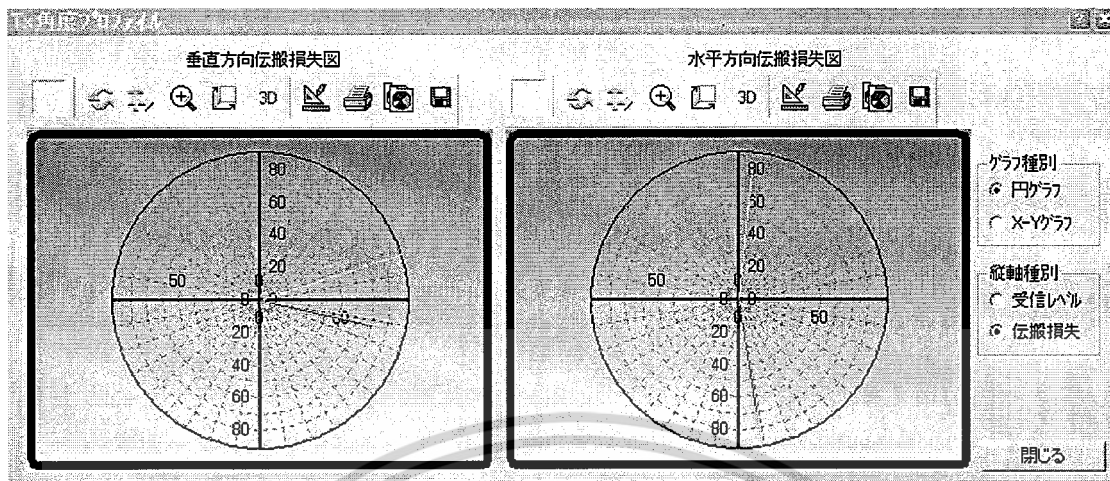
**ตารางที่ 5.1** แสดงค่า ระยะห่าง TxRx, Path loss, Time of Arrival ของแบบจำลองที่ 1

No.	ระยะห่าง TxRx(m)	Path loss จาก การทดลอง(dB)	Path loss จากการ คำนวณ(dB)	Time of arrival(nsec)
1	28.67	69.20	69.19	95.63
2	42.58	79.72	74.04	142.05
3	31.18	77.06	71.80	104.02
4	29.31	91.12	71.31	97.76
5	31.17	72.99	71.33	103.97
6	29.50	82.41	72.38	98.39

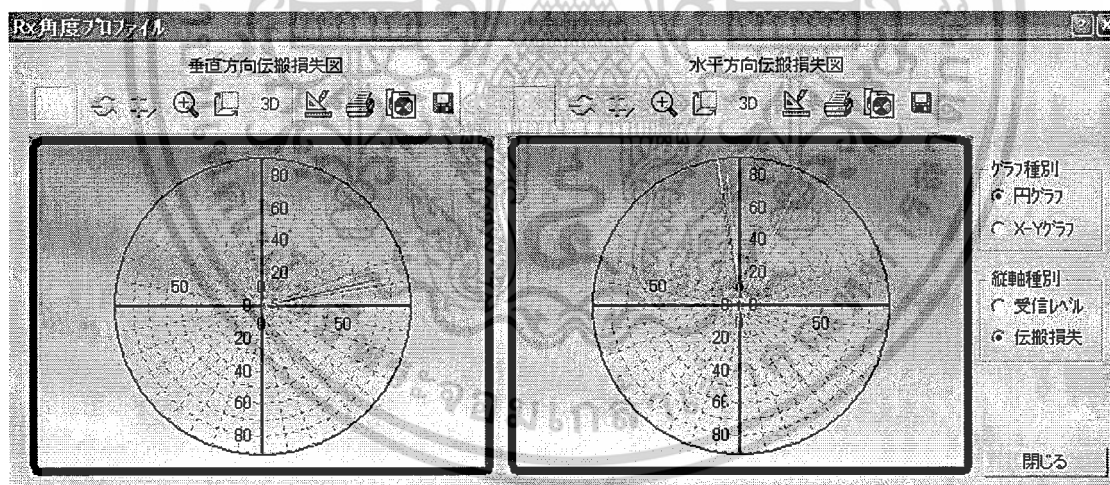


**รูปที่ 5.4** กราฟแสดงค่า Power Delay Profile แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

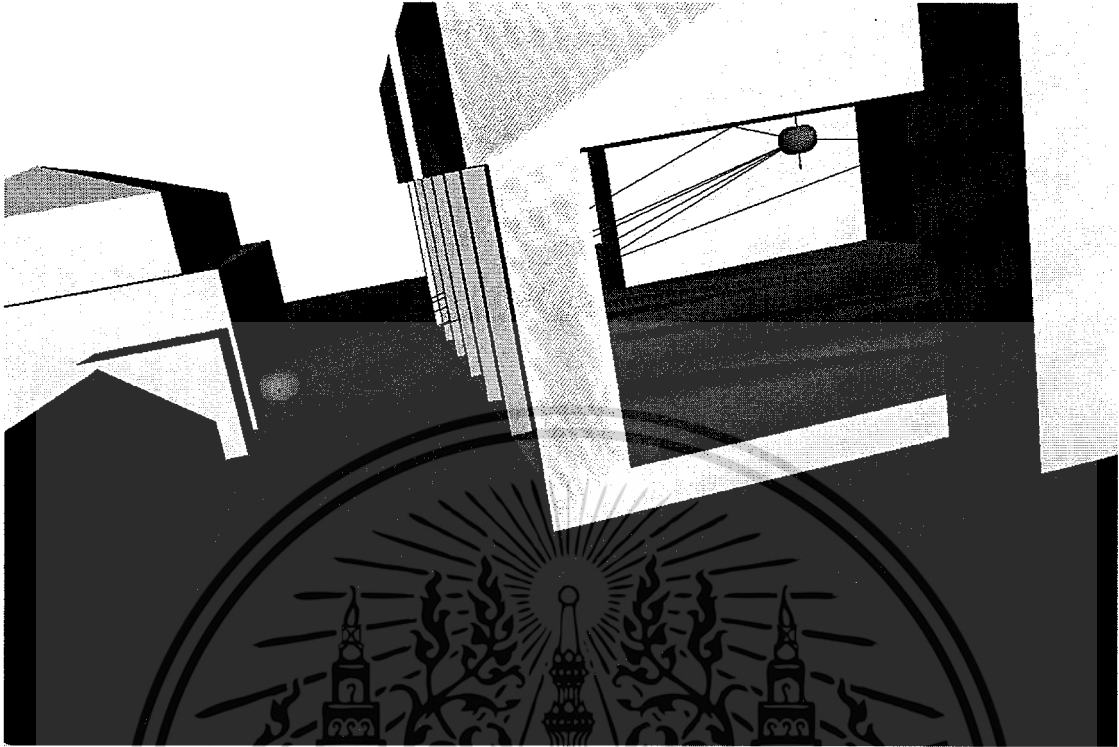


**รูปที่ 5.5** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth



**รูปที่ 5.6** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth

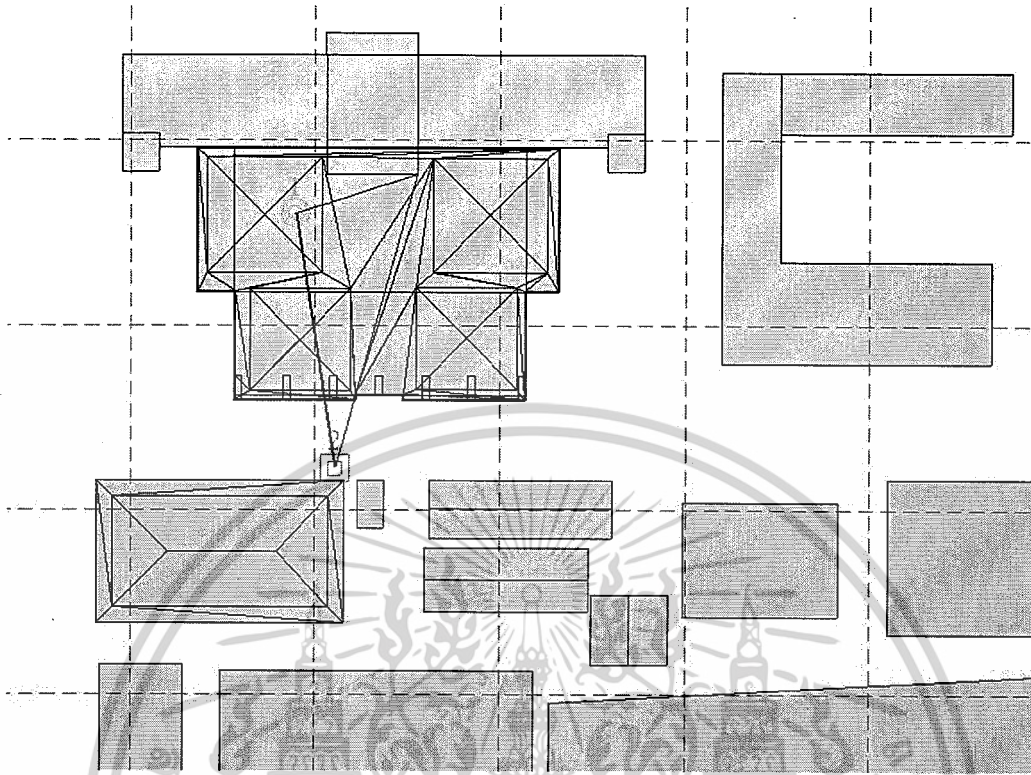
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



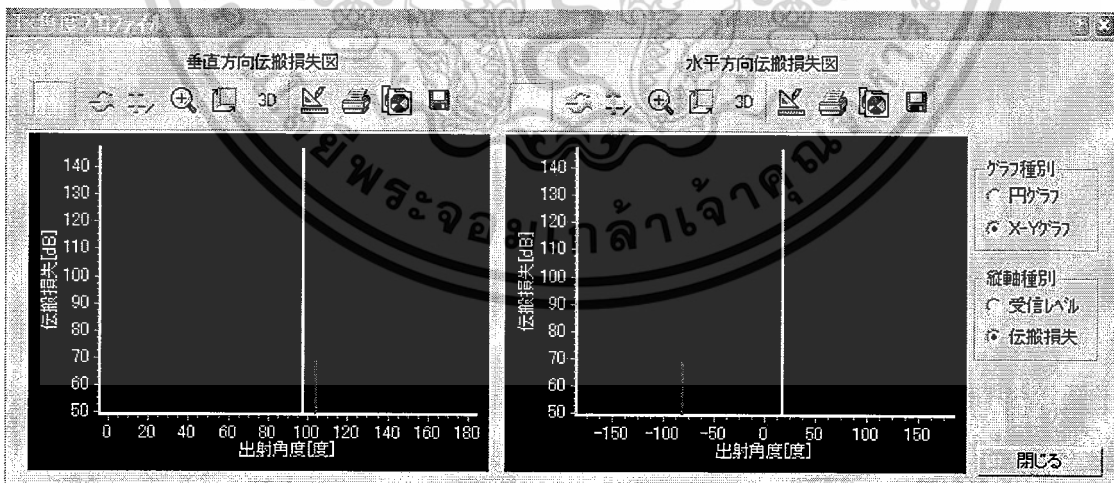
**รูปที่ 5.7** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับ ในรูปแบบ Side-View 3D

ในแบบจำลองครั้งที่ 2 กำหนดให้สายอากาศ ไม่มีการสะท้อนกับตัวอาคาร แต่มีการ Diffraction โดยใช้แบบจำลองของตึก 12 ชั้นคณะวิศวกรรมศาสตร์ ผลจากการจำลองและวิเคราะห์ ได้แสดงตามรูปดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

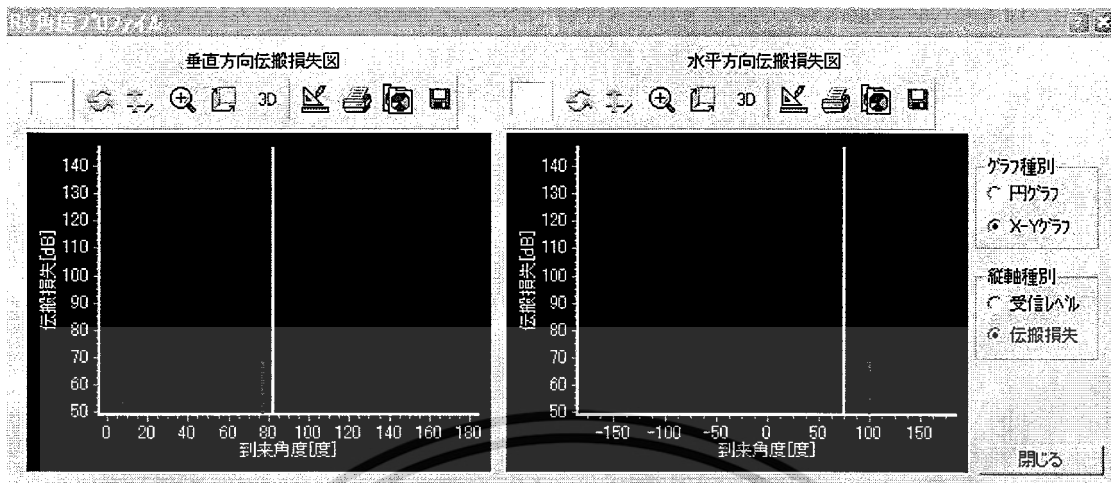


**รูปที่ 5.8** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับแบบไม่มีการสะท้อนกับตัวอาคาร แต่มีการ Diffraction



**รูปที่ 5.9** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



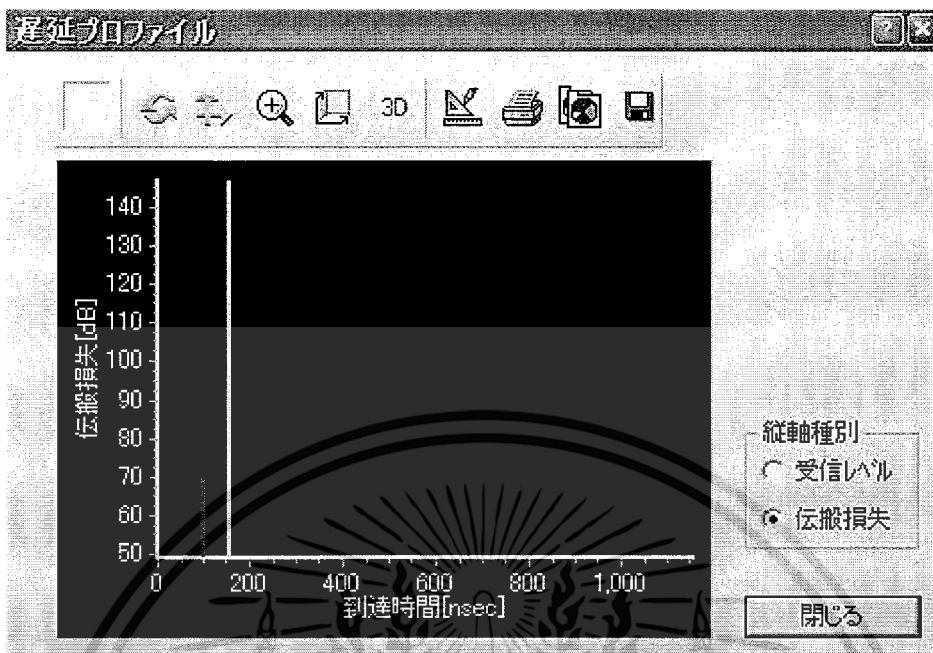
**รูปที่ 5.10** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph

จากการทดลองดังรูปที่ 5.1 จะได้ผลดังรูปซึ่งเป็นกราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่า path loss และ Angle ของเสาสัญญาณ Tx และ Rx โดยผลการทดลองจะแสดงในตาราง

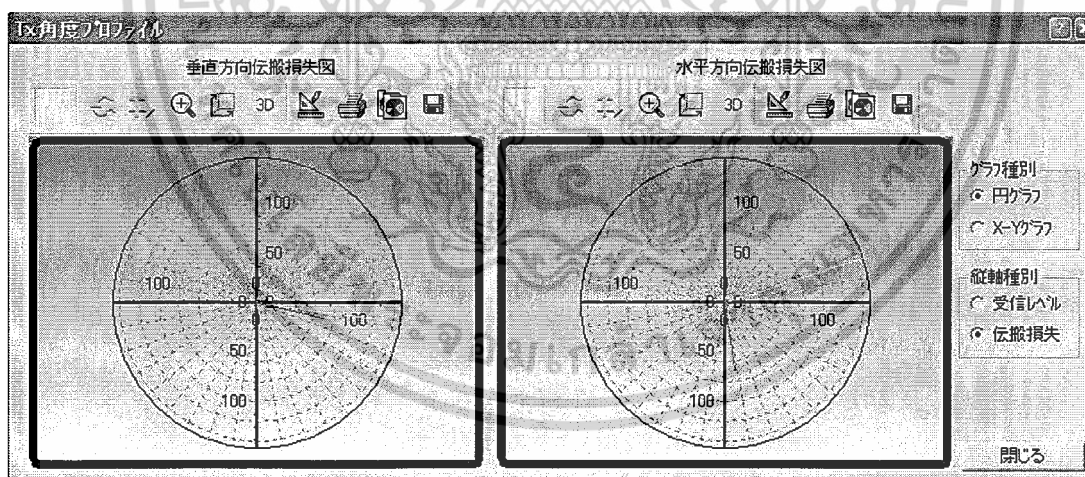
**ตารางที่ 5.2** แสดงค่า ระยะห่าง TxRx, Path loss, Time of Arrival ของแบบจำลองที่ 2

No.	ระยะห่าง TxRx (m)	Path loss จากการทดลอง (dB)	Path loss จากการคำนวณ (dB)	Time of Arrival (nsec)
1	28.67	69.20	69.19	95.63
2	47.19	147.20	74.46	157.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

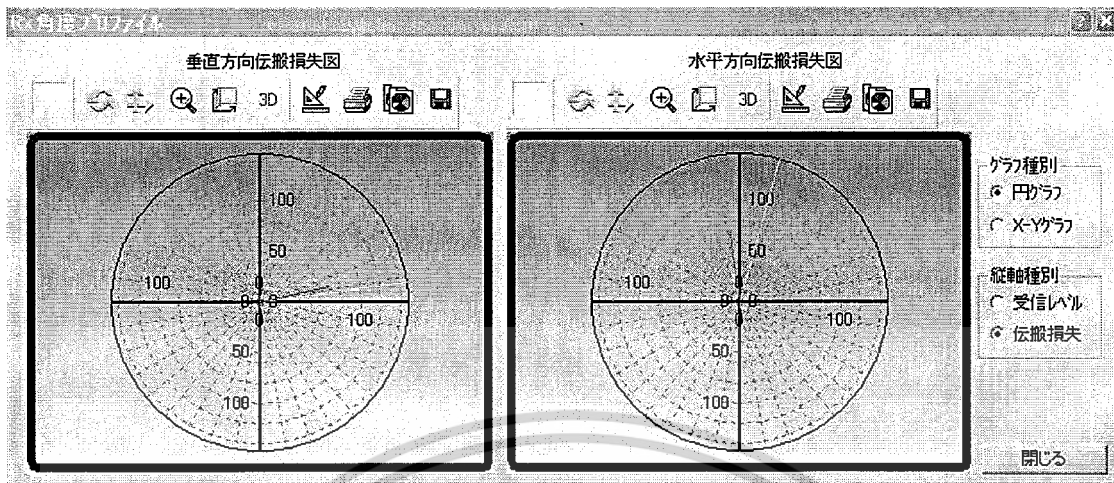


**รูปที่ 5.11** กราฟแสดงค่า Power Delay Profile แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec



**รูปที่ 5.12** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



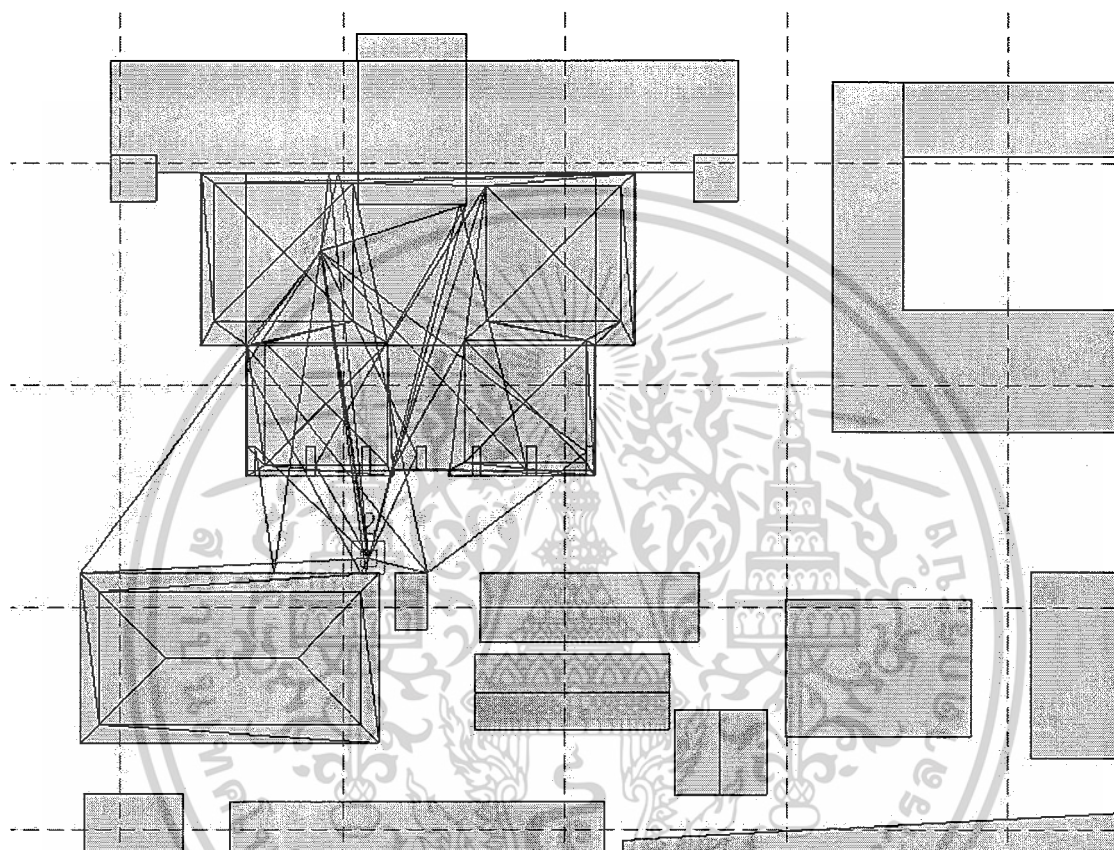
**รูปที่ 5.13** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth



**รูปที่ 5.14** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับ ในรูปแบบ Top-View 3D

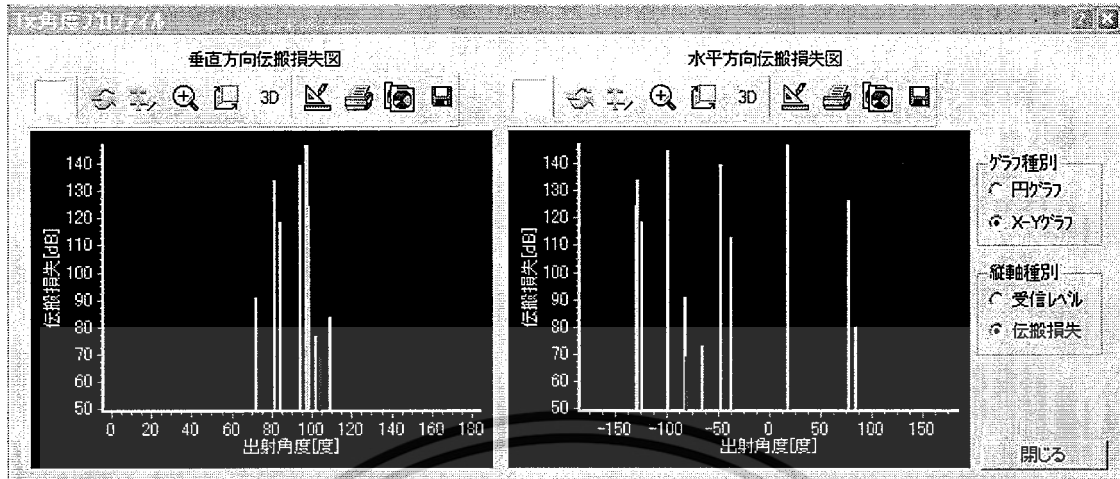
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแบบจำลองครั้งที่ 3 กำหนดให้สายอากาศมีค่าการสะท้อนกับตัวอาคารได้ และมีการ Diffraction โดยใช้แบบจำลองของตึก 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ผลจากการจำลองและวิเคราะห์ ได้แสดงตามรูปดังนี้

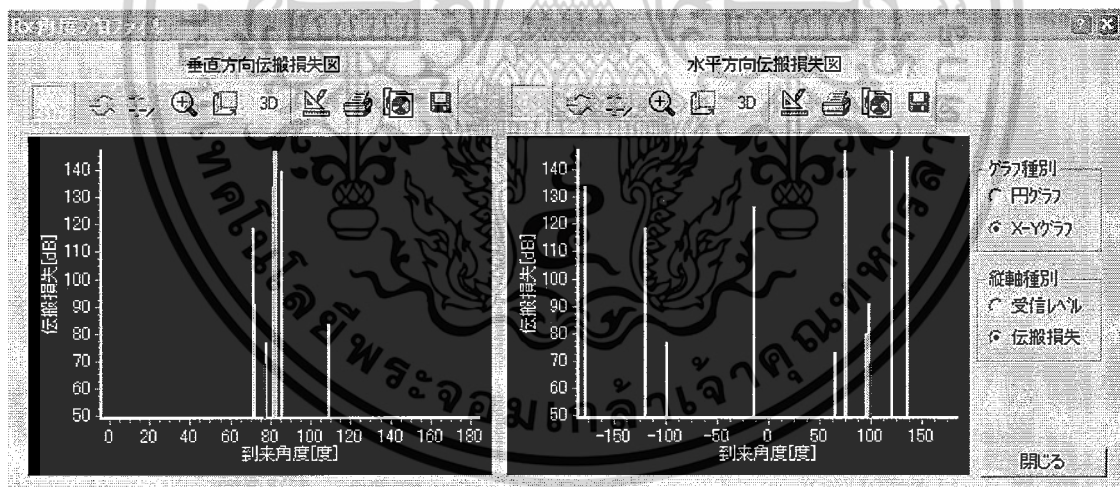


**รูปที่ 5.15** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับแบบมีค่าการสะท้อนกับตัวอาคารได้ และมีการ Diffraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.16** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph



**รูปที่ 5.17** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph

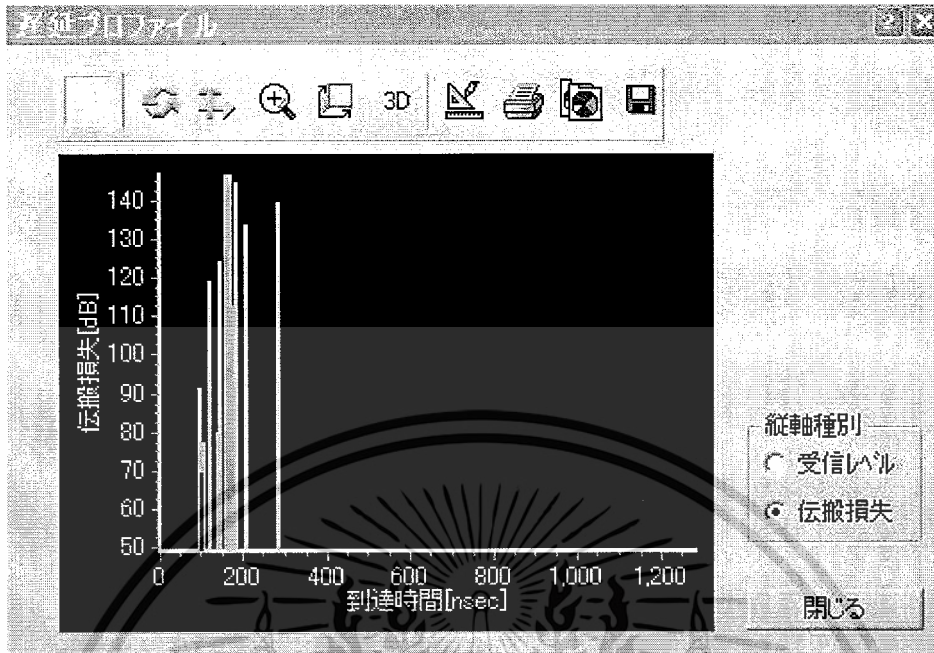
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองดังรูปที่ 5.1 จะได้ผลดังรูปซึ่งเป็นกราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่า path loss และ Angle ของเสาสัญญาณ Tx และ Rx โดยผลการทดลองจะแสดงในตาราง

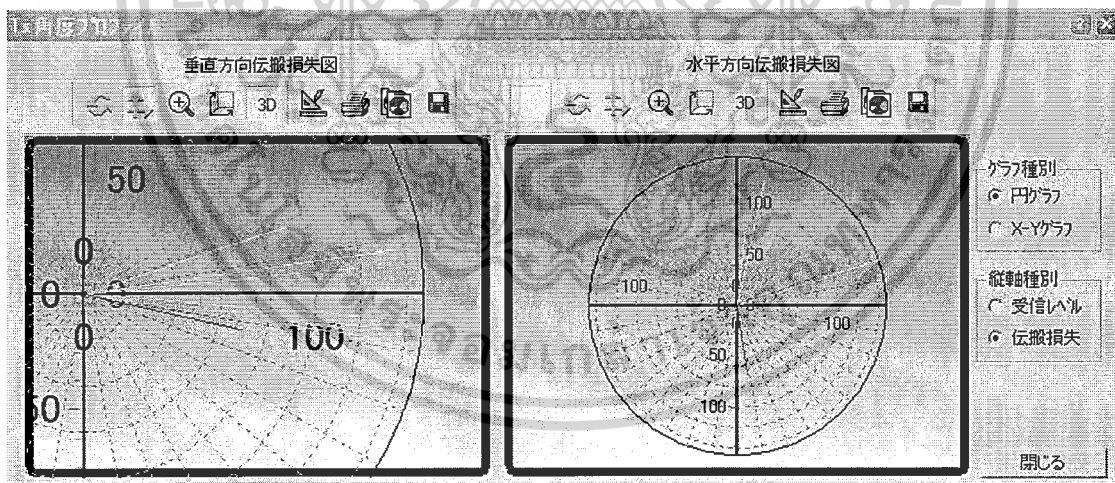
**ตารางที่ 5.3** แสดงค่า ระยะห่าง TxRx, Path loss, Time of Arrival ของแบบจำลองที่ 3

No.	ระยะห่าง TxRx (m)	Path loss จากการทดลอง (dB)	Path loss จาก การคำนวณ (dB)	Time of Arrival (nsec)
1	28.67	69.20	69.19	95.63
2	42.58	79.72	72.63	142.05
3	31.18	77.06	71.80	104.02
4	29.31	91.12	72.18	97.76
5	31.17	72.99	72.27	103.97
6	29.50	83.41	72.38	98.39
7	47.19	147.20	74.46	157.41
8	36.38	118.78	72.20	121.34
9	50.91	147.22	75.28	169.82
10	84.99	139.55	79.26	283.49
11	50.06	126.62	75.30	167.00
12	42.88	124.36	73.95	143.02
13	53.85	112.93	75.61	179.62
14	62.64	133.74	77.39	208.93
15	55.39	144.53	76.02	184.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

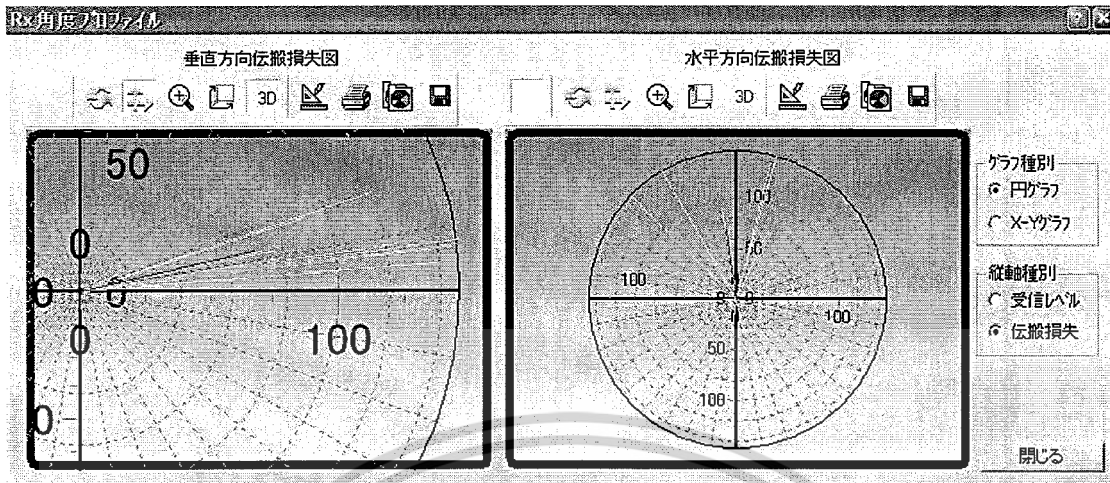


**รูปที่ 5.18** กราฟแสดงค่า Power Delay Profile แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec



**รูปที่ 5.19** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

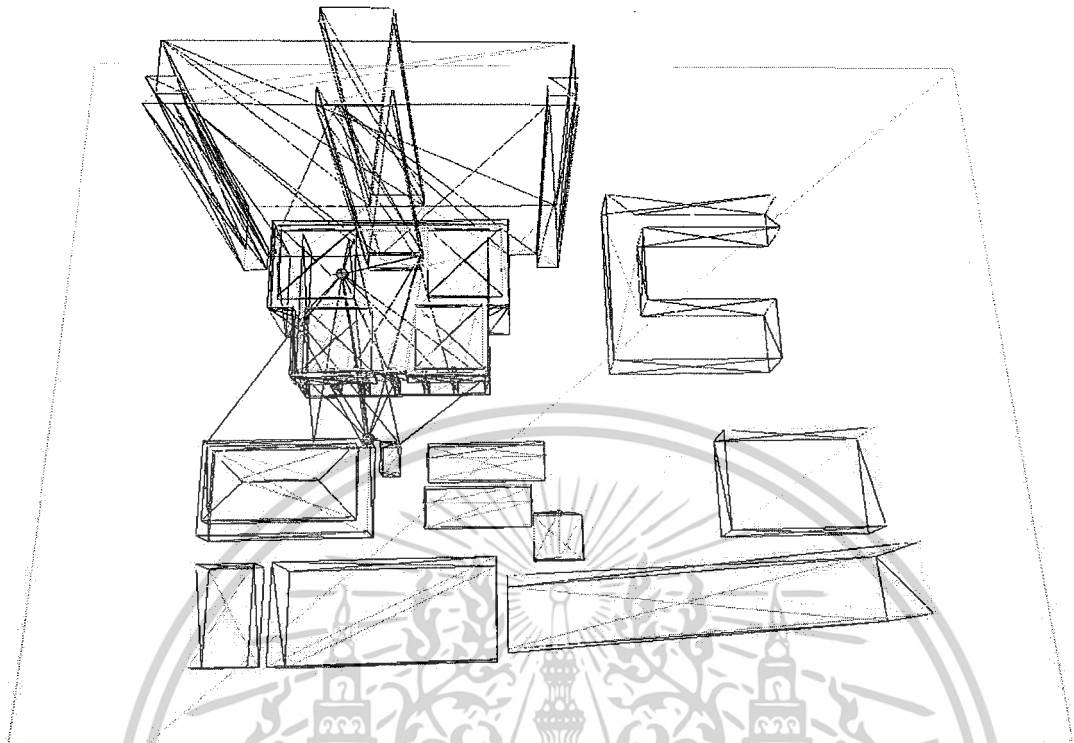


**รูปที่ 5.20** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth



**รูปที่ 5.21** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับในรูปแบบ Side-View 3D

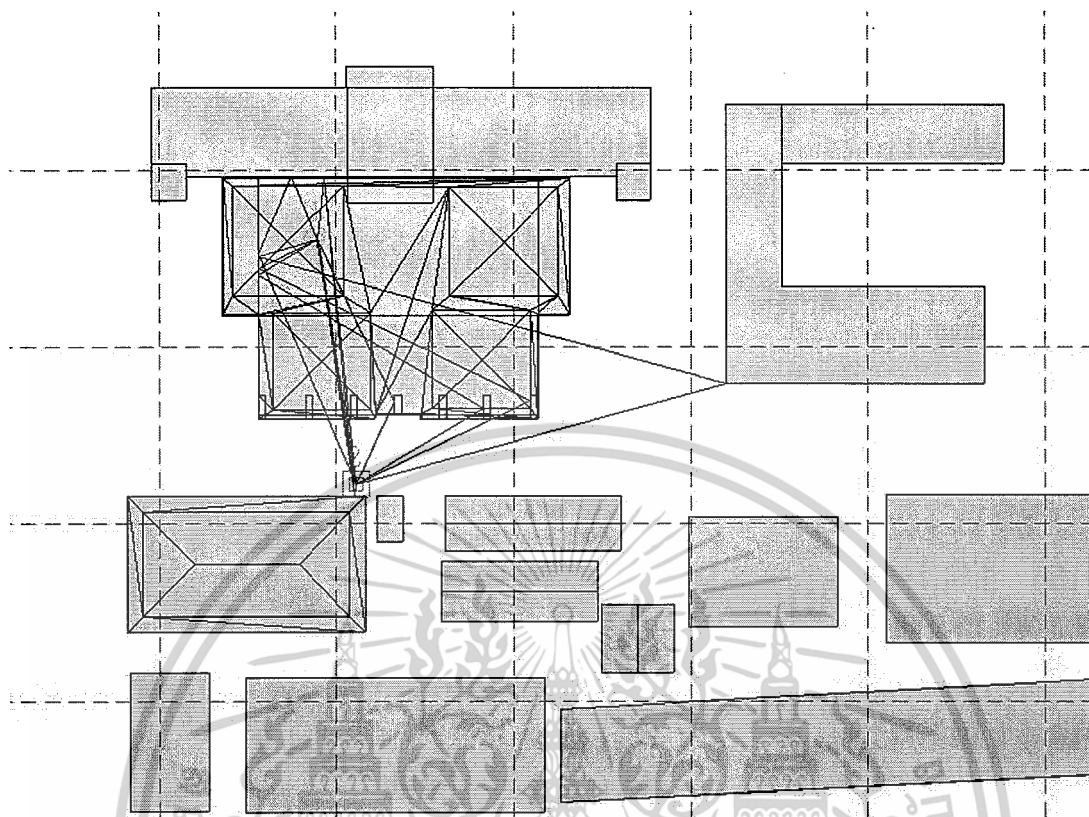
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



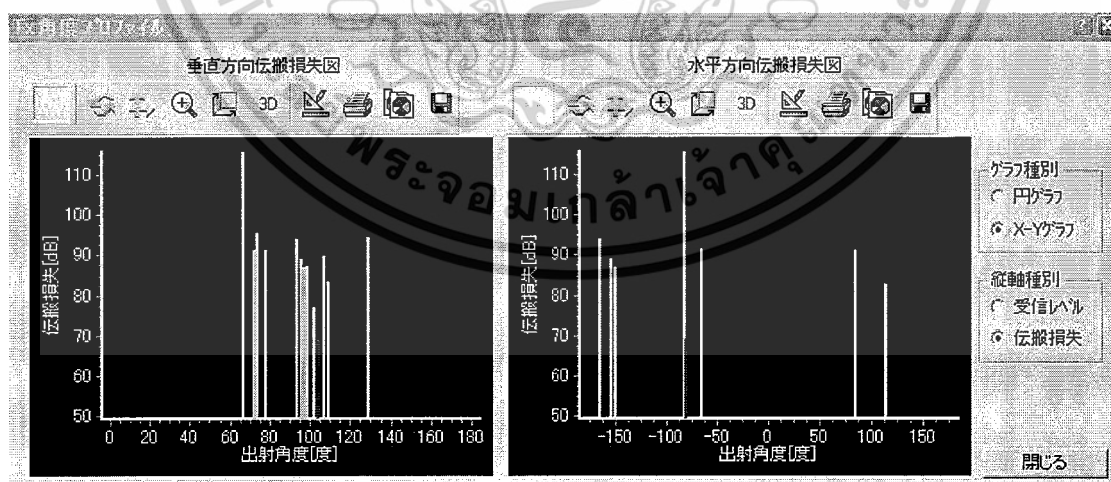
**รูปที่ 5.22** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับ ในรูปแบบ Top-View 3D

ในแบบจำลองครั้งที่ 4 กำหนดให้สายอากาศมีค่าการสะท้อนกับตัวอาคารมากกว่าในแบบจำลองครั้งที่ 1 แต่ไม่มีการ Diffraction โดยใช้แบบจำลองของตึก 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ผลจากการจำลองและวิเคราะห์ ได้แสดงตามรูปดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

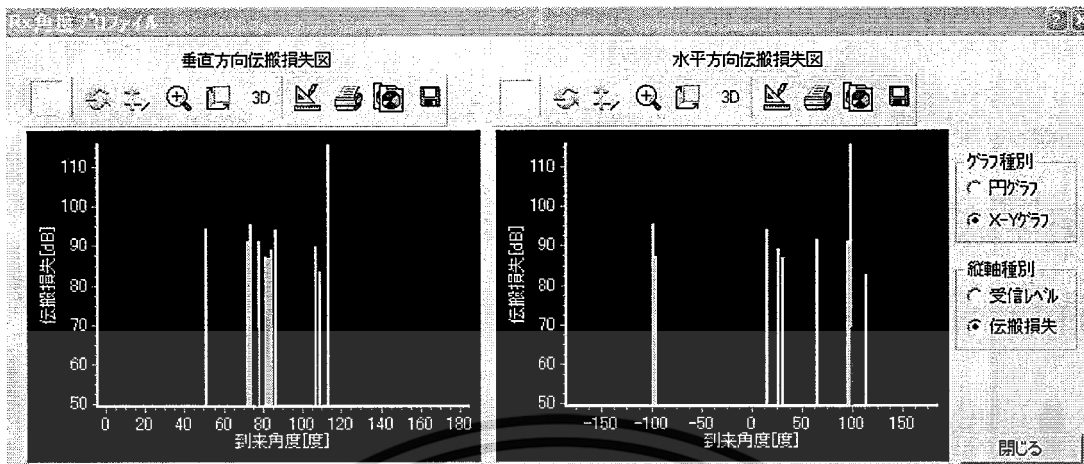


**รูปที่ 5.23** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับแบบมีค่าการสะท้อนกับตัวอาคารมากกว่าในแบบจำลองครั้งที่ 1 แต่ไม่มีการ Diffraction



**รูปที่ 5.24** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.25** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph

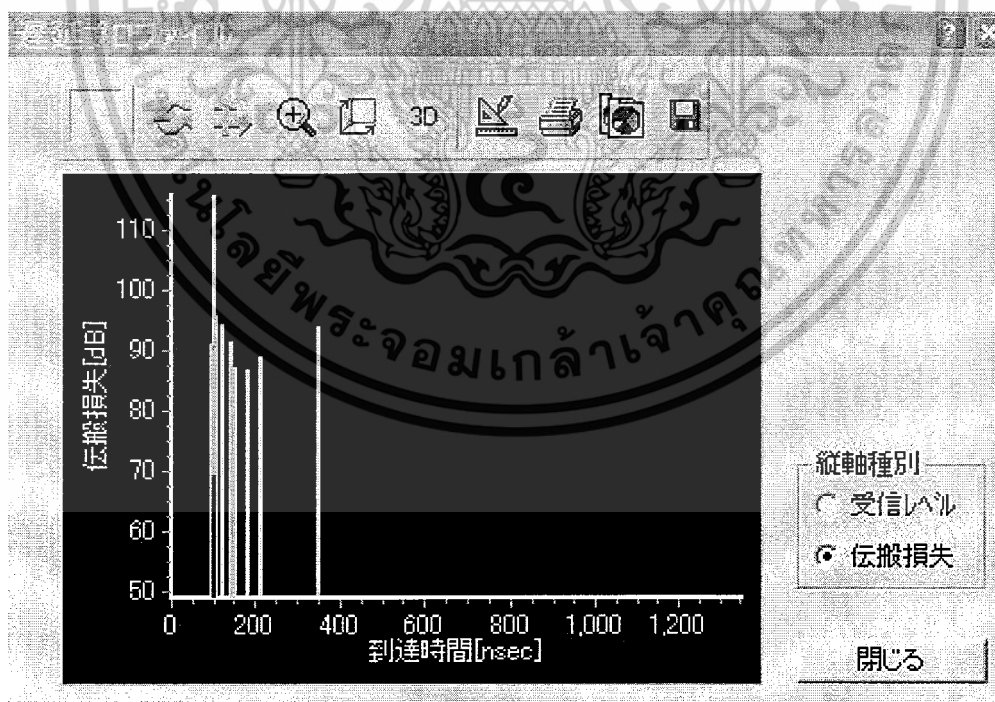
จากการทดลองดังรูปที่ 5.1 จะได้ผลดังรูปซึ่งเป็นกราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่า path loss และ Angle ของเสาสัญญาณ Tx และ Rx โดยผลการทดลองจะแสดงในตาราง

**ตารางที่ 5.4** แสดงค่า ระยะห่าง TxRx, Path loss, Time of Arrival ของแบบจำลองที่ 4

No.	ระยะห่าง TxRx (m)	Path loss จากการทดลอง (dB)	Path loss จากการคำนวณ (dB)	Time of Arrival (nsec)
1	28.67	69.20	69.19	95.63
2	42.58	79.72	74.58	142.05
3	31.18	77.06	71.92	104.02
4	29.31	91.12	72.03	97.76
5	31.17	72.99	71.36	103.97
6	29.50	83.41	71.02	98.39
7	43.02	91.40	75.51	143.49
8	45.15	87.31	74.40	150.59
9	31.77	95.67	72.58	105.97

ตารางที่ 5.4 แสดงค่า ระยะห่าง TxRx, Path loss, Time of Arrival ของแบบจำลองที่ 4 (ต่อ)

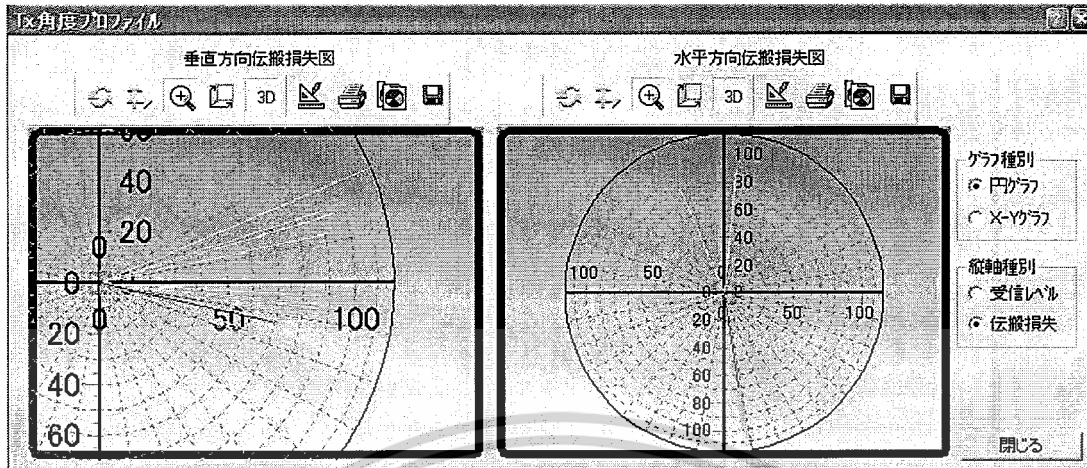
No.	ระยะห่าง TxRx (m)	Path loss จากการทดลอง (dB)	Path loss จากการคำนวณ (dB)	Time of Arrival (nsec)
10	31.94	89.95	72.77	106.55
11	35.86	94.42	75.81	119.62
12	45.94	82.70	73.97	153.23
13	54.35	86.99	75.43	181.28
14	31.76	91.50	71.96	105.93
15	105.23	94.13	80.96	351.00
16	63.78	88.94	76.93	212.73
17	30.35	116.18	73.35	101.25
18	31.93	85.74	70.92	106.51



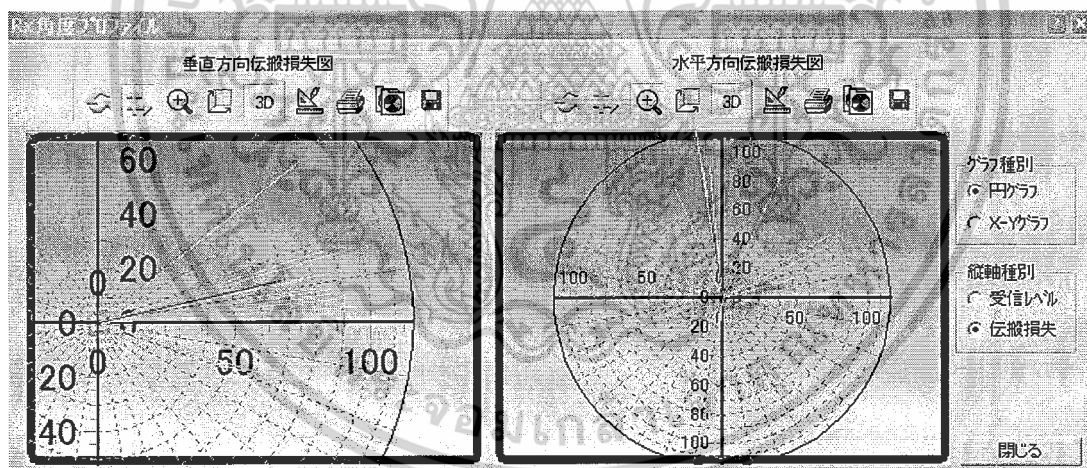
รูปที่ 5.26 กราฟแสดงค่า Power Delay Profile แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB

แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

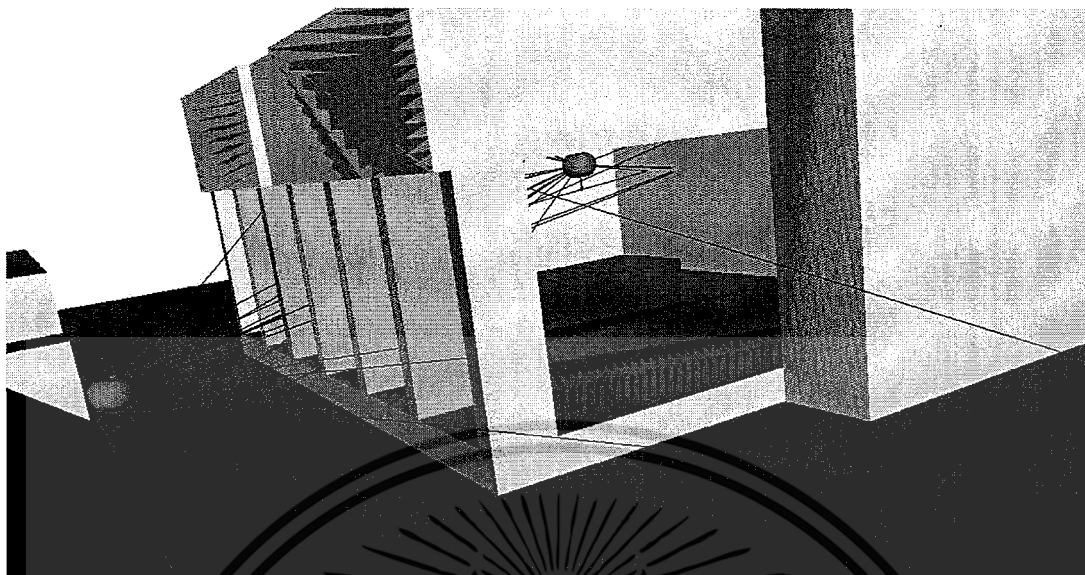


**รูปที่ 5.27** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth



**รูปที่ 5.28** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



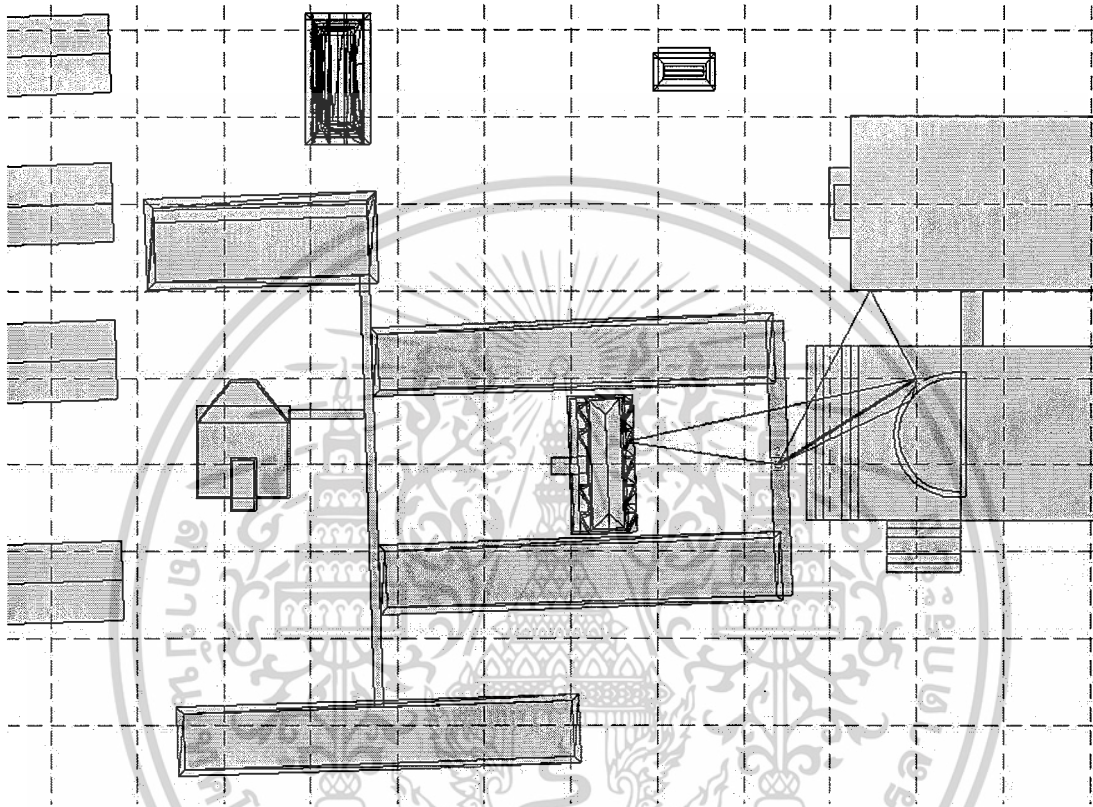
**รูปที่ 5.29** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับในรูปแบบ Side-View 3D



**รูปที่ 5.30** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับในรูปแบบ Side-View 3D

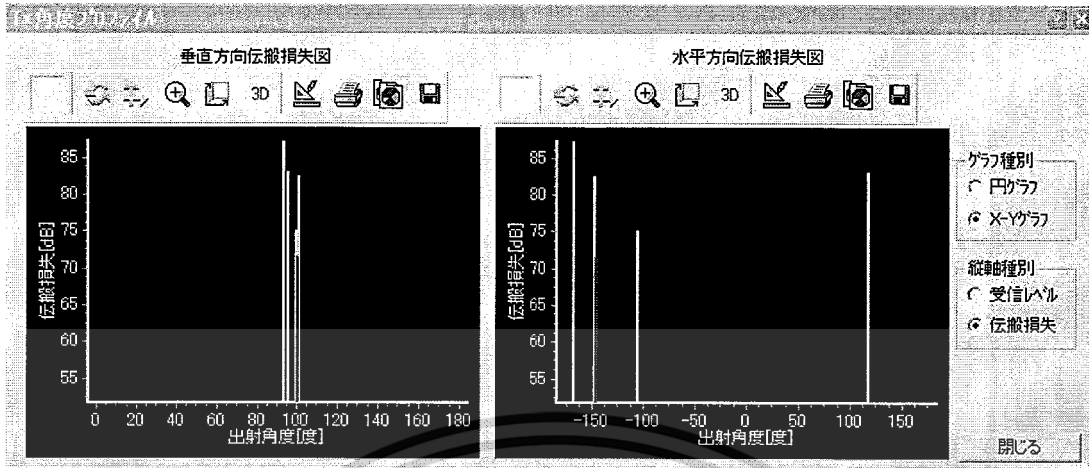
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแบบจำลองครั้งที่ 5 กำหนดให้สายอากาศมีค่าการสะท้อนกับตัวอาคารได้ แต่ไม่มีการ Diffraction โดยใช้แบบจำลองของตึกคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ผลจากการจำลองและวิเคราะห์ได้ แสดงตามรูปดังนี้

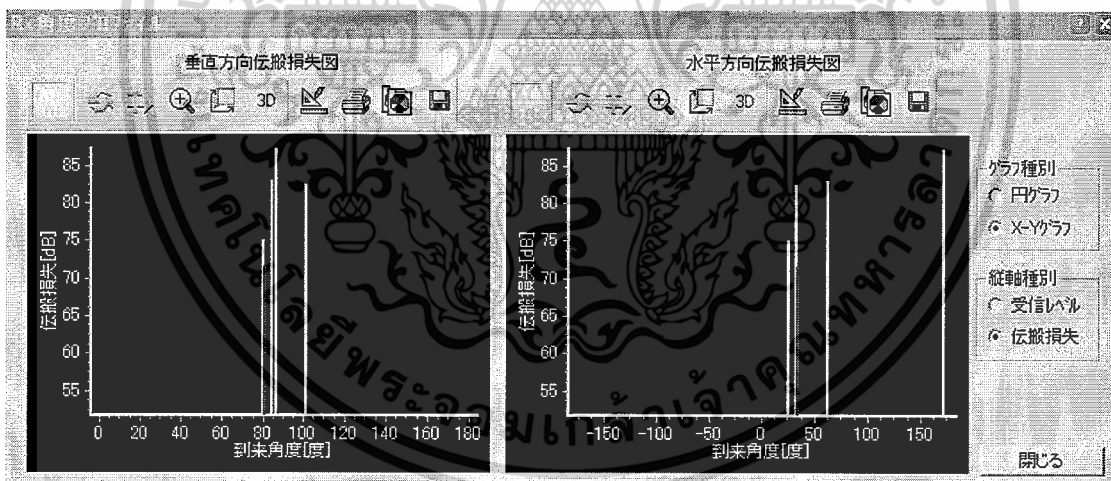


**รูปที่ 5.31** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับแบบสายอากาศมีค่าการสะท้อนกับตัวอาคารได้ แต่ไม่มีการ Diffraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.32** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph



**รูปที่ 5.33** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองดังรูปที่ 5.1 จะได้ผลดังรูปซึ่งเป็นกราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่า path loss และ Angle ของเสาสัญญาณ Tx และ Rx โดยผลการทดลองจะแสดงในตาราง

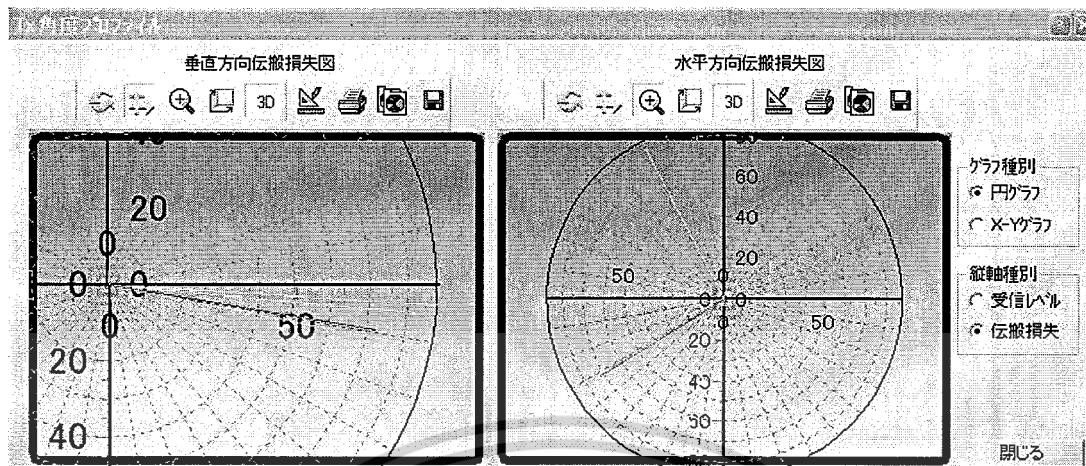
**ตารางที่ 5.5** แสดงค่า ระยะห่าง TxRx, Path loss, Time of Arrival ของแบบจำลองที่ 5

No.	ระยะห่าง TxRx (m)	Path loss จาก การทดลอง (dB)	Path loss จาก การคำนวณ (dB)	Time of Arrival (nsec)
1	38.29	71.71	71.71	127.73
2	38.47	82.43	73.63	128.34
3	105.08	87.43	81.11	350.49
4	39.84	75.02	73.62	132.90
5	68.81	83.09	79.23	229.51

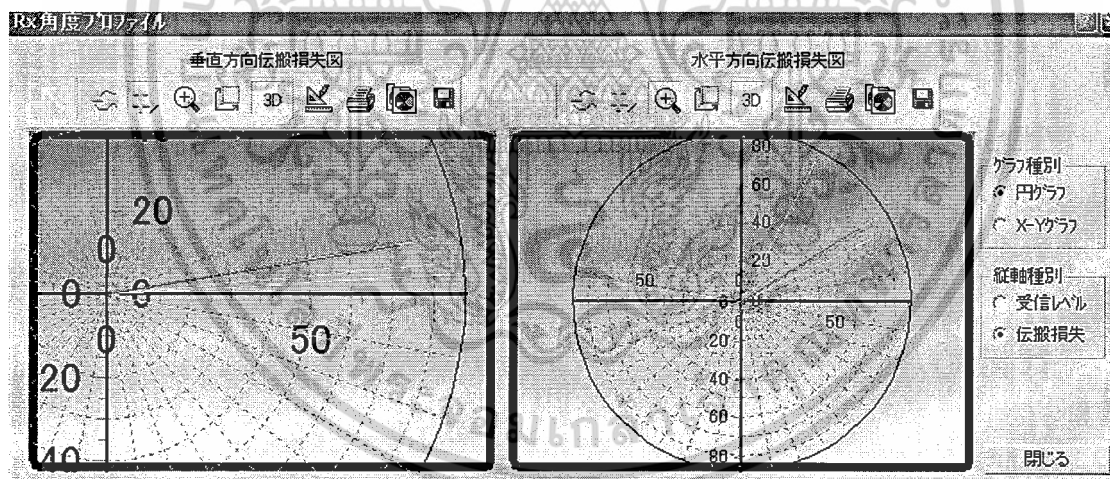


**รูปที่ 5.34** กราฟแสดงค่า Power Delay Profile แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



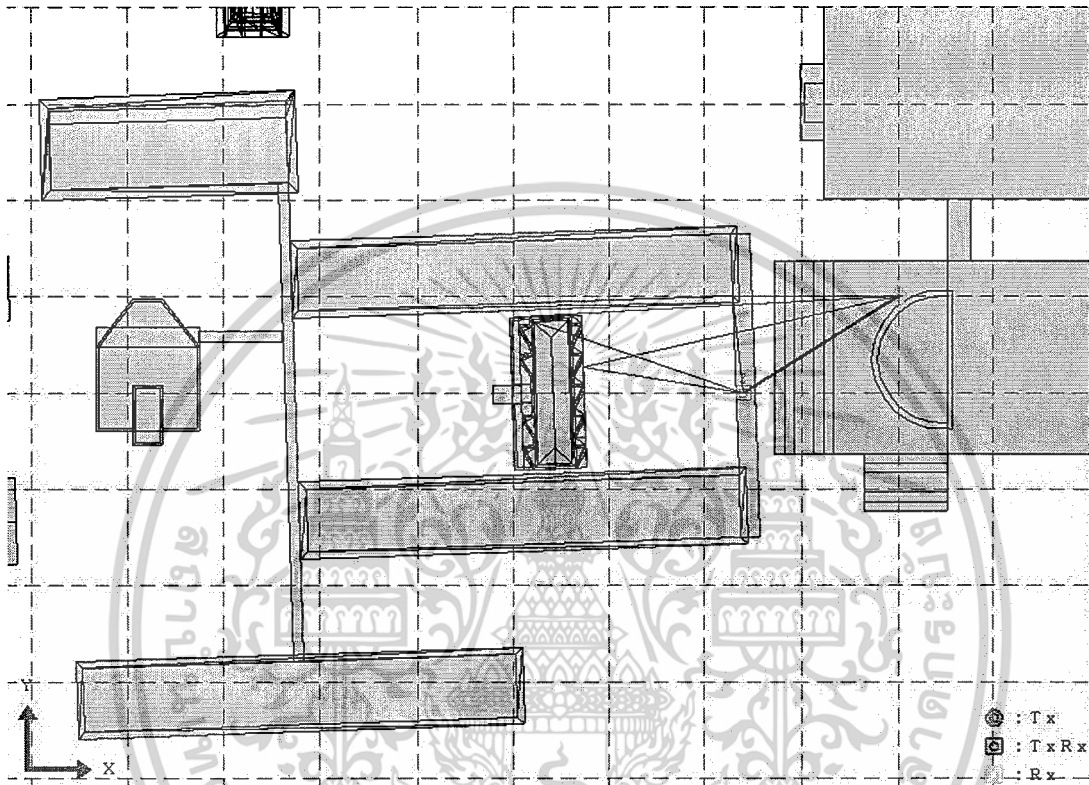
**รูปที่ 5.35** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth



**รูปที่ 5.36** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth

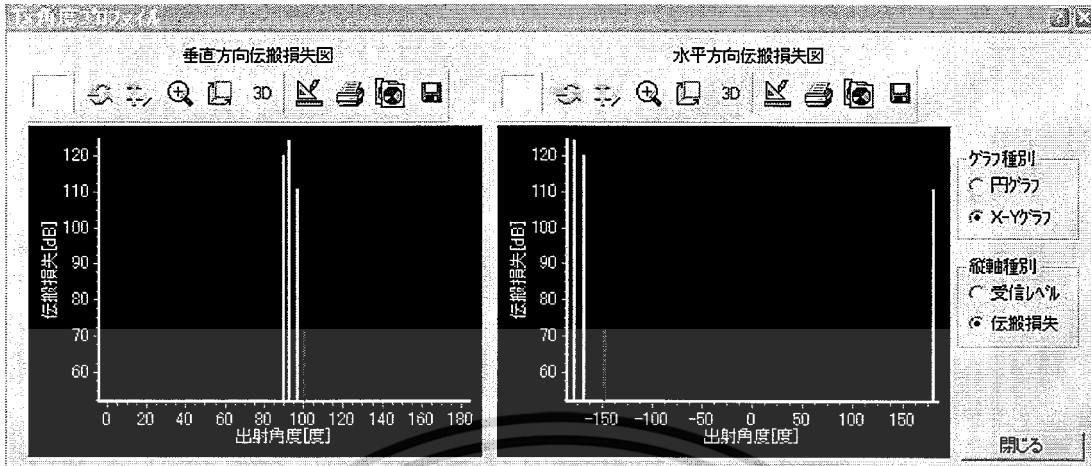
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแบบจำลองครั้งที่ 6 กำหนดให้สายอากาศไม่มีการสะท้อนกับตัวอาคาร แต่มีการ Diffraction โดยใช้แบบจำลองของตีคคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ผลจากการจำลองและวิเคราะห์ได้แสดงตามรูปดังนี้

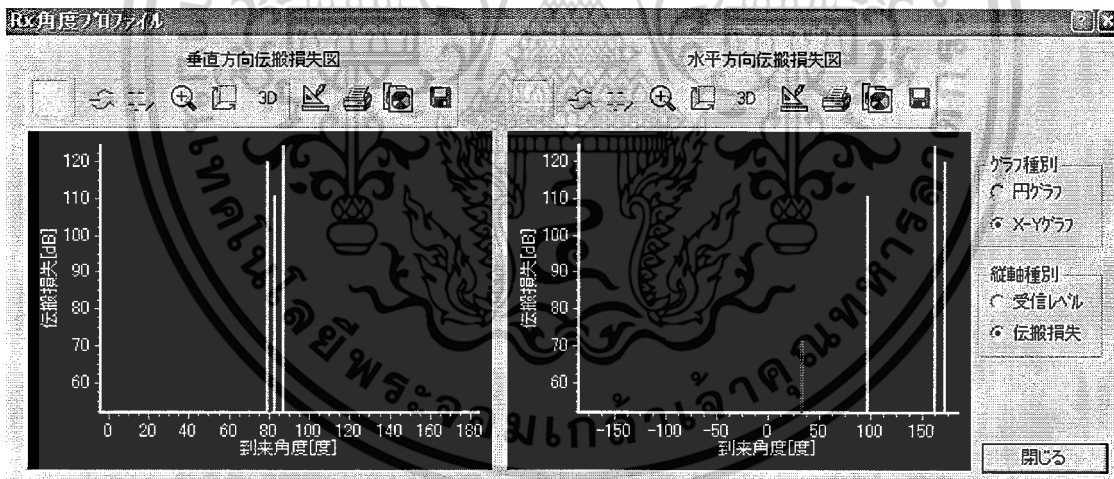


**รูปที่ 5.37** แสดงการ Ray-Tracing จากสายอากาศภาคส่งไปยังภาครับแบบไม่มีการสะท้อนกับตัวอาคาร แต่มีการ Diffraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.38** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph



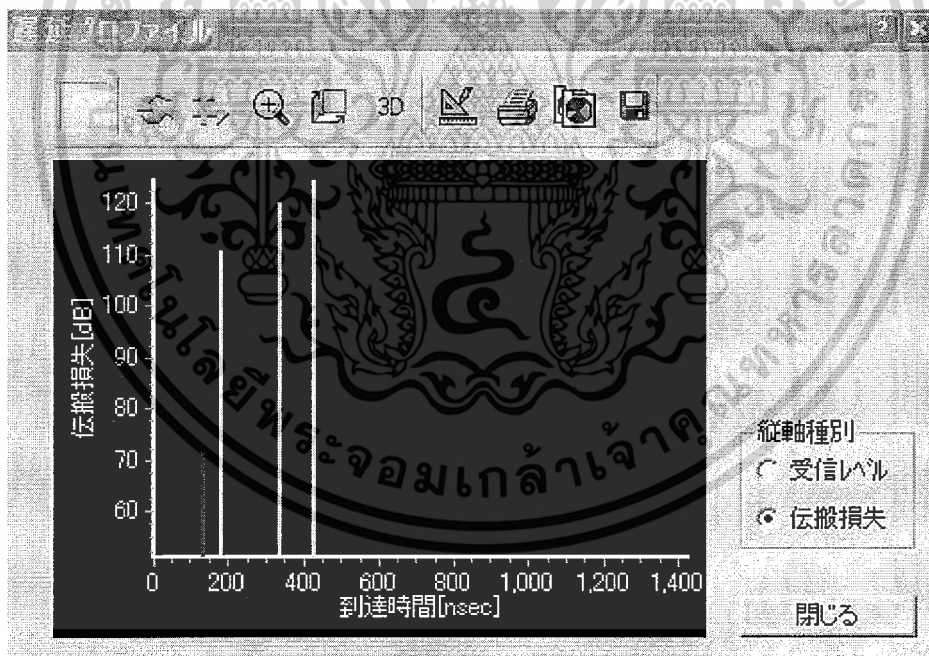
**รูปที่ 5.39** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec แกน X โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบ XY-Graph

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองดังรูปที่ 5.1 จะได้ผลดังรูปซึ่งเป็นกราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่า path loss และ Angle ของเสาสัญญาณ Tx และ Rx โดยผลการทดลองจะแสดงในตาราง

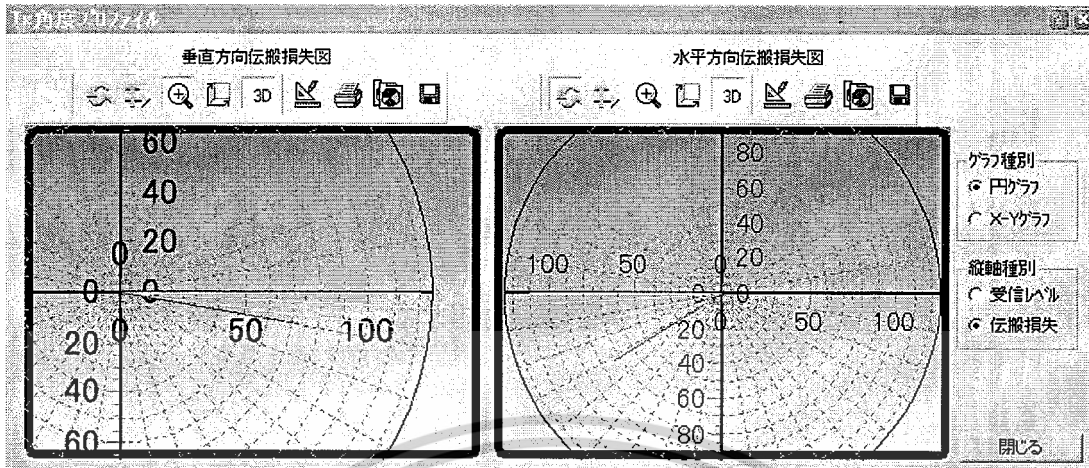
**ตารางที่ 5.6** แสดงค่า ระยะห่าง TxRx, Path loss, Time of arrival ของแบบจำลองที่ 6

No.	ระยะห่าง TxRx (m)	Path loss จากการทดลอง (dB)	Path loss จากการคำนวณ (dB)	Time of arrival (nsec)
1	38.29	71.71	71.71	127.73
2	101.56	120.05	80.34	338.77
3	55.00	110.56	75.95	183.46
4	128.44	124.73	82.69	428.42

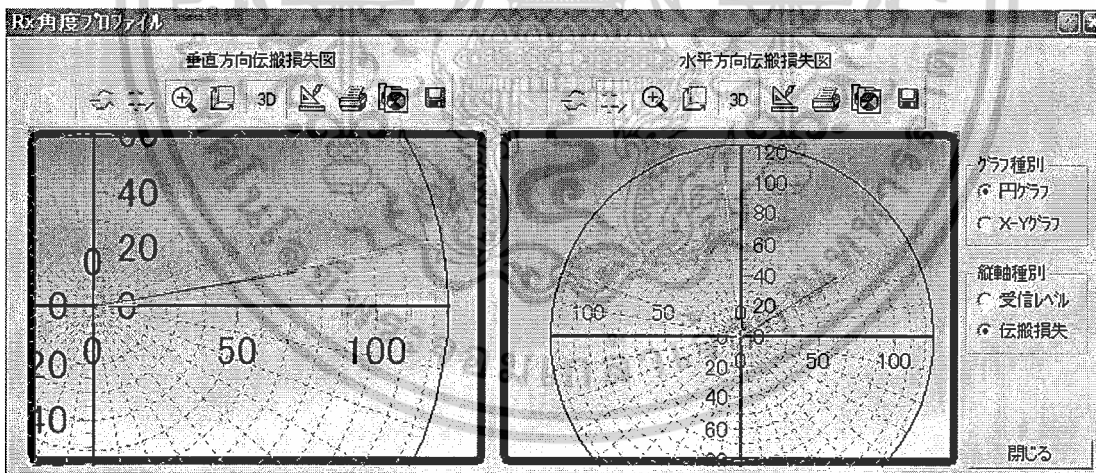


**รูปที่ 5.40** กราฟแสดงค่า Power Delay Profile แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB แกน Y กับ เวลาที่คลื่นเข้ามาถึง (Time of Arrival) หน่วย nsec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.41** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาคส่ง Tx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth



**รูปที่ 5.42** กราฟ Angle Profile ของสายอากาศภาครับ Rx แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Path Loss หน่วย dB กับ มุมที่คลื่นเข้ามาถึง (Angle of Arrival) โดยที่ด้านซ้ายเป็นการวางสายอากาศแนวตั้ง (Vertical) และด้านขวาเป็นการวางสายอากาศแนวนอน (Horizontal) แสดงในรูปแบบกราฟ Azimuth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผล ปัญหา และแนวทางการพัฒนา

#### 6.1 สรุปผล

จากการศึกษาและทดลองการใช้โปรแกรม RapLab 4.0 ทำให้ทราบว่าเส้นการเดินทางการส่งสัญญาณภายนอกอาคารนั้นมาการกระจายไปในทิศทางต่างๆ เมื่อทำการทดลองแล้วจะพบว่าเส้นทางที่มีกำลังในการส่งสัญญาณจากเสาสัญญาณภาคส่ง (Tx) ไปยังเสาสัญญาณภาครับ (Rx) ที่ดีที่สุดคือเส้นทางไหน จากการทดลองใช้โปรแกรม RapLab 4.0 เส้น Directions ซึ่งจะเป็นเส้นทางที่มีกำลังการส่งสัญญาณที่ดีที่สุดและมี Path loss น้อยที่สุด ส่วนเส้นทางอื่นๆ จะเป็นเส้นทางที่มีกำลังการส่งน้อยและใช้เวลานาน โดยจะมีการเลี้ยวเบนเมื่อกระทบกับมุมหรือขอบของอาคารในแบบ Diffractions และแบบ Reflections คือ รังสีจะเกิดการสะท้อนกับพื้นผิวและกำแพงของอาคาร โดยที่เราสามารถกำหนดค่า diffractions และค่า Reflections ว่าต้องการมากเท่าไรผ่านโปรแกรมได้ และจากผลการคำนวณจะได้ค่าที่มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่ผลการทดลองมี Pattern ของสายอากาศและ Gain เข้ามาเกี่ยวข้อง ค่าที่ได้จึงมีค่าไม่ตรงกับการทดลองในโปรแกรมแต่ได้ค่าใกล้เคียงกัน

#### 6.2 ปัญหาที่พบ

จากการทดลองใช้โปรแกรม RapLab 4.0 พบปัญหาต่างๆ ดังนี้

6.2.1 เนื่องจากคำสั่งต่างๆ ในตัวโปรแกรม Raplab 4.0 เป็นภาษาอังกฤษทำให้ยากต่อการใช้งาน

6.2.2 เครื่องที่ใช้ในการทดลองไม่เพียงพอต่อความต้องการ และเกิดปัญหาบ่อยครั้ง

6.2.3 เมื่อกำหนดค่า diffractions และค่า Reflections ให้มีค่ามากๆ แล้ว Run จะพบว่ามีการประมวลผลที่นานมากๆ หรืออาจประมวลผลไม่ได้เลย

#### 6.3 แนวทางการพัฒนา

จากปัญหาที่พบ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการที่จะต้องศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมให้ละเอียดยิ่งขึ้น เพื่อหาทางแก้ปัญหที่เกิดขึ้นในหัวข้อข้างต้น และเมื่อทำการออกแบบและ Simulate เสร็จสิ้นจึงดำเนินการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ และวัดสัญญาณจากสถานที่จริงต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] H. Zhu, J. Takada.2000.A Ray-Tracing-Based Channel Modeling Scheme for Future Mobile Communication Systems. Interdisciplinary Graduate School for Science and Engineering.
- [2] โมไนย ไกรฤกษ์ และวิวัฒน์ กิรานนท์. ทฤษฎีสายอากาศ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] พงษ์วัฒน์ สีลาเหล็กยม, สันติพงศ์ แดงขาว และจักรพันธ์ ศรีรัตน์. วิศวกรรมสายอากาศ (Antennas Engineering). นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [4] Mr.Voravut Srithong. Radio Propagation. กระบี่ : <http://www.hs8jyx.com>
- [5] แพลนคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] นาวตรีพานิช ศิริสัมปทา, SCATTERING EVALUATION SCHEME ON BUILDING SURFACE FOR UWB IMPULSE RADIO SYSTEM : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2551