

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับการวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมือง



นายสุรเชษฐ กอสิริขจร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

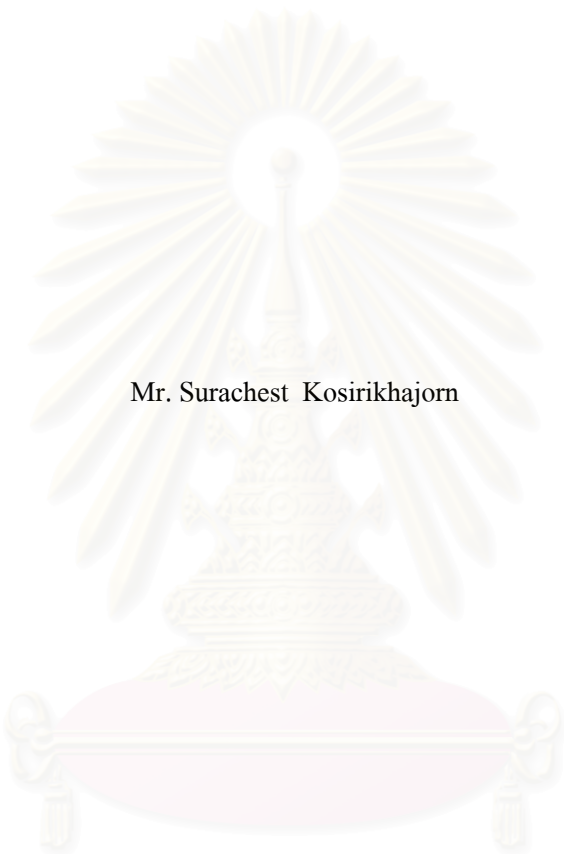
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1142-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A RADIO WAVE PROPAGATION MODEL FOR MOBILE COMMUNICATION SYSTEM PLANNING IN
URBAN ENVIRONMENT



Mr. Surachest Kosirikhajorn

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1142-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับการวางแผนระบบสื่อสาร
เคลื่อนที่ในเขตเมือง
โดย นายสุรเชษฐ กอสิริจร
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศุรเชษฐ กอสิริจิจร: แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับการวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมือง (A Radio Wave Propagation Model for Mobile Communication System Planning in Urban Environment) อ. ที่ปริกษา : รศ. ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร,
143 หน้า. ISBN 974-17-1142-5.

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ โดยกรรมวิธีเชิงรังสีและการใช้ทฤษฎีภาพเสมือนร่วมกับฐานข้อมูลบริเวณเสาตั้งกำลังคลื่น ทำให้สามารถคำนวณจุดที่รังสีตกกระทบแล้วสะท้อนหรือเลี้ยวเบนจากอาคาร การตามรอยทางเดินของรังสีทำโดยเชื่อมตำแหน่งของสถานีฐาน จุดตกกระทบ จุดสะท้อนหรือจุดเลี้ยวเบน และตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ การติดตามรอยทางเดินของรังสีจึงมีความแม่นยำและรวดเร็วมากกว่าการใช้ระเบียบวิธีการปล่อยรังสีทดสอบ การวัดทดสอบเพื่อตรวจสอบการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ กระทำโดยการตั้งสถานีฐานในคณะวิศวกรรมศาสตร์แล้ววัดทดสอบและวัดทดสอบในพื้นที่บริการของระบบสื่อสารเคลื่อนที่จริง ผลการวิจัยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับผลการวัดมีค่าเท่ากับ 0.7263 ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณโดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับผลการวัดการวัดการแพร่กระจายจริงแล้วสร้างตัวประกอบชดเชยเพื่อปรับเทียบผลการคำนวณกับผลการวัด การบันทึกฐานข้อมูลของรังสีสัญญาณ ที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่ที่สามารถสร้างแผนภูมิการกระจายกำลังคลื่น แผนภูมิมุมการมาถึงของคลื่น แผนภูมิการกระจายเวลาประวิงและคำนวณค่าความสามารถครอบคลุมของสถานีฐาน และค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยได้อย่างถูกต้องพอสมควรกับความละเอียดของฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นและหาได้ ทำให้สามารถนำค่าปัจจัยเชิงระบบเหล่านี้ไปใช้ในช่วยการออกแบบและวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่ให้มีประสิทธิภาพ ความแม่นยำของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้ขึ้นอยู่กับความละเอียดถูกต้องในการสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางและระเบียบวิธีการลบขอบเขตเงาบนผนังอาคารในการสร้างฐานข้อมูล บริเวณเสาตั้งกำลังคลื่นมีความถูกต้องแม่นยำเมื่อการเรียงตัวของผนังอาคารไม่ซับซ้อนมากนัก

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา..... 2545

4370586321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: RADIO WAVE PROPAGATION MODELLING / URBAN PROPAGATION MODELLING / GEOMETRICAL OPTICS/UNIFORM THEORY OF DIFFRACTION / THEOREM OF IMAGES / ILLUMINATION ZONES / POWER PROFILE / TIME DELAY SPREAD / ANGLE OF ARRIVAL

SURACHEST KOSIRIKHAJORN : A RADIO WAVE PROPAGATION MODEL FOR MOBILE COMMUNICATION SYSTEM PLANNING IN URBAN ENVIRONMENT.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHATCHAI WAIYAPATTANAKORN, Ph.D.

143 pp. ISBN 974-17-1142-5.

This research develops a ray based propagation model employing the image theorem and the illumination zone technique. Ray tracing according to the aforementioned approach is by connecting the base station, reflection points or diffraction points and mobile station. This ray tracing gives more accurate results and consumes less time than the classical technique of ray launching. Experimental drive-test for verifying the developed model have been carried out in the faculty of Engineering Chulalongkorn University and in two real service areas of a mobile communication network. The average correlation coefficient between the simulation results, which have been calibrated by calibration factor, and measurement results is 0.7263. The ray database constructed from calculated results is used in plotting the power profile, the angle of arrival diagram and the time delay profile which can be used in calculation of the coverability of the base station and the mean time delay spread. So these system parameters can be used in construction and planning of mobile communication networks. The accuracy of the result is satisfactory with respect to the available database accuracy. The shadow removal using in construction of illumination zones gives good accuracy when the complexity of walls configuration is not very high.

Department Electrical Engineering

Field of study Electrical Engineering

Academic year 2002

Student's signature.....

Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ ข้อมูลในการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุและอุปกรณ์ในการวัดการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

ขอขอบคุณ ดร.ศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข ดร.ธีรศักดิ์ อนันตกุล คุณวิลาศ วงศ์แจ่มบุญ และ คุณวันชัย อัมพชินีวรรณ ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ น้องๆ ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกาย แรงใจ จินงานวิจัย สำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณแฉวยพา เจริญเลิศอุดม ที่ช่วยเป็นกำลังใจให้สามารถทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จ ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและทุกคนในครอบครัวที่ช่วยสนับสนุนด้านการเรียน และเป็นกำลังใจเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
หลักการและทฤษฎีที่ใช้.....	2
ทฤษฎีเบื้องต้น.....	2
การพิจารณาปัญหาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	3
วัตถุประสงค์.....	4
ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	5
ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุด้วยกรรมวิธีเชิงรังสี.....	7
การสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางในแบบจำลอง.....	7
การสร้างฐานข้อมูลสายอากาศ.....	10
รูปแบบการตามรอยทางเดินของรังสีแบบต่างๆ และข้อเปรียบเทียบ.....	13
การตามรอยทางเดินของรังสีโดยการปล่อยรังสีทดสอบ.....	13
การตามรอยทางเดินของรังสีโดยการใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน.....	16
ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีวิธีต่างๆ...22	
การตามรอยทางเดินของรังสี.....	23
ระนาบขนานกับพื้นโลก.....	24
ระนาบตั้ง.....	42
การคำนวณกำลังคลื่น.....	46
3 ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	48
บริเวณทดสอบ.....	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

การวัดและผลการวัด.....	53
ผลการวัดและผลการคำนวณ.....	55
บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	57
บริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	64
บริเวณถนนอังรีดูนังต์.....	66
ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ โดยใช้องค์ประกอบชดเชย เทียบกับผลการวัด.....	68
การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ โดยงานวิจัยนี้ เทียบกับผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ โดยงานวิจัย [1]	71
สรุป.....	77
4 การออกแบบและวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่.....	78
โดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	
การสร้างแผนภูมิแสดงกำลังคลื่นในพื้นที่บริการ.....	78
การหาค่าการกระจายเวลาประวิง.....	80
การหามุมการมาถึงของคลื่น.....	82
ผลการคำนวณ.....	84
บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	84
บริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	97
บริเวณถนนอังรีดูนังต์.....	102
สรุป.....	107
5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	108
สรุปงานวิจัย.....	108
ข้อเสนอแนะ.....	111
รายการอ้างอิง.....	113
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก.....	116
ภาคผนวก ข.....	129
ภาคผนวก ค.....	136
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	143

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สถานีฐานในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	52
3.2 สถานีฐานในบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และถนนอังรีดูนังต์.....	53
3.3 ค่าทางสถิติของผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้ฟังก์ชันชดเชยเทียบกับ ผลการวัดบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	63
3.4 ค่าทางสถิติของผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้ฟังก์ชันชดเชยเทียบกับ ผลการวัดบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	65
3.5 ค่าทางสถิติของผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้ฟังก์ชันชดเชยเทียบกับ ผลการวัดบริเวณถนนอังรีดูนังต์.....	67
3.6 ค่าทางสถิติของผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยใช้ฟังก์ชันชดเชยเทียบกับผลการวัด.....	70
3.7 การเปรียบเทียบค่าสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับ..... ผลการวัดโดยแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยนี้กับแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัย [1]	75
4.1 ค่าการกระจายเวลาประวิงของคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมแบบต่างๆ.....	82
4.2 ค่าความสามารถครอบคลุม (C) เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายใน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	84
4.3 ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ย ($\bar{\Delta}$) เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	87
4.4 ค่าความสามารถครอบคลุม (C) บริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อสถานีฐานคือ CHU1-1.....	97
4.5 ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ย ($\bar{\Delta}$) เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	100
4.6 ค่าความสามารถครอบคลุม (C) บริเวณถนนอังรีดูนังต์เมื่อสถานีฐานคือ HRDN-1.....	102
4.7 ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ย ($\bar{\Delta}$) เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณถนนอังรีดูนังต์.....	103

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะการใช้งานระบบสื่อสารเคลื่อนที่.....	3
1.2 ระบุว่าพิจารณาในแบบจำลอง.....	4
2.1 ลักษณะการประมาณอาคารเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมและการกำหนดพิกัด.....	8
2.2 ฐานข้อมูลด้านของอาคาร.....	8
2.3 การจำลองต้นไม้ในแบบจำลอง.....	9
2.4 ฐานข้อมูลต้นไม้.....	9
2.5 มุมก้ม มุมเอียง และ โพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าในระนาบของแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	11
(ก) มุมเอียงจากแนวพหุหลักในระนาบระดับ (ข) มุมก้มจากพหุหลักในระนาบตั้ง	
(ค) แนวโพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากสายอากาศส่ง	
2.6 การพิจารณารอยทางเดินของรังสีโดยวิธีปล่อยรังสีทดสอบบนระนาบระดับ.....	14
2.7 ขั้นตอนการกำหนดจุดสะท้อนและคำนวณรังสีสะท้อนโดยการปล่อยรังสีทดสอบ [1].....	15
2.8 การตามรอยทางเดินของรังสีโดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน.....	16
2.9 การสร้างบริเวณสาตส่งกำลังคลื่น และการตามรอยทางเดินของรังสี.....	18
โดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนและบริเวณสาตส่งกำลังคลื่น	
2.10 กระบวนการคำนวณรอยทางเดินของรังสีสะท้อน โดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน.....	19
และพื้นที่สาตส่งกำลังคลื่น	
2.11 ขอบเขตของมุมกวาดรังสีของแผนภูมิการมองเห็น.....	20
2.12 บางส่วนของแผนภูมิการมองเห็นของสภาพแวดล้อมในรูปที่ 2.11.....	21
2.13 ผลเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีการตามรอยทางเดินของรังสี.....	23
แบบปล่อยรังสีทดสอบ (.....) เทียบกับวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีโดย	
ใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนร่วมกับการสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่งกำลังคลื่น (.....)	
2.14 รอยทางเดินของรังสีตรงบนระนาบขนานกับพื้นโลกและระนาบตั้ง.....	25
2.15 กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีตรง.....	26
2.16 การสร้างภาพเสมือนและบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นของภาพเสมือน.....	27
2.17 ตัวอย่างพื้นที่สาตส่งกำลังคลื่นที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมจริง.....	28
2.18 โครงสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่งกำลังคลื่น.....	28
2.19 การวิเคราะห์รังสีแบบผสมจากระนาบสองมิติเพื่อพิจารณารอยทางเดินของรังสี.....	30
ในปริภูมิสามมิติ	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากผนังและรังสีสะท้อนจากผนัง.....	32
แล้วสะท้อนพื้นดินก่อนเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่	
2.21 รังสีเลี้ยวเบนบนระนาบขนานกับพื้นโลกและในปริภูมิสามมิติ.....	34
(ก) รังสีเลี้ยวเบนบนระนาบขนานกับพื้นโลก (ข) รังสีเลี้ยวเบนในปริภูมิสามมิติ [1]	
2.22 ลักษณะเวกเตอร์ที่ขอบเลี้ยวเบน (ก) เวกเตอร์ในระนาบตกกระทบและระนาบเลี้ยวเบน.....	35
(ข) มุมมองด้านบน	
2.23 ฐานข้อมูลขอบเลี้ยวเบนในแนวตั้ง.....	37
2.24 กระบวนการหารังสีเลี้ยวเบนที่สันขอบอาคารในแนวตั้ง.....	39
2.25 รังสีเลี้ยวเบนที่สันขอบของอาคารในแนวนอนและลักษณะเวกเตอร์ที่ขอบเลี้ยวเบน.....	40
(ก) รังสีเลี้ยวเบนที่สันขอบแนวนอนในปริภูมิสามมิติ (ข) มุมมองด้านข้างของรูป (ค)	
(ค) แนวเวกเตอร์ในระนาบตกกระทบและระนาบเลี้ยวเบน	
2.26 กระบวนการตามรอยทางเดินรังสีเลี้ยวเบนจากสันขอบอาคารในแนวนอน.....	41
2.27 รังสีสะท้อนจากพื้นดิน.....	42
2.28 กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากพื้นโลก.....	43
2.29 รังสีเลี้ยวเบนจากยอดตึก.....	44
2.30 จุดตัดของแนวรังสีและแนวสันขอบบนระนาบขนานกับพื้นโลก.....	44
2.31 กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากยอดตึก.....	45
2.32 สนามไฟฟ้ารวมที่สายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่รับได้.....	46
3.1 บริเวณทดสอบภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	49
3.2 บริเวณทดสอบรอบศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และแนวทดสอบ.....	49
3.3 บริเวณทดสอบบนถนนอังรีดูนังต์ และแนวทดสอบ.....	50
3.4 สถานีฐานในบริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและถนนอังรีดูนังต์.....	51
3.5 ที่ตั้งสถานีฐานที่ใช้ทดลองแพร่กระจายคลื่นในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์.....	52
3.6 แผนภาพอุปกรณ์ของสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่.....	53
ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
3.7 ผลการวัดความแรงสัญญาณกรณี ENG1 บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์.....	54
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.8 แผนภูมิอุปกรณ์ของสถานีเคลื่อนที่ในรถทดสอบ.....	54	
3.9 ผลการวัดความแรงสัญญาณความถี่ 952.4 MHz บริเวณศาลาพระเกี้ยว.....	55	
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย		
3.10 ผลการคำนวณก่อนซดเซชด้วยฟังก์ชันเซชเทียบกับผลการวัด.....	56	
3.11 กรณี ENG1 (ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG1.....	57	
(ข) ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นเทียบกับผลวัดในกรณี ENG1		
3.12 กรณี ENG2 (ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG2.....	59	
(ข) ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นเทียบกับผลวัดในกรณี ENG2		
3.13 กรณี ENG3 (ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG3.....	60	
(ข) ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นเทียบกับผลวัดในกรณี ENG3		
3.14 กรณี ENG4 (ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG4.....	62	
(ข) ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นเทียบกับผลวัดในกรณี ENG4		
3.15 กรณี CHU1-1 (ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ในการทดลองวัดสัญญาณ.....	64	
กรณี CHU1-1 (ข) ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นเทียบกับผลวัดในกรณี CHU1-1		
3.16 กรณี HRDN-1 (ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ในการทดลองวัดสัญญาณ.....	66	
กรณี HRDN-1 (ข) ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นเทียบกับผลวัดในกรณี HRDN-1		
3.17 ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเมื่อใช้ฟังก์ชันซดเซชเทียบกับผลวัดกรณี ENG4.....	68	
3.18 ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเมื่อใช้ฟังก์ชันซดเซชเทียบกับผลวัดกรณี CHU1-1.....	69	
3.19 ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเมื่อใช้ฟังก์ชันซดเซชเทียบกับผลวัดกรณี HRDN-1.....	69	
3.20 การเปรียบเทียบผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณโดย		
แบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี ENG 1.....		72
3.21 การเปรียบเทียบผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณโดย		
แบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี ENG 2.....		72
3.22 การเปรียบเทียบผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณโดย		
แบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี ENG 3.....		73
3.23 การเปรียบเทียบผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณโดย		
แบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี ENG 4.....		73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 การเปรียบเทียบผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี CHU1-1.....	74
3.25 การเปรียบเทียบผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี HRDN-1.....	74
4.1 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงกำลังคลื่นบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	79
4.2 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงของสัญญาณพหุวิถีในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์.....	81
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ก) กรณีมีรังสีตรงจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่ (ข) กรณีไม่มีรังสีตรงจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่	
4.3 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงมุมของการมาถึงของรังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับของสถานีรับ.....	83
ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
4.4 การกระจายกำลังคลื่นบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในกรณี ENG2....	84
4.5 การกระจายกำลังคลื่นบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในกรณี ENG3....	85
4.6 การกระจายกำลังคลื่นบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในกรณี ENG4....	85
4.7 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG2.....	88
(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG2 (ข) ตำแหน่งที่ 22 (ค) ตำแหน่งที่ 220	
4.8 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG3.....	90
(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG3 (ข) ตำแหน่งที่ 40 (ค) ตำแหน่งที่ 82	
4.9 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG4.....	91
(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG4 (ข) ตำแหน่งที่ 9 (ค) ตำแหน่งที่ 36	
4.10 ตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG2.....	93
(ก) ตำแหน่งที่ 22 (ข) ตำแหน่งที่ 220	
4.11 ตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG3.....	94
(ก) ตำแหน่งที่ 40 (ข) ตำแหน่งที่ 82	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG4.....	95
(ก) ตำแหน่งที่ 9 (ข) ตำแหน่งที่ 36	
4.13 การกระจายกำลังคลื่นบริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในกรณี CHU1-1.....	97
4.14 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี CHU1-1.....	98
(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี CHU1-1	
(ข) ตำแหน่งที่ 49 (ค) ตำแหน่งที่ 79	
4.15 ตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี CHU1-1.....	100
(ก) ตำแหน่งที่ 49 (ข) ตำแหน่งที่ 79	
4.16 การกระจายกำลังคลื่นบริเวณถนนอังรีดูนังต์ ในกรณี HRDN-1.....	102
4.17 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี HRDN-1.....	104
(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี HRDN-1	
(ข) ตำแหน่งที่ 9 (ค) ตำแหน่งที่ 19	
4.18 ตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี HRDN-1.....	106
(ก) ตำแหน่งที่ 9 (ข) ตำแหน่งที่ 19	
ก.1 ตัวอย่างบริเวณสาดส่องกำลังคลื่นในสิ่งแวดล้อมจริง.....	116
ก.2 ตัวอย่างมุมมองของภาพเสมือนจากการสะท้อนอันดับที่ 1.....	117
ก.3 กระบวนการสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาดส่องกำลังคลื่น.....	118
ก.4 การกำจัดผนังด้านหลัง.....	119
ก.5 ภาพฉายของผนังอาคารบนระนาบสองมิติ (1) ภาพฉายของผนังอาคารบนระนาบสองมิติ.....	120
(2) ภาพฉายของผนังอาคารในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
เมื่อสถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคาร โดยรอบ (3) ภาพฉายของผนังอาคารในคณะวิศวกรรมศาสตร์	
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อสถานีฐานอยู่บนยอดอาคาร	
ก.6 ตัวอย่างการกวาดภาพฉายของผนังอาคาร.....	122
ก.7 การกวาดภาพฉายของผนังอาคาร.....	123
ก.8 การลบเขตเงาของภาพฉายบนระนาบสองมิติ.....	123
ก.9 กระบวนการลบเขตเงาของภาพฉายบนระนาบสองมิติ (1) เมื่อสายอากาศส่งของสถานีฐาน.....	125
อยู่ต่ำกว่าอาคาร โดยรอบ (2) เมื่อสายอากาศส่งของสถานีฐานอยู่บนยอดอาคาร	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.10 บริเวณสาดส่องกำลังคลื่นบนผนังที่ได้จากการฉายภาพย้อนกลับ.....	127
ก.11 บริเวณสาดส่องกำลังคลื่นในปริภูมิสามมิติ.....	128
ข.1 การไล่จุดมุมเพื่อหาบริเวณภายนอกขอบเขตเงาของซับเจกโพลีกอน.....	130
ข.2 การติดตามจุดเพื่อหาบริเวณที่อยู่นอกเขตเงาโดยระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton.....	131
ข.3 ตัวอย่างกรณีที่ทำให้ระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton เกิดความผิดพลาดและการแก้ไข....	132
ข.4 ตัวอย่างภาพฉายของผนังอาคารเมื่อสถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคาร โดยรอบ.....	132
ข.5 ปัญหาเนื่องจากการซ้อนทับกันของภาพฉาย (1) ลำดับของภาพฉาย A,B,C	133
(2) การลบเขตเงาของภาพฉาย C' เนื่องจาก ภาพฉาย B	
ข.6 รายการของจุดในการลบเขตเงาก่อนและหลังแก้ไขปัญหาการซ้ำซ้อนกันของจุด.....	134
ข.7 การลบเขตเงาของภาพฉายจากภาพฉายหน้าที่อยู่ติดกันไปยังภาพฉายแรก.....	135
ค.1 บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	136
(1) ถนนด้านหลังอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 3	
(2) ถนนด้านหน้าอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	
(3) ถนนด้านหลังอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 และอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 2	
ค.2 ตัวอย่างต้นไม้ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
ที่ใช้ในการวัดสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังคลื่น.....	138
(1) ต้นไม้ทรงพุ่มหนาแน่น (2) ต้นไม้ทรงพุ่มบาง	
ค.3 สถานีฐาน สถานีเคลื่อนที่ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดทดสอบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ...138	
(1) สถานีฐาน (2) สถานีเคลื่อนที่ (3) เครื่องกำเนิดสัญญาณ รุ่น HP8648C	
(4) เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ รุ่น HP8590L	
ค.4 บริเวณรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	139
(1) บริเวณด้านหน้าศาลาพระเกี้ยว เมื่อมองจากบริเวณด้านหน้าอาคารเปรมบวรจักร	
(2) บริเวณลานจอดรถศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
(3) ถนนด้านหลังอาคารจุลจักรพงษ์	
(4) บริเวณถนนด้านหน้าศาลาพระเกี้ยวและอาคารเปรมบวรจักร	
ค.5 สถานีฐานในกรณีทดสอบบริเวณรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	141

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.6 บริเวณถนนอังรีดูนังต์.....	141
(1) ถนนอังรีดูนังต์ทางด้านสยามเสถียร (2) ถนนอังรีดูนังต์ทางด้านสี่แยกอังรีดูนังต์	
ค.7 สถานีฐานในกรณีทดสอบบริเวณถนนอังรีดูนังต์.....	142



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การออกแบบและวางแผนโครงข่ายระบบสื่อสารเคลื่อนที่ที่ดีจะทำให้โครงข่ายระบบสื่อสารเคลื่อนที่มีประสิทธิภาพสามารถให้บริการที่มีคุณภาพครอบคลุมพื้นที่บริการและมีระดับกำลังสัญญาณที่เพียงพอ เพื่อให้เครื่องลูกข่ายและสถานีฐานติดต่อสื่อสารกันได้ ถือเป็นหัวใจสำคัญในการสร้างโครงข่ายระบบสื่อสารเคลื่อนที่ นักวิจัยหลายท่านมุ่งที่จะพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเชิงวิเคราะห์โดยกรรมวิธีเชิงรังสีให้มีความถูกต้องแม่นยำ เพื่อที่จะสามารถนำผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไปประกอบการวางแผนและออกแบบตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานเพื่อแก้ไขปัญหาพื้นที่ครอบคลุมของโครงข่ายระบบสื่อสารเคลื่อนที่ และพัฒนาให้สามารถนำผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไปช่วยในการวิเคราะห์เพื่อแก้ไขปัญหาคุณภาพสัญญาณ

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในเขตเมืองของระบบสื่อสารเคลื่อนที่เป็นเครื่องมือที่สามารถช่วยในการออกแบบระบบสื่อสารเคลื่อนที่ให้ครอบคลุมพื้นที่บริการได้อย่างทั่วถึง และมีการใช้ทรัพยากรความถี่ที่มีอยู่จำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อให้ผู้ใช้บริการได้รับบริการที่มีคุณภาพ ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากแบบจำลองฯ สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการออกแบบระบบสื่อสารเคลื่อนที่ ดังนั้นแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจึงได้รับการพัฒนาเรื่อยมาเพื่อให้สามารถให้ผลการจำลองแบบได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วโดยใช้ฐานข้อมูลน้อยที่สุด

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเชิงวิเคราะห์โดยกรรมวิธีเชิงรังสีเป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงเนื่องจากข้อมูลที่ใช้มาจากสภาพแวดล้อมของพื้นที่ให้บริการ ต่างจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเชิงประจักษ์ (empirical model) ซึ่งอาจให้ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไม่แม่นยำหากสภาพแวดล้อมในพื้นที่ที่พิจารณามีลักษณะต่างไปจากเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง จุดด้อยของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเชิงวิเคราะห์โดยกรรมวิธีเชิงรังสีคือต้องการฐานข้อมูลของสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมเป็นจำนวนมากและต้องมีความแม่นยำ จึงจะให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในสภาพแวดล้อมจริง นอกจากนี้วิธีคำนวณโดยกรรมวิธีเชิงรังสีค่อนข้างยุ่งยากหากขาดการพัฒนาระเบียบวิธีการคำนวณในแบบจำลองที่ดีก็จะทำให้การคำนวณใช้เวลายาวนาน

นักวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเชิงวิเคราะห์โดยกรรมวิธีเชิงรังสี [1-7] งานวิจัย [1] เป็นแบบจำลองการแพร่กระจายที่พัฒนาโดยห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งพบว่ามีข้อผิดพลาดอาจเนื่องมาจากการเตรียมฐานข้อมูลมีความแม่นยำไม่เพียงพอ เพราะการถอดพิกัดของอาคารในพื้นที่ที่พิจารณากระทำจากแผนที่ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอย่างมาก รูปแบบอาคารในฐานข้อมูลถูกจำกัดให้มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมทำให้ลักษณะอาคารที่ใช้เป็นฐานข้อมูลแตกต่างจากลักษณะของอาคารในสภาพแวดล้อมจริง รายละเอียดของสิ่งกีดขวางอื่นๆ นอกจากอาคารในแบบจำลองยังไม่นำมาพิจารณา ขาดการพิจารณาเส้นทางเดินของคลื่นที่แพร่กระจายบางเส้นทาง เช่น เส้นทางที่คลื่นสะท้อนที่ผนังอาคารจากนั้นสะท้อนกับพื้นดินก่อนเข้าสู่เครื่องรับ และเส้นทางที่คลื่นเลี้ยวเบนจากสันขอบในแนวระดับของอาคาร เป็นต้น นอกจากนี้ขั้นตอนในระเบียบวิธีคำนวณยังใช้เวลาในการคำนวณยาวนานเนื่องจากระเบียบวิธีที่ใช้ในการตามทางเดินของรังสีใช้วิธีการแปรค่ามุมแล้วจึงทดสอบเส้นทางรังสีนั้นว่าเกิดขึ้นจริงหรือไม่ ต้องเสียเวลาคำนวณมาก ทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุลดลง

งานวิจัย [2-7] นำเสนอแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยกรรมวิธีเชิงรังสีแบบต่างๆ งานวิจัย [2] นำเสนอแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในปริภูมิสามมิติ โดยการพิจารณาเส้นทางเดินรังสีแบบผสมผสานจากเส้นทางเดินของรังสีในระนาบสองระนาบคือระนาบขนานกับพื้นโลกและระนาบตั้ง พร้อมกับปรับปรุงความเร็วในการคำนวณของระเบียบวิธีโดยการใช้หลักการของทฤษฎีบทภาพเสมือน และตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยการทำนายแบบแถบแคบและแบบแถบกว้าง (narrow-band and wide-band prediction) งานวิจัย [2] เป็นแบบจำลองที่พัฒนาโดยมีพื้นฐานมาจากงานวิจัย [3] ซึ่งงานวิจัย [3] นำเสนอแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นสองมิติโดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน และศึกษาผลของการคิดสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนแบบต่างๆ งานวิจัย [4,5 และ 6] นำเสนอผลของความละเอียดถูกต้องของฐานข้อมูลภูมิลักษณะของสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่พื้นโลกมีความไม่ราบเรียบเนื่องมาจากการยกตัวของแผ่นดินและความไม่สม่ำเสมอของความสูงอาคารในเขตเมืองซึ่งจะมีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ งานวิจัย [7] นำเสนอแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยการคิดรังสีเลี้ยวเบนด้วยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป (UTD) และใช้หลักการของทฤษฎีบทภาพเสมือนในการคำนวณรังสีสะท้อนอันดับต่างๆ

หลักการและทฤษฎีที่ใช้

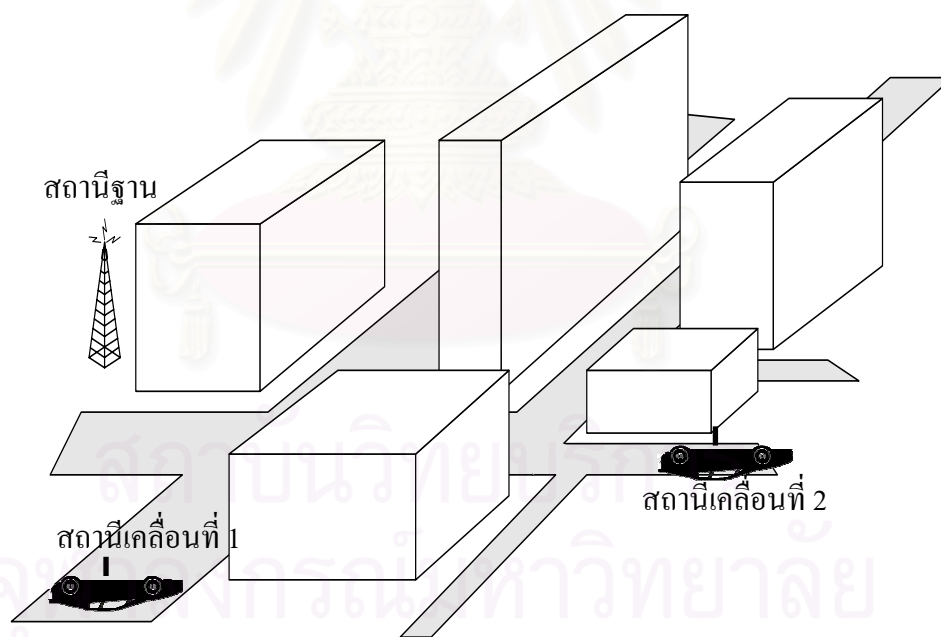
ทฤษฎีเบื้องต้น

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยกรรมวิธีเชิงรังสีมีพื้นฐานอยู่บนหลักการทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (Geometrical Optics, GO) ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป

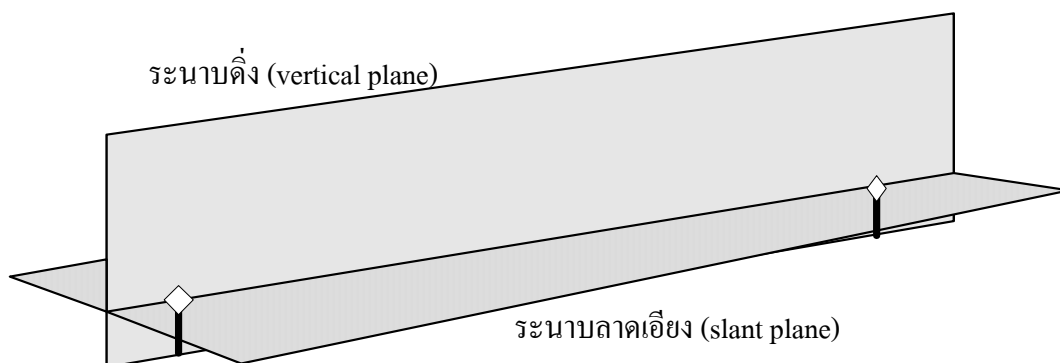
(Uniform Theory of Diffraction, UTD) [8] ทฤษฎีเหล่านี้ใช้การประมาณเข้ามาพิจารณาพฤติกรรมของคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงเพื่อลดรูปของปัญหาให้มีความซับซ้อนน้อยลงและสะดวกในการแก้ปัญหามากกว่าการใช้ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิเคราะห์โดยตรง

การพิจารณาปัญหาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ใช้กรรมวิธีเชิงรังสี ซึ่งพิจารณาให้คลื่นความถี่สูงที่ออกจากแหล่งกำเนิดมีการแพร่กระจายเป็นลำของรังสี โดยภายในลำรังสีมีพลังงานของคลื่นบรรจุอยู่ เมื่อพิจารณาให้ลำรังสีเหล่านี้แพร่กระจายในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางเป็นอาคารในเขตเมืองดังรูปที่ 1.1 รังสีของคลื่นเหล่านี้จะเกิดการสะท้อนและเลี้ยวเบนไปในบริเวณที่ว่างต่างๆ ของสิ่งแวดล้อมที่พิจารณาซึ่งเป็นบริเวณที่มีเครื่องรับสัญญาณอยู่ แบบจำลองที่เสนอเป็นแบบจำลองสามมิติซึ่งเกิดจากคลื่นบนระนาบสองระนาบประกอบกันคือ ระนาบลาดเอียงและระนาบดิ่ง [1] ดังรูปที่ 1.2 ระนาบทั้งสองจะมีสายอากาศส่งและสายอากาศรับวางอยู่ กลไกการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่เกิดขึ้นในแบบจำลองประกอบด้วยการแพร่กระจายผ่านอากาศว่าง การสะท้อน และการเลี้ยวเบน



รูปที่ 1.1 ระบบสื่อสารเคลื่อนที่



รูปที่ 1.2 ระนาบที่พิจารณาในแบบจำลอง

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในเขตเมืองโดยกรรมวิธีเชิงรังสีในย่านความถี่ 900 MHz ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและสามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าปัจจัยเชิงระบบ เช่น รูปแบบการกระจายกำลังคลื่นวิทยุ (power profile) มุมการมาถึงของคลื่น (angle of arrival) และการกระจายเวลาประวิง (time delay profile) โดยการใช้ฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อมที่มีความละเอียดแม่นยำเพิ่มขึ้น การหาพิกัดของอาคารและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางในแบบจำลองหาได้จากการถอดพิกัดแผนที่เทียบกับพิกัดที่ได้จากการรังวัดโดยใช้เครื่องมือรังวัดร่วมกับอุปกรณ์ GPS และศึกษาความเป็นไปได้เพื่อพัฒนาให้รูปแบบอาคารในฐานข้อมูลของแบบจำลองมีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปร่างจริง รวมถึงการเพิ่มรายละเอียดของฐานข้อมูลเพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงสภาพแวดล้อมที่จำลองการแพร่กระจายมากที่สุดเพื่อให้ผลการจำลองแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ยังได้พิจารณาเส้นทางของรังสีที่เป็นไปได้เพิ่มขึ้นโดยนำแนวคิดของทฤษฎีบทภาพเสมือน (theorem of image) และพื้นที่สาดส่องกำลังคลื่น (illumination zone) มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง ทำให้ระเบียบวิธีที่ใช้ในการติดตามรอยทางเดินรังสีมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น มีการคำนวณแบบวนซ้ำลดลง ทำให้ผลการคำนวณมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นจากแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัย [1] และพัฒนาให้แบบจำลองสามารถคำนวณค่าปัจจัยพื้นฐานเชิงระบบบางค่าเพื่อนำไปใช้ช่วยในการวางแผนและออกแบบระบบสื่อสารเคลื่อนที่ให้มีประสิทธิภาพซึ่งรายละเอียดจะนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เสนอแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในเขตเมืองโดยกรรมวิธีเชิงรังสี ซึ่งมีความแม่นยำและใช้เวลาในการคำนวณสั้นลงเทียบกับแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัย [1]
2. เสนอแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในเขตเมือง ซึ่งสามารถนำผลการจำลองแบบไปช่วยในการออกแบบ และวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่ โดยสามารถคำนวณค่าปัจจัยพื้นฐานเชิงระบบบางค่าได้

ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. พัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับการแพร่กระจายคลื่นย่านความถี่ 900 MHz โดยกรรมวิธีเชิงรังสีให้มีความแม่นยำและมีความรวดเร็วในการคำนวณมากขึ้น เมื่อเทียบกับงานวิจัย [1]
2. ประยุกต์แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้สามารถนำไปใช้ช่วยในการออกแบบและวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่ โดยพัฒนาให้แบบจำลองสามารถคำนวณค่าปัจจัยพื้นฐานเชิงระบบบางค่าได้
3. ทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นเพื่อนำผลการวัดมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยแบบจำลองในพื้นที่บริการ 2-3 พื้นที่บริการ

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ
2. ศึกษาวิธีการใช้ทฤษฎีเชิงรังสีในการพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ
3. ศึกษาวิธีการหาค่าพิกัดของอาคารให้มีความแม่นยำเพื่อนำมาใช้สร้างฐานข้อมูลสำหรับแบบจำลองและสำรวจอาคารและสิ่งกีดขวางอื่นๆในพื้นที่แพร่กระจายคลื่นวิทยุของระบบสื่อสารเคลื่อนที่
4. พัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในพื้นที่เขตเมือง
5. ตรวจสอบและปรับเทียบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการวัดการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่สามารถหาได้
6. สรุปงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ซอฟต์แวร์เพื่อใช้ทำนายลักษณะการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในเขตเมือง
2. นำผลจำลองการแพร่กระจายนี้ไปใช้ช่วยในการออกแบบและวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่โดยใช้ฐานข้อมูลซึ่งมีความแม่นยำประกอบกับข้อมูลของสภาพแวดล้อมที่เกิดจากการสำรวจพื้นที่เองและข้อมูลผลการวัดที่จะนำมาทดสอบแบบจำลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน บทที่ 2 กล่าวถึงการสร้างฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อมและสิ่งปลูกสร้าง ฐานข้อมูลของสายอากาศ หลักการและข้อเปรียบเทียบของระเบียบวิธีการตามรอยทางเดินรังสีแบบต่างๆ การติดตามรอยทางเดินของรังสี และการคำนวณกำลังงานของรังสีของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้ บทที่ 3 กล่าวถึงผลที่ได้จากการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยแบบจำลองฯ และการเปรียบเทียบผลการคำนวณโดย

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้และในงานวิจัย [1] กับผลการวัดจริง บทที่ 4 กล่าวถึงการนำผลการคำนวณโดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นไปใช้วิเคราะห์หาค่าปัจจัยเชิงระบบ และบทที่ 5 เป็นส่วนของการสรุปผลและข้อเสนอแนะเพื่อใช้ในการปรับปรุงงานวิจัยต่อไปในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นด้วยกรรมวิธีเชิงรังสี

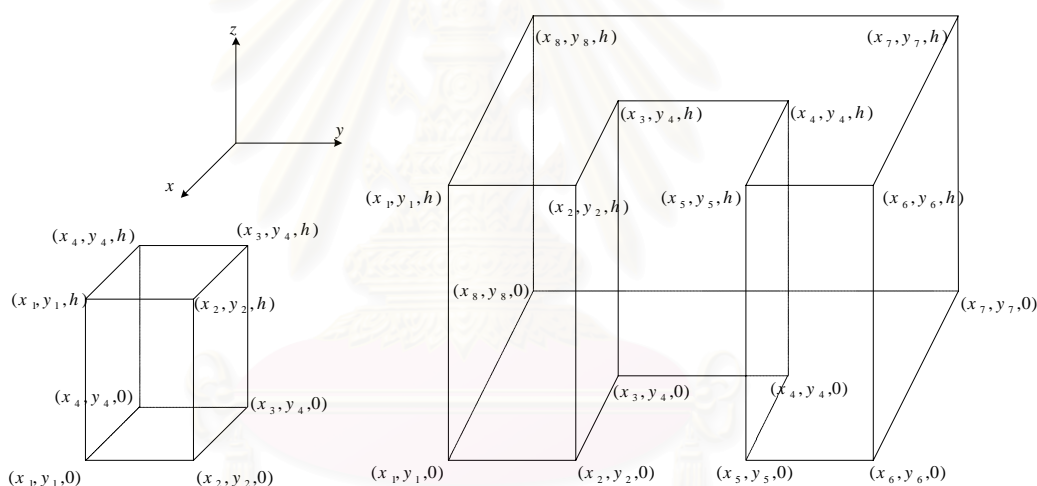
การตามรอยทางเดินของรังสีตามกลไกการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยกรรมวิธีเชิงรังสีเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากมีผลต่อความแม่นยำและความรวดเร็วในการคำนวณของแบบจำลอง นอกจากนี้ฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางในบริเวณแพร่กระจายคลื่นที่มีความถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดจะทำให้ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อมและสิ่งปลูกสร้าง ฐานข้อมูลสายอากาศ หลักการและข้อเปรียบเทียบของระเบียบวิธีการตามรอยรังสีแบบต่างๆ การตามรอยทางเดินของรังสี และการคำนวณกำลังงานของรังสีของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในงานวิจัยนี้ โดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นแบบจำลองเชิงรังสีที่ใช้กรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตอธิบายการสะท้อนและการส่งผ่านพลังงานจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่ในบริเวณแพร่กระจายคลื่น และใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของคลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบของอาคารทั้งในแนวคิ่งและแนวระดับรวมถึงปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของคลื่นบนยอดอาคารที่กีดขวางอยู่ในบริเวณการแพร่กระจายคลื่น แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุนี้เป็นแบบจำลองสามมิติที่พิจารณาการตามรอยทางเดินของรังสีด้วยวิธีกึ่งสามมิติ ฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางในแบบจำลองได้จากการถอดพิกัดด้านของอาคารจากแผนที่แล้วปรับเทียบพิกัดนั้นกับค่าที่วัดได้ในสถานที่จริง เพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริงมากที่สุดและกำหนดค่าปัจจัยทางไฟฟ้าของวัสดุโดยใช้ค่ากลางเดียวกันทั้งหมดเพื่อลดความยุ่งยากในการสร้างฐานข้อมูล ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณนี้จะชดเชยโดยฟังก์ชันชดเชยซึ่งสร้างจากการวัดทดสอบเพื่อหาค่าปรับเทียบที่เหมาะสม

การสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางในแบบจำลอง

สิ่งแวดล้อมและสิ่งปลูกสร้างในบริเวณเขตเมืองที่ถือว่าเป็นสิ่งกีดขวางของการแพร่กระจายคลื่นจำแนกได้ดังนี้ [1]

1. ตึกสูง อาคารที่อยู่อาศัย
2. ป้ายชื่อร้านค้า กันสาด
3. เสาไฟฟ้า เสาโทรศัพท์
4. ต้นไม้ข้างทางและเกาะกลางถนน
5. สะพานลอย ทางยกระดับ
6. รถบนถนนทั้งที่เคลื่อนที่และไม่เคลื่อนที่

สิ่งกีดขวางที่นำมาพิจารณาในการสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางในแบบจำลอง ได้แก่ อาคารต่างๆ และต้นไม้ เนื่องจากอาคารต่างๆ เป็นสิ่งกีดขวางส่วนใหญ่และพบมากในบริเวณเขตเมือง ต้นไม้ก็เป็นสิ่งกีดขวางที่พบได้ทั่วไปซึ่งจะมีผลต่อการลดทอนของกำลังคลื่นเมื่อแพร่กระจายผ่าน การจำลองแบบกระทำโดยการประมาณรูปทรงของสิ่งกีดขวางและสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวาง แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นนี้จะจัดเก็บด้านของอาคารแยกกันเพื่อให้สามารถจำลองรูปลักษณะของอาคารหลาย-เหลี่ยมได้ง่ายและใกล้เคียงกับลักษณะจริงมากที่สุด ด้านของอาคารจะประมาณเป็นระนาบสี่เหลี่ยมตั้งฉากกับพื้นดินมีค่าปัจจัยทางไฟฟ้า (σ และ ϵ_r) เป็นค่ากลางเท่ากันหมดทุกๆ อาคารดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยอาคารสองอาคารมีจำนวนด้านรวมกันทั้งหมด 13 ด้าน ด้านทั้งหมดนี้จะจัดเก็บในฐานข้อมูลด้านของอาคารในรูปแบบข้อมูลเชิงเวกเตอร์ พิกัดของด้านของอาคารได้จากการถอดพิกัดมุมที่ฐานของอาคาร ความสูงได้จากการสำรวจและประมาณความสูงของอาคารในพื้นที่จริง ค่าปัจจัยทางไฟฟ้าจะเก็บในรูปแบบของค่า σ และ ϵ_r ลักษณะฐานข้อมูลด้านของอาคารแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ลักษณะการประมาณอาคารเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมและการกำหนดพิกัด

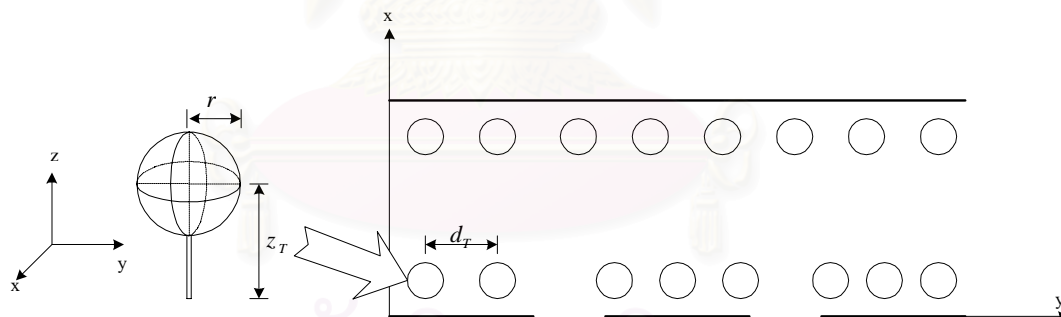
เลขที่ด้านของอาคาร (Side ID.)
พิกัดมุม (Corners' coordinations) (x_1, y_1, z_1) และ (x_2, y_2, z_2)
ความสูง (Height, h)
ค่าปัจจัยทางไฟฟ้าของวัสดุ

ฐานข้อมูลอาคาร

รูปที่ 2.2 ฐานข้อมูลด้านของอาคาร

ขั้นตอนการจัดทำฐานข้อมูลเริ่มจากการถอดพิกัดจากแผนที่ในระบบพิกัด UTM (Universal Transverse Mercator) ซึ่งเป็นระบบพิกัดมาตรฐานอย่างหนึ่งของระบบบอกตำแหน่ง GPS (Global Positioning System) ระบบ UTM เป็นการแปลงแกนพิกัดละติจูด/ลองจิจูดบนผิวโค้งของโลกให้เป็นพิกัดเส้นตัดฉากบนผิวราบมีหน่วยเป็นเมตร ซึ่งจะทำให้ได้ระบบพิกัดคล้ายกับระบบพิกัดฉาก (x,y) จากนั้นจะเปรียบเทียบพิกัดอาคารที่ถอดจากแผนที่เพื่อให้ได้ตำแหน่ง ระยะห่าง และแนวของการวางตัวของด้านของอาคารใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อมจริงมากที่สุด การเปรียบเทียบพิกัดอาคารจะใช้ค่าที่สำรวจและรังวัดได้ในสถานที่จริงเป็นตัวเปรียบเทียบ แล้วจึงจัดเก็บค่าพิกัดของด้านของอาคาร ความสูงของอาคาร และค่าปัจจัยทางไฟฟ้า ไว้ในฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางโดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความนำไฟฟ้า (σ) เท่ากับ 10^{-4} S และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของผนังคอนกรีต (ϵ_r) เท่ากับ 5 F/m [3]

การสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางเนื่องจากต้นไม้จะจำลองให้ต้นไม้มีลำต้นเป็นท่อทรงกระบอกขนาดเล็กและมีพุ่มไม้เป็นทรงกลมมีรัศมี r เมตร ความสูงจากพื้นถึงกลางพุ่มไม้เท่ากับ z_T เมตร และอยู่ห่างกัน d_T เมตร ดังรูปที่ 2.3 มีอัตราการลดทอนคลื่น $a = e^{-\alpha d}$ เท่า เมื่อ α คือสัมประสิทธิ์การลดทอนของสนามไฟฟ้าเมื่อคลื่นเดินทางผ่านพุ่มไม้ กำหนดให้มีค่าเท่ากันทุกต้น [8] และ d คือระยะทางที่คลื่นเดินทางในพุ่มไม้ โครงสร้างฐานข้อมูลต้นไม้ในแบบจำลองแสดงในรูปที่ 2.4 ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ $\alpha = 1.8718$ Np/m ซึ่งได้จากการทดลองที่ความถี่ 1 GHz กับต้นไม้ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 การจำลองต้นไม้ในแบบจำลอง

เลขที่ต้นไม้
พิกัดต้นไม้ (x,y,0)
ขนาดของพุ่มไม้ (r)
ความสูงจากพื้นถึงกลางพุ่มไม้ (z_T)

ฐานข้อมูลต้นไม้

รูปที่ 2.4 ฐานข้อมูลต้นไม้

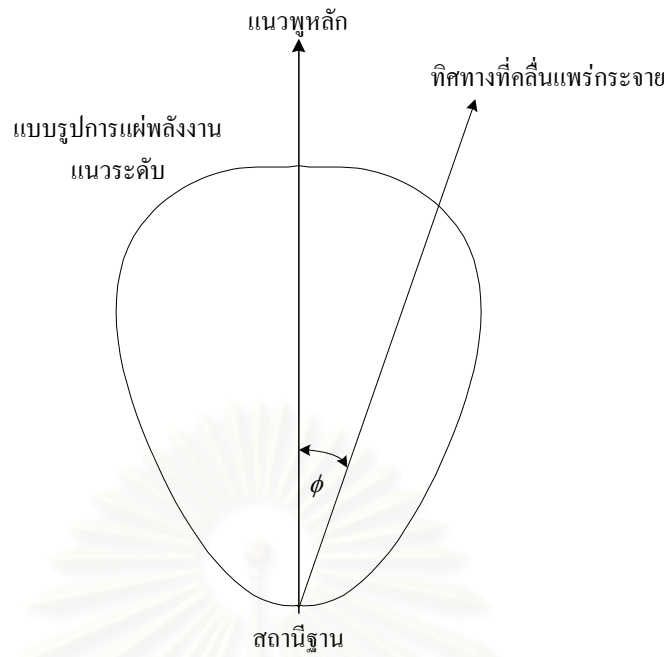
การสร้างฐานข้อมูลสายอากาศ

ฐานข้อมูลของสายอากาศที่ต้องใช้ในการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ประกอบด้วย

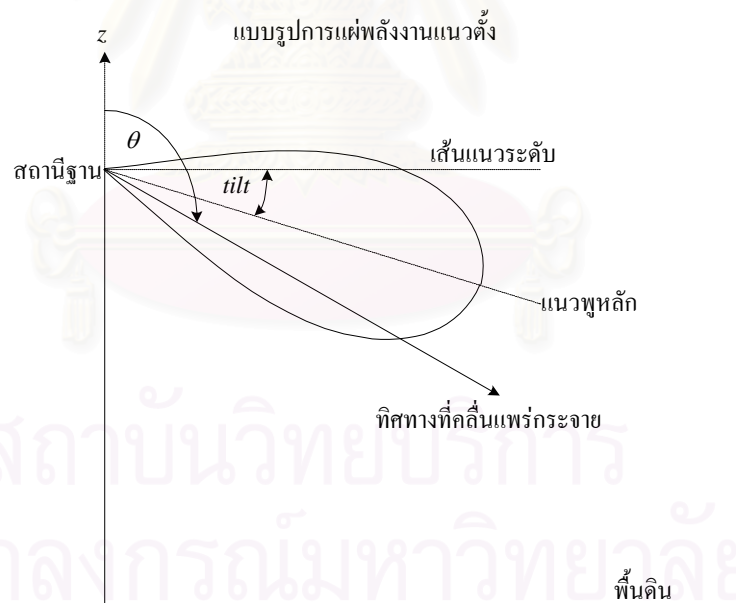
- อัตราขยายของสายอากาศ
- แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบระดับ (horizontal pattern)
- แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบตั้ง (vertical pattern)
- มุมก้มของสายอากาศ (tilt angle)
- โพลาริเซชัน
- ตำแหน่งและความสูงของสายอากาศรับ

ข้อมูลต่างๆ เหล่านี้หาได้จากการวัดโดยตรงหรือจากคู่มือสายอากาศที่ได้จากผู้ผลิต ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกได้จากการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐาน (HP 11966H) เป็นสายอากาศรับ-ส่งคลื่นวิทยุ กำลังคลื่นที่แผ่ออกมาจากสายอากาศส่งจะคำนวณได้จากอัตราขยายของสายอากาศและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพล โพลาริเซชันของสายอากาศไดโพลเป็นโพลาริเซชันเชิงเส้นและอยู่ในแนวตั้ง ดังนั้นคลื่นที่แผ่ออกมาจากสายอากาศไดโพลจะมีโพลาริเซชันวางตัวอยู่ในระนาบตั้งดังรูปที่ 2.5 (ค) ในส่วนที่สองเป็นการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยอาศัยผลการวัดการแพร่กระจายคลื่นในระบบ GSM 900 ข้อมูลลักษณะสมบัติของสายอากาศได้จากบริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด(มหาชน) ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลต่างๆจะกล่าวถึงในรายละเอียดการทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นและผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่น ในบทที่ 3

คลื่นที่แพร่กระจายออกไปจากสายอากาศในแต่ละทิศทางจะมีกำลังสัญญาณไม่เท่ากัน ขึ้นกับอัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศนั้น โพลาริเซชันของคลื่นก็จะขึ้นกับโพลาริเซชันของสายอากาศเช่นกัน ดังนั้นคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศส่งของสถานีฐานจะมีสมบัติกำหนดจากลักษณะสมบัติของสายอากาศ ได้แก่ อัตราขยายของสายอากาศ แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศและโพลาริเซชันของสายอากาศ จะสามารถคำนวณสนามไฟฟ้าที่ออกจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับได้โดยใช้ฐานข้อมูลสายอากาศ รูปที่ 2.5 สายอากาศส่งมีอัตราขยาย G_t มีแบบรูปการแผ่พลังงานในทิศทางใดๆ ซึ่งหาคะมุมนก้มของสายอากาศเป็น $f_t(\theta - tilt, \phi)$ เมื่อ θ เป็นมุมที่วัดจากแกน z และ $tilt$ เป็นมุมก้มของสายอากาศ

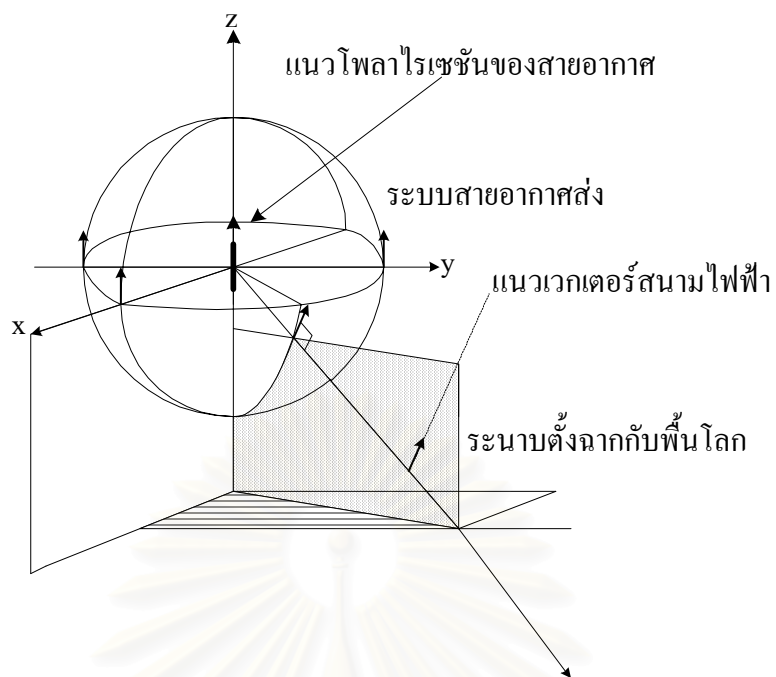


(ก) มุมเอียงจากแนวพู่หลักในระนาบระดับ



(จ) มุมก้มจากพู่หลักในระนาบตั้ง

รูปที่ 2.5 มุมก้ม มุมเอียง และ โพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าในระนาบของแบบรูปการแผ่พลังงาน



(ค) แนวโพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกจากสายอากาศส่ง

รูปที่ 2.5 มุมก้ม มุมเอียง และโพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าในระนาบของแบบรูปการแผ่พลังงาน
(ต่อ)

ขนาดของสนามไฟฟ้าที่ระยะทาง d คำนวณได้จากสมการพอยน์ติงเวกเตอร์ สำหรับตัวกลาง
อากาศว่าง (free space)

$$S = \frac{1}{2} \frac{E_m^2}{\eta_0} = \frac{P_t G_t f_t(\theta - \text{tilt}, \phi)}{4\pi d^2} \quad (2.1)$$

$$E_m = \frac{\sqrt{60 P_t G_t f_t(\theta - \text{tilt}, \phi)}}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อเขียนเป็นเฟสเซอร์สนามไฟฟ้าและคิโพลาริเซชันของสายอากาศส่งด้วยจะได้เวกเตอร์
สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศส่งเป็น

$$\vec{E} = E_m e^{-j\beta r} \hat{e}_w \quad (2.3)$$

เมื่อ β คือค่าคงที่วัฏภาค และ \hat{e}_w คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยแสดงโพลาริเซชันคลื่นซึ่งหาได้
จาก

$$\hat{h}_w = \hat{d} \times \hat{e}_{ix} \quad (2.4)$$

$$\hat{e}_{ix} = \hat{h}_w \times \hat{d} \quad (2.5)$$

เมื่อ \hat{d} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางการแพร่กระจายคลื่น

\hat{e}_{ix} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยแสดงโพลาไรเซชันของสายอากาศส่ง

\hat{h}_w คือ เวกเตอร์สนามแม่เหล็กที่แพร่ออกจากสายอากาศส่งมีขนาดหนึ่งหน่วย

รูปแบบการตามรอยทางเดินของรังสีแบบต่างๆ และข้อเปรียบเทียบ

เมื่อพิจารณาการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ปรากฏการณ์การแพร่กระจายของคลื่นที่เกิดขึ้นจะเป็นปรากฏการณ์เฉพาะที่ ทำให้สามารถพิจารณาคลื่นที่แพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดเป็นลำของรังสีแพร่กระจายในทุกทิศทางในปริภูมิสามมิติ ลำรังสีจะแพร่ไปในสภาพแวดล้อมตามกลไกการแพร่กระจายคลื่น การพิจารณาเส้นทางที่รังสีแผ่ออกจากแหล่งกำเนิดแพร่กระจายในสภาพแวดล้อมเรียกว่าการตามรอยทางเดินของรังสี การตามรอยทางเดินของรังสีเป็นกระบวนการสำคัญในการคำนวณของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเชิงวิเคราะห์ การตามรอยทางเดินของรังสีนี้เป็นการหาเส้นทางที่คลื่นวิทยุสามารถแพร่กระจายจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่โดยผ่านกลไกการแพร่กระจายคลื่นแบบต่างๆ เช่น การส่งผ่านอากาศว่าง การสะท้อนและการเลี้ยวเบน เป็นต้น เมื่อทราบเส้นทางที่คลื่นแพร่กระจายจะสามารถคำนวณขนาดสนามไฟฟ้าและกำลังงานคลื่นของสัญญาณพหุวิถี (multipath rays) ที่สายอากาศของสถานีเคลื่อนที่รับได้

ขั้นตอนในการตามรอยทางเดินของรังสีจะพิจารณารอยทางเดินของรังสีตามกลไกการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการคำนวณในแบบจำลอง เนื่องจากกลไกแต่ละกลไกของการแพร่กระจายคลื่นจะมีการพิจารณาเงื่อนไขของรอยทางเดินของรังสีแตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีต่างกันจะมีกระบวนการคำนวณรอยทางเดินของรังสีสะท้อนกับสิ่งกีดขวางที่แตกต่างกัน และเนื่องจากในการคำนวณรอยทางเดินของรังสีสะท้อนจะใช้เวลามากกว่าการคำนวณรอยทางเดินของรังสีที่เกิดจากกลไกการแพร่กระจายแบบอื่นๆ จึงมีการพัฒนาแนวทางการตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนเพื่อให้การคำนวณตามแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีความรวดเร็วและมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น

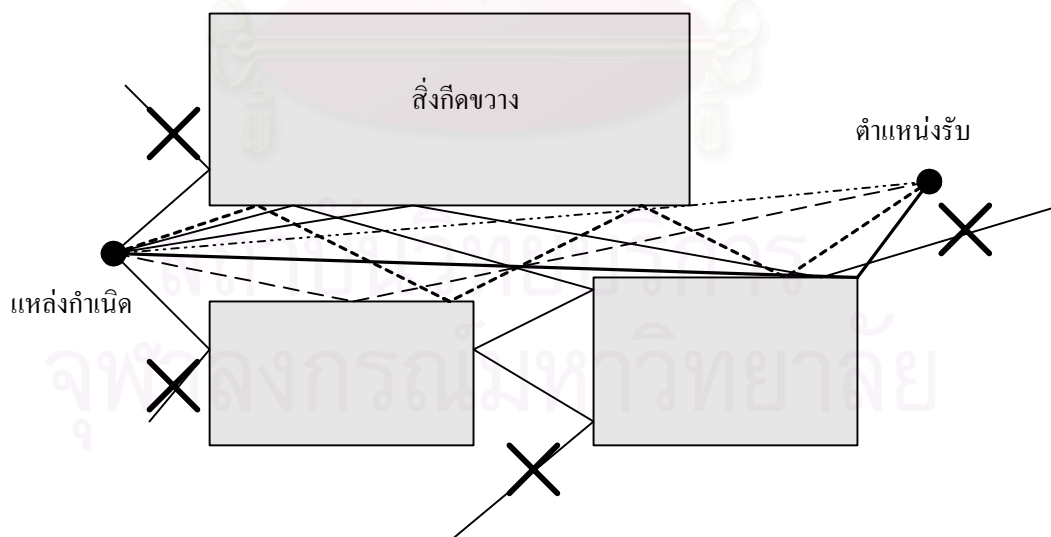
การตามรอยทางเดินของรังสีของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเชิงวิเคราะห์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. การตามรอยทางเดินของรังสีโดยการปล่อยรังสีทดสอบ

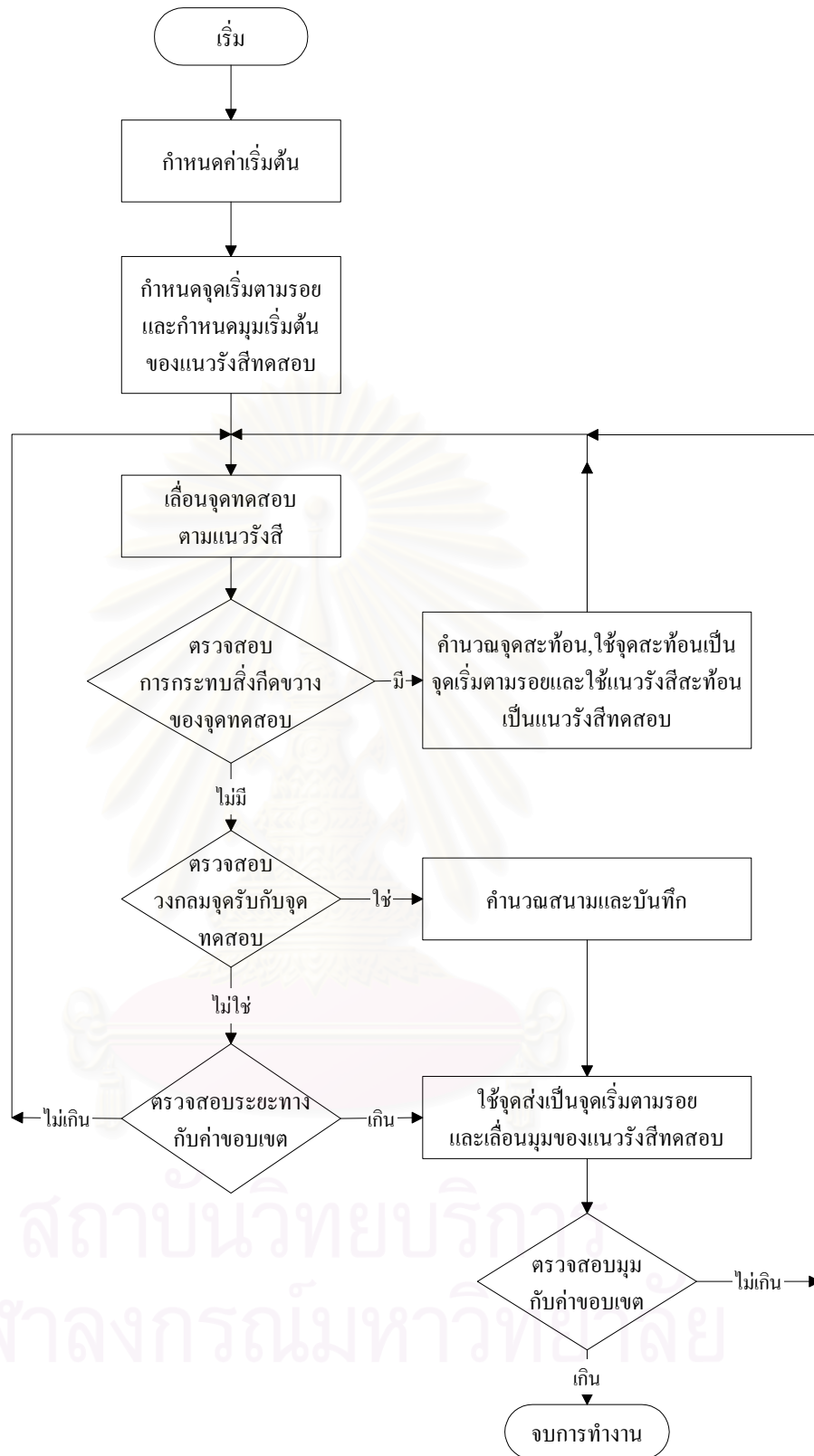
การตามรอยทางเดินของรังสีโดยการปล่อยรังสีทดสอบเป็นกระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีที่ใช้หลักการแพร่กระจายของรังสีออกจากแหล่งกำเนิดทุกทิศทาง แพร่ไปในสภาพแวดล้อม

เกิดการสะท้อน เลี้ยวเบน หรือพุ่งตรงเข้าสู่สถานีรับ ถ้ารังสีทดสอบใดพุ่งเข้าสู่สถานีรับก็จะพิจารณาให้รอยทางเดินของรังสีทดสอบนั้นเป็นรอยทางเดินของรังสีที่เกิดขึ้นจริง ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มาถึงสายอากาศรับที่สถานีรับคำนวณได้จากกลไกการแพร่กระจายที่เกิดขึ้นบนรอยทางเดินของรังสีนั้น

การปล่อยรังสีทดสอบ (ray launching) จะสมมุติให้รังสีทดสอบแพร่กระจายออกจากสถานีฐานบนระนาบสองมิติเริ่มจากมุมเริ่มต้นมุมหนึ่ง แล้วพิจารณาจุดตัดของแนวรังสีว่าตกกระทบกับสิ่งกีดขวางหรือไม่ ถ้าเกิดการตกกระทบของรังสีกับสิ่งกีดขวางก็จะใช้จุดตกกระทบนั้นเป็นจุดเริ่มต้นการตามรอยทางเดินของรังสีต่อไปภายใต้เงื่อนไขของกฎการสะท้อนจนรังสีพุ่งเข้าสู่ทรงกลมจูดรับของสถานีเคลื่อนที่ หากในการตามรอยทางเดินของรังสีในมุมใดรังสีไม่ตกลงบนพื้นผิวของสิ่งกีดขวางหรือรังสีสุดท้ายไม่ผ่านทรงกลมจูดรับ ก็จะไม่พิจารณารังสีทดสอบซึ่งปล่อยออกจากมุมนั้นเป็นรอยทางเดินของรังสีที่เกิดขึ้นจริง จากนั้นกระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีก็จะแปรค่ามุมและเริ่มต้นทำซ้ำกระบวนการเดิมต่อไปจนครบ 360 องศา รอบสถานีฐาน รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นแนวทางเดินของรังสีที่ไม่เข้าสู่ทรงกลมจูดรับบนระนาบระดับ ในกรณีของรอยทางเดินของรังสีที่ไม่ตกบนพื้นผิวของสิ่งกีดขวางจะพิจารณาจากจุดตัดของรอยทางเดินของรังสีกับสิ่งกีดขวางบนระนาบระดับแล้วจึงคำนวณความสูงของจุดตัดนั้นจากสมการระนาบของผิวสิ่งกีดขวาง หากจุดตกกระทบที่คำนวณได้ในปริภูมิสามมิติไม่อยู่บนพื้นผิวของสิ่งกีดขวาง ก็จะไม่พิจารณาเส้นทางรังสีทดสอบนั้นเป็นเส้นทางเดินของรังสีจริง กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีแบบปล่อยรังสีทดสอบสรุปเป็นผังการทำงานได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 การพิจารณารอยทางเดินของรังสีโดยวิธีปล่อยรังสีทดสอบบนระนาบระดับ

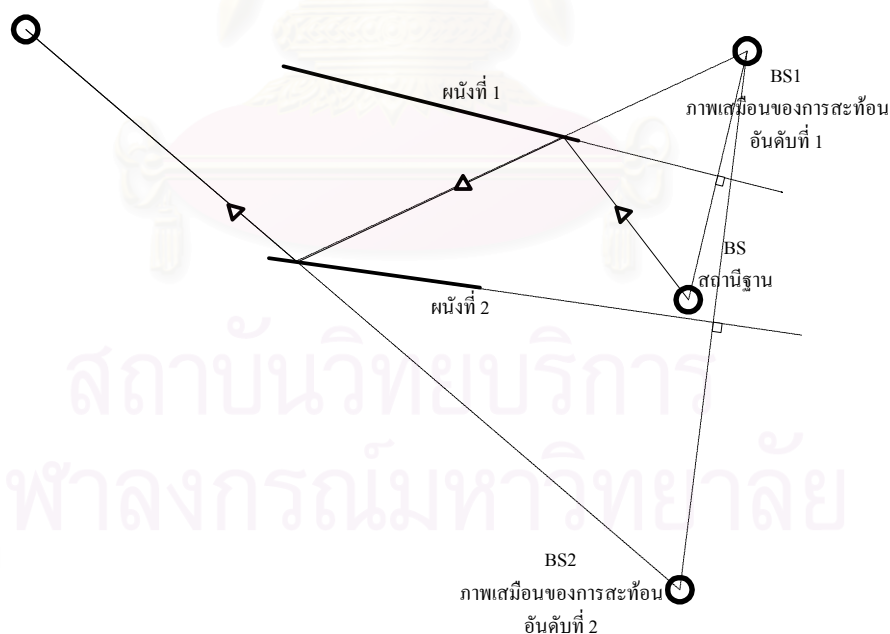


รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการกำหนดจุดสะท้อนและคำนวณรังสีสะท้อนโดยการป้อนรังสีทดสอบ [1]

2. การตามรอยทางเดินของรังสีโดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน

การตามรอยทางเดินของรังสีโดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน (theorem of images) ใช้ในการตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนเพื่อคำนวณหาจุดตกกระทบบนสิ่งกีดขวาง เริ่มจากการคำนวณหาตำแหน่งภาพเสมือนของแหล่งกำเนิดกับสิ่งกีดขวางในระนาบขนานกับพื้นโลกเพื่อสร้างรอยทางเดินของรังสีมายังสถานีเคลื่อนที่โดยการหาจุดตัดของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างภาพเสมือนและสถานีเคลื่อนที่กับสิ่งกีดขวาง จุดตัดที่คำนวณได้จะเป็นจุดตกกระทบของรังสีจากแหล่งกำเนิด และรังสีจะสะท้อนจากจุดตกกระทบบนสิ่งกีดขวางนี้เข้าสู่สถานีเคลื่อนที่

ในการคำนวณการสะท้อนมากกว่าหนึ่งครั้งจะคำนวณจุดตกกระทบของรังสีบนสิ่งกีดขวางโดยการคำนวณตำแหน่งของภาพเสมือนที่เกิดจากสิ่งกีดขวางที่พิจารณา เมื่อคำนวณจุดที่รังสีตกกระทบบนสิ่งกีดขวางที่พิจารณาอยู่ได้แล้วก็จะให้ภาพเสมือนของสถานีส่งเป็นแหล่งกำเนิดเพื่อคำนวณภาพเสมือนอันดับสูงที่เกิดจากสิ่งกีดขวางอันดับสูง แล้วคำนวณจุดตกกระทบของรังสีต่อไปจนได้ทางเดินของรังสีที่เข้าถึงจุดรับ รูปที่ 2.8 แสดงการคำนวณรอยทางเดินของรังสีเมื่อพิจารณาการสะท้อนของคลื่น 2 ครั้ง จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อคำนวณจุดตกกระทบของการสะท้อนอันดับที่ 2 ได้แล้ว จะสามารถสร้างรอยทางเดินของรังสีเชื่อมจากจุดตกกระทบอันดับที่ 2 ไปยังสถานีเคลื่อนที่ได้ โดยมีเงื่อนไขว่าเส้นทางเดินของรังสีจากการสะท้อนอันดับที่ 2 จะต้องไม่ถูกบดบังก่อนถึงสถานีเคลื่อนที่



รูปที่ 2.8 การตามรอยทางเดินของรังสีโดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน

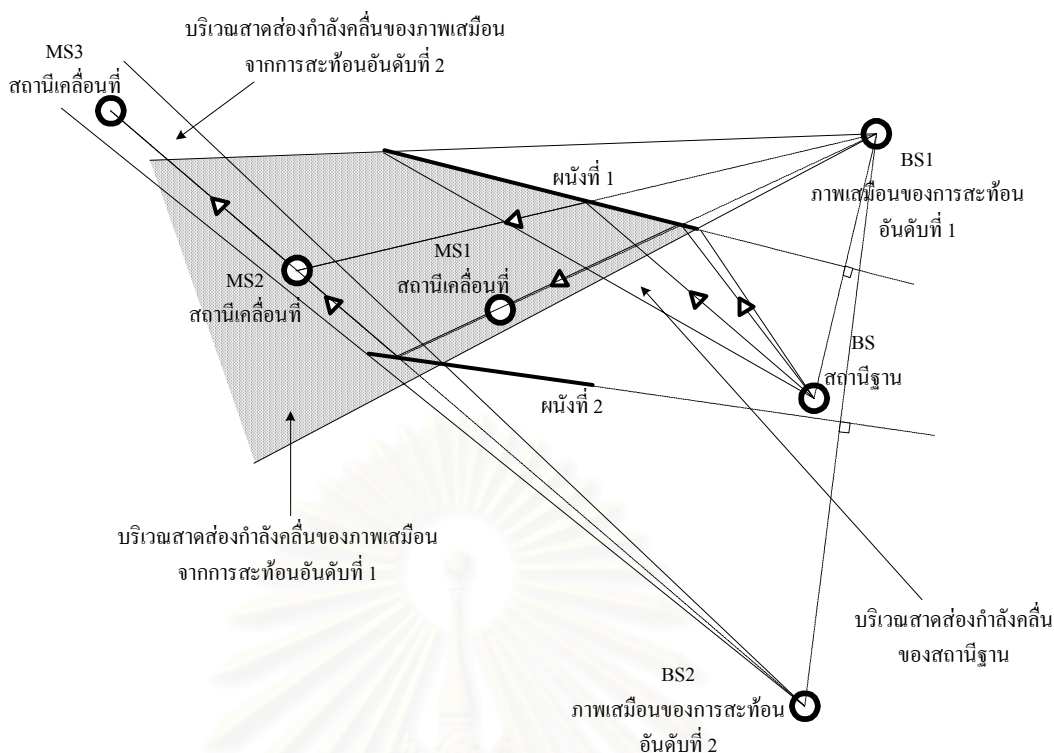
กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีโดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนนี้จะใช้ร่วมกับวิธีการเสริมอื่นๆ เพื่อลดเวลาในการคำนวณรอยทางเดินรังสีให้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ จากการศึกษา

พบว่ากระบวนการเสริมเพื่อเร่งความเร็วในการคำนวณของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีหลายวิธี วิธีสร้างฐานข้อมูลบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นและวิธีสร้างแผนภูมิการมองเห็นเป็นวิธีที่ใช้หลักการของทฤษฎีรูปภาพเสมือนเป็นพื้นฐาน ระเบียบวิธีการหารอยทางเดินของรังสีของทั้งสองวิธีมีดังนี้

2.1 การพิจารณาดำเนินการของสถานีเคลื่อนที่กับบริเวณเสาตอมกำลังคลื่น

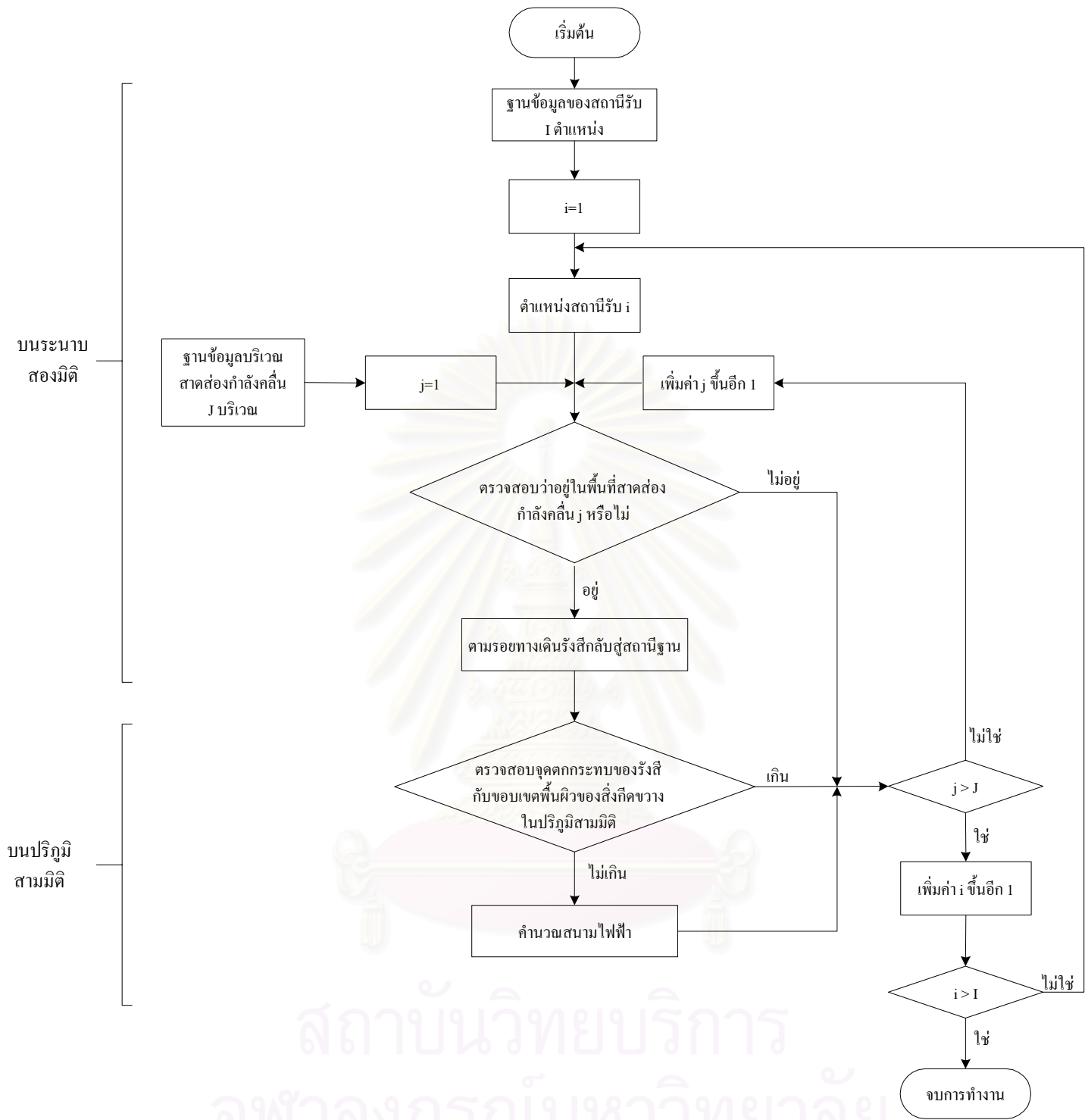
บริเวณเสาตอมกำลังคลื่น คือบริเวณที่รังสีจากแหล่งกำเนิดจะสามารถตกกระทบบนสิ่งกีดขวางได้โดยไม่ถูกบดบัง กระบวนการสร้างบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นเริ่มจากการพิจารณาขอบเขตเงาบนสิ่งกีดขวางที่พิจารณาซึ่งจะเป็นบริเวณที่รังสีจากแหล่งกำเนิดไม่สามารถตกกระทบได้เนื่องจากถูกบดบัง บริเวณเสาตอมกำลังคลื่นจะสร้างจากแหล่งกำเนิดหรือภาพเสมือนของแหล่งกำเนิดเนื่องจากสิ่งกีดขวางอื่น ซึ่งบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นที่สร้างจากภาพเสมือนของแหล่งกำเนิดจะเป็นบริเวณที่เชื่อมต่อระหว่างบริเวณที่มองเห็นของสิ่งกีดขวางซึ่งก่อให้เกิดภาพเสมือนของแหล่งกำเนิดกับบริเวณที่มองเห็นของสิ่งกีดขวางที่สนใจที่อยู่ในขอบเขตของการเสาตอมกำลังคลื่นจากภาพเสมือนนั้น โดยขอบเขตของการเสาตอมกำลังคลื่นจากภาพเสมือนจะถูกจำกัดโดยบริเวณที่มองเห็นบนสิ่งกีดขวางต้นกำเนิดของภาพเสมือนนั้น การสร้างบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นแสดงในรูปที่ 2.9 เมื่อให้ผนังที่ 1 เป็นสิ่งกีดขวางที่สนใจผนังนี้จะมองเห็นโดยสถานีฐานได้ทั่วทั้งหมด บริเวณที่รังสีตกกระทบบนผนังที่ 1 แล้วสะท้อนออกไปจะอยู่ในบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นของภาพเสมือนจากการสะท้อนอันดับที่ 1 ต่อมาเมื่อพิจารณาบริเวณที่ไม่ถูกบดบังบนผนังที่ 2 เนื่องจาก BS_1 จะได้บริเวณเสาตอมกำลังคลื่นของภาพเสมือนจากการสะท้อนอันดับที่ 2 ซึ่งเกิดจากบริเวณที่ไม่ถูกบดบังของผนังที่ 2 ที่อยู่ในบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นของภาพเสมือนจากการสะท้อนอันดับที่ 1 และเมื่อพิจารณาให้ผนังที่ 2 เป็นสิ่งกีดขวางที่สนใจจะสามารถสร้างบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นเนื่องจากสถานีฐานและบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นเนื่องจากภาพเสมือนอันดับสูงได้ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 การสร้างบริเวณสาตส่งกำลังคลื่น และการตามรอยทางเดินของรังสี โดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนและบริเวณสาตส่งกำลังคลื่น

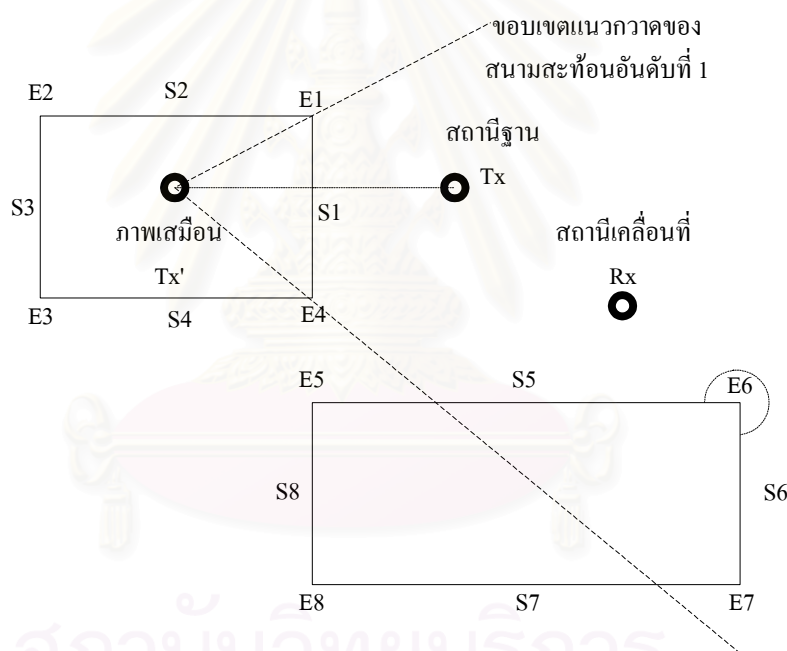
จากรูปที่ 2.9 เมื่อใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนร่วมกับการสร้างบริเวณสาตส่งกำลังคลื่น โดยพิจารณาเฉพาะกลไกการสะท้อนของคลื่นจะช่วยให้แบบจำลองคำนวณได้ทันทีว่า ณ ตำแหน่งที่สถานีเคลื่อนที่หยุดอยู่ คลื่นวิทยุที่มาถึงจะเป็นคลื่นวิทยุเนื่องจากการสะท้อนอันดับใดได้บ้าง เช่น ที่ตำแหน่ง MS1 สถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ในบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นของภาพเสมือนจากการสะท้อนอันดับที่ 1 จะมีรังสีสะท้อนอันดับที่ 1 มาถึง และตำแหน่ง MS2 สถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ในบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นของภาพเสมือนจากการสะท้อนอันดับที่ 1 และ 2 ก็จะมีรังสีสะท้อนอันดับที่ 1 และ 2 มาถึงสถานีเคลื่อนที่ ในกรณีสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่ง MS3 สถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ในบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นของภาพเสมือนจากการสะท้อนอันดับที่ 2 เพียงอย่างเดียวก็จะมีเพียงคลื่นสะท้อนอันดับที่ 2 มาถึงเท่านั้น กระบวนการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการคำนวณรอยทางเดินของรังสีสะท้อนโดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน และพื้นที่สาคสองกำลังคลื่น

2.2 การใช้แผนภูมิการมองเห็น

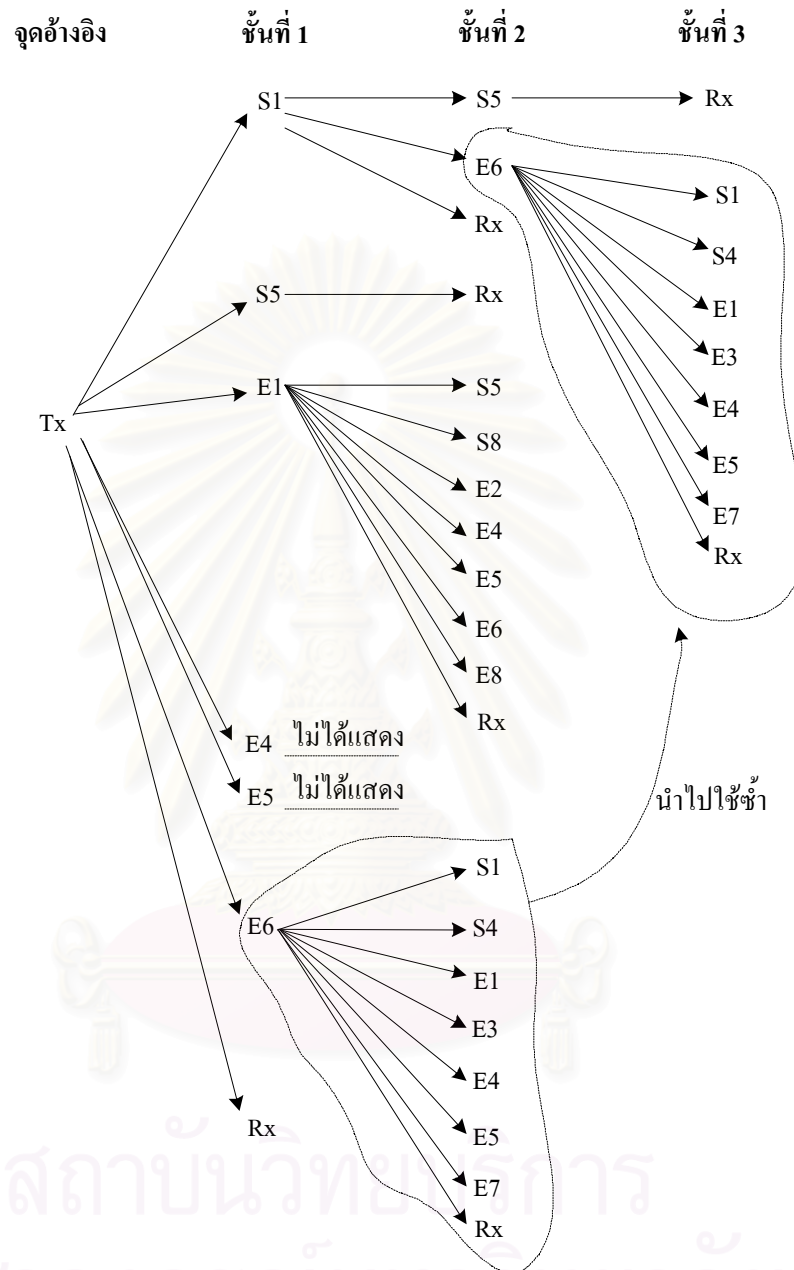
แผนภูมิการมองเห็น [12] เป็นแผนภูมิที่บรรจุผนัง มุมอาคาร สิ่งกีดขวางอื่นๆ และสถานีเคลื่อนที่ซึ่งอยู่ในขอบเขตการสาธต่งกำลังคลื่นของภาพเสมือนของแหล่งกำเนิดหรืออยู่ในขอบเขตการสาธต่งกำลังคลื่นของตัวเลี้ยวเบน เมื่อใช้แผนภูมิการมองเห็นในการตามรอยทางเดินของรังสีจะช่วยลดจำนวนสิ่งกีดขวางที่จะต้องใช้ในการพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นในรอยทางเดินของรังสีแต่ละรอยดังรูปที่ 2.11 เมื่อสร้างภาพเสมือนของสถานีฐานกับผนัง S1 ขอบเขตของแนวรังสีที่เป็นไปได้แสดงโดยเส้นประ จะพบว่าแนวกวาดของรังสีสะท้อนในขอบเขตของเส้นประทั้งสองจะครอบคลุมบางส่วนของกำแพง S5 มุม E6 และสถานีเคลื่อนที่ Rx สามารถสร้างแผนภูมิการมองเห็น (visibility graph) ได้ดังรูปที่ 2.12 รังสีที่แพร่กระจายออกจากมุม E6 มีการเกิดขึ้นซ้ำในแผนภูมิการมองเห็นชั้นที่ 2 และ 3 แผนภูมีย่อยของมุม E6 ที่สร้างในแผนภูมิการมองเห็นชั้นที่ 2 จะถูกนำมาใช้ซ้ำในแผนภูมิการมองเห็นชั้นที่ 3 เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ



รูปที่ 2.11 ขอบเขตของมุมกวาดรังสีของแผนภูมิการมองเห็น

การสร้างแผนภูมิการมองเห็นดังรูปที่ 2.12 จะกวาดรังสีทดสอบรอบสถานีฐานเพื่อตรวจสอบว่ารังสีจากสถานีฐานจะตกกระทบบริเวณใดบ้าง แล้วนำมาสร้างเป็นแผนภูมิการมองเห็นชั้นที่ 1 จากนั้นจะตรวจสอบแนวรังสีที่เกิดการสะท้อนหรือเลี้ยวเบนในแต่ละบริเวณในแผนภูมิการมองเห็นชั้นที่ 1 ว่าตกกระทบสิ่งกีดขวางใดบ้าง โดยมุมของการกวาดรังสีทดสอบจะถูกจำกัดอยู่ในขอบเขตของตัวสะท้อนคลื่น (ผนังอาคาร) หรือตัวเลี้ยวเบนคลื่น (สันมุมของอาคาร) นั้นๆ เมื่อสร้างแผนภูมิการมองเห็นได้แล้วก็จะคำนวณรอยทางเดินของรังสีและพิจารณาการเกิดขึ้นจริงของ

รังสีในปริภูมิสามมิติกับเงื่อนไขขอบเขตของสิ่งกีดขวางที่รังสีตกกระทบ ถ้ารอยทางเดินของรังสีเกิดขึ้นจริง จะคำนวณขนาดสนามไฟฟ้าและกำลังคลื่นที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่จากรังสีนั้น

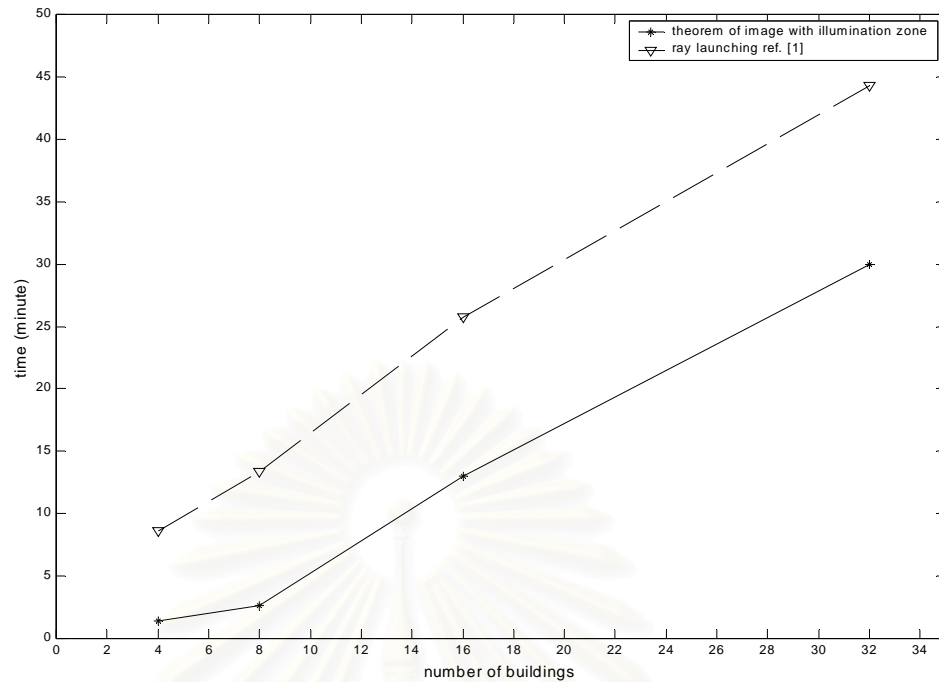


รูปที่ 2.12 บางส่วนของแผนภูมิการมองเห็นของสภาพแวดล้อมในรูปที่ 2.11

3. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีวิธีต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการคำนวณรอยทางเดินของรังสีระหว่างวิธีปล่อยรังสีทดสอบ และวิธีใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน วิธีตามรอยทางเดินของรังสีแบบใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนจะให้ผลการคำนวณที่รวดเร็วกว่า เนื่องจากไม่ต้องแปรค่ามุมเพื่อปล่อยรังสีทดสอบ เพราะมุมที่รังสีทดสอบออกจากสถานีฐานแล้วรอยทางเดินของรังสีทดสอบนั้นเกิดขึ้นจริงมีอยู่จำกัดไม่เกิดขึ้นทุกๆ มุมรอบสถานีฐาน การกวาดมุมแล้วทดสอบการเกิดขึ้นจริงของรังสีจึงทำให้เสียเวลาในการคำนวณมาก ในขณะที่เมื่อใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนจะช่วยหาจุดตกกระทบบนสิ่งกีดขวางได้รวดเร็วกว่า นอกจากนี้วิธีการตามรอยทางเดินรังสีโดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนจะพิจารณารังสีที่พุ่งเข้าหาตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยตรงทำให้มั่นใจได้ว่ารังสีที่คำนวณนั้นพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่จริง ไม่นับรวมรังสีที่เฉียดผ่านสถานีเคลื่อนที่แบบวิธีใช้ทรงกลมจุดรับเพื่อทดสอบการมาถึงของรังสี และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีโดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนโดยการสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นกับวิธีการสร้างแผนภูมิการมองเห็น วิธีการตามรอยทางเดินของรังสีโดยการสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นจะให้ประสิทธิภาพในการตามรอยทางเดินของรังสีดีกว่าการสร้างแผนภูมิการมองเห็น เนื่องจากการสร้างแผนภูมิการมองเห็นจะต้องทำที่ทุกๆ ตำแหน่งที่สถานีเคลื่อนที่ไปหยุดอยู่เพราะกระบวนการของการสร้างแผนภูมิการมองเห็นจะไม่ได้ระบุไว้ในแต่ละบริเวณในสิ่งแวดล้อมจะมีรังสีสะท้อนอันดับใดมาถึงได้บ้าง จึงต้องสร้างแผนภูมิการมองเห็นเพื่อตามรอยทางเดินของคลื่นทุกครั้งที่สถานีเคลื่อนที่เลื่อนตำแหน่งไปจึงไม่ช่วยลดเวลาในการคำนวณได้มากนัก การสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นจะทำให้ทราบได้ว่า ณ ตำแหน่งที่สถานีเคลื่อนที่หยุดอยู่จะมีรังสีสะท้อนอันดับใดมาถึงได้บ้าง การตามรอยทางเดินของรังสีจึงทำได้ง่ายกว่าเพราะในฐานข้อมูลจะบันทึกต้นกำเนิดของรังสีสะท้อนจากสถานีฐานและสิ่งกีดขวางที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นอันดับต่างๆ ไว้อย่างสมบูรณ์

ประสิทธิภาพในด้านความเร็วในการคำนวณของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ใช้วิธีการตามรอยทางเดินของรังสีแบบปล่อยรังสีทดสอบ [1] เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ใช้วิธีการตามรอยทางเดินของรังสีโดยการใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนร่วมกับการสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มี CPU แบบ Pentium II 400 MHz หน่วยความจำ 128 MB แสดงในรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนของสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้นแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ใช้วิธีการตามรอยทางเดินของรังสีโดยการปล่อยรังสีทดสอบจะใช้เวลาในการคำนวณรอยทางเดินของรังสีมากกว่าการใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนร่วมกับการสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่งกำลังคลื่น



รูปที่ 2.13 ผลเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณของวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีแบบปล่อยรังสีทดสอบ (---▽---) เทียบกับวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีโดยใช้ทฤษฎีบทบาทเสมือนร่วมกับการสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่องกำลังคลื่น (—*—)

จากผลการเปรียบเทียบรูปแบบการตามรอยทางเดินของรังสีแบบต่างๆ การตามรอยทางเดินของรังสีโดยใช้ทฤษฎีบทบาทเสมือนร่วมกับการสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่องกำลังคลื่นเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านความถูกต้องและความเร็วในการคำนวณ เนื่องจากรังสีที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่จะเป็นรังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่โดยตรงไม่ใช่ทรงกลมจูดรับซึ่งจะนับรังสีที่เพียงเฉียดผ่านสถานีเคลื่อนที่มาคำนวณเป็นกำลังคลื่นที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่ด้วย และไม่ใช้การแปรค่ามุมเพื่อปล่อยรังสีทดสอบซึ่งเป็นการหารอยทางเดินของรังสีที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่ที่ใช้เวลามาก ดังนั้นในแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้วิธีการตามรอยทางเดินของรังสีโดยใช้ทฤษฎีบทบาทเสมือนร่วมกับการสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่องกำลังคลื่นเป็นวิธีตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนในแบบจำลอง

การตามรอยทางเดินของรังสี

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่พัฒนาในวิทยานิพนธ์นี้จะเริ่มติดตามรอยทางเดินของรังสีตามกลไกการแพร่กระจายคลื่น ได้แก่ การส่งผ่านอวกาศว่าง การสะท้อน และการเลี้ยวเบนด้วยการแยกพิจารณาการตามรอยทางเดินของรังสีที่เป็นไปได้บนระนาบสองมิติซึ่งเป็นภาพฉายของระนาบลาดเอียงและรอยทางเดินของรังสีที่เป็นไปได้บนระนาบโค้งซึ่งตั้งฉากกับพื้นโลก ชนิดของการตามรอยทางเดิน

ของรังสีที่ใช้ในการคำนวณสัญญาณที่มาถึงสถานีรับของแบบจำลองจำแนกตามกลไกการแพร่กระจายคลื่นคือ

1. รอยทางเดินของรังสีตรงจากการส่งผ่านอวกาศว่าง
2. รอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากการสะท้อนจากพื้นดิน
3. รอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากการสะท้อนที่ผนังอาคาร
4. รอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากการสะท้อนที่ผนังอาคารแล้วสะท้อนพื้นดินก่อนเข้าสู่สถานีรับ
5. รอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากการเลี้ยวเบนที่สันขอบอาคารในแนวตั้ง
6. รอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากการเลี้ยวเบนที่สันขอบอาคารในแนวนอน
7. รอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากการเลี้ยวเบนจากยอดตึก

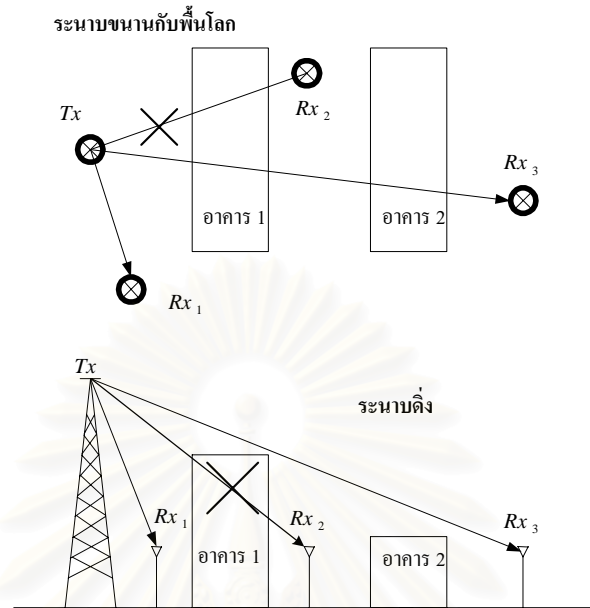
เมื่อกำหนดรอยทางเดินของรังสีแต่ละชนิดได้แล้วจะพิจารณาว่ารอยทางเดินของรังสีแต่ละรอยเดินทางผ่านต้นไม้หรือไม่ หากเกิดการตัดผ่านบริเวณพุ่มของต้นไม้ซึ่งมีเก็บอยู่ในฐานข้อมูลต้นไม้กำลังงานของคลื่นที่อยู่ในรังสีนั้นก็จะถูกลดทอนด้วยอัตราการลดทอน a เท่า รอยทางเดินของรังสีชนิดต่างๆ จะถูกแยกพิจารณาบนระนาบขนานกับพื้นโลก และระนาบดังต่อไปนี้

1. ระนาบขนานกับพื้นโลก

1.1 รอยทางเดินของรังสีตรงจากการส่งผ่านอวกาศว่าง

จากภาพฉายของสถานีฐาน สถานีเคลื่อนที่ และสิ่งกีดขวางบนระนาบขนานกับพื้นโลก รอยทางเดินของรังสีตรงจากการส่งผ่านอวกาศว่างพิจารณาได้จากการเชื่อมเส้นตรงจากสถานีฐาน (Tx) ไปยังสถานีเคลื่อนที่ (Rx) แล้วพิจารณาว่าเส้นตรงที่เกิดขึ้นนี้ตัดกับสิ่งกีดขวางที่เป็นอาคารหรือไม่ ถ้าไม่เกิดการตัดกันของอาคารกับเส้นตรงที่เชื่อมระหว่าง Tx กับ Rx ก็จะมีรอยทางเดินของรังสีตรงมาถึงสถานีเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งนั้น หากเส้นตรงนั้นตัดผ่านอาคารจะต้องทดสอบว่าจุดตัดบนระนาบขนานกับพื้นโลกนั้นอยู่บนผนังของอาคารหรือไม่โดยการตรวจสอบจุดตัดของเส้นตรงในปริภูมิสามมิติที่เชื่อมจากสถานีฐาน (x_t, y_t, z_t) ไปยังสถานีเคลื่อนที่ (x_r, y_r, z_r) กับระนาบของผนังอาคาร หากจุดตัดนั้นไม่อยู่บนผนังอาคารก็จะมีรังสีตรงพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.14 รูปที่ 2.14 แสดงรอยทางเดินของรังสีตรงจากสถานีฐานพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่ง Rx_1 ส่วนที่ตำแหน่ง Rx_2 จะไม่มีรังสีตรงมาถึงเนื่องจากรอยทางเดินของรังสีจากสถานีฐานมายังสถานีเคลื่อนที่ถูกลบบังจากผนังอาคาร และที่ตำแหน่ง Rx_3 จะมีรังสีตรงพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่แม้ว่าภาพฉายรอยทางเดินของรังสีตรงบนระนาบขนานกับพื้นโลกตัดกับผนังอาคาร แต่

เมื่อพิจารณาในระนาบดิ่งรอยทางเดินของรังสีจะไม่เกิดการชนกับผนังอาคาร กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีตรงเมื่อมีตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ทั้งหมด I สถานี แสดงในรูปที่ 2.15



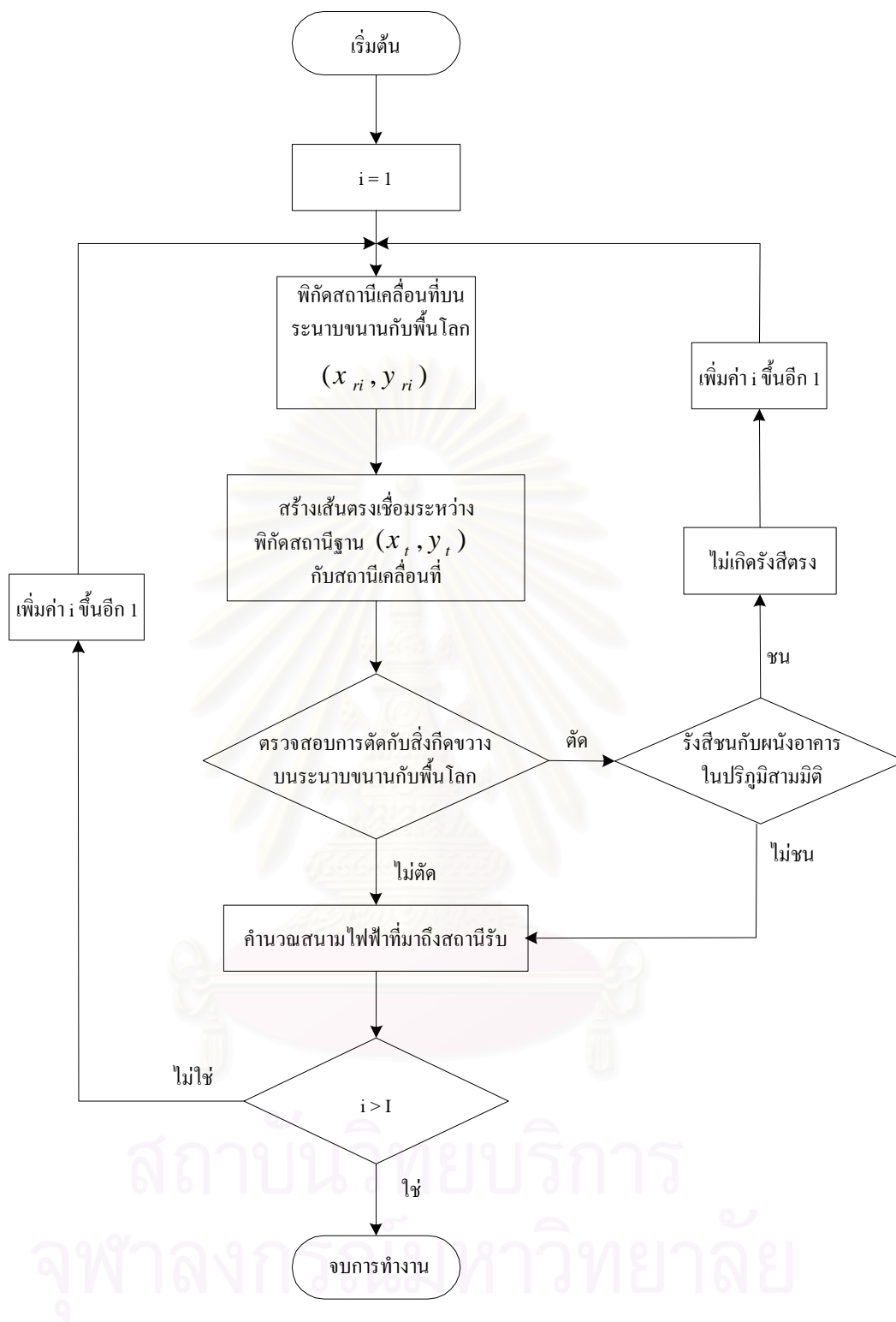
รูปที่ 2.14 รอยทางเดินของรังสีตรงบนระนาบขนานกับพื้นโลกและระนาบดิ่ง

ค่าสนามไฟฟ้าจากรังสีตรงที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่ (E_t) เมื่อกำลังส่งของสถานีฐานเป็น P_t สายอากาศส่งที่สถานีฐานมีอัตราขยาย G_t และมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็น $f_t(\theta, \phi)$ โพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าจากสายอากาศส่งอยู่ในทิศทางของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{e}_{tx} รังสีตรงผ่านพุ่มต้นไม้จำนวน M ต้น แต่ละต้นมีอัตราลดทอนกำลังคลื่นเท่ากับ a_i

$$E_t = \frac{\sqrt{60P_t G_t f_t(\theta, \phi)}}{d_t} \prod_{i=1}^M a_i e^{-j\beta d_i} \hat{e}_{tx} \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.6)$$

เมื่อ d_t คือ ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่จากสายอากาศส่งถึงสายอากาศรับ

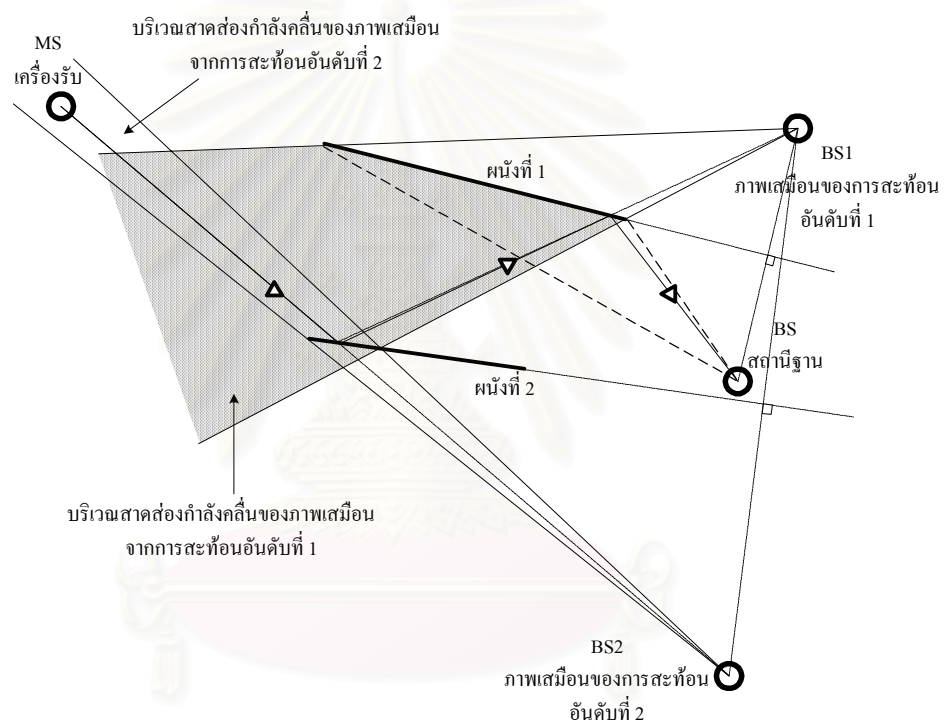
\hat{e}_{rx} คือ โพลาริเซชันของสายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่



รูปที่ 2.15 กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีตรง

1.2 รอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากการสะท้อนที่ผนังอาคาร และ รอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากการสะท้อนที่ผนังอาคารแล้วสะท้อนพื้นดินก่อนเข้าสู่สถานีรับ

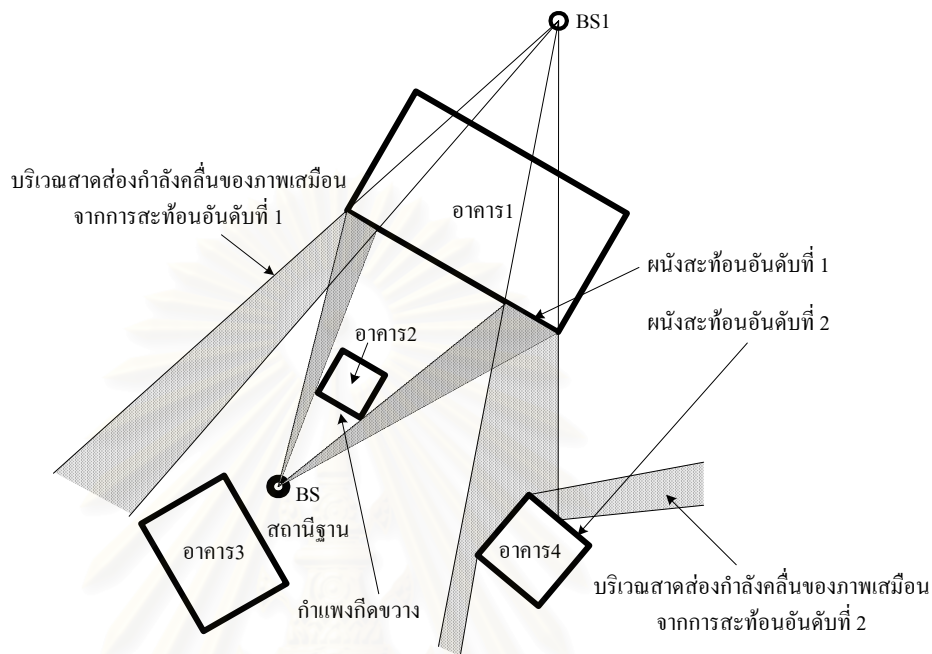
การหารอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากผนังอาคารและรังสีสะท้อนจากผนังอาคารแล้วสะท้อนพื้นดินก่อนเข้าสู่สถานีรับใช้หลักการของทฤษฎีบทภาพเสมือนร่วมกับฐานข้อมูลบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่น (รายละเอียดของการสร้างฐานข้อมูลบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นศึกษาได้จากภาคผนวก) โดยพิจารณาผนังของอาคารต่างๆ เป็นตัวสะท้อนและใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนของแหล่งกำเนิดซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสมมุติของคลื่นที่สะท้อนออกจากผนังต่อไป [2,3,9] บริเวณที่มีรังสีสะท้อนจะอยู่ภายในบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่น (illumination zones) [2] ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งการตามรอยทางเดินสัญญาณจะทวนสอบจากเครื่องรับไปยังสถานีฐาน



รูปที่ 2.16 การสร้างภาพเสมือนและบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นของภาพเสมือน

บริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นแต่ละบริเวณจะเกิดจากภาพเสมือนที่เป็นแหล่งกำเนิดสมมุติของรังสีสะท้อนจากผนัง วิธีการนี้จะช่วยลดเวลาในการพิจารณาผนังต่างๆ ในแบบจำลองว่ารังสีสะท้อนจะตกกระทบหรือไม่เพราะรังสีสะท้อนจะตกกระทบผนังที่อยู่ในบริเวณของพื้นที่เสาตอม่อกำลังคลื่นเท่านั้น เช่นในรูปที่ 2.16 ภาพเสมือนอันดับที่ 1 (BS_1) ของสถานีฐาน (BS) ที่เกิดจากผนังที่ 1 จะทำให้เกิดภาพเสมือนอันดับที่ 2 (BS_2) จากผนังที่ 2 โดยบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นจากภาพเสมือน BS_1 จะครอบคลุมผนังที่ 2 เพียงบางส่วนเท่านั้น บริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่รังสีสะท้อนจากผนังที่ 1 มาตกกระทบผนังที่ 2 พื้นที่เสาตอม่อกำลังคลื่นอันดับต่อไปที่เกิดจากภาพเสมือน BS_2 ก็จะเกิดจากส่วนของผนังที่ 2 ที่อยู่ในพื้นที่เสาตอม่อกำลังคลื่นของ BS_1 จากหลักการนี้เมื่อนำไปใช้ในบริเวณสิ่งแวดล้อมจริง ดังรูปที่ 2.17 ผนังของอาคารต่างๆที่อยู่ในรัศมีครอบคลุมของสถานีฐานจะ

เป็นตัวสะท้อนเพื่อสร้างภาพเสมือนและพื้นที่ที่สอดคล้องกำลังคลื่น ข้อมูลของภาพเสมือนและพื้นที่ที่สอดคล้องกำลังคลื่นที่เกิดขึ้นจากภาพเสมือนแต่ละภาพจะจัดเก็บในฐานะข้อมูลของพื้นที่ที่สอดคล้องกำลังคลื่นซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างพื้นที่ที่สอดคล้องกำลังคลื่นที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมจริง

เลขที่บริเวณสอดคล้องกำลังคลื่น
พิกัดภาพเสมือนต้นกำเนิดในปริภูมิสามมิติ
เลขที่ของผนังอาคารต้นกำเนิด
อันดับการสะท้อนที่เกิดขึ้น
พิกัดมุมของบริเวณสอดคล้องกำลังคลื่น
บริเวณที่ถูกสอดคล้องกำลังคลื่นบนผนังต้นกำเนิด
เลขที่บริเวณสอดคล้องกำลังคลื่นที่เป็นต้นกำเนิดของบริเวณสอดคล้องกำลังคลื่นนี้

ฐานข้อมูลบริเวณสอดคล้องกำลังคลื่น

รูปที่ 2.18 โครงสร้างฐานข้อมูลบริเวณสอดคล้องกำลังคลื่น

การพิจารณารอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากผนังอาคารที่จะมาถึงสถานีเคลื่อนที่ในปริภูมิสามมิติจะพิจารณาค่าแห่งของสถานีเคลื่อนที่ว่าอยู่ในบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นเลขที่ใดบ้าง เมื่อทราบบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นนั้นแล้วก็จะทราบสอรังสีจากสถานีเคลื่อนที่ไปยังภาพเสมือนของบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นที่มีสถานีเคลื่อนที่อยู่ แนวรังสีที่เชื่อมจากสถานีเคลื่อนที่ไปยังภาพเสมือนจะตัดกับกำแพงทำให้หาจุดตกกระทบของรังสีได้ เมื่อทราบจุดที่รังสีตกกระทบบนผนังต้นกำเนิดของบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นจะหามุมตกกระทบของรังสีได้จากเวกเตอร์ของรังสีจากจุดรับไปยังภาพเสมือนและเวกเตอร์ปกติของผนัง ณ จุดตกกระทบนั้น ทำให้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบไดโอดิกได้จาก

$$R_{s,\perp} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}} \quad (2.7)$$

เมื่อสนามไฟฟ้ามีโพลาไรเซชันในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ (soft polarization) หรือ

$$R_{h,\parallel} = \frac{\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i} - \epsilon \cos \theta_i}{\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i} + \epsilon \cos \theta_i} \quad (2.8)$$

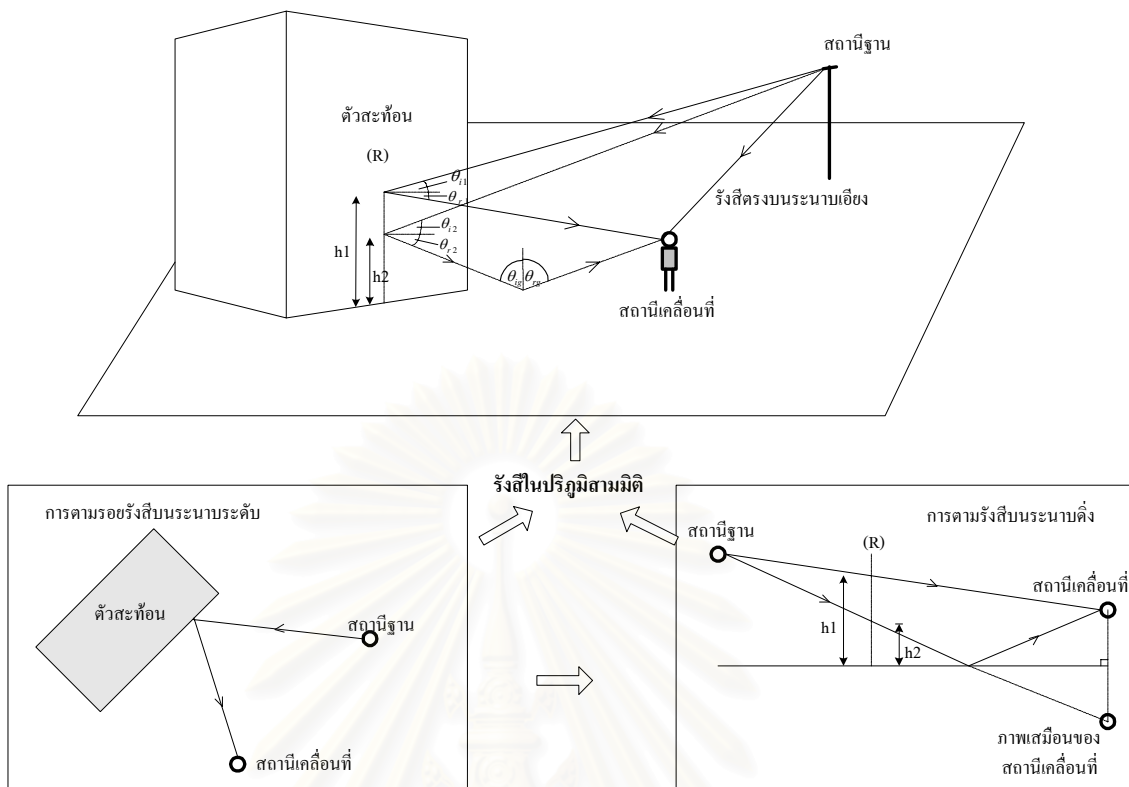
เมื่อสนามไฟฟ้ามีโพลาไรเซชันในทิศที่ขนานกับระนาบตกกระทบ (hard polarization)

โดย $\epsilon = \epsilon_r - j60\sigma\lambda$

$R_{s,\perp}, R_{h,\parallel}$ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบอ่อนและสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบแข็งตามลำดับ และ θ_i เป็นมุมตกกระทบของรังสีบนผนังอาคาร

จากนั้นจะใช้จุดตกกระทบบนผนังตามรอยทางเดินของรังสีต่อไปยังภาพเสมือนอันดับล่าง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของภาพเสมือนอันดับสูง แล้วหาจุดตกกระทบ มุมตกกระทบ และสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่อไป จะทำซ้ำกระบวนการนี้จนรังสีจากสถานีเคลื่อนที่ไปสิ้นสุดที่สถานีฐานโดยจำนวนครั้งของการสะท้อนทั้งหมดจะเท่ากับอันดับการสะท้อนของบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นที่มีสถานีเคลื่อนที่อยู่

การตรวจสอบรอยทางเดินของรังสีบนปริภูมิสามมิติที่มายังจุดรับว่าเกิดขึ้นจริงหรือไม่ ทำได้โดยพิจารณาจากเงื่อนไขขอบเขตของผนังอาคารที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน ถ้าจุดสะท้อนของการสะท้อนอันดับใดๆ ไม่อยู่บนบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นบนผนังของอาคารที่เป็นตัวสะท้อน แสดงว่าเส้นทางรังสีนั้นไม่เกิดขึ้นจริง ในกรณีที่เส้นทางรังสีบนระนาบสองมิติเกิดขึ้นจริงจะนำภาพฉายของทางเดินรังสีบนระนาบดังกล่าวมาประกอบการพิจารณาเพื่อหาเส้นทางเดินรังสีในสามมิติต่อไปดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การวิเคราะห์รังสีแบบผสมจากระนาบสองมิติเพื่อพิจารณารอยทางเดินของรังสีในปริภูมิสามมิติ

เมื่อพิจารณาภาพฉายของรอยทางเดินของรังสีบนระนาบขนานกับพื้นโลกในรูปที่ 2.19 รอยทางเดินของรังสีสะท้อนที่ผนังอาคารแล้วสะท้อนพื้นดินก่อนเข้าสู่สถานีรับจะอยู่บนรอยทางเดินรังสีเดียวกันกับรังสีสะท้อนจากผนัง การตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากผนังแล้วสะท้อนพื้นดินจึงใช้หลักการเดียวกันกับการตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากผนัง แต่การตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากผนังแล้วสะท้อนพื้นดินจะมีการคำนวณจุดตกกระทบของรังสีที่พื้นดินซึ่งจะหาได้จากจุดตัดบนพื้นโลกกับแนวรังสีที่เชื่อมจากภาพเสมือนของสถานีเคลื่อนที่กับพื้นดินและภาพเสมือนของบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นที่สถานีเคลื่อนที่หยุดอยู่ เมื่อทราบจุดตกกระทบก็จะสามารถหาเวกเตอร์ตั้งฉาก (normal vector) ของผิวตกกระทบ และหามุมตกกระทบ มุมสะท้อน รวมทั้งสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบโคแอดิกได้ จากนั้นจะตามรอยทางเดินของสัญญาณตกกระทบผนังโดยใช้จุดตกกระทบบนพื้นดินเป็นจุดรับ จุดตกกระทบของรังสีบนผนังจะหาได้จากจุดตัดบนผนังต้นกำเนิดของบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นกับแนวรังสีที่เชื่อมจากจุดตกกระทบบนพื้นดินไปยังภาพเสมือน เมื่อทราบจุดตกกระทบบนผนังก็จะสามารถหา มุมตกกระทบ มุมสะท้อน และสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบโคแอดิกได้ จากนั้นจะใช้จุดตกกระทบบนผนังตามรอยทางเดินของรังสีต่อไปยังภาพเสมือนอันดับล่างซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของภาพเสมือนอันดับสูง แล้วหาจุดตกกระทบ มุมตกกระทบ และสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่อไป จะทำซ้ำกระบวนการนี้จนรังสีจากสถานีเคลื่อนที่

ไปสิ้นสุดที่สถานีฐาน โดยจำนวนครั้งของการสะท้อนที่ผนังอาคารทั้งหมดจะเท่ากับอันดับการสะท้อนของบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นที่มีสถานีเคลื่อนที่อยู่เช่นเดียวกับการตามรอยทางเดินของรังสีที่สะท้อนจากผนังอาคาร กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากผนังและรังสีสะท้อนจากผนังแล้วสะท้อนพื้นดินก่อนเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่แสดงในรูปที่ 2.20

เนื่องจากโพลาริเซชันของสายอากาศที่ใช้ในแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในวิทยานิพนธ์นี้เป็นโพลาริเซชันเชิงเส้นและอยู่ในแนวตั้ง โพลาริเซชันของรังสีสะท้อนทั้งสองชนิดจึงอยู่ในระนาบตั้งฉากกับพื้นโลก สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้าเนื่องจากรังสีสะท้อนจากผนังจึงเป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบอ่อน ส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้าเนื่องจากรังสีสะท้อนที่พื้นดินจะเป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบแข็ง การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าจากรังสีสะท้อนจากผนังอาคารและสนามไฟฟ้าจากรังสีสะท้อนจากผนังอาคารแล้วสะท้อนพื้นดินก่อนเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ เมื่อเกิดการสะท้อน N ครั้ง และสะท้อนพื้นดิน 1 ครั้ง รังสีผ่านพุ่มไม้จำนวน M ต้น แต่ละต้นมีการลดทอน a_i สามารถได้จาก

$$E_r = \frac{\sqrt{60P_t G_t f_t(\theta, \phi)}}{d_r} \prod_{i=1}^M a_i \prod_{j=1}^N R_w(j) e^{-j\beta d_r} \hat{e}_{tx} \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.9)$$

สำหรับรังสีสะท้อนจากผนัง และ

$$E_{rg} = \frac{\sqrt{60P_t G_t f_t(\theta, \phi)}}{d_{rg}} \prod_{i=1}^M a_i \prod_{j=1}^N R_w(j) \cdot R_g e^{-j\beta d_r} \hat{e}_{tx} \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.10)$$

สำหรับรังสีสะท้อนจากผนังและสะท้อนพื้นดินก่อนเข้าสู่สถานีรับ

โดย P_t คือ กำลังคลื่นที่ส่งออกจากสายอากาศส่งของสถานีฐาน

G_t คือ อัตรายายของสายอากาศส่ง

$f_t(\theta, \phi)$ คือ แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศส่ง

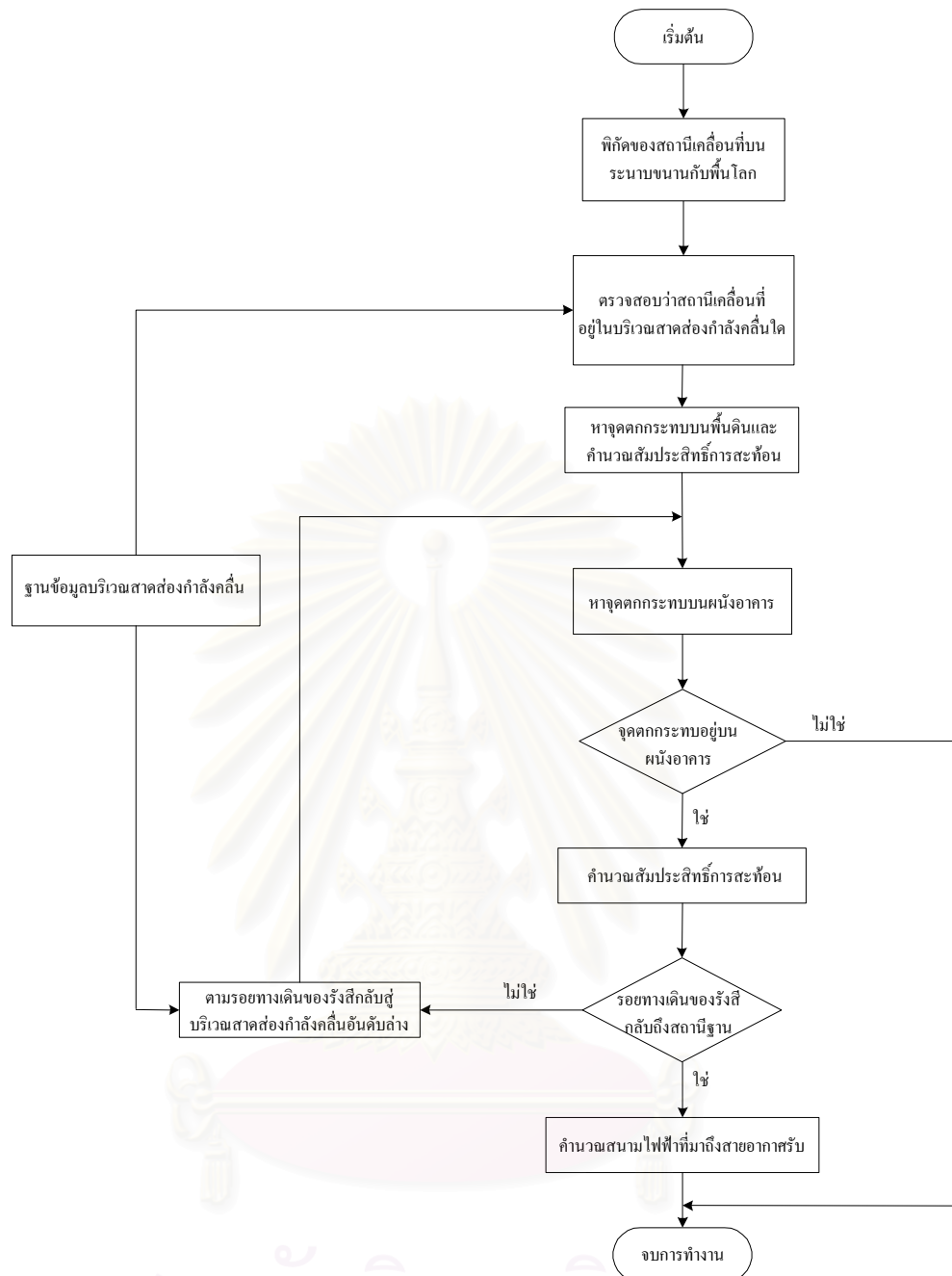
\hat{e}_{tx} คือ โพลาริเซชันของคลื่นที่แผ่ออกจากสถานีฐาน

\hat{e}_{rx} คือ โพลาริเซชันของสายอากาศรับที่สถานีเคลื่อนที่

R_w, R_g คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากผนังและสัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจาก

พื้นดินตามสมการ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ

d_r, d_{rg} คือ ระยะทางที่รังสีสะท้อนจากผนังเดินทางและระยะทางที่รังสีสะท้อนจากผนังแล้วสะท้อนพื้นดินเดินทางเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ ตามลำดับ



รูปที่ 2.20 กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากผนังและรังสีสะท้อนจากผนังแล้วสะท้อนพื้นดินก่อนเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่

1.3 รอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากการเลี้ยวเบนที่สันขอบอาคารในแนวตั้ง

การตามรอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากการเลี้ยวเบนที่สันขอบอาคารในแนวตั้งจะพิจารณารังสีเลี้ยวเบนครั้งเดียวโดยเลือกขอบที่สามารถมองเห็นได้ทั้งจากสายอากาศส่ง (T_x) และสายอากาศรับ (R_x) เป็นขอบที่ทำให้เกิดจุดเลี้ยวเบนดังรูปที่ 2.21 (ก) รังสีหมายเลข 1 เท่านั้นที่จะสามารถเกิดรังสีเลี้ยวเบนที่สันขอบอาคารในแนวตั้งได้ รูปที่ 2.21 (ข) แสดงรังสีเลี้ยวเบนที่สันขอบอาคารในแนวตั้ง

ถ้าจุด Q_D เป็นจุดเฉี่ยวเบนที่สั้นขอบอาคารในแนวตั้ง การเกิดรังสีเฉี่ยวเบนจะเป็นไปตามกฎการเฉี่ยวเบนของทฤษฎีการเฉี่ยวเบนเชิงเอกรูป [8 และ 13] ดังสมการ

$$\hat{s}_i \cdot \hat{e} = \hat{s}_d \cdot \hat{e} \quad (2.11)$$

เมื่อ \hat{s}_i คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรังสีตกกระทบกำหนดโดย $\hat{s}_i = \frac{(\bar{Q}_D - \bar{T}x)}{\|\bar{Q}_D - \bar{T}x\|}$

\hat{s}_d คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรังสีเฉี่ยวเบนกำหนดโดย $\hat{s}_d = \frac{(\bar{R}x - \bar{Q}_D)}{\|\bar{R}x - \bar{Q}_D\|}$

\hat{e} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยสัมผัสแนวแกนขอบเฉี่ยวเบนจากรูปที่ 2.22

จากรูปที่ 2.22 เมื่อให้ $\hat{e} = \hat{a}_z$ จะสามารถหาจุดเฉี่ยวเบนจากสมการ (2.11) ได้ดังนี้

$$\frac{[(x - x_t)\hat{a}_x + (y - y_t)\hat{a}_y + (z - z_t)\hat{a}_z] \cdot \hat{a}_z}{\sqrt{(x - x_t)^2 + (y - y_t)^2 + (z - z_t)^2}} = \frac{[(x_r - x)\hat{a}_x + (y_r - y)\hat{a}_y + (z_r - z)\hat{a}_z] \cdot \hat{a}_z}{\sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + (z_r - z)^2}}$$

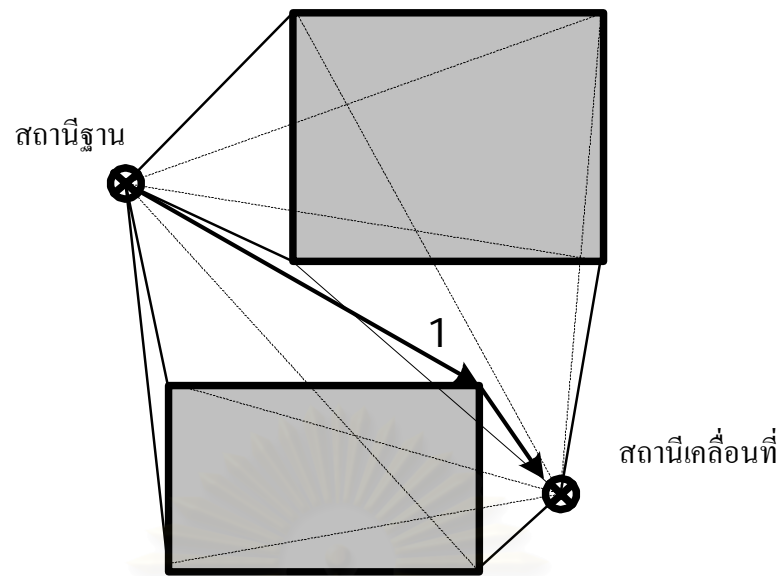
$$\frac{(z - z_t)}{\sqrt{(x - x_t)^2 + (y - y_t)^2 + (z - z_t)^2}} = \frac{(z_r - z)}{\sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + (z_r - z)^2}}$$

$$(z - z_t)^2 \cdot [a + (z_r - z)^2] = (z_r - z)^2 \cdot [b + (z - z_t)^2]$$

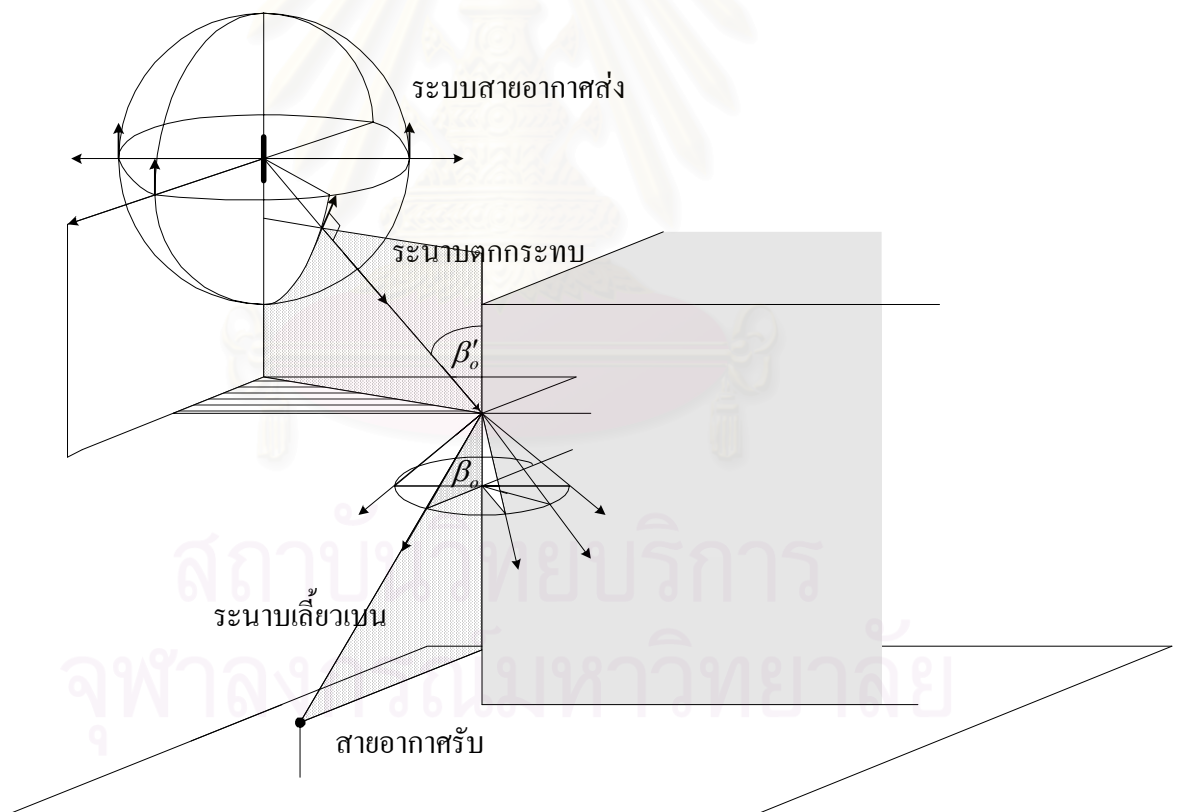
เมื่อ $a = (x_r - x)^2 + (y_r - y)^2$ และ $b = (x - x_t)^2 + (y - y_t)^2$ จะได้ความสูงของจุดเฉี่ยวเบน

$$z = \frac{\sqrt{a} \cdot z_t + \sqrt{b} \cdot z_r}{\sqrt{a} + \sqrt{b}} \quad \text{หรือ} \quad z = \frac{\sqrt{a} \cdot z_t - \sqrt{b} \cdot z_r}{\sqrt{a} - \sqrt{b}} \quad (2.12)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

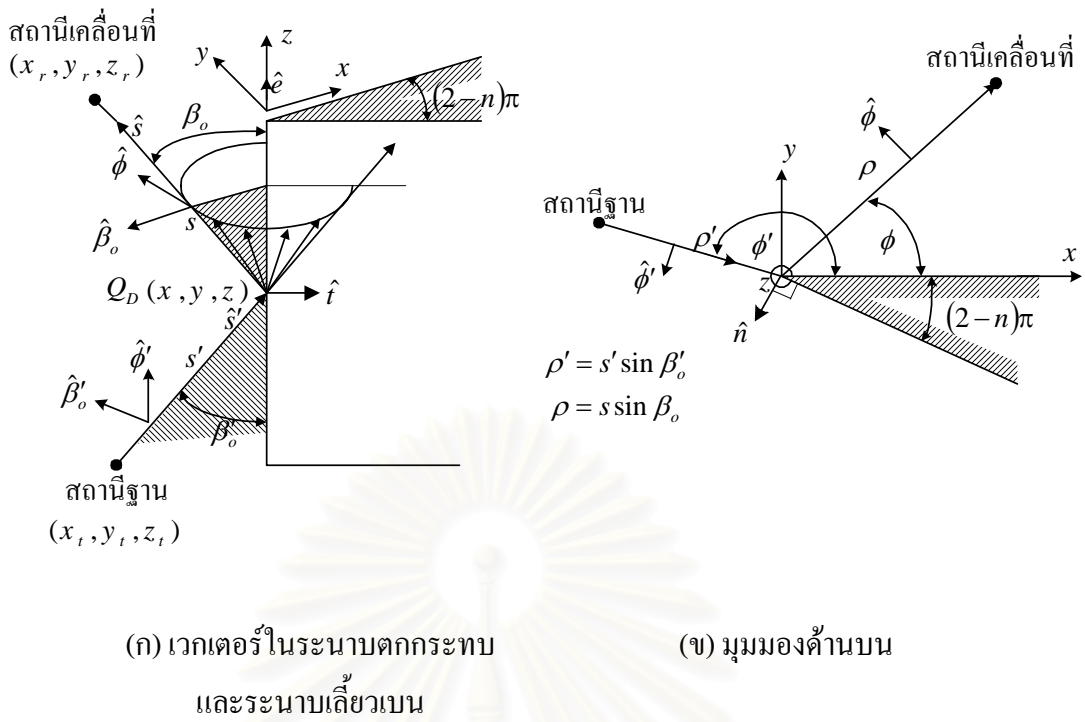


(ก) รังสีเลี้ยวเบนบนระนาบขนานกับพื้นโลก



(ข) รังสีเลี้ยวเบนในปริภูมิสามมิติ [1]

รูปที่ 2.21 รังสีเลี้ยวเบนบนระนาบขนานกับพื้นโลกและในปริภูมิสามมิติ



รูปที่ 2.22 ลักษณะเวกเตอร์ที่ขอบเลี้ยวเบน

เมื่อกำหนดให้เวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{t} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ \hat{e} อยู่บนด้านประกอบของรูปสี่เหลี่ยม เวกเตอร์และมุมในระบบพิกัดของจุดเลี้ยวเบนในรูปที่ 2.22 หาได้จาก

$$\hat{n} = \hat{t} \times \hat{e} \tag{2.13 ก}$$

$$\hat{\phi}' = \frac{\hat{e} \times \hat{s}'}{\|\hat{e} \times \hat{s}'\|} \tag{2.13 ข}$$

$$\hat{\beta}'_o = \hat{s}' \times \hat{\phi}' \tag{2.13 ค}$$

$$\hat{\phi} = \frac{\hat{s} \times \hat{e}}{\|\hat{s} \times \hat{e}\|} \tag{2.13 ง}$$

$$\hat{\beta}_o = \hat{s} \times \hat{\phi} \tag{2.13 จ}$$

$$\beta = \beta_o = \beta'_o = \sin^{-1}(\sqrt{1 - (\hat{s}' \cdot \hat{e})^2}) \tag{2.13 ฉ}$$

$$\phi' = \begin{cases} \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}'); \hat{t} \cdot \hat{\phi}' \leq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}'); \hat{t} \cdot \hat{\phi}' > 0 \end{cases} \quad (2.13 \text{ ข})$$

$$\phi = \begin{cases} \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}); \hat{t} \cdot \hat{\phi} \leq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}); \hat{t} \cdot \hat{\phi} > 0 \end{cases} \quad (2.13 \text{ ช})$$

สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่ขอหาได้จาก

$$D_s = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_o} \left\{ \begin{array}{l} \cot \left[\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi - \phi')] \\ + \cot \left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi - \phi')] \\ + R_s^n \cot \left[\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi + \phi')] \\ + R_s^o \cot \left[\frac{\pi - (\phi + \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi + \phi')] \end{array} \right\} \quad (2.14 \text{ ก})$$

$$D_h = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_o} \left\{ \begin{array}{l} \cot \left[\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi - \phi')] \\ + \cot \left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi - \phi')] \\ + R_h^n \cot \left[\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi + \phi')] \\ + R_h^o \cot \left[\frac{\pi - (\phi + \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi + \phi')] \end{array} \right\} \quad (2.14 \text{ ข})$$

เมื่อ $R_{s,h}^o$ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวด้านรังสีตกกระทบด้วยมุมตกกระทบเท่ากับ ϕ' สำหรับโพลาไรเซชันแบบอ่อนและแบบแข็งตามลำดับ และ $R_{s,h}^n$ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวด้านรังสีเลี้ยวเบนออกจากขอบด้วยมุมสะท้อนเท่ากับ $n\pi - \phi$ สำหรับโพลาไรเซชันแบบอ่อนและแบบแข็งตามลำดับ

$F(x) = 2j\sqrt{x} e^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-j\tau^2} d\tau$ เป็นฟังก์ชันทรานซิชัน (transition function) ที่ชดเชยความไม่ต่อเนื่องบริเวณขอบเขตเงา, L เป็นปัจจัยระยะทางกำหนดโดย $L = \frac{ss' \sin^2 \beta_0}{s + s'}$ และฟังก์ชัน $a^\pm(x) = 2 \cos^2 \left[\frac{2n\pi N^\pm - x}{2} \right]$ เมื่อ N^\pm คือเลขจำนวนเต็มที่ทำให้ฟังก์ชันต่อไปนี้มีค่าใกล้เคียงมากที่สุด

$$2\pi n N^+ - x = \pi$$

$$2\pi n N^- - x = \pi$$

กระบวนการเริ่มจากการพิจารณาแนวรังสีที่เชื่อมระหว่างสถานีฐานกับขอบของอาคารในระนาบขนานกับพื้นโลกทุกๆ อาคาร แนวรังสีที่ไม่เกิดการตัดกับสิ่งกีดขวาง ขอบอาคารที่อยู่ในเส้นทางเดินของรังสีนั้นจะถูกเก็บเป็นฐานข้อมูลขอบเหลี่ยมบนในแนวตั้งแสดงในรูปที่ 2.23

เลขที่ขอบเหลี่ยมบน
พิกัดขอบเหลี่ยมบนบนระนาบสองมิติ (x,y)
ความสูงของขอบเหลี่ยมบน

รูปที่ 2.23 ฐานข้อมูลขอบเหลี่ยมบนในแนวตั้ง

ภาพฉายของรังสีเหลี่ยมบนจากขอบเหลี่ยมบนไปยังสถานีเคลื่อนที่บนระนาบขนานกับพื้นโลกจะหาได้โดยการพิจารณาแนวรังสีที่เชื่อมจากขอบเหลี่ยมบนทุกขอบในฐานข้อมูลขอบเหลี่ยมบนไปยังสถานีเคลื่อนที่ แนวรังสีที่ไม่ตัดกับด้านของอาคารจะเป็นรังสีเหลี่ยมบนจากขอบเหลี่ยมบนไปยังสถานีเคลื่อนที่บนระนาบขนานกับพื้นโลก รังสีเหลี่ยมบนในปริภูมิสามมิติจะออกจากสถานีฐานตกกระทบสันขอบในแนวตั้งของอาคาร จุดเหลี่ยมบนบนสันขอบจะมีความสูงดังสมการ (2.12) ซึ่งทำให้สมการ (2.11) เป็นจริง หากค่าความสูงทั้งสองของจุดเหลี่ยมบนไม่อยู่ในขอบเขตของสันเหลี่ยมบนรังสีเหลี่ยมบนเนื่องจากสันขอบนั้นจะไม่เกิดขึ้น สนามไฟฟ้าของรังสีเหลี่ยมบนที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่ที่เกิดจากผลรวมของสนามไฟฟ้าเหลี่ยมบนที่มีโพลาไรเซชันแบบอ่อนและสนามไฟฟ้าเหลี่ยมบนที่มีโพลาไรเซชันแบบแข็ง ถ้าสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบสันขอบเหลี่ยมบนมีโพลาไรเซชันอยู่ในแนว \hat{e}_{tx} องค์ประกอบในแนวโพลาไรเซชันแบบอ่อน (\hat{e}_s) หาได้จาก

$$\hat{e}_s = -(\hat{e}_{rx} \cdot \hat{\beta}') \cdot \hat{\beta}$$

และองค์ประกอบในแนวโพลาริเซชันแบบแข็ง (\hat{e}_h) หาได้จาก

$$\hat{e}_h = -(\hat{e}_{rx} \cdot \hat{\phi}') \cdot \hat{\phi}$$

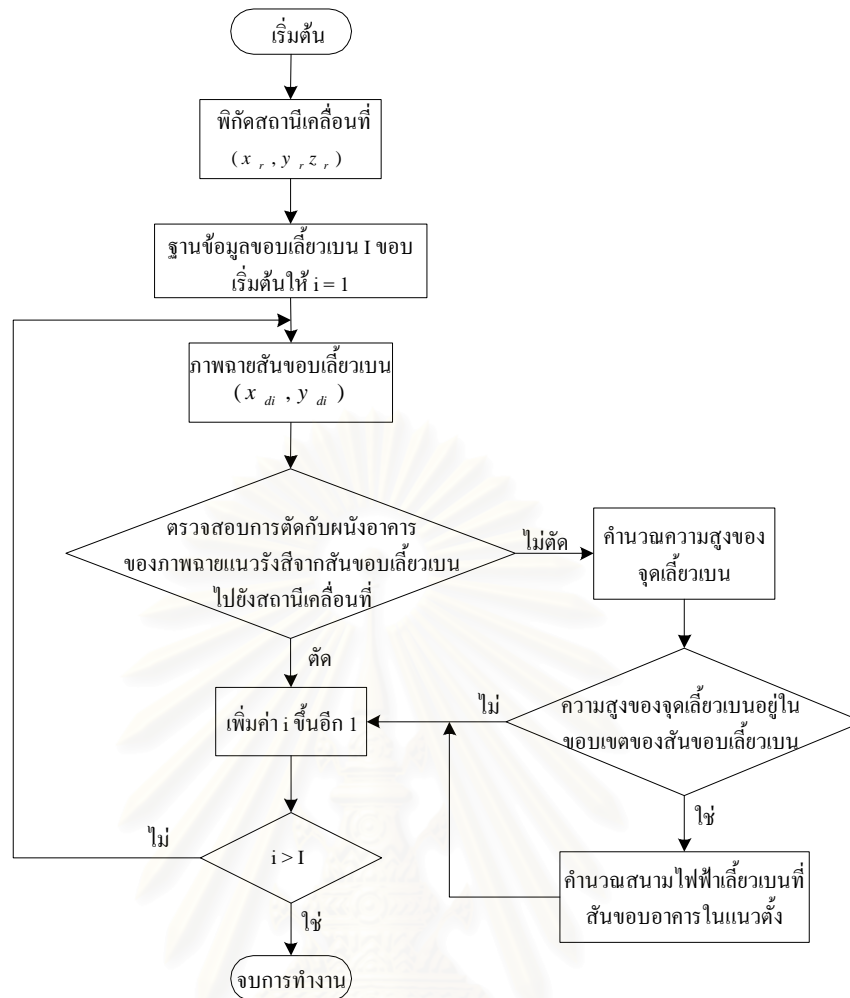
สนามไฟฟ้าเลี้ยวเบนที่เข้าสู่สถานีเคลื่อนหาได้จาก

$$E_{dv} = E_{ds} + E_{dh} \quad (2.14 ก)$$

$$E_{ds} = E^i(Q_D) \cdot D_s \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} \cdot \prod_{i=1}^M a_i \cdot e^{-j\beta s} \hat{e}_s \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.14 ข)$$

$$E_{dh} = E^i(Q_D) \cdot D_h \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} \cdot \prod_{i=1}^M a_i \cdot e^{-j\beta s} \hat{e}_h \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.14 ค)$$

E_{ds} คือสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนแบบอ่อน และ E_{dh} คือสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนแบบแข็ง เมื่อรังสีเลี้ยวเบนผ่านพุ่มไม้จำนวน M ต้น แต่ละต้นมีอัตราการลดทอน a_i , $E^i(Q_D)$ คือสนามไฟฟ้าที่มาถึงจุดเลี้ยวเบน Q_D และ \hat{e}_{rx} คือโพลาริเซชันของสายอากาศรับที่สถานีเคลื่อนที่ กระบวนการหารังสีเลี้ยวเบนที่สันขอบอาคารในแนวตั้งแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กระบวนการหารังสีเหลี่ยมที่สั้นขอบอาคารในแนวตั้ง

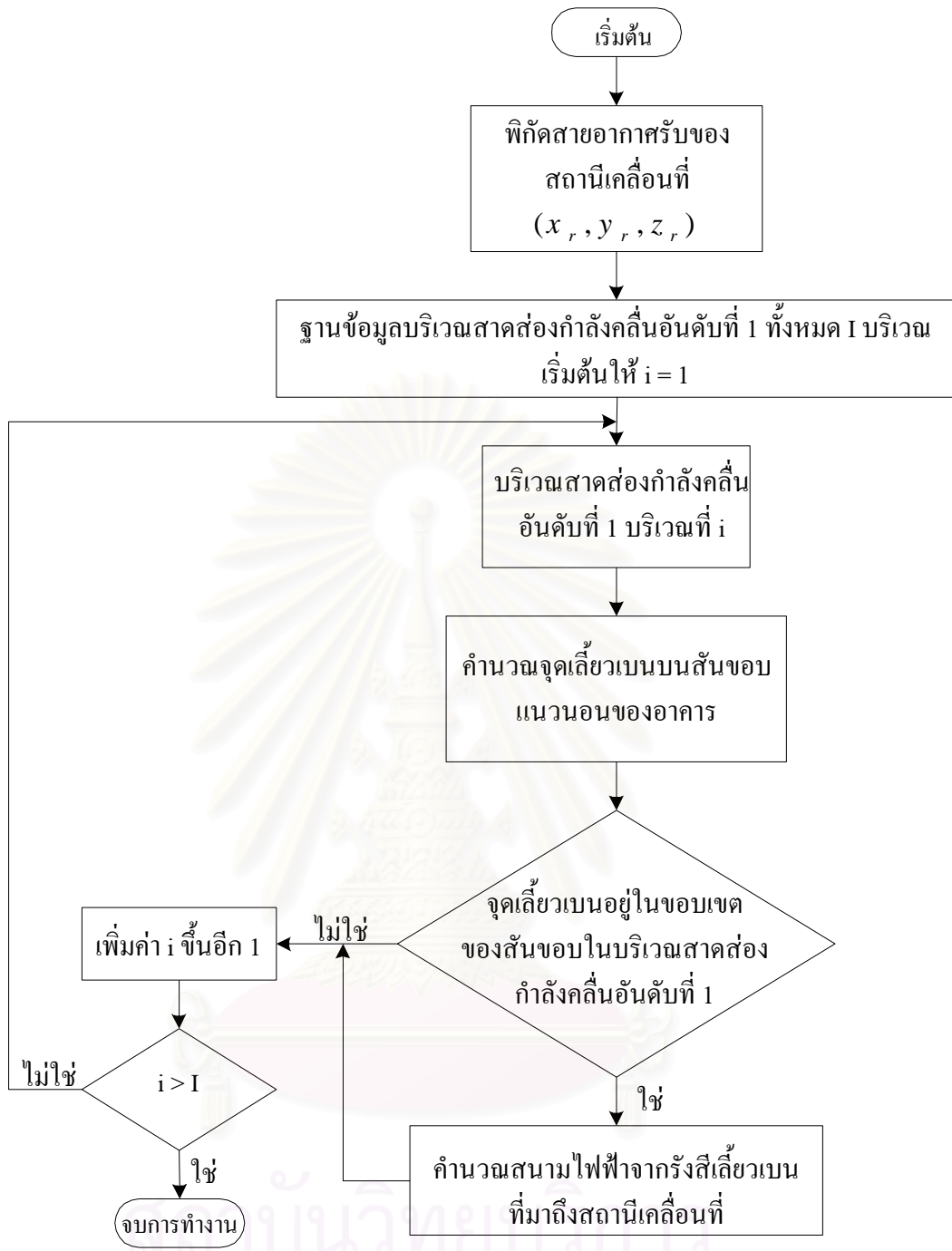
1.4 รอยทางเดินของรังสีเหลี่ยมเบนจากการเหลี่ยมเบนที่สั้นขอบอาคารในแนวนอน

รังสีเหลี่ยมเบนจากสั้นขอบอาคารในแนวนอนจะพิจารณาการเหลี่ยมเบนเพียงครั้งเดียว โดยขอบเหลี่ยมเบนจะเลือกจากขอบที่สามารถมองเห็นได้จากสายอากาศรับและสายอากาศส่ง

สั้นขอบแนวนอนของอาคาร เช่น สั้นบริเวณยอดตึก สามารถก่อให้เกิดรังสีเหลี่ยมเบนเมื่อรังสีจากสถานีฐานตกกระทบบริเวณสั้นขอบนั้นดังรูปที่ 2.25

จากรูปที่ 2.25 (ค) สามารถหาจุดเหลี่ยมเบนบนขอบได้จากกฎการเหลี่ยมเบนของทฤษฎีการเหลี่ยมเบนเชิงเอกรูปตามสมการ (2.11) โดยจุดเหลี่ยมเบนนั้นจะต้องอยู่ในขอบเขตของขอบเหลี่ยมเบน หากจุดเหลี่ยมเบนอยู่นอกขอบเขตของขอบเหลี่ยมเบน จุดเหลี่ยมเบนนั้นจะไม่มีอยู่จริง จะไม่เกิดรังสีเหลี่ยมเบนจากสั้นขอบนั้น เวกเตอร์และมุมตามระบบพิกัดของจุดเหลี่ยมเบนในรูปที่ 2.25 (ข) และ 2.25 (ค) หาได้จากสมการ (2.13)

กระบวนการหารอยทางเดินของรังสีเหลี่ยมเบนจากสั้นขอบแนวนอนของอาคาร จะเริ่มจากการหาจุดเหลี่ยมเบนบนขอบแนวนอนของอาคารที่อยู่ในบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นอันดับที่ 1 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีรังสีตรงจากสถานีฐานไปตกกระทบโดยไม่ถูกบดบังตามสมการ (2.11) จากนั้นจะตรวจสอบว่าจุดเหลี่ยมเบนที่คำนวณได้นั้นอยู่ในขอบเขตของสั้นขอบที่อยู่ในบริเวณสาตส่งกำลังคลื่น



รูปที่ 2.26 กระบวนการตามรอยทางเดินรังสีเลี้ยวเบนจากสันขอบอาคารในแนวนอน

$$E_{dh} = E_{hs} + E_{hh} \quad (2.15 \text{ ก})$$

$$E_{hs} = E^i(Q_D) \cdot D_s \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s' + s)}} \cdot \prod_{i=1}^M a_i \cdot e^{-j\beta s} \hat{e}_s \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.15 \text{ ข})$$

$$E_{hh} = E^i(Q_D) \cdot D_h \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s' + s)}} \cdot \prod_{i=1}^M a_i \cdot e^{-j\beta s} \hat{e}_h \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.15 ค)$$

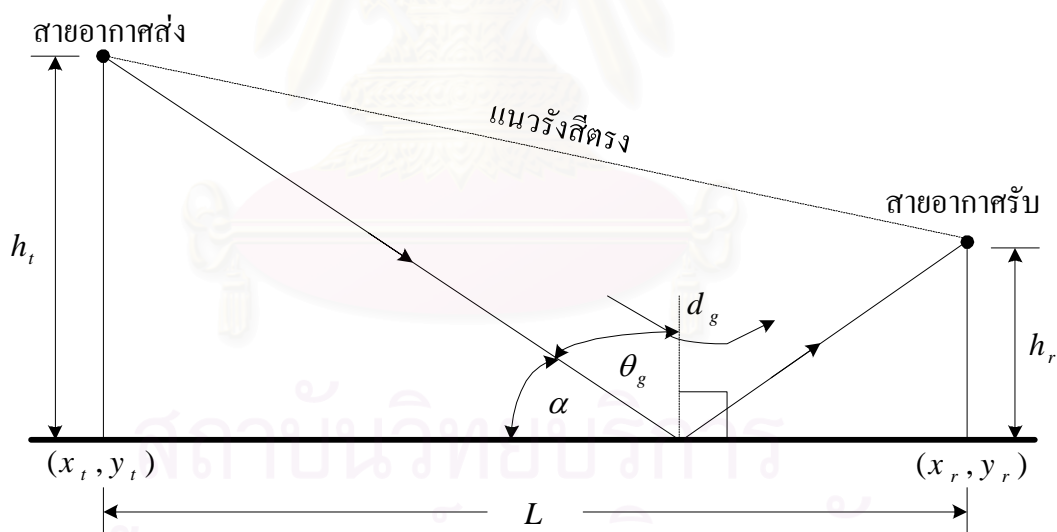
E_{ds} คือสนามไฟฟ้าที่คิดจากสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนแบบอ่อน และ E_{dh} คือสนามไฟฟ้าที่คิดจากสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนแบบแข็ง $E^i(Q_D)$ คือสนามไฟฟ้าที่มาถึงจุดเลี้ยวเบน Q_D

\hat{e}_s, \hat{e}_h เป็นองค์ประกอบในแนวโพลาริเซชันแบบอ่อนและแบบแข็งตามลำดับ และ \hat{e}_{rx} คือโพลาริเซชันของสายอากาศรับที่สถานีเคลื่อนที่ กระบวนการหารังสีเลี้ยวเบนที่สั้นขอบอาคารในแนวนอนแสดงในรูปที่ 2.26

2. ระนาบตั้ง

2.1 รอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากการสะท้อนจากพื้นดิน

รอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากการสะท้อนจากพื้นดินเป็นรังสีที่ออกจากสถานีฐานแล้วสะท้อนที่พื้นดินหนึ่งครั้งก่อนพุ่งเข้าสู่สายอากาศรับที่สถานีเคลื่อนที่ ภาพฉายรังสีสะท้อนจากพื้นดินจะอยู่ในแนวเดียวกับภาพฉายของรังสีตรง การตามรอยรังสีสะท้อนจากพื้นดินจะพิจารณาจุดตกกระทบของรังสีบนพื้นดินดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 รังสีสะท้อนจากพื้นดิน

ระยะ d_g คือ ระยะทางที่รังสีเดินทางจากสายอากาศส่งของสถานีฐานแล้วสะท้อนพื้นดินพุ่งเข้าสู่สายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่ ระยะทาง d_g และมุมตกกระทบที่พื้นดิน (θ_g) หาได้จาก

$$d_g = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + L^2} \quad \text{และ} \quad \theta_g = 90 - \alpha = 90 - \tan^{-1}\left(\frac{h_t + h_r}{L}\right)$$

เนื่องจากสายอากาศส่งของสถานีฐานมีโพลาริเซชันอยู่ในแนวตั้ง รังสีที่แผ่ออกจากสายอากาศส่งจึงมีโพลาริเซชันอยู่ในระนาบตั้ง สัมประสิทธิ์การสะท้อนของรังสีสะท้อนจากพื้นดินจึงเป็นสัมประสิทธิ์

การสะท้อนแบบแข็งด้วยมุมตกกระทบ θ_g ดังสมการ(2.8) โดยค่า $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_2 = \varepsilon_{rg} + j60\sigma_g \lambda$ โดย $\varepsilon_{rg} = 7 \text{ F/m}$, $\sigma_g = 3 \text{ S}$ [3] สนามไฟฟ้าจากรังสีสะท้อนจากพื้นดินที่มาถึงสายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่ (E_{rg}) โดยสมมุติรังสีเคลื่อนที่ผ่านพุ่มไม้ M ต้น มีอัตราการลดทอนต้นละ a_i คำนวณได้จาก

$$E_{rg} = \frac{\sqrt{60P_t G_t f_t(\theta, \phi)}}{d_g} R_h \cdot \prod_{i=1}^M a_i \cdot e^{-j\beta d_g} \hat{e}_{tx} \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.16)$$

โดย P_t คือ กำลังคลื่นที่ส่งออกจากสายอากาศส่งของสถานีฐาน

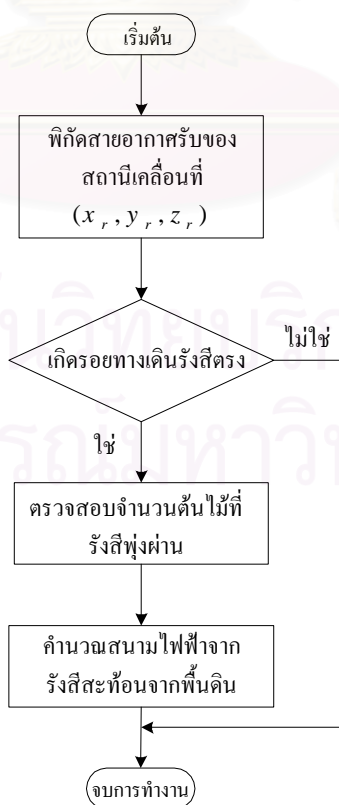
G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

$f_t(\theta, \phi)$ คือ แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศส่ง

\hat{e}_{tx} คือ โพลาริเซชันของคลื่นที่แผ่ออกจากสถานีฐาน

\hat{e}_{rx} คือ โพลาริเซชันของสายอากาศรับที่สถานีเคลื่อนที่

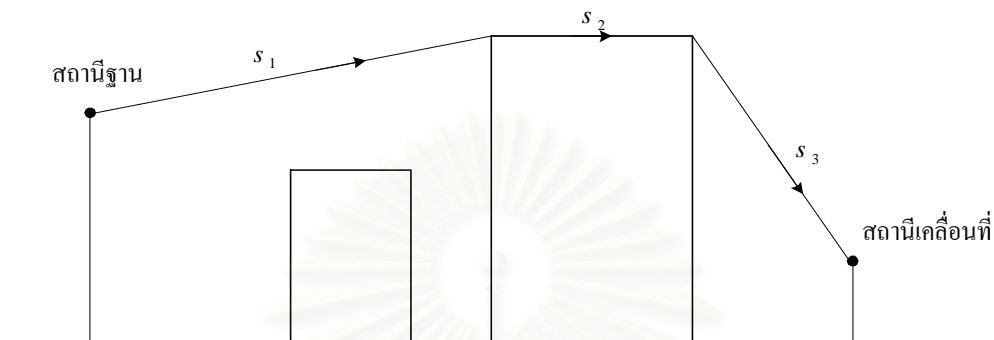
กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากพื้นดินจะเป็นกระบวนการต่อเนื่องจากการตามรอยทางเดินของรังสีตรง ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีสะท้อนจากพื้นโลก

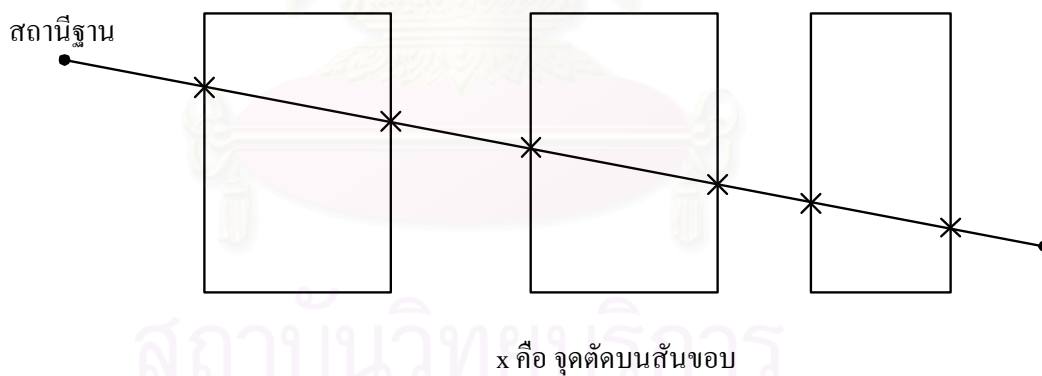
2.2 รอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากการเลี้ยวเบนจากยอดคดึก

รอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากการเลี้ยวเบนจากยอดคดึกจะพิจารณาการเลี้ยวเบนเพียงสองครั้ง ดังรูปที่ 2.29 เนื่องจากกำลังคลื่นจะลดลงจนไม่มีนัยสำคัญเมื่อเกิดการเลี้ยวเบนมากกว่าสองครั้ง [14]



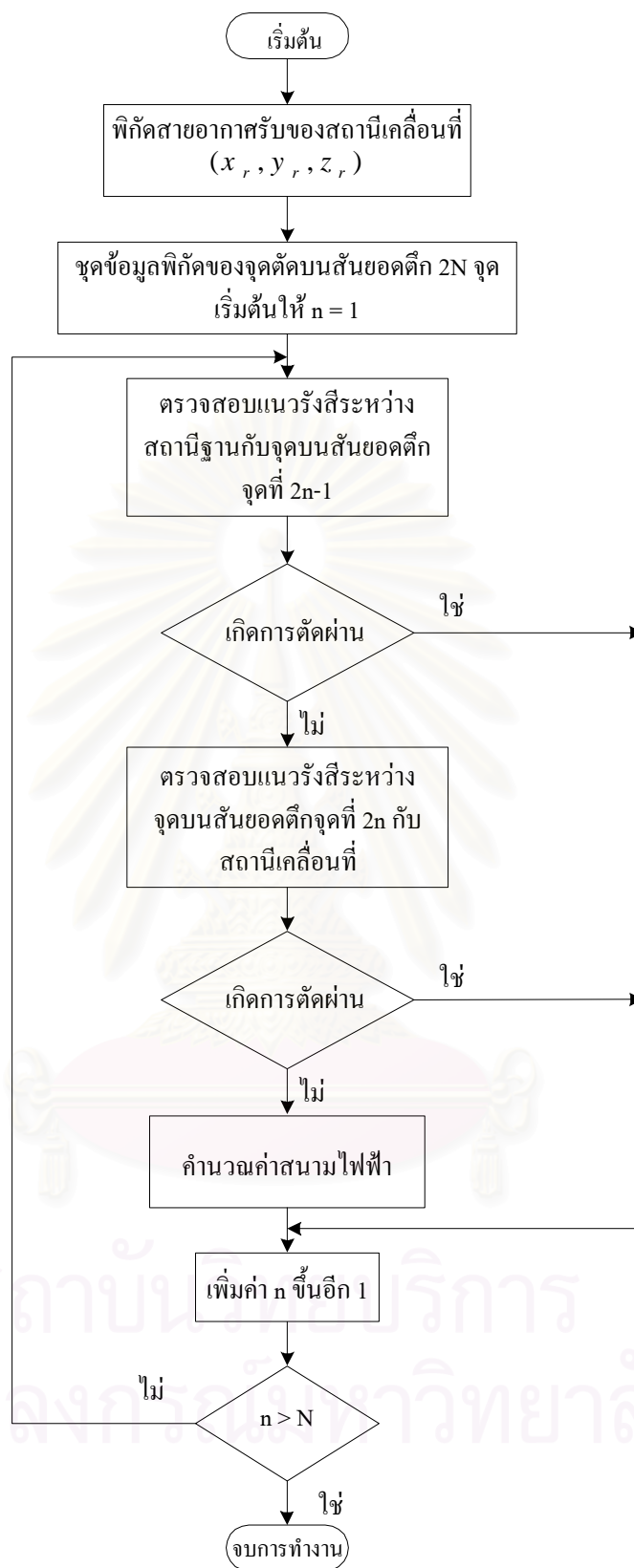
รูปที่ 2.29 รังสีเลี้ยวเบนจากยอดคดึก

การพิจารณารอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากยอดคดึก เริ่มจากการตรวจสอบจุดตัดของภาพฉายแนวรังสีที่เชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่บนระนาบขนานกับพื้นโลก ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 จุดตัดของแนวรังสีและแนวเส้นขอบบนระนาบขนานกับพื้นโลก

การตามรอยทางเดินของรังสีจะเริ่มต้นจากการตรวจสอบการตัดผ่านผนังกีดขวางในปริภูมิสามมิติของแนวรังสีที่เชื่อมจากสถานีฐานไปยังจุดบนสันยอดคดึกตำแหน่งที่ $2n - 1 (n = 1, 2, \dots, N)$ เมื่อ N คือจำนวนคดึกที่รังสีจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่ตัดผ่าน หากแนวรังสีมีการตัดผ่านผนังกีดขวางอื่นๆ ในฐานข้อมูลสิ่งปลูกสร้าง เส้นทางรังสีเลี้ยวเบนจากสถานีฐานไปยังยอดคดึกที่ n นั้น



รูปที่ 2.31 กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากขดตึก

จะไม่เกิดขึ้น แต่หากไม่เกิดการตัดผ่านผนังกีดขวางจะตรวจสอบการตัดผ่านผนังกีดขวางในปริภูมิสามมิติของแนวรังสีที่เชื่อมจากจุดตัดบนสันยอดตึกตำแหน่งที่ $2n$ กับสถานีเคลื่อนที่หากไม่เกิดการตัดผ่านผนังกีดขวาง แนวรังสีที่เชื่อมจากสถานีฐาน จุดตัดบนยอดตึกตำแหน่งที่ $2n - 1$ และ $2n$ และสถานีเคลื่อนที่จะเป็นรอยทางเดินของสนามเลี้ยวเบนจากยอดตึก กระบวนการนี้จะเริ่มต้นที่ค่า $n = 1$ และทำซ้ำจนค่า $n = N$ กระบวนการตามรอยทางเดินของรังสีเลี้ยวเบนจากยอดตึกแสดงดังรูปที่ 2.31

เนื่องจากการเลี้ยวเบนบนสันยอดตึกจะทำให้ไม่มีรังสีเลี้ยวเบนที่มีโพลาไรเซชันแบบอ่อนเหลืออยู่ [15] รังสีเลี้ยวเบนบนสันยอดตึกจึงปรากฏต่อองค์ประกอบในแนวโพลาไรเซชันแบบแข็งเท่านั้น เมื่อกำหนดให้ s_1 , s_2 และ s_3 เป็นระยะทางที่รังสีเดินทางจากสถานีฐานไปยังจุดเลี้ยวเบนที่ 1 (Q_1), จุดเลี้ยวเบนที่ 1 ไปยังจุดเลี้ยวเบนที่ 2 (Q_2) และ จากจุดเลี้ยวเบนที่ 2 ไปยังสถานีเคลื่อนที่ตามลำดับ และสมมุติรังสีเดินทางผ่านต้นไม้ M ต้นแต่ละต้นมีอัตราการลดทอน a_i สนามไฟฟ้าเนื่องจากการเลี้ยวเบนที่สันยอดตึกจะคำนวณได้จาก

$$E_{ds} = \frac{\sqrt{60P_t G_t f_t(\theta, \phi)}}{s_1} D_h(Q_1) \cdot D_h(Q_2) \cdot \sqrt{\frac{s_1}{s_2(s_1 + s_2)}} \sqrt{\frac{s_2}{s_3(s_2 + s_3)}} \cdot \prod_{i=1}^M a_i \cdot e^{-j\beta s} \hat{e}_h \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.17)$$

การคำนวณกำลังคลื่น

กำลังคลื่นรวมของรังสีที่เข้าสู่สายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่คำนวณได้จากสนามไฟฟ้ารวมดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 สนามไฟฟ้ารวมที่สายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่รับได้

สนามไฟฟ้าที่สายอากาศรับของสถานีเคลื่อนเกิดจากผลรวมของสัญญาณพหุวิถี (multipath rays) ที่มาถึงมีค่าเป็น

$$E_{total} = E_m e^{-j\phi} = \sum (E_i e^{-j\beta d_i}) \quad (2.18)$$

ให้แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้ารวมมีค่าเป็น E_m กำลังคลื่นที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่ได้จากสูตรการส่งผ่านพลังงานของฟรีส (Friis formula) ดังสมการที่ (2.19)

$$\begin{aligned} P_r &= S \cdot A_{er} \\ &= \frac{1}{2} \frac{E_m^2}{\eta_o} \cdot \left(G_r \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

เมื่อ A_{er} เป็นขนาดช่องเปิดประสิทธิผลของสายอากาศรับซึ่งโดยทั่วไปจะเท่ากับ $G_r \cdot \lambda^2 / (4\pi)$ เมื่อ G_r คืออัตราขยายของสายอากาศรับ

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้กรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป การตามรอยทางเดินของรังสีใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนร่วมกับฐานข้อมูลบริเวณสาดส่องกำลังคลื่นเพื่อตามรอยทางเดินของรังสีบนระนาบขนานกับพื้นโลกและระนาบโค้ง คลื่นที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศส่งของสถานีฐานจะมีโพลาริเซชันตามโพลาริเซชันของสายอากาศส่งและทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นซึ่งเมื่อคลื่นแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมและเกิดกลไกการแพร่กระจายคลื่นแบบต่างๆ แล้วเข้าสู่สายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่ การคำนวณค่าของสนามไฟฟ้าของคลื่นในแต่ละกลไกการแพร่กระจายจะแยกพิจารณาตามแนวโพลาริเซชันของคลื่นและเมื่อคลื่นพุ่งเข้าสู่สายอากาศรับสนามไฟฟ้าที่สายอากาศรับรับได้จะขึ้นกับการเข้ากันได้ของโพลาริเซชันของคลื่นและโพลาริเซชันของสายอากาศรับ กำลังคลื่นรวมที่สายอากาศรับรับได้จะเป็นผลรวมของคลื่นพหุวิถีที่มีโพลาริเซชันแนวเดียวกันกับสายอากาศรับ

ในบทต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของการทดลองและการจำลองการแพร่กระจายคลื่น โดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งแบ่งเป็นการจำลองการแพร่กระจายคลื่นในสองมิติและสามมิติ ข้อมูลการทดลองได้มาจากการประมาณและข้อมูลจากผู้ผลิต ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองจะถูกชดเชยโดยฟังก์ชันชดเชยซึ่งสร้างจากผลการวัดทดสอบในบริเวณแพร่กระจายคลื่นนั้นๆ

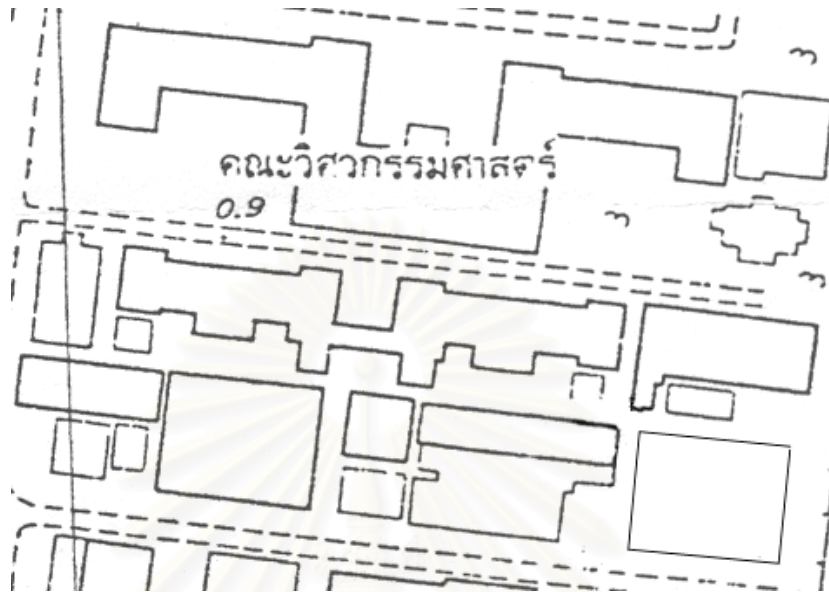
บทที่ 3

ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

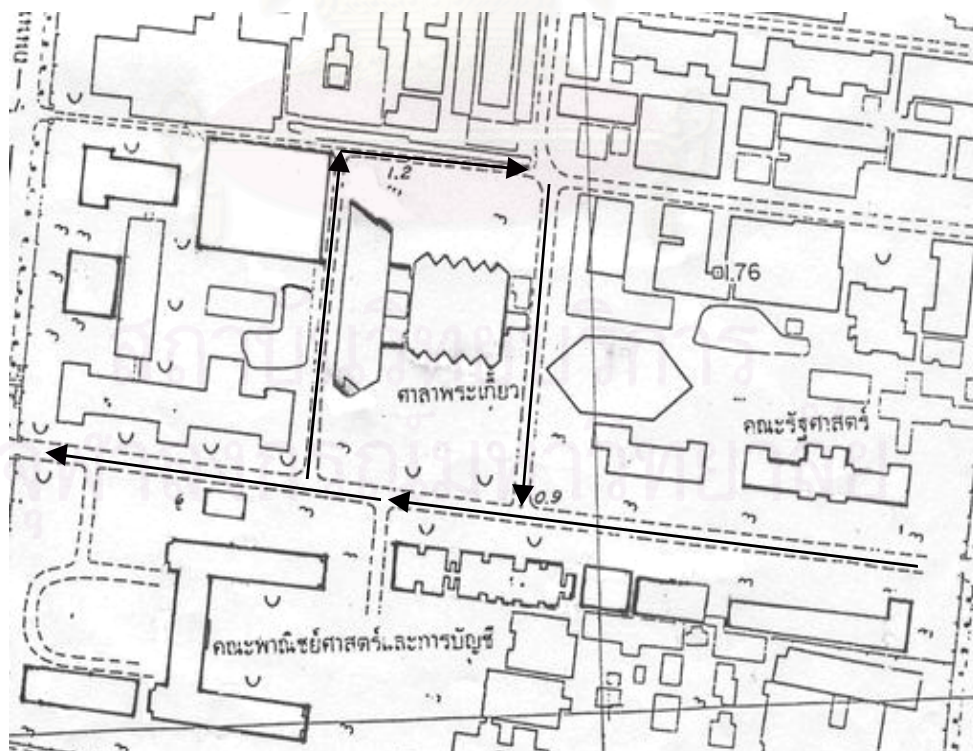
ในบทนี้จะแสดงผลการคำนวณกำลังคลื่น โดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ตำแหน่งต่างๆ ในบริเวณทดสอบเปรียบเทียบกับผลการวัดการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจริงและใช้องค์ประกอบชดเชย ที่ได้จากการวัดทดสอบปรับเทียบผลการคำนวณ ค่าปัจจัยเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าที่กำหนดโดยลักษณะสิ่งแวดล้อมและค่าปัจจัยต่างๆ ในการแพร่กระจายคลื่นวิทยุของสถานีฐานซึ่งจะได้กล่าวถึงค่าปัจจัยเหล่านี้และลักษณะการเก็บข้อมูลผลการวัดในบริเวณทดสอบต่างๆ จากนั้นจะแสดงให้เห็นผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการวัด

การทดลองและการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่น ที่จะนำเสนอต่อไปนี้เป็นทดลองและจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสองมิติ (เมื่อความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีค่าเท่ากัน) และในปริภูมิสามมิติ (เมื่อความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีค่าไม่เท่ากัน) แผนที่บริเวณทดสอบที่ใช้เป็นภาพขยายเพื่อให้เห็นรายละเอียดได้ชัดเจนจากแผนที่ในระบบพิกัด UTM มาตรฐาน 1:4000 ที่จัดทำโดยความร่วมมือระหว่างรัฐบาลไทยกับรัฐบาลญี่ปุ่น (JICA) เมื่อปี พ.ศ. 2531 บริเวณที่ใช้เป็นบริเวณทดสอบได้แก่ บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ บริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริเวณถนนอังรีดูนังต์ ดังรูปที่ 3.1 ถึงรูปที่ 3.3 ผลการวัดที่ใช้เพื่อเปรียบเทียบได้จากการตั้งสถานีฐาน และออกอากาศแพร่กระจายคลื่นวิทยุในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์โดยสายอากาศรับ และชุดอุปกรณ์รับคลื่นวิทยุจะติดตั้งอยู่บนรถเข็นขนาดเล็กและเคลื่อนไปตามถนนในบริเวณทดสอบเพื่อวัด และบันทึกค่ากำลังคลื่นในแต่ละตำแหน่งที่สถานีเคลื่อนที่หยุดอยู่ที่พิกัดของสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ได้จากการวัดเทียบกับอาคาร แล้วนำไปอ้างอิงกับแผนที่ที่มีอยู่ ส่วนในบริเวณศาลาพระแก้วและบริเวณถนนอังรีดูนังต์ผลการวัดที่ใช้เปรียบเทียบได้จากการใช้รถทดสอบสัญญาณของบริษัท แอดวานซ์อินโฟร์เซอร์วิส จำกัด (มหาชน) ซึ่งให้ความอนุเคราะห์ในการจัดเก็บข้อมูลความแรงสัญญาณของการแพร่กระจายคลื่นด้วยสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM 900 รถทดสอบจะติดตั้งสายอากาศรับสัญญาณและอุปกรณ์บอกตำแหน่ง GPS โดยมีอุปกรณ์ต่อพ่วงที่สามารถบันทึกค่าความแรงสัญญาณและตำแหน่งขณะนั้นๆลงในคอมพิวเตอร์ การทดลองโดยใช้รถทดสอบจะให้รถวิ่งตามแนวถนนและบันทึกค่าความแรงสัญญาณพร้อมทั้งตำแหน่งของจุดทดสอบที่บันทึกค่ากำลังสัญญาณด้วย จากนั้นจะนำจุดพิกัดของสถานีเคลื่อนที่ที่บันทึกไว้มาประกอบกับค่าปัจจัยอื่นๆ เพื่อคำนวณระดับความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งเหล่านี้ และนำค่าที่ได้จากผลการคำนวณ และผลการวัดมาสร้างกราฟ

เปรียบเทียบแบบจุดต่อจุด รูปที่ 3.4 แสดงสถานีฐานของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ระบบ GSM 900 ของบริษัท แอดวานซ์อินโฟร์เซอร์วิส จำกัด (มหาชน) บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและถนนอังรีดูนังต์



รูปที่ 3.1 บริเวณทดสอบภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ภาพขยายอ้างอิงจากแผนที่มาตราส่วน 1:4000)



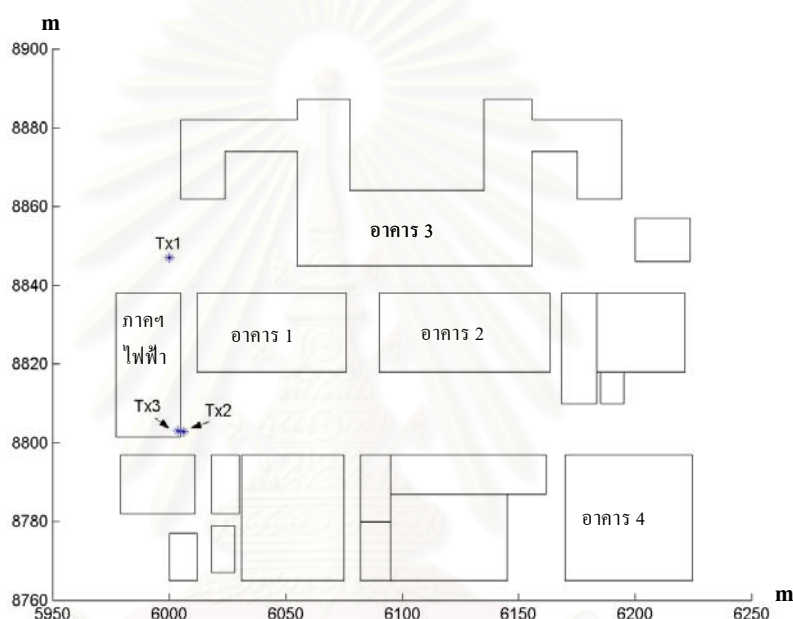
รูปที่ 3.2 บริเวณทดสอบรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และแนวทดสอบ (ภาพขยายอ้างอิงจากแผนที่มาตราส่วน 1:4000)



รูปที่ 3.3 บริเวณทดสอบบนถนนอังรีดูนังต์ และแนวทดสอบ
(ภาพขยายอ้างอิงจากแผนที่มาตราส่วน 1:4000)

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการติดตั้งสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ในการวัดทดสอบสัญญาณ
ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองครั้งที่	สถานีฐาน	ความถี่ (MHz)	มุมก้ม (Degree)	กำลังส่ง (dBm)	ความสูงสถานีฐาน (m)	ความสูงสถานี เคลื่อนที่ (m)	ระยะสุ่ม กำลังสัญญาณ(m)
1	Tx1	440	0	0	1.47	1.47	1
2	Tx1	1000	0	0	1.53	1.53	1
3	Tx2	1000	0	0	1.76	1.76	2
4	Tx3	1000	0	10	27.68	1.455	5



รูปที่ 3.5 ที่ตั้งสถานีฐานที่ใช้ทดลองแพร่กระจายคลื่นในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์

สำหรับการวัดทดสอบสัญญาณบริเวณรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และถนนอังรีดูนังต์จะใช้สถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ย่านความถี่ 900 MHz แต่ละสถานีแบ่งออกเป็นเซกเตอร์ย่อยตามทิศทางกำหนดแนวเล็งพู่หลักของสายอากาศโดยมีชื่อย่อภาษาอังกฤษกำกับแต่ละสถานีและมีตัวเลข 1 ถึง 3 กำกับแต่ละเซกเตอร์ย่อยดังแสดงในรูปที่ 3.4 คำปัจจัยการใช้งานและตำแหน่งพิกัดของสถานีฐานแสดงในตารางที่ 3.2 การบันทึกค่ากำลังสัญญาณทำเฉพาะบางสถานีและบางเซกเตอร์ที่ครอบคลุมเส้นทางการวัดสัญญาณเพื่อให้ได้ค่ากำลังสัญญาณที่มีความแรงมากที่สุด

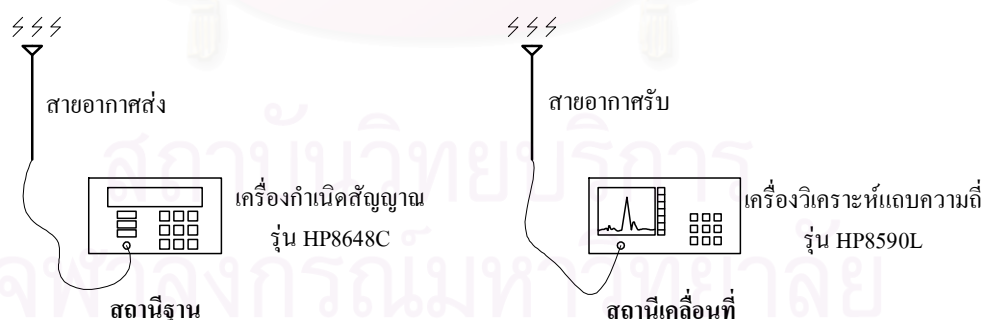
สถานีฐานที่พิจารณาบริเวณศาลาพระเกี้ยว ได้แก่ สถานี CHU1 เซกเตอร์ 1 (CHU1-1) และสถานีฐานที่พิจารณาบริเวณถนนอังรีดูนังต์ ได้แก่ สถานี HRDN เซกเตอร์ 1 (HRDN-1) สำหรับแผนที่บริเวณทดสอบและเส้นทางทดสอบดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของสถานีฐานในบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และถนนอังรีดูนังต์

ชื่อสถานี	ตำแหน่ง ²		เซกเตอร์	ความถี่ MHZ	แนวตั้ง Degree	มุมก้ม Degree	กำลังส่ง dBm	ความสูง m	สายอากาศ
	E	N							
CHU1 Chulalongkorn 1	666010.05	1518568.10	1	952.4	50	14	46.5	37	Allgon 7143.14
			2	954.6	180	2	46.5	25	Allgon 7143.14
			3	955.8	290	10	46.5	37	Allgon 7143.14
HRDN Henry Dunant Road	666285.02	1518970.08	1	943.6	210	0	41	6	Kathrein7306.76
			2	943.6	340	0	41	6	Kathrein7306.76

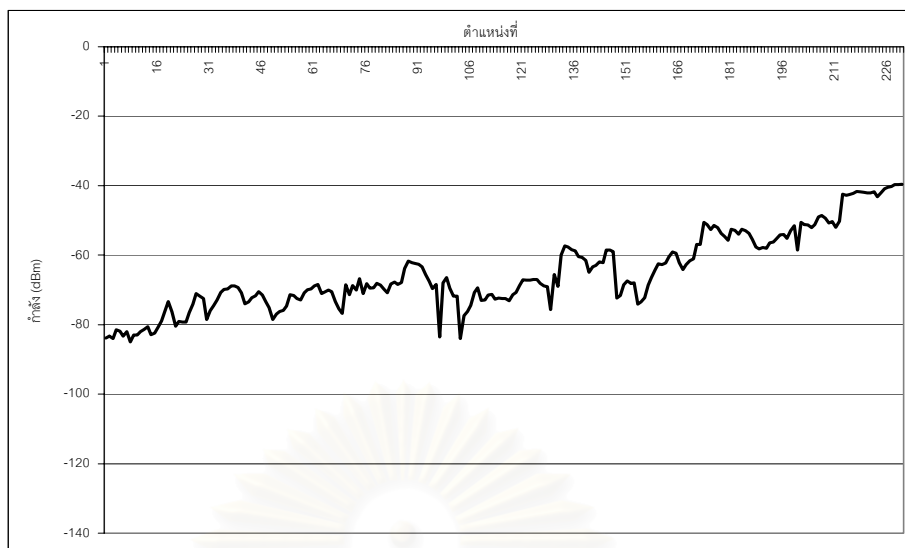
การวัดและผลการวัด

การทดสอบสัญญาณในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สายอากาศรับและอุปกรณ์วัดระดับความแรงของสัญญาณของสถานีเคลื่อนที่จะถูกติดตั้งอยู่บนรถเข็น การวัดค่ากำลังสัญญาณกระทำโดยการเคลื่อนที่สถานีเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการวัดตำแหน่งต่างๆ ในกรณี ENG1 และ ENG2 บันทึกค่ากำลังสัญญาณทุกๆระยะ 1 เมตร ในกรณี ENG3 บันทึกค่ากำลังสัญญาณทุกๆระยะ 2 เมตร และในกรณี ENG4 บันทึกค่ากำลังสัญญาณทุกๆระยะ 5 เมตร ตำแหน่งพิกัดของจุดทดสอบได้จากการวัดเทียบกับอาคารแล้วนำไปอ้างอิงในแผนที่ ค่ากำลังสัญญาณที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่วัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (Spectrum Analyzer รุ่น HP8590L) โดยใช้วิธีกวาดย่านความถี่ที่ครอบคลุมความถี่ที่ใช้ทดสอบแล้วอ่านค่ากำลังสัญญาณที่ความถี่นั้น แล้วบันทึกค่ากำลังสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ แผนภาพอุปกรณ์ของสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 3.6 และตัวอย่างผลการวัดสัญญาณความถี่ 440 MHz กรณี ENG 1 แสดงดังรูปที่ 3.7



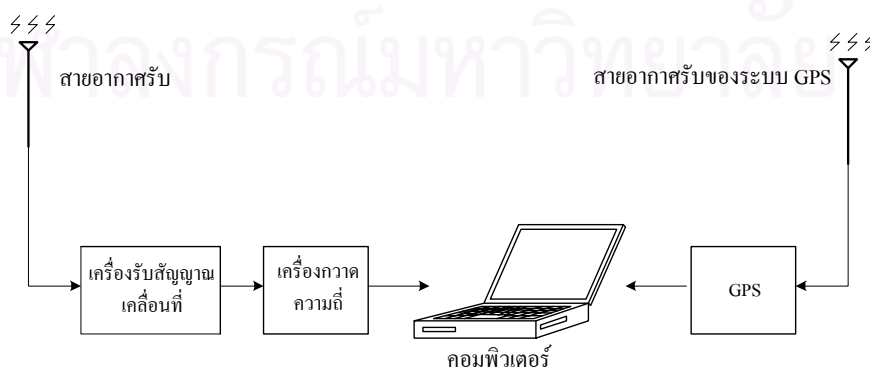
รูปที่ 3.6 แผนภาพอุปกรณ์ของสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่
ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

² ตำแหน่งของสถานีฐานแสดงในพิกัดระบบ UTM แสดงโดยแกนตะวันออก-เหนือ หรือ E-N ตัวอย่างเช่นพิกัด E 100 N 200 หมายถึงพิกัดที่อยู่ทางตะวันออก 100 เมตร เหนือ 200 เมตร เทียบกับจุดอ้างอิง E 0 N 0 ที่เส้นละติจูด 0 องศา ลองจิจูด 99 องศา สำหรับประเทศไทย [1]

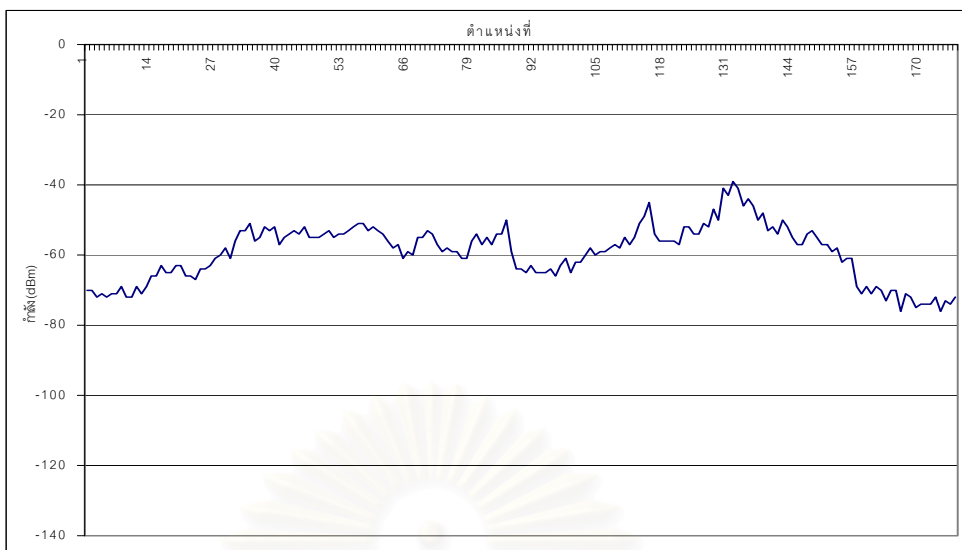


รูปที่ 3.7 ผลการวัดกำลังสัญญาณกรณี ENG1 บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.11(ก))

การทดสอบสัญญาณในบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และถนนอังรีดูนังต์ ใช้รถทดสอบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับกำลังสัญญาณ โดยมีสายอากาศรับติดตั้งอยู่บนหลังคาของรถทดสอบเป็นสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว (Omni-directional) อัตรายก 2 dBi ความสูงของสายอากาศรับจากพื้นเท่ากับ 2 เมตร และใช้คอมพิวเตอร์ต่อพ่วงเพื่อบันทึกค่าความแรงสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ ที่สนใจ และบันทึกตำแหน่งของจุดทดสอบสัญญาณด้วยการต่อพ่วงกับอุปกรณ์ GPS ในรถทดสอบ อุปกรณ์วัดระดับความแรงสัญญาณสามารถวัดระดับความแรงสัญญาณของสัญญาณได้หลายความถี่พร้อมกันโดยกวาดค่าวัดไปตามความถี่แต่ละความถี่ที่กำหนด การวัดระดับกำลังสัญญาณใช้การสุ่มค่าที่ทุกๆ ระยะ 5 เมตร จากนั้นจะนำตำแหน่งจุดทดสอบที่ได้ไปใช้ในการคำนวณด้วยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเพื่อปรับเทียบแบบจำลองและเปรียบเทียบผลการวัดในแต่ละกรณี แผนภูมิอุปกรณ์ของสถานีเคลื่อนที่ในรถทดสอบ และตัวอย่างผลการวัดสัญญาณความถี่ 952.4 MHz บริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แผนภูมิอุปกรณ์ของสถานีเคลื่อนที่ในรถทดสอบ



รูปที่ 3.9 ผลการวัดกำลังสัญญาณความถี่ 952.4 MHz บริเวณศาลาพระเกี้ยว
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.16(ก))

ผลการวัดและผลการคำนวณ

ผลคำนวณการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุได้มาจากการคำนวณกำลังคลื่นที่รับได้เมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับจุดทดสอบ ผลการคำนวณนี้จะนำมาเปรียบเทียบโดยการเพิ่มองค์ประกอบชดเชยการลดทอนสำหรับสิ่งกีดขวางอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวไว้ใบบทที่ 2 และความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวสิ่งกีดขวางที่ละลายไป การเปรียบเทียบผลการคำนวณก่อนชดเชยด้วยองค์ประกอบชดเชยกับผลการวัด แสดงในรูปที่ 3.10

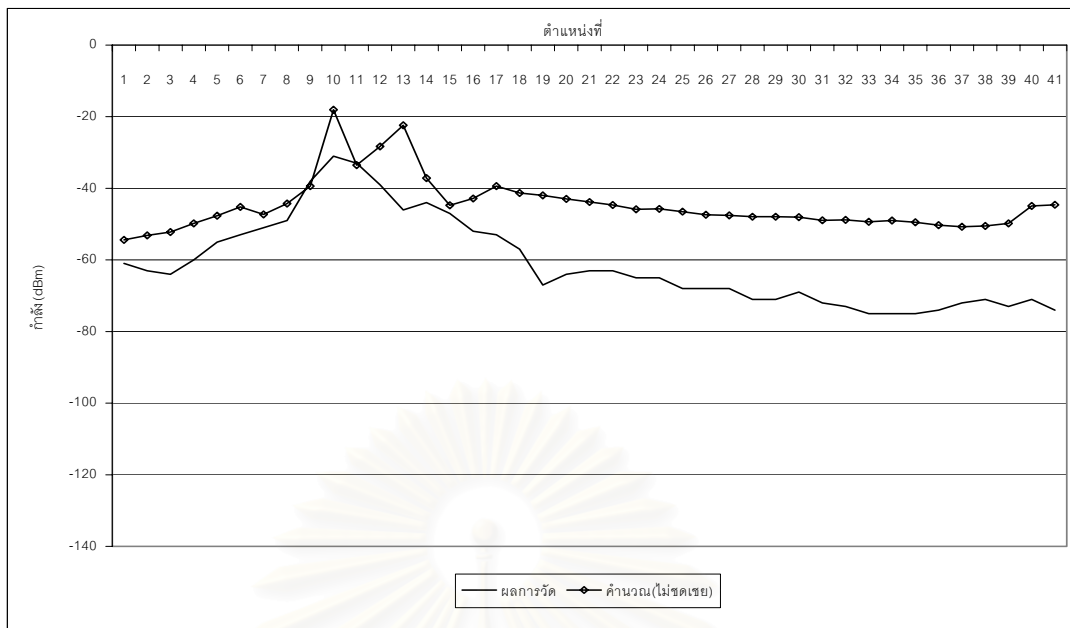
องค์ประกอบชดเชยเป็นค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดสอบในบริเวณแพร่กระจายคลื่นต่างๆ ซึ่งองค์ประกอบชดเชยที่สร้างขึ้นนี้เป็นองค์ประกอบชดเชยที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ องค์ประกอบชดเชย (L) ในงานวิจัยนี้แสดงดังสมการที่ (4.1)

$$L = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{e}_i}{N} \quad (4.1)$$

เมื่อ \bar{e}_i คือ ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลการคำนวณกับผลการวัดในบริเวณที่ทำการวัดทดสอบ

กำลังสัญญาณ N บริเวณ

กำลังรับที่คำนวณได้เมื่อนำไปรวมกับผลขององค์ประกอบชดเชยจะได้กำลังรับสุทธิที่ชดเชยแล้วดังสมการที่ (4.2)



รูปที่ 3.10 ผลการคำนวณก่อนชดเชยด้วยองค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลการวัด บริเวณถนนอังรีดูนังต์ (อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.16(ก))

$$P_{total} = P_{calculated} + L \tag{4.2}$$

โดย P_{total} คือ กำลังรับสุทธิที่ชดเชยแล้ว

$P_{calculated}$ คือ กำลังรับที่คำนวณได้และยังไม่ได้ชดเชย

L คือ องค์ประกอบชดเชย

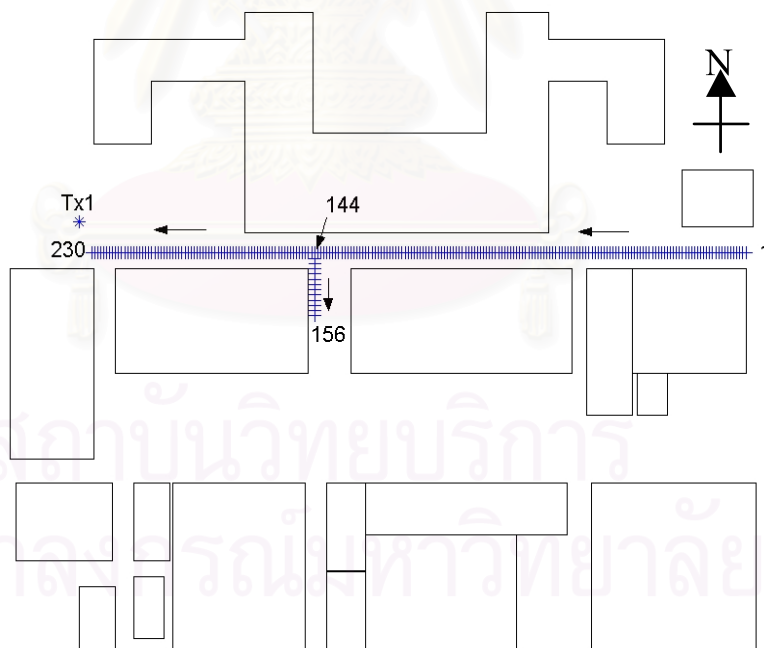
การเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ชดเชยแล้วกับผลการวัดจะแสดงในลักษณะจุดต่อจุดและแสดงเส้นแนวโน้มที่ได้จากค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ในบริเวณทดสอบที่มีจุดทดสอบอยู่ในแนวเดียวกันเพื่อความสะดวกในการพิจารณา แต่หากจุดทดสอบมีการกระจายตัวแบบไม่อยู่ในแนวเดียวกันอาจจะไม่สามารถใช้วิธีค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ได้ [1] จะพบว่าผลการคำนวณจะมีการแกว่งของสัญญาณมากกว่าผลการวัดเป็นเพราะความไวของเครื่องรับสัญญาณมีไม่มากจึงทำให้สัญญาณที่วัดได้มีการแกว่งตัวไม่มาก นอกจากนี้จะแสดงผลการคำนวณเชิงสถิติเพื่อเป็นดัชนีที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ความแม่นยำของแบบจำลอง ค่าทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของผลการคำนวณเทียบกับผลการวัด ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าผิดพลาดของผลการคำนวณเทียบกับผลการวัดและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

การเปรียบเทียบผลการวัดและผลการคำนวณในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ บริเวณศาลาพระ
เกี้ยวและบริเวณถนนอังรีดูนังต์ โดยการวิเคราะห์จากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณและ
ใช้ค่าทางสถิติของผลการเปรียบเทียบมาอธิบาย แสดงดังรูปที่ 3.11 ถึงรูปที่ 3.19

บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

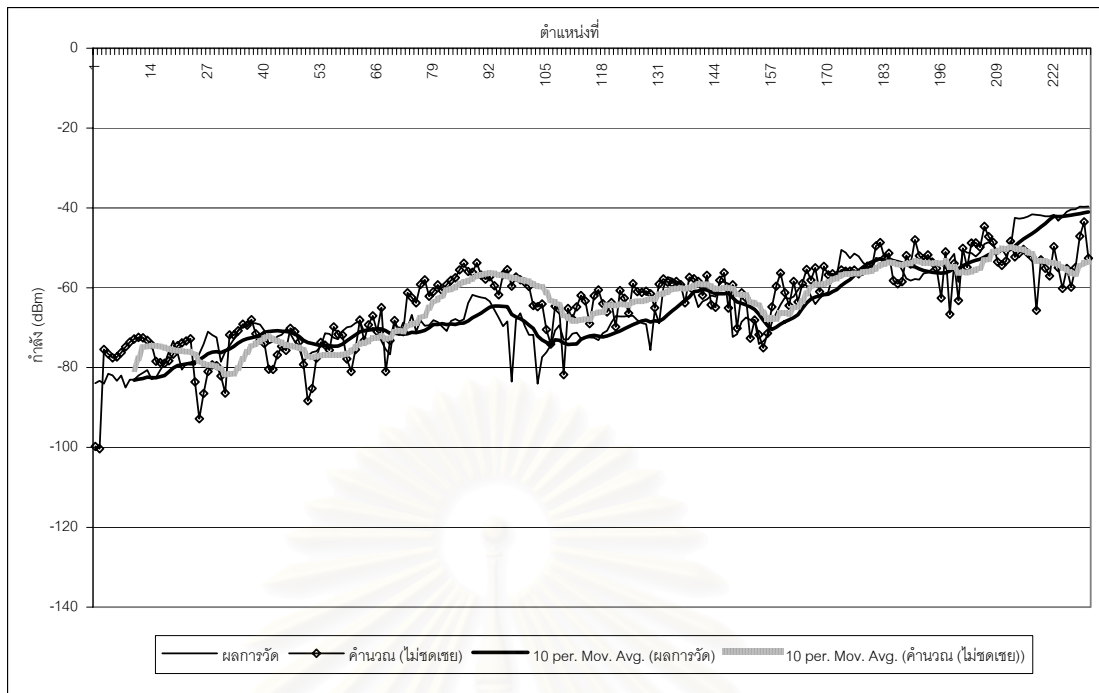
ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้องค์ประกอบซดเซยเทียบกับผลการวัด
ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อตั้งสถานีฐานในกรณีต่างๆ แสดงดัง
รูปที่ 3.11 ถึงรูปที่ 3.14 สามารถพิจารณาลักษณะระดับสัญญาณในแต่ละกรณีดังนี้

กรณี ENG1 (รูปที่ 3.11 (ก)) กรณีนี้สถานีฐานตั้งอยู่ที่หน้าอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและหัน
แนวเล็งไปทางทิศตะวันออกในรูปที่ 3.11 (ก) เส้นทางการวัดสัญญาณเป็นแนวเส้นตรงโดยเริ่มจาก
ตำแหน่งที่สถานีเคลื่อนที่อยู่ห่างไกลจากสถานีฐานแล้วค่อยๆเคลื่อนที่เข้าไปใกล้สถานีฐาน ลักษณะ
สัญญาณจึงมีค่าต่ำในช่วงแรกแล้วค่อยๆ สูงขึ้นเมื่อสถานีเคลื่อนที่เคลื่อนเข้าไปใกล้สถานีฐาน แนวโน้ม
ของสัญญาณจากการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นกับผลการวัดจึงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG1

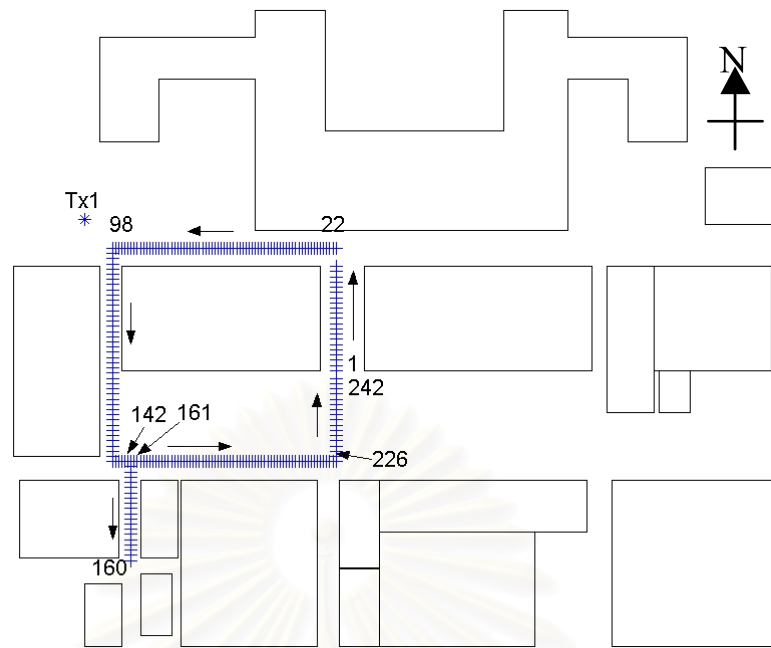
รูปที่ 3.11 กรณี ENG1



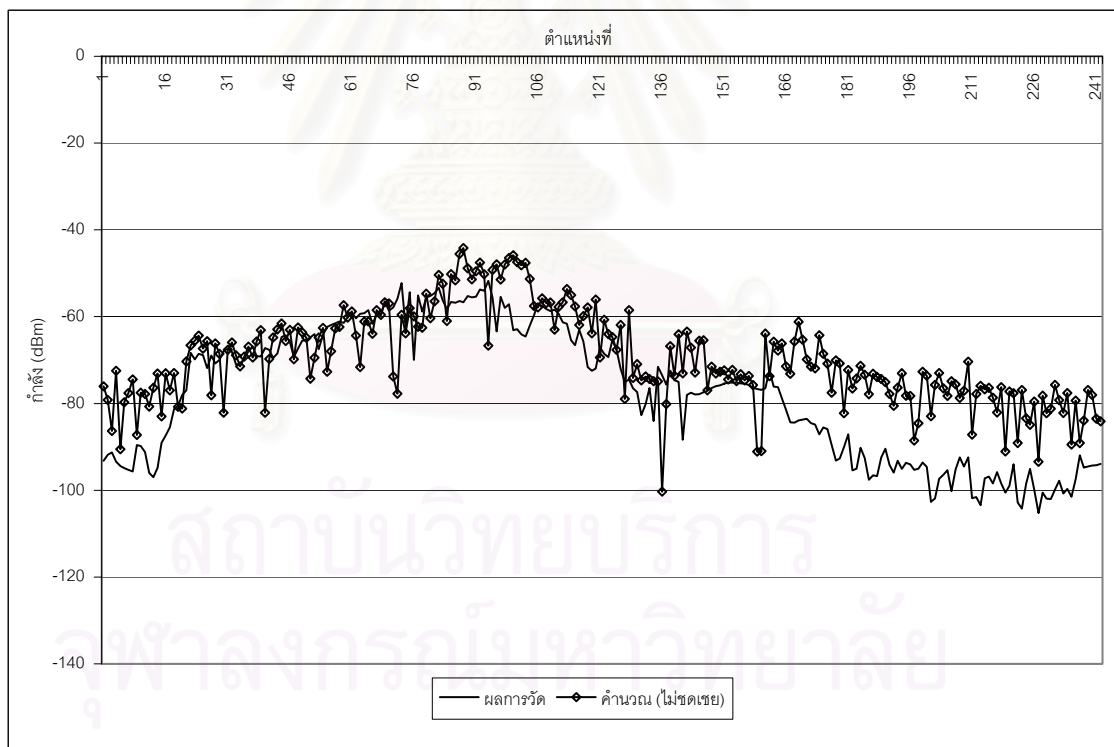
(ข) ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเทียบกับผลวัดในกรณี ENG1
(อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูป (ก))

รูปที่ 3.11 กรณี ENG1 (ต่อ)

กรณี ENG2 (รูปที่ 3.12 (ข)) กรณีนี้สถานีฐานมีตำแหน่งที่ตั้งเดียวกันและหันไปในทิศทางเดียวกันกับกรณี ENG1 เส้นทางการวัดสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.12 (ก) ตำแหน่งของสถานีฐานอยู่ในช่วงบริเวณจุดทดสอบที่ประมาณ 95-100 สัญญาณจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงในช่วงตำแหน่งรับที่ 22-110 ส่วนบริเวณอื่นๆ จะถูกบดบังโดยอาคารแวดล้อม ผลการคำนวณมีแนวโน้มเดียวกันกับผลการวัด แต่ในช่วงต้นและช่วงปลายของเส้นทางการวัดสัญญาณซึ่งอยู่ในเขตเงาระดับสัญญาณที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่าผลการวัดคาดว่าเป็นผลจากการสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางที่ไม่ครบถ้วน เช่น การละเลยรถยนต์ที่จอดอยู่ การละเลยทางเดินเชื่อมระหว่างอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 และอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 2 ซึ่งเป็นสิ่งกีดขวางที่สามารถสะท้อนและทำให้คลื่นเลี้ยวเบนได้จึงอาจทำให้รังสีบางรังสีที่คำนวณได้ในแบบจำลองถูกบดบังทำให้ไม่มีรังสีนั้นหรืออาจทำให้เกิดรังสีเพิ่มมากขึ้นจนเกิดการหักล้างทางวิทยาศาสตร์ของสัญญาณทำให้ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุคลาดเคลื่อนไปจากผลการวัด



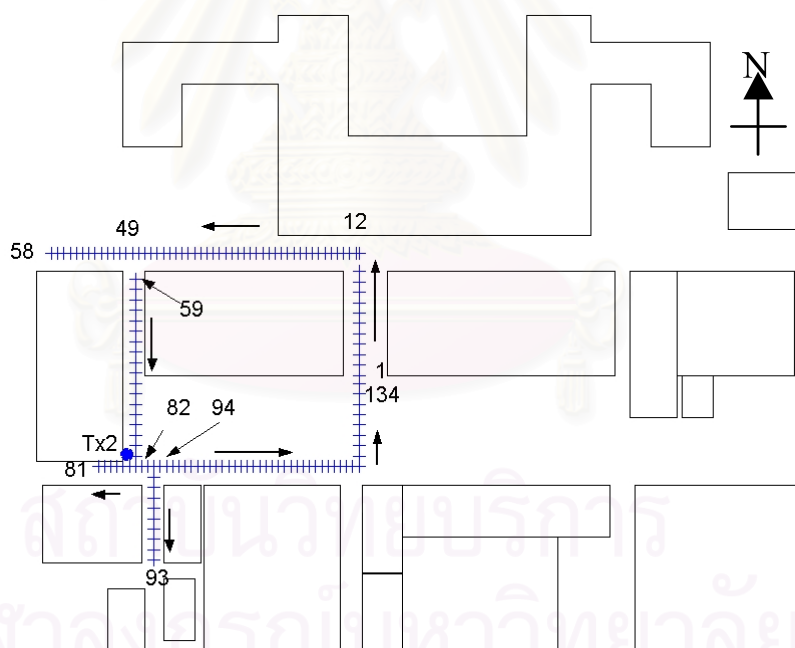
(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG2



(ข) ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเทียบกับผลวัดในกรณี ENG2
(อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูป (ก))

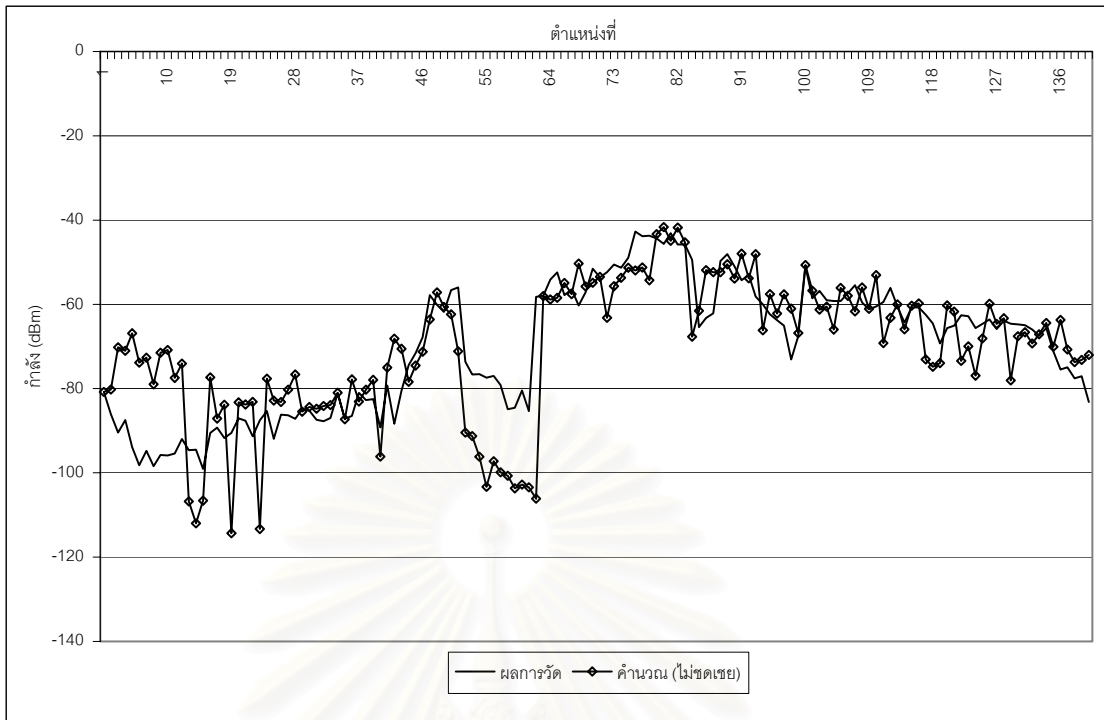
รูปที่ 3.12 กรณี ENG2

กรณี ENG3 (รูปที่ 3.13 (ข)) กรณีนี้ตั้งสถานีฐานบริเวณหลังอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและหันแนวเล็งไปทางทิศตะวันออก เส้นทางการวัดสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.13 (ก) ตำแหน่งของสถานีฐานอยู่ในช่วงของจุดทดสอบที่ประมาณ 73-78 บริเวณที่มีรังสีตรงจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่อยู่ในช่วงตำแหน่งที่ 48-52 ช่วงตำแหน่งที่ 59-76 ช่วงตำแหน่งที่ 82-85 และช่วงตำแหน่งที่ 94-134 บริเวณเหล่านี้จึงมีกำลังสัญญาณแรงกว่าบริเวณอื่นๆซึ่งอยู่ในบริเวณขอบเขตเงา ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวัด บริเวณตำแหน่งที่ 1-10 และบริเวณตำแหน่งที่ 51-58 เป็นตำแหน่งที่อยู่ในช่วงเขตเงา ความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับผลการวัดในช่วงตำแหน่งที่ 1-10 อาจเกิดจากการละเลยทางเดินเชื่อมระหว่างอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 และอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 2 ทำให้รังสีที่มาถึงตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ดังกล่าวลดลงจากการบดบังหรือเพิ่มขึ้นจากการเกิดการสะท้อนและการเลี้ยวเบนของคลื่น ส่วนในตำแหน่งที่ 51-58 เป็นตำแหน่งที่สถานีเคลื่อนที่หยุดอยู่ที่ด้านหน้าอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าซึ่งเป็นช่วงสุดขอบเขตของฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางที่สร้างขึ้น ทำให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง เนื่องจากละเลยอิทธิพลของสระว่ายน้ำจุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและอาคารจักรพงษ์ซึ่งอาจมีผลต่อการแพร่กระจายของคลื่น



(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG3

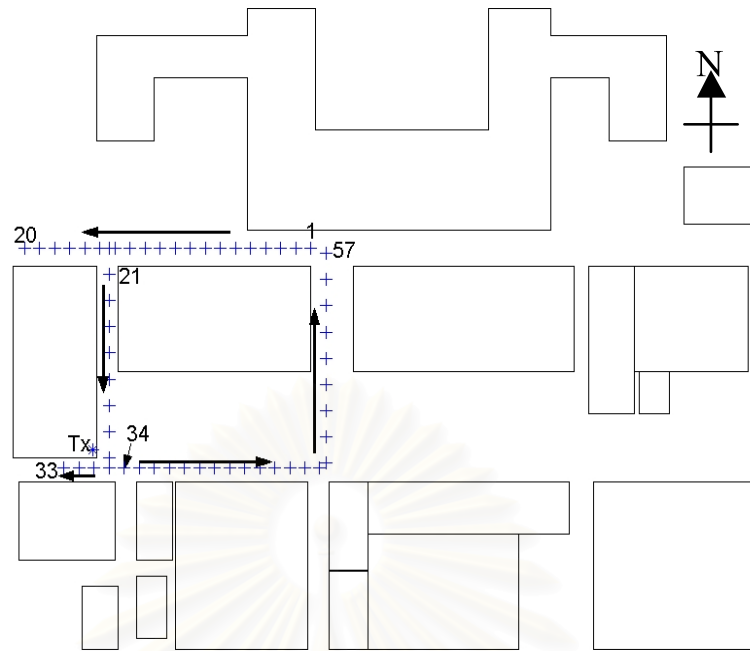
รูปที่ 3.13 กรณี ENG3



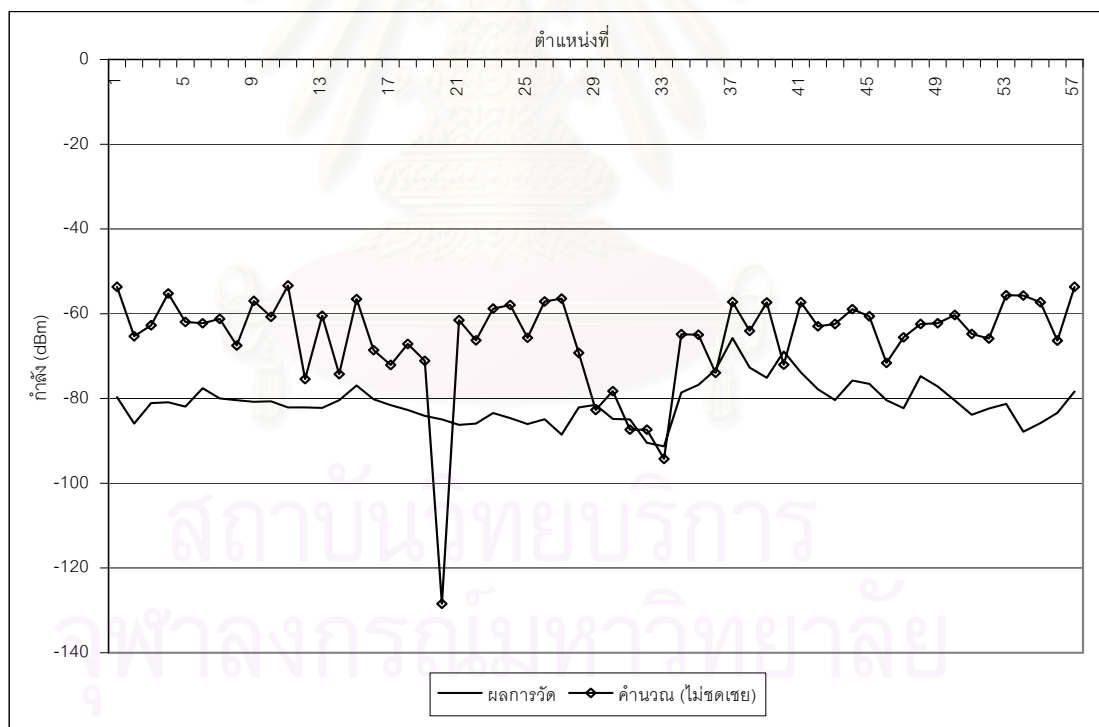
(ข) ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเทียบกับผลวัดในกรณี ENG3
(อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูป (ก))

รูปที่ 3.13 กรณี ENG3 (ต่อ)

กรณี ENG4 (รูปที่ 3.14 (ข)) สถานีฐานตั้งอยู่บนชั้นคาดฟ้าของอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและหันแนวเล็งไปทางทิศตะวันออกในรูปที่ 3.14 (ก) การจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นจึงมีลักษณะเป็นแบบสามมิติต่างจากกรณี ENG1 ENG2 และ ENG3 ซึ่งเป็นการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบสองมิติเนื่องจากความสูงของสายอากาศส่ง ที่สถานีฐานเท่ากับความสูงของสายอากาศรับที่สถานีเคลื่อนที่ ในกรณี ENG4 นี้กราฟผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีแนวโน้มใกล้เคียงกันแต่ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีกำลังสัญญาณสูงกว่าผลการวัดประมาณ 15 ถึง 20 dB โดยตลอด ยกเว้นตำแหน่งที่ 21 กำลังสัญญาณที่ได้จากการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นจะต่ำกว่าผลการวัดอาจเป็นเพราะที่ตำแหน่งนี้ เป็นจุดบอดสัญญาณที่คำนวณได้จากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ความคลาดเคลื่อนของกำลังสัญญาณที่คำนวณได้ที่ตำแหน่งนี้อาจมาจากความคลาดเคลื่อนของฐานข้อมูลสิ่งกีดขวาง ซึ่งแม้จะพยายามสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางให้มีความใกล้เคียงกับสภาพ-แวดล้อมจริงแต่ฐานข้อมูลก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อน เป็นผลให้ในความเป็นจริงที่ตำแหน่งที่เป็นจุดบอดสัญญาณนี้มีรังสีเดินทางมาถึง จึงทำให้ที่ตำแหน่งนี้มีกำลังสัญญาณมากกว่าที่คำนวณได้



(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG4



(ข) ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเทียบกับผลวัดในกรณี ENG4
(อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูป (ก))

รูปที่ 3.14 กรณี ENG4

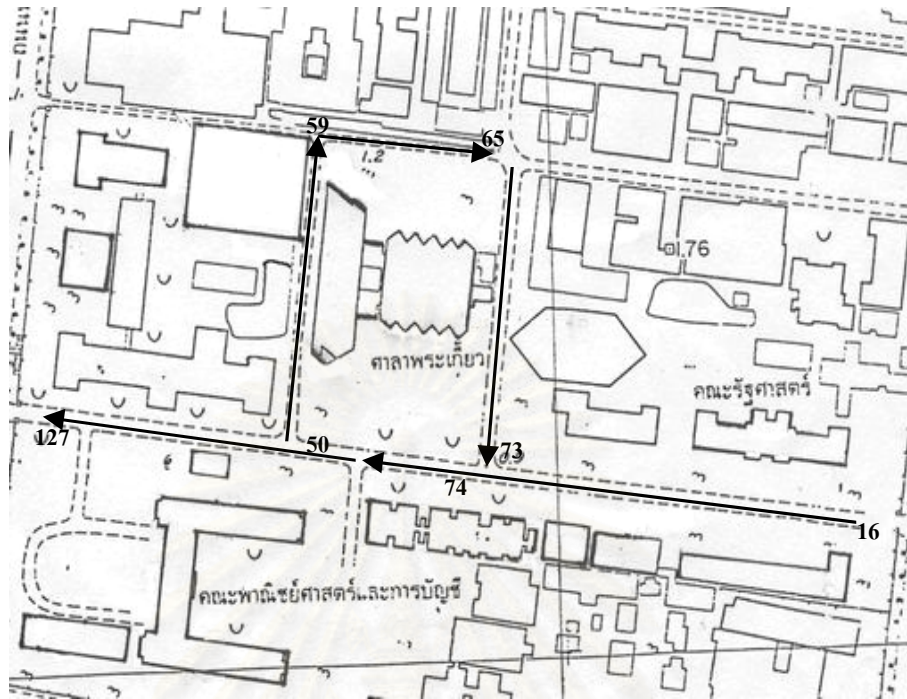
จากการเปรียบเทียบแนวโน้มของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้องค์ประกอบซดเซชและผลการวัด จะเห็นว่าผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุและผลการวัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน การจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นในกรณี ENG1 ENG2 และ ENG3 ซึ่งความสูงของสายอากาศส่งของสถานีฐานมีค่าเท่ากับความสูงของสายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่ กระทำบนระนาบสองมิติ พบว่า ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวัด แต่ในกรณี ENG4 สายอากาศส่งของสถานีฐานมีความสูงมากกว่าสายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่การจำลองการแพร่กระจายคลื่นจึงมีลักษณะเป็นสามมิติ ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีกำลังสัญญาณสูงกว่าผลการวัดประมาณ 15-20 dB โดยตลอด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความไม่เป็นอุดมคติของฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางที่สร้างขึ้น เช่น ผิวผนังของอาคารจริงไม่ได้เป็นผิวเรียบ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าของผนังอาคารต่างๆมีค่าไม่เท่ากันเหมือนที่กำหนดในการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่น และการสร้างฐานข้อมูลยังมีความละเอียดได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้นแม้ในงานวิจัยนี้ ได้ปรับปรุงฐานข้อมูลอาคารให้มีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมและเพิ่มฐานข้อมูลของต้นไม้เข้าไปในฐานข้อมูลผลโดยรวมของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันมากกว่าผลในงานวิจัย [1] แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง

ตารางที่ 3.3 ค่าทางสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้องค์ประกอบซดเซชเทียบกับผลการวัดบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีเปรียบเทียบ	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย(dB)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (dB)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
ENG1	-1.12	7.400	0.7640
ENG2	-7.92	9.830	0.7680
ENG3	0.484	11.18	0.7500
ENG4	-15.07	11.74	0.2850

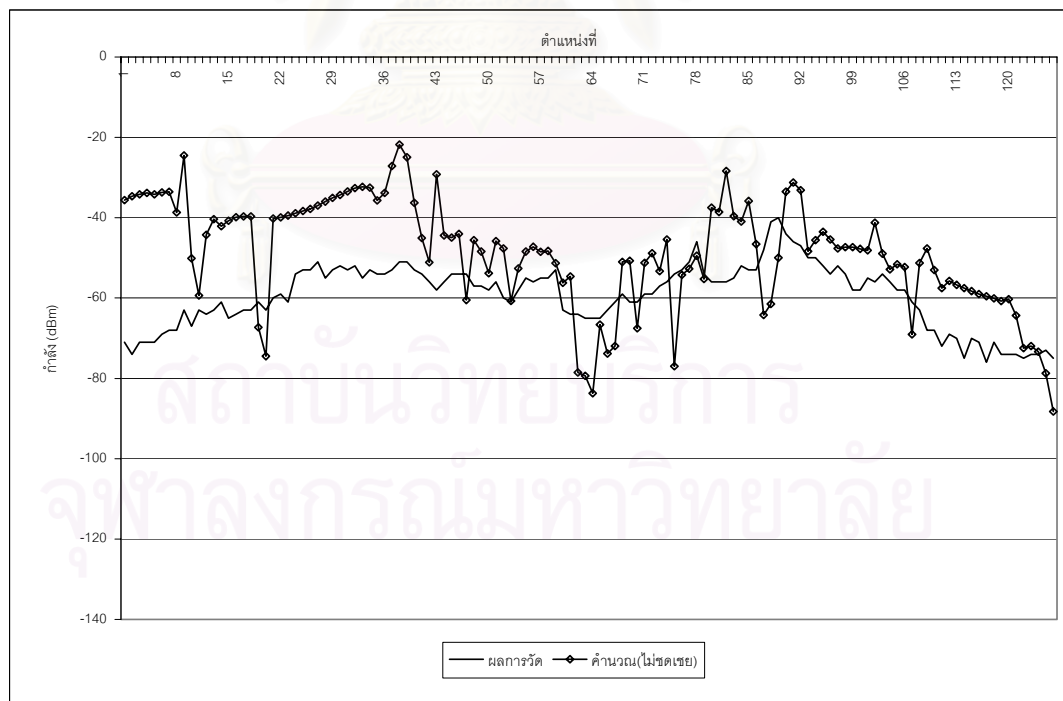
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าทางสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้องค์ประกอบซดเซชเทียบกับผลการวัดบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุและผลการวัดมีค่ามากกว่า 0.7500 แสดงว่าผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสามารถทำนายผลการวัดได้น่าพอใจ ยกเว้นกรณี ENG4 หากสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางให้มีความละเอียดยิ่งขึ้นและใช้องค์ประกอบซดเซชผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุน่าจะมีความถูกต้องเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ก็จะเพิ่มมากขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง -15 dB และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 7 ถึง 12 dB ซึ่งถือว่าไม่มากนัก

บริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ในการทดลองวัดสัญญาณกรณี CHU1-1

(ภาพถ่ายอ้างอิงจากแผนที่มาตราส่วน 1:4000)



(ข) ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเทียบกับผลวัดในกรณี CHU1-1

(อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูป (ก))

รูปที่ 3.15 กรณี CHU1-1

ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้ช่องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลการวัด บริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแสดงดังรูปที่ 3.15 (ข) ตำแหน่งของสถานีฐานและเส้นทางการวัดสัญญาณแสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.15 (ก) สถานีฐานตั้งอยู่บนอาคารประชาธิปไตย ไร่ไพ พระณี และเล็งทิศไปทาง 50 องศาเทียบกับทิศเหนือในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ตำแหน่งของสถานีฐานตั้งอยู่ในช่วงจุดทดสอบตำแหน่งที่ 37-46 และตำแหน่งที่ 82-91 ช่วงจุดทดสอบตำแหน่งที่ 1-15 เป็นช่วงที่รถทดสอบสัญญาณอยู่บนถนนอังรีดูนังค์กำลังจะเลี้ยวเข้าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทางประตูทางเข้าด้านคณะรัฐศาสตร์ ช่วงจุดทดสอบตำแหน่งที่ 16-50 เป็นช่วงที่รถทดสอบสัญญาณวิ่งจากหน้าคณะรัฐศาสตร์ ผ่านคณะเศรษฐศาสตร์ถึงทางเลี้ยวด้านหลังศาลาพระเกี้ยวด้านหน้าคณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี ช่วงจุดทดสอบตำแหน่งที่ 51-73 เป็นช่วงที่รถทดสอบสัญญาณวิ่งรอบศาลา-พระเกี้ยวผ่านด้านหลังศาลาพระเกี้ยว แล้วเลี้ยวผ่านบริเวณอาคารภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ บริเวณสระว่ายน้ำจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แล้วเลี้ยวผ่านด้านหน้าศาลาพระเกี้ยวมุ่งหน้าไปยังถนนหน้าคณะเศรษฐศาสตร์อีกครั้ง ช่วงจุดทดสอบตำแหน่งที่ 74-127 รถทดสอบสัญญาณวิ่งอยู่บนถนนหน้าคณะเศรษฐศาสตร์มุ่งหน้าไปยังประตูทางออกด้านคณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี ผลเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้ช่องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลการวัด พบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแต่มีความคลาดเคลื่อนของระดับกำลังคลื่นที่ได้จากการคำนวณและกำลังคลื่นที่ได้จากการวัด ช่วงจุดทดสอบตำแหน่งที่ 1-40 ระดับความแตกต่างของกำลังสัญญาณที่คำนวณได้เทียบกับผลการวัดมีค่อนข้างสูงสาเหตุอาจเป็นเพราะบริเวณจุดทดสอบที่ 1-40 อยู่บริเวณขอบเขตของการวัดและจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่น ฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางในบริเวณนี้ได้สำรวจและสร้างขึ้นโดยให้ความสำคัญเฉพาะบริเวณรอบศาลาพระเกี้ยวเท่านั้น ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในช่วงต้นจึงคลาดเคลื่อนไปจากผลการวัดมากเพราะฐานข้อมูลสิ่งกีดขวาง ในช่วงนี้มีความละเอียดเพียงระดับหนึ่งเท่านั้น ในช่วงจุดทดสอบที่ 41 เป็นต้นไปเป็นช่วงที่อยู่โดยรอบศาลาพระเกี้ยว เป็นช่วงที่มีฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางที่ละเอียดถูกต้องมากกว่า ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจึงมีช่วงความแตกต่างสม่ำเสมอประมาณ 20 dB

ตารางที่ 3.4 ค่าทางสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้ช่องค์ประกอบชดเชย เทียบกับผลการวัดบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีเปรียบเทียบ	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (dB)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (dB)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
CHU1-1	-10.77	12.81	0.3904

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าทางสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้ช่องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลการวัดบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่ามีค่า

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียง 0.3904 แต่เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉพาะช่วงจุดทดสอบที่ 20-127 ซึ่งเป็นช่วงที่มีฐานข้อมูลสมบูรณ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่คำนวณได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.6034 แต่เนื่องด้วยแนวโน้มของกราฟกำลังสัญญาณเป็นไปในทิศทางเดียวกันคาดว่าเมื่อเพิ่มองค์ประกอบชุดเซตก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่ามากขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าประมาณ -10.77 dB และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 12.81 dB ใกล้เคียงกับผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

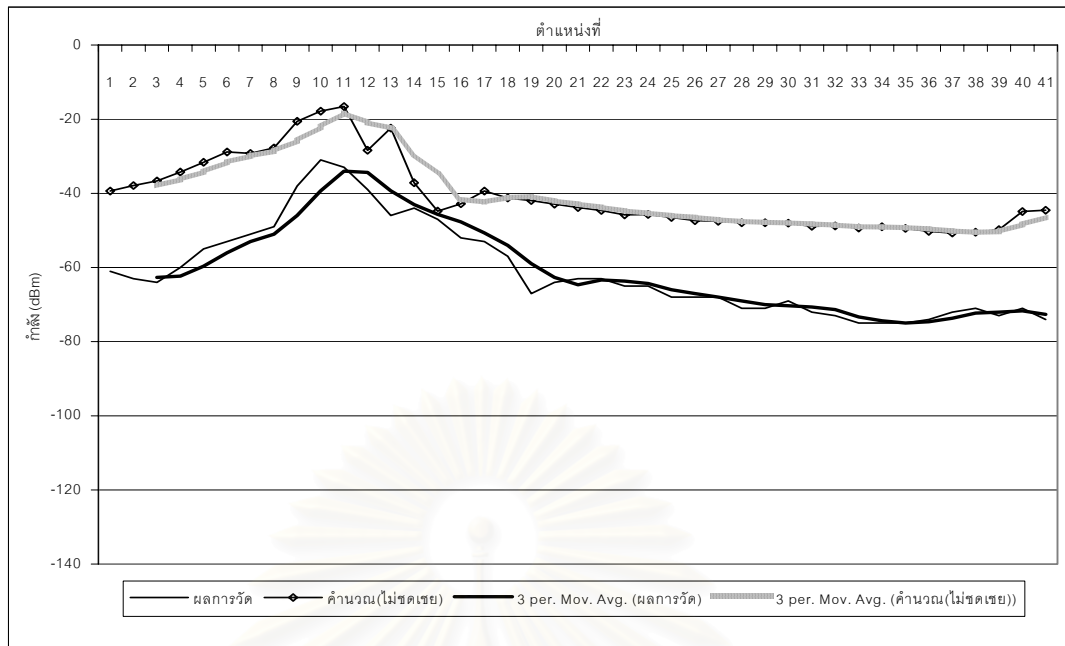
บริเวณถนนอังรีดูนังต์



(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ในการทดลองวัดสัญญาณกรณี HRDN-1

(ภาพขนาดย่ออ้างอิงจากแผนที่มาตราส่วน 1:4000)

รูปที่ 3.16 กรณี HRDN-1



(ข) ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเทียบกับผลวัดในกรณี HRDN-1
(อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูป (ก))

รูปที่ 3.16 กรณี HRDN-1 (ต่อ)

ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ โดยไม่ใช้องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลการวัดบริเวณถนนอังรีดูนังต์แสดงดังรูปที่ 3.16 (ข) ตำแหน่งของสถานีฐานและเส้นทางการวัดสัญญาณแสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.16 (ก) สถานีฐานตั้งอยู่บริเวณหน้าสนามม้าราชกรีฑาสโมสร และเล็งไปทางทิศ 210 องศาเทียบกับทิศเหนือในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ตำแหน่งของสถานีฐานอยู่บริเวณจุดทดสอบที่ 6-10 ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเทียบกับผลการวัดมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่มีความคลาดเคลื่อนของระดับสัญญาณตลอดแนวการวัดสัญญาณประมาณ 20-30 dB ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากความละเอียดของฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางที่ได้สำรวจและสร้างขึ้นโดยให้ความสำคัญเฉพาะอาคารที่อยู่บริเวณริมถนนเท่านั้น ในบริเวณสี่แยกอังรีดูนังต์กับบริเวณถนนนับจากด้านหน้าโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒปทุมวันไปทางสยามเสกสรรค์ เป็นบริเวณปลายขอบเขตของฐานข้อมูลซึ่งฐานข้อมูลมีความละเอียดน้อย

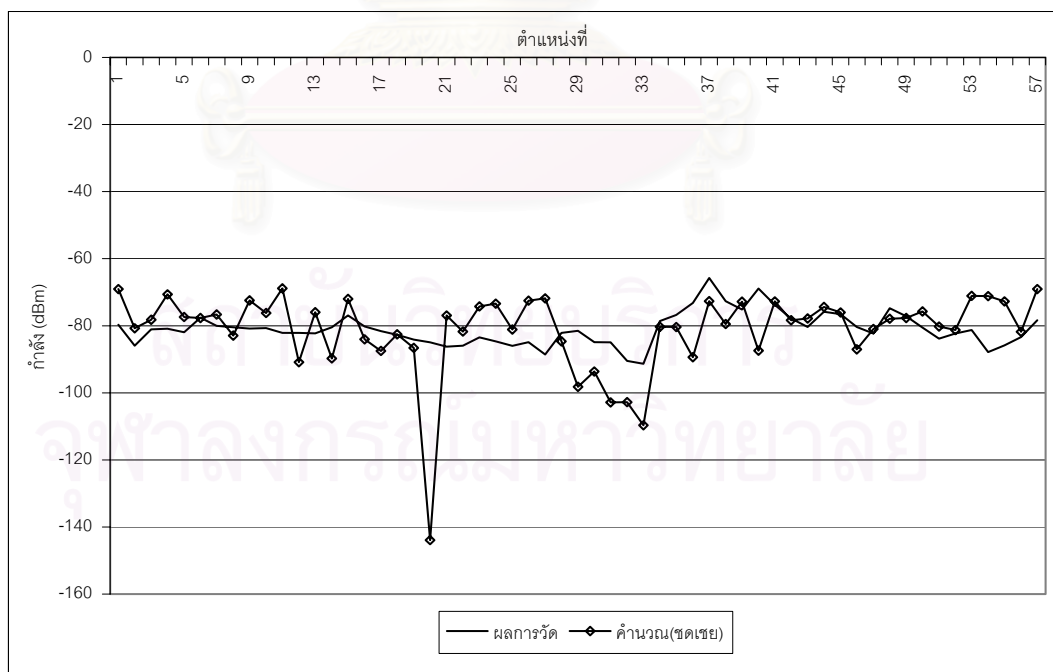
ตารางที่ 3.5 ค่าทางสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลการวัด บริเวณถนนอังรีดูนังต์

กรณีเปรียบเทียบ	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (dB)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (dB)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
HRDN-1	-20.49	5.71	0.8927

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าทางสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยไม่ใช้ องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลการวัด บริเวณถนนอังรีดูนังต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่า สูงมาก เนื่องจากกราฟผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับผลการวัดมีแนวโน้มไปใน ทิศทางเดียวกัน แต่เนื่องจากกราฟทั้งสองมีความแตกต่างของระดับกำลังสัญญาณประมาณ 20-30 dB ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจึงมากถึง -20.49 dB ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 5.71 dB โคล้่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในสองบริเวณก่อนหน้า

ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยใช้องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลการวัด

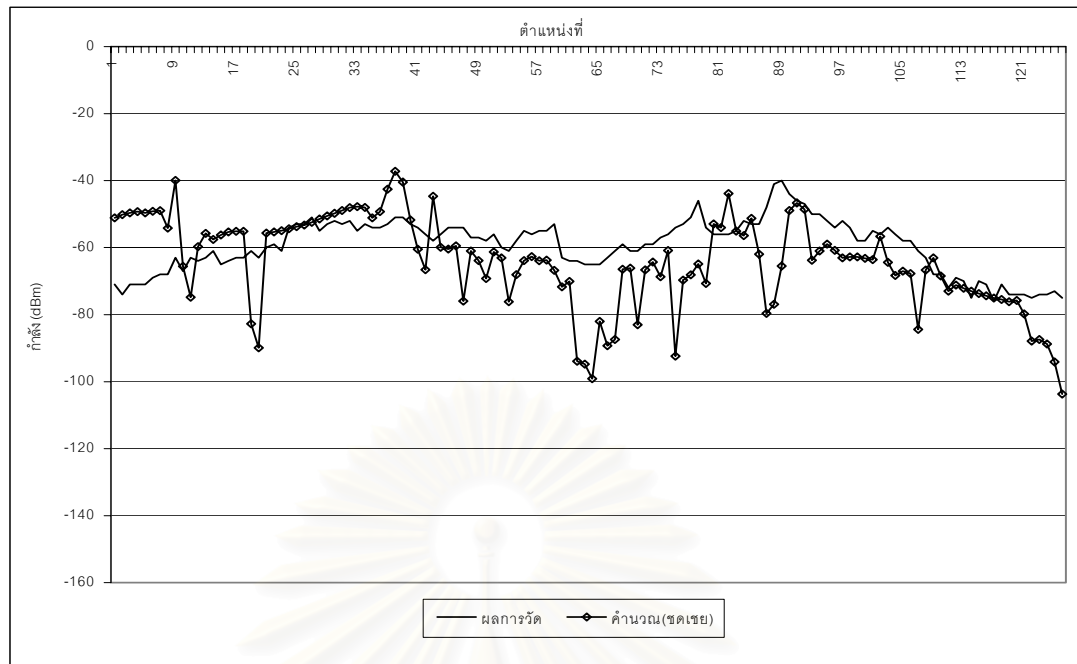
องค์ประกอบชดเชยที่จะใช้ในการชดเชยผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสร้าง จากความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกรณี ENG4 CHU1-1 และ HRDN-1 เมื่อไม่ใช้องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลการวัด แม้ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในแต่ละ กรณีจะมีค่าไม่เท่ากันแต่จะสังเกตได้ว่าทั้งสามกรณีมีช่วงต่างของผลการจำลองแบบการแพร่กระจาย คลื่นวิทยุกับผลการวัดประมาณ 20 dB เท่าๆกัน ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของกรณี ENG4 CHU1-1 และ HRDN-1 มีค่าเท่ากับ -15.07 , -10.77 และ -20.49 dB ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ทั้งสามกรณีมีค่าเท่ากับ -15.44 dB ต่อไปจะเป็นการแสดงผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ที่ได้ชดเชยความคลาดเคลื่อนเท่ากับค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของกรณี ENG4 CHU1-1 และ HRDN-1 ดังรูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.17 ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเมื่อใช้องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลวัดกรณี

ENG4

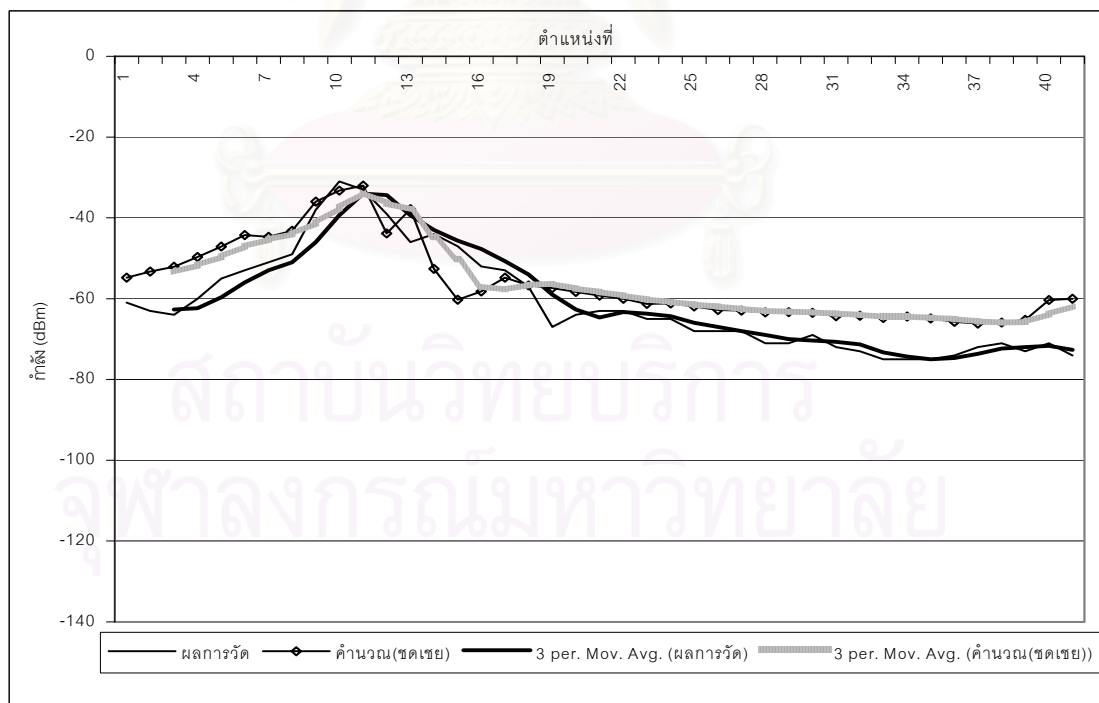
(อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.14 (ก))



รูปที่ 3.18 ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเมื่อใช้องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลวัดกรณี CHU1-

1

(อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.15 (ก))



รูปที่ 3.19 ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเมื่อใช้องค์ประกอบชดเชยเทียบกับผลวัดกรณี

HRDN-1

(อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.16 (ก))

ค่าทางสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเมื่อใช้องค์ประกอบชดเชย
แสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าทางสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยใช้อุปกรณ์ประกอบชดเชย
เทียบกับผลการวัด

กรณีเปรียบเทียบ	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (dB)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (dB)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
ENG4	0.37	11.74	0.3049
CHU1-1	4.67	12.81	0.3998
HRDN-1	-5.05	5.71	0.9145

จากตารางที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อชดเชยผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจะทำให้ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับผลวัดมีค่าลดลง แต่ไม่มีผลทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเปลี่ยนแปลง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่เมื่อเปรียบเทียบกราฟของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับกราฟผลการวัดในรูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.19 จะพบว่ากราฟทั้งสองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีความแตกต่างน้อยลง

ในกรณี ENG4 เมื่อชดเชยผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจะยังคงพบความแตกต่างกับผลการวัดที่บริเวณจุดทดสอบที่ 21-33 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับผลการวัดเมื่อไม่พิจารณาจุดทดสอบที่ 21 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 0.4025 สาเหตุที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักอาจเนื่องมาจากผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในบริเวณจุดทดสอบที่ 1-30 มีการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่รับได้มากกว่าผลการวัดและมีความแตกต่างของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับผลการวัดในช่วงจุดทดสอบที่ 22-30 แม้กราฟของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับผลการวัดจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

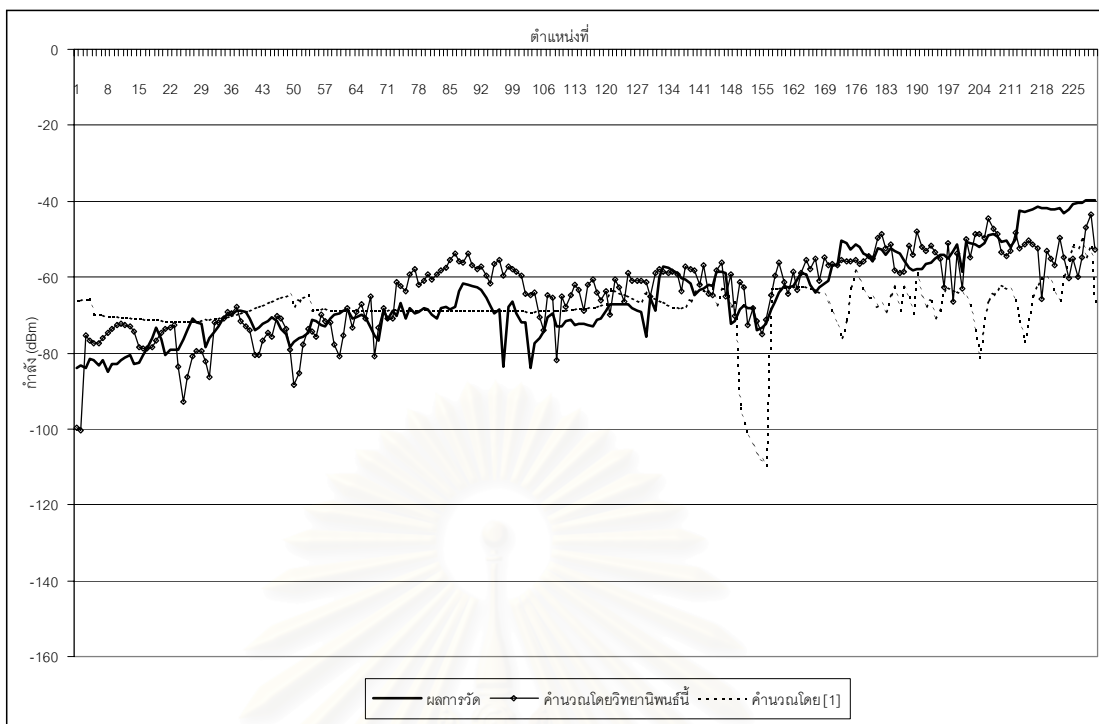
ในกรณี CHU1-1 ก็เช่นเดียวกันแม้การชดเชยผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจะทำให้กราฟของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับผลการวัด มีความใกล้เคียงกันมากขึ้น แต่ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ตำแหน่งที่ 1-20 มีแนวโน้มที่แตกต่างจากผลการวัดเนื่องจากเป็นจุดทดสอบที่อยู่บริเวณขอบเขตของฐานข้อมูล ทำให้ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไม่แม่นยำนัก แต่เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุตำแหน่งที่ 20-127 กับผลการวัด จะพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.6231 เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเทียบกับเมื่อไม่ใช้อุปกรณ์ประกอบชดเชย

ในกรณี HRDN-1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเพิ่มขึ้น ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเมื่อใช้องค์ประกอบชุดเซชทำให้กราฟของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีความใกล้เคียงกับผลการวัดมากยิ่งขึ้น

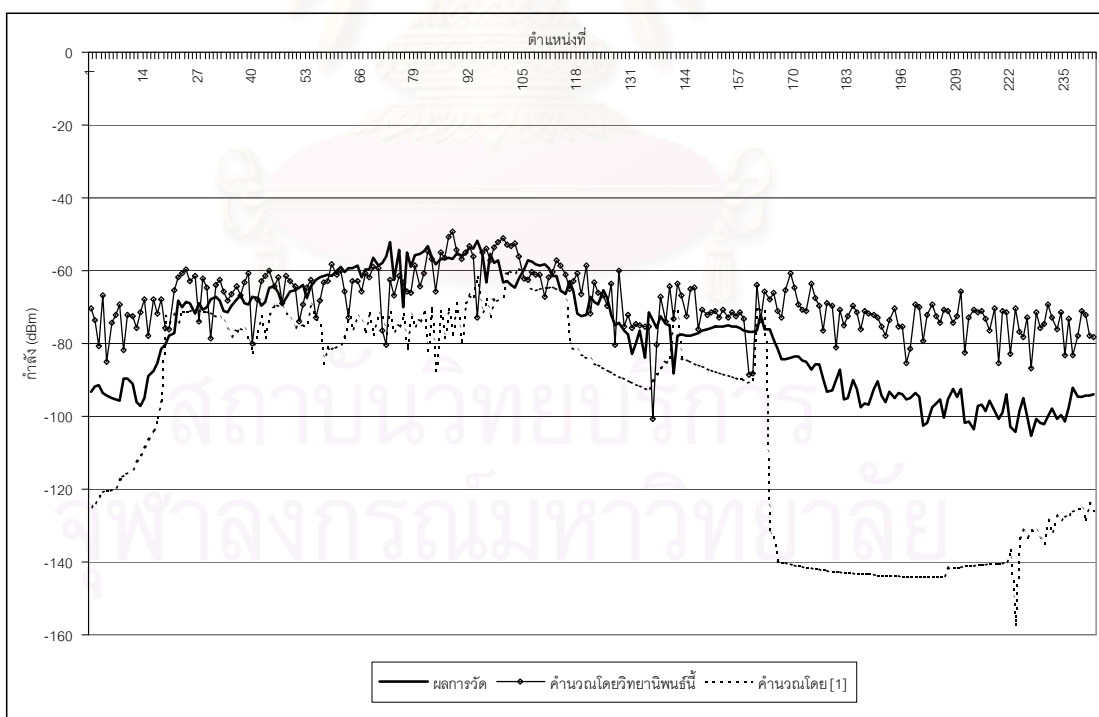
ดังนั้นการใช้องค์ประกอบชุดเซชในการปรับเทียบผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจะทำให้ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเทียบกับผลวัดมีแนวโน้มที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันมากขึ้น มีความแตกต่างของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุลดลง แต่ในกรณีของจุดทดสอบที่อยู่บริเวณขอบเขตของฐานข้อมูลหรืออยู่ในบริเวณที่มีฐานข้อมูลไม่เพียงพอ การชุดเซชผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจะช่วยทำให้ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีแนวโน้มที่ดีขึ้นแต่ไม่อาจช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้มากนัก

การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยงานวิจัยนี้เทียบกับผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยงานวิจัย [1]

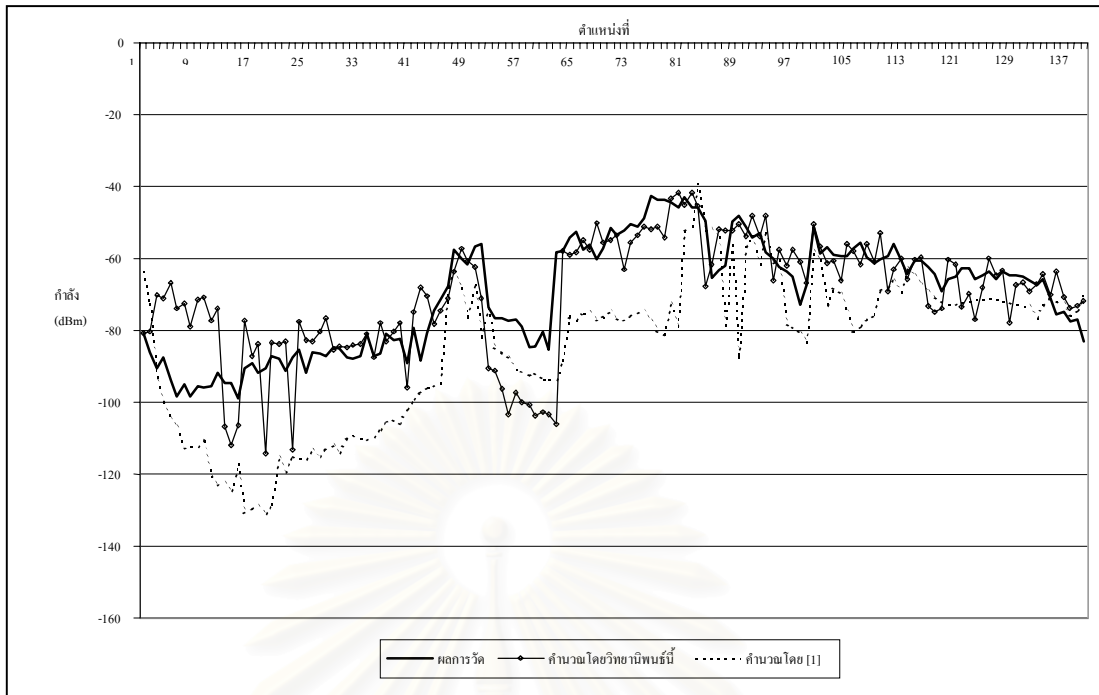
การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยนี้เทียบกับผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัย [1] กระทำโดยสร้างฐานข้อมูลอาคารกีดขวางสำหรับแบบจำลองโดยงานวิจัย [1] ที่จำลองอาคารกีดขวางในบริเวณทดสอบในงานวิจัยนี้ ได้แก่ บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริเวณถนนอังรีดูนังต์ และใช้ข้อมูลของสถานีฐานและข้อมูลของสถานีเคลื่อนที่เดียวกันกับการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้ นำผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] มาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้และผลการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.20 ถึงรูปที่ 3.25 แล้วเปรียบเทียบค่าทางสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยงานวิจัย [1] กับผลการวัด เทียบกับค่าสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยงานวิจัยนี้กับผลการวัด ผลการเปรียบเทียบค่าสถิติแสดงในตารางที่ 3.7



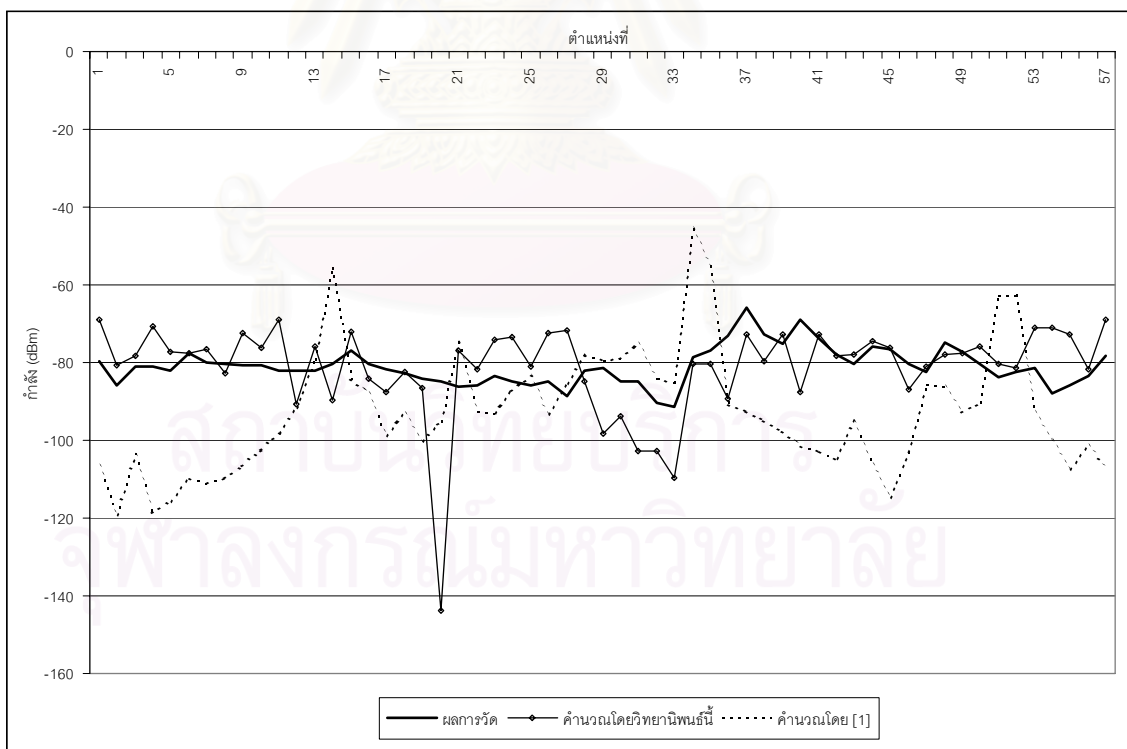
รูปที่ 3.20 การเปรียบเทียบผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี ENG 1 (อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.11 (ก))



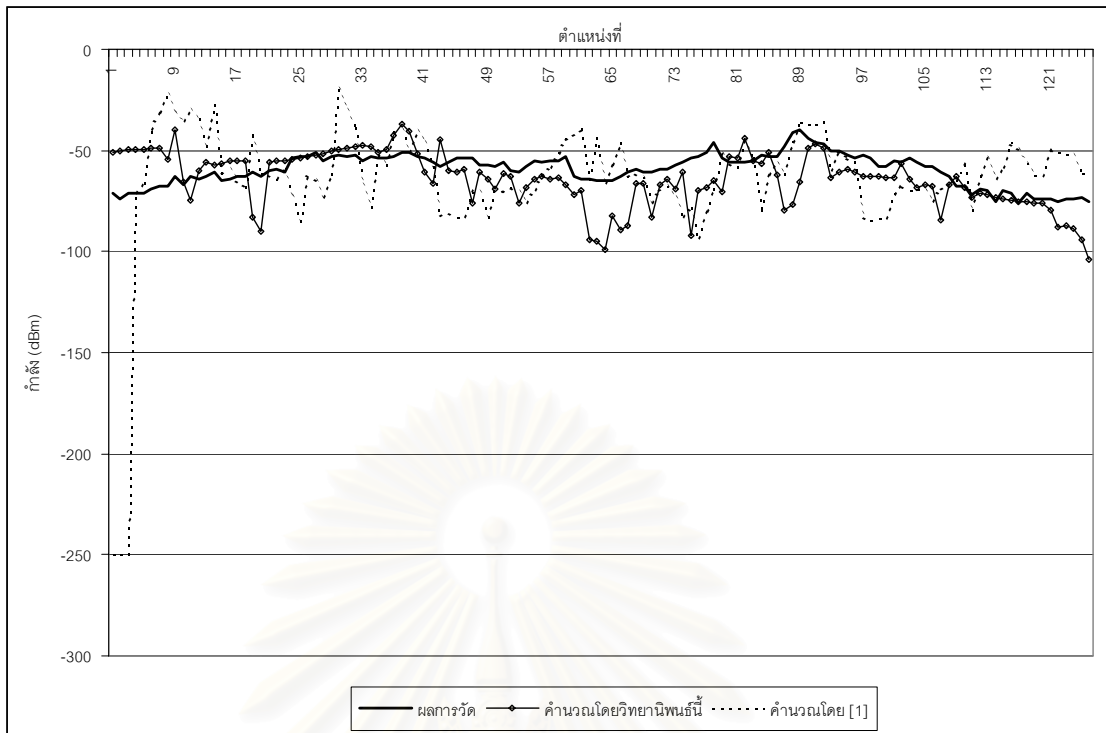
รูปที่ 3.21 การเปรียบเทียบผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี ENG 2 (อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.12 (ก))



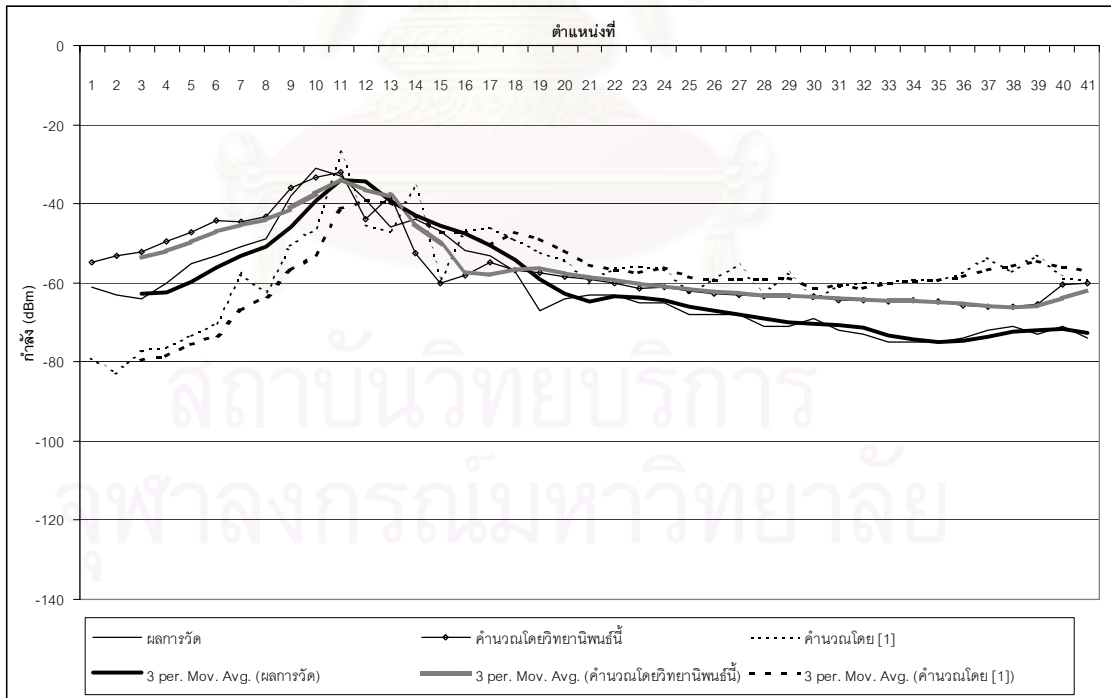
รูปที่ 3.22 การเปรียบเทียบผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี ENG 3 (อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.13 (ก))



รูปที่ 3.23 การเปรียบเทียบผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี ENG 4 (อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.14 (ก))



รูปที่ 3.24 การเปรียบเทียบผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี CHU1-1 (อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.15 (ก))



รูปที่ 3.25 การเปรียบเทียบผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้กับผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] กรณี HRDN-1 (อ้างอิงตำแหน่งกับแผนที่ในรูปที่ 3.16 (ก))

ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบค่าสถิติของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกับผลการวัด โดยแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยนี้กับแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัย [1]

กรณีเปรียบเทียบ	จำนวนจุดทดสอบ	จำนวนอาคาร	คำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้				คำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัย [1]			
			m.e. (dB)	m.a.e (dB)	S.D. (dB)	cross correlation	m.e. (dB)	m.a.e (dB)	S.D. (dB)	cross correlation
ENG 1	230	18	-1.121	5.915	7.400	0.7641	15.74	15.92	7.875	0.3295
ENG 2	242	18	-8.956	11.78	11.77	0.7640	22.26	22.83	17.89	0.8891
ENG 3	140	18	0.484	7.950	11.18	0.750	14.63	15.95	12.32	0.8128
ENG 4	57	18	0.371	7.799	11.74	0.3049	11.54	17.67	17.04	-0.1221
CHU1-1	126	22	4.670	10.39	12.81	0.3998	4.720	18.13	32.30	0.1893
HRDN-1	41	51	-5.051	6.855	5.710	0.9145	-3.365	11.63	12.29	0.4417

หมายเหตุ : m.e. (mean error) = ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลการคำนวณเทียบกับผลการวัด

m.a.e. (mean of absolute error) = ขนาดความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลการคำนวณเทียบกับผลการวัด

S.D. = ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณเทียบกับผลการวัด

cross correlation = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของผลการคำนวณเทียบกับผลการวัด

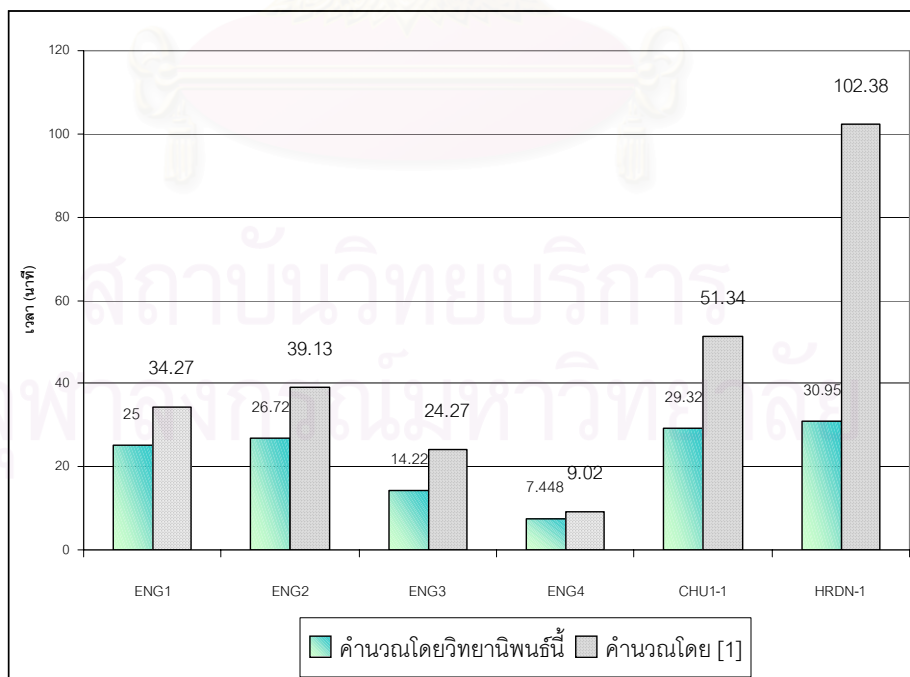
จากรูปที่ 3.20 ถึงรูปที่ 3.25 จะเห็นได้ว่าการสร้างฐานข้อมูลที่มีความละเอียดถูกต้องเพิ่มขึ้น และการพัฒนาระเบียบวิธีการติดตามรอยทางเดินของรังสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น ทำให้ผลการคำนวณ โดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่พัฒนาในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลการวัดมากกว่าผลการคำนวณโดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่พัฒนาในงานวิจัย [1] ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยเมื่อตัดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 0.7263 เทียบกับค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยงานวิจัย [1] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4433 แต่เมื่อพิจารณาค่าสถิติในตารางที่ 3.7 จะพบว่าในกรณี ENG 2 และ ENG 3 ผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่าผลการคำนวณในงานวิจัยนี้ แต่ผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] มีขนาดของความผิดพลาดเฉลี่ยสูงกว่าผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ดังนั้นในการเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองจึงพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียงอย่างเดียวไม่ได้ ต้องพิจารณาร่วมกับค่าสถิติอื่นๆ ด้วย

ในกรณี ENG 2 และ ENG 3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] มีค่าสูงกว่าผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้ เนื่องจากกราฟของผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นและลดลงของสัญญาณในทิศทางเดียวกันกับผลการวัดและมีการแกว่งของสัญญาณน้อยกว่าผลการคำนวณ โดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ซึ่งก็มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นและลดลงของกำลังสัญญาณในทิศทางเดียวกันกับผลการวัดแต่มีการ

แกว่งของสัญญาณมากกว่า จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่าแม้ว่าจะมีค่าเฉลี่ยของขนาดความคลาดเคลื่อนของกำลังสัญญาณที่คำนวณได้น้อยกว่า

ในกรณีเปรียบเทียบอื่นๆ ผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัยนี้จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของกำลังสัญญาณ และค่ากำลังสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ใกล้เคียงกับผลการวัดมากกว่าผลการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] จึงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้มากกว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ค่าขนาดความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณเทียบกับผลการวัดน้อยกว่าผลการคำนวณโดยแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัย [1] แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยกรรมวิธีเชิงรังสีที่พัฒนาในงานวิจัยนี้จึงมีความถูกต้องแม่นยำเพิ่มขึ้นจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยกรรมวิธีเชิงรังสีในงานวิจัย [1]

เมื่อพิจารณาในแง่ของเวลาที่ใช้ในการคำนวณกำลังสัญญาณในกรณีเปรียบเทียบต่างๆ ของแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยนี้เทียบกับแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัย [1] โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ ที่มีซีพียูแบบ Pentium II 400 MHz หน่วยความจำ 128 MB เวลาที่ใช้ในการคำนวณกรณีเปรียบเทียบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.26 จะเห็นได้ว่าการคำนวณโดยแบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ใช้เวลาน้อยกว่าการคำนวณโดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] เนื่องมาจากการระเบียบวิธีที่ใช้ในการติดตามรอยทางเดินของรังสีมีการคำนวณวนซ้ำลดลง เมื่อพิจารณาพร้อมกับความแม่นยำของผลการคำนวณที่ได้ ระเบียบวิธีการติดตามรอยทางเดินของรังสีที่ใช้ในการวิจัยนี้จึงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากงานวิจัย [1]



รูปที่ 3.26 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่พัฒนาในงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัย [1] ในกรณีเปรียบเทียบต่างๆ

สรุป

ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ โดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยกรรมวิธีเชิงรังสีจะมีความถูกต้อง ถ้ามีฐานข้อมูลที่มีความถูกต้องในปริมาณที่เพียงพอ ผลของความไม่แน่นอนของข้อมูล จะก่อให้เกิดความแตกต่างของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ตัวประกอบชดเชย เป็นค่าปรับเทียบเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากความไม่แน่นอนของข้อมูลเหล่านั้น ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการวัดแต่ในกรณีที่มีฐานข้อมูลไม่เพียงพอจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าต่ำ เช่น ในกรณี ENG4 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อชดเชยแล้วต่ำที่สุดเท่ากับ 0.4025 ส่วนในกรณี CHU1-1 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉพาะบริเวณที่ฐานข้อมูลเพียงพอจะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.6231 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.9145 ในกรณี HRDN-1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยเมื่อตัดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดออกมีค่าเท่ากับ 0.7263 มากกว่าผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.4433 และการคำนวณโดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้ใช้เวลาน้อยกว่าการคำนวณโดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัย [1] เนื่องจากมีการคำนวณซ้ำน้อยกว่า

บทที่ 4

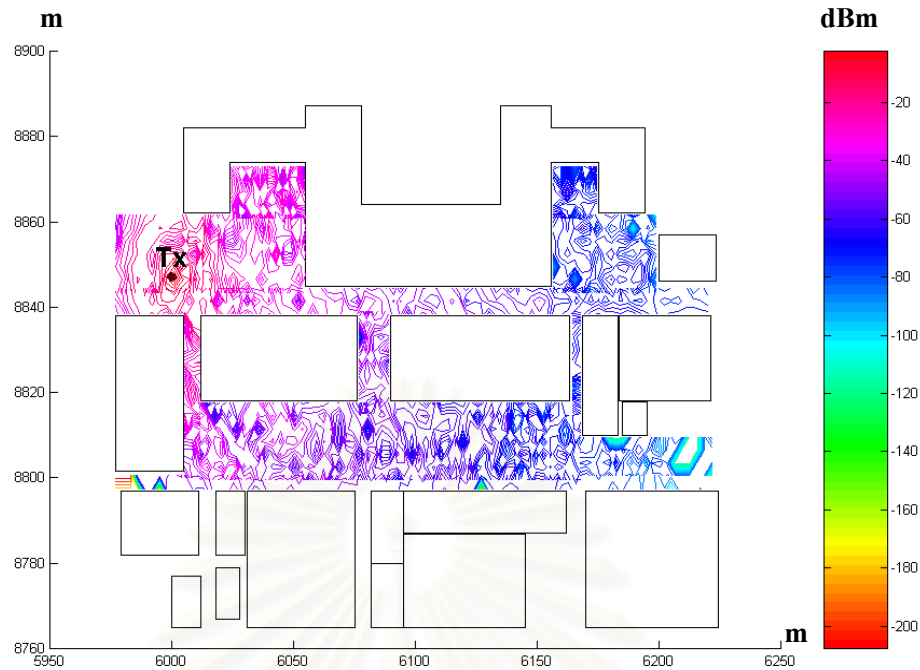
การออกแบบและวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่โดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

การออกแบบและวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่ เป็นสิ่งสำคัญในการสร้างและจัดการให้ระบบสื่อสารเคลื่อนที่มีประสิทธิภาพและสมรรถนะสูงที่สุด เพื่อให้ผู้ใช้บริการได้รับบริการที่มีคุณภาพ แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในเขตเมืองของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ เป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งที่สามารถช่วยในการออกแบบระบบสื่อสารเคลื่อนที่ ให้ครอบคลุมพื้นที่บริการได้อย่างทั่วถึง และให้มีการใช้ทรัพยากรความถี่ที่มีอยู่จำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจากแบบจำลอง สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพในการออกแบบระบบสื่อสารเคลื่อนที่ เช่น การตรวจสอบความครอบคลุมของระบบในพื้นที่บริการ การวิเคราะห์เวลาประวิงและมุมการมาถึงของสัญญาณให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้เพื่อลดปัญหาการจางหาย (fading) เป็นต้น

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่นำเสนอ ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบจำลองที่ประมาณสัญญาณวิทยุที่แผ่ออกจากสายอากาศส่งที่สถานีฐานด้วยกรรมวิธีเชิงรังสี สัญญาณที่มาถึงสายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่ จะเป็นรังสีที่แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมผ่านกลไกการแพร่กระจายคลื่นแบบต่างๆ รังสีที่มาถึงสายอากาศรับจะถูกบันทึกเป็นฐานข้อมูลเชิงรังสีซึ่งจะบันทึกกระยะทางที่รังสีเดินทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ มุมการมาถึงสายอากาศรับของรังสีนั้นๆทำให้สามารถคำนวณค่าการกระจายเวลาประวิงและมุมการมาถึงของคลื่นได้ เมื่อรวมกำลังคลื่นของรังสีแบบเวกเตอร์ก็จะทำให้สามารถคำนวณกำลังคลื่นรวมของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศรับที่ตำแหน่งนั้นๆได้ ทำให้สามารถสร้างแผนภูมิแสดงกำลังคลื่นในแต่ละบริเวณในพื้นที่บริการที่พิจารณา รายละเอียดของการสร้างแผนภูมิแสดงกำลังคลื่นในพื้นที่บริการ การคำนวณค่ากระจายเวลาประวิงและมุมการมาถึงของคลื่น โดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในเขตเมืองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีกระบวนการดังต่อไปนี้

การสร้างแผนภูมิแสดงกำลังคลื่นในพื้นที่บริการ (power profile)

เมื่อคำนวณกำลังคลื่นรวมของรังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับ ณ แต่ละตำแหน่งที่สายอากาศรับหยุดอยู่จะสร้างแผนภูมิแสดงกำลังคลื่นได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งลักษณะการกระจายกำลังคลื่นนี้จะช่วยให้สามารถออกแบบตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและค่าปัจจัยต่างๆในการติดตั้งสายอากาศส่ง เช่น กำลังส่ง มุมก้ม ทิศทางของพูหลัก เป็นต้น เพื่อให้ทั่วทุกบริเวณในพื้นที่บริการมีระดับกำลังสัญญาณที่เพียงพอให้การสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายและสถานีฐานเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงกำลังคลื่นบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประโยชน์ที่ได้จากแผนภูมิแสดงกำลังคลื่นอีกประการหนึ่งก็คือทำให้สามารถทำนายบริเวณที่อาจเป็นจุดบอดสัญญาณหรือจุดอับสัญญาณ¹ (blind spot) ในพื้นที่บริการ ช่วยให้ประหยัดเวลาในการวัดทดสอบเนื่องจากรู้ตำแหน่งที่อาจเป็นจุดอับสัญญาณแล้ว บริเวณที่ต้องวัดทดสอบระดับสัญญาณจะถูกจำกัดให้เล็กลงและสามารถระบุตำแหน่งได้ การแก้ไขจุดอับสัญญาณก็จะสามารถกระทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอค่าความสามารถครอบคลุม (coverability) เพื่อเป็นค่าปัจจัยเชิงปริมาณในการบอกความสามารถครอบคลุมในพื้นที่บริการของสถานีฐาน ค่าความสามารถครอบคลุม (C) หาได้จาก

$$C = \frac{N_p}{N_{total}} \times 100\% \quad (4.1)$$

โดย N_p คือ จำนวนจุดทดสอบที่มีระดับสัญญาณสูงกว่าระดับสัญญาณอ้างอิง

N_{total} คือ จำนวนจุดทดสอบทั้งหมดในพื้นที่บริการ

¹ จุดบอดสัญญาณหรือจุดอับสัญญาณ (blind spot) คือ บริเวณที่สถานีเคลื่อนที่ไม่สามารถติดต่อกับสถานีฐานได้ เนื่องจากกำลังสัญญาณที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่มีระดับต่ำกว่าความไวของเครื่องรับหรือมีสัญญาณรบกวนสูงมากจนไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้

ระดับสัญญาณอ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับระดับสัญญาณที่จุดทดสอบต่างๆ ในพื้นที่บริการ เป็นระดับสัญญาณที่ยังทำให้สถานีเคลื่อนที่สามารถติดต่อสื่อสารกับสถานีฐานได้ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้ระดับสัญญาณอ้างอิงมีค่าเท่ากับ -110 dBm (ข้อมูลจากบริษัท แอดวานซ์อินโฟร์เซอร์วิส จำกัด (มหาชน))

การหาค่าการกระจายเวลาประวิง (time delay spread)

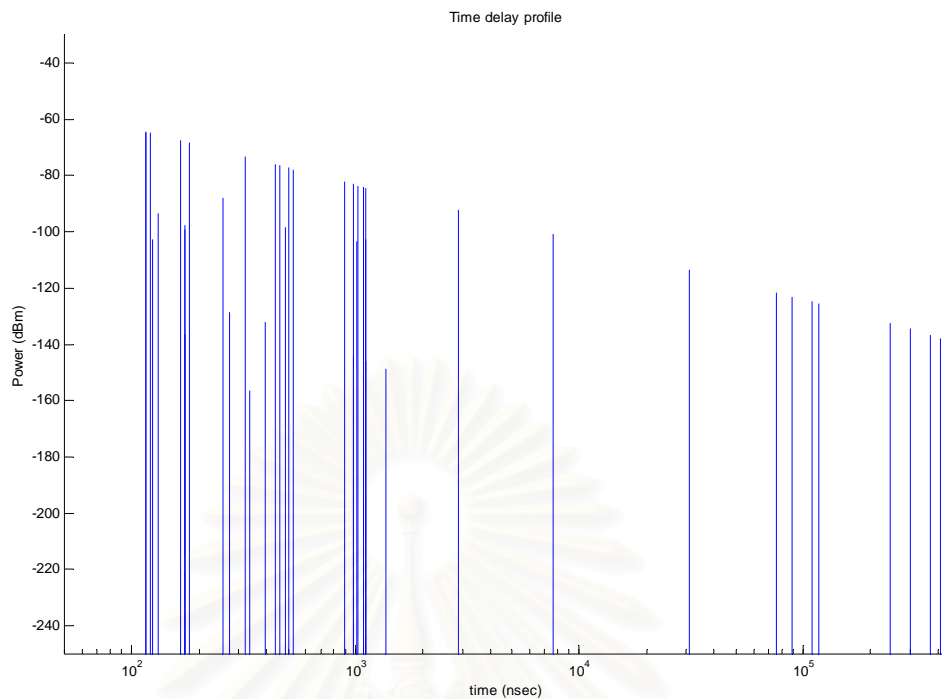
การใช้กรรมวิธีเชิงรังสีในการประมาณการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ คลื่นวิทยุที่แผ่ออกจากสายอากาศส่งจะประมาณเป็นรังสีโดยมีลักษณะเป็นสัญญาณอิมพัลส์ เมื่อทราบระยะทางที่รังสีแต่ละรังสีเดินทางมาจนถึงสายอากาศรับจะคำนวณเวลาประวิงที่รังสีใช้ในการเดินทางได้จาก

$$t_d = \frac{d}{c} \quad (4.2)$$

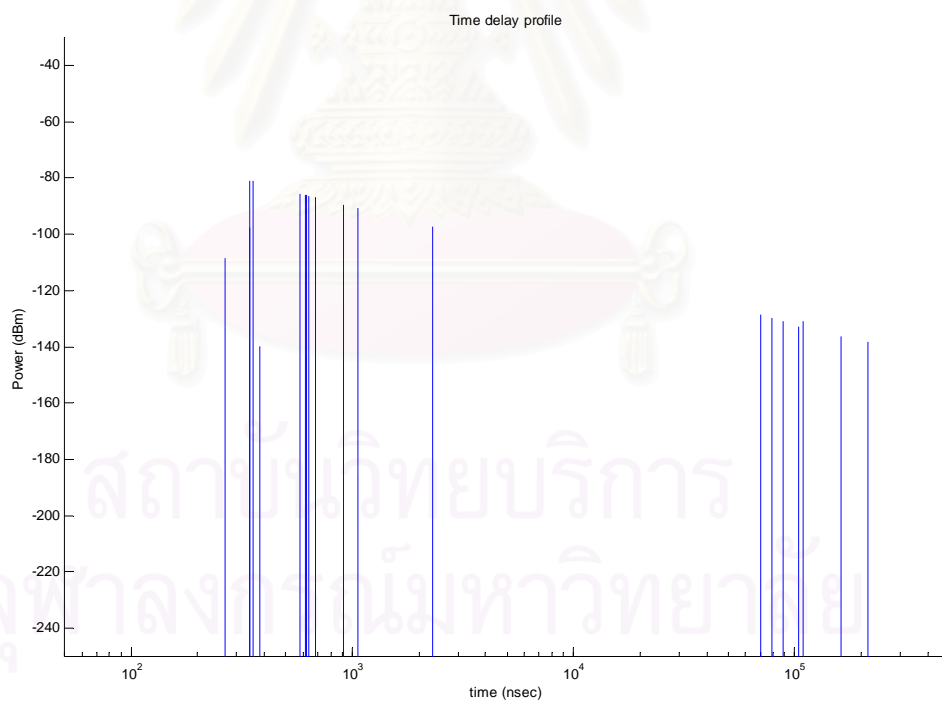
เมื่อ d คือ ระยะทางทั้งหมดที่รังสีเดินทางจากสายอากาศส่งมาถึงสายอากาศรับ

c คือ อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

เมื่อพิจารณาค่าแห่งของสถานีเคลื่อนที่ที่เวลาใดๆ รังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่จะมีลักษณะเป็นสัญญาณพหุวิถี รังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับแต่ละรังสีจะมีกำลังไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับรอยทางเดินของรังสีและกลไกการแพร่กระจายคลื่นที่ก่อให้เกิดรังสีนั้น ในกรณีที่สถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ในบริเวณที่มีรังสีตรงพุ่งจากสถานีฐานเข้าสู่สายอากาศรับ (line of sight, LOS) กำลังสัญญาณของรังสีตรงจะมีค่ามากที่สุดและรังสีนี้จะมีเวลาประวิงน้อยที่สุด แต่ถ้าสถานีเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณที่เป็นเขตเงารังสีตรงจากสถานีฐานจะถูกบดบังจากสิ่งแวดล้อม (non-line of sight, NLOS) รังสีที่มีกำลังสัญญาณสูงสุดและรังสีที่มีเวลาประวิงน้อยที่สุดอาจไม่ใช่รังสีเดียวกันขึ้นอยู่กับกลไกการแพร่กระจายคลื่นและระยะทางที่รังสีเคลื่อนที่ก่อนเข้าสู่สายอากาศรับ เช่น รังสีจากการสะท้อนอาจมีเวลาประวิงมากกว่ารังสีที่เกิดจากการเลี้ยวเบนเนื่องจากรังสีสะท้อนอาจเกิดการสะท้อนหลายครั้งทำให้เดินทางด้วยระยะทางที่ไกลกว่าแต่การลดทอนของกำลังสัญญาณของรังสีสะท้อนอาจมีค่าน้อยกว่าทำให้รังสีสะท้อนมีกำลังคลื่นมากกว่ารังสีเลี้ยวเบน เป็นต้น ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงของสัญญาณพหุวิถีแสดงดังรูปที่ 4.2



(ก) กรณีมีรังสีตรงจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่



(ข) กรณีไม่มีรังสีตรงจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงของสัญญาณพหุวิถีในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อทราบการกระจายเวลาประวิงของสัญญาณพหุวิถี จะคำนวณเวลาประวิงเฉลี่ย (\bar{t}_d) ได้จาก

$$\bar{t}_d = \sum_{i=1}^N \frac{t_{di}}{N} \quad (4.3)$$

และจะสามารถคำนวณค่าการกระจายเวลาประวิงได้จาก [11]

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N (t_{di} - \bar{t}_d)^2} \quad (4.4)$$

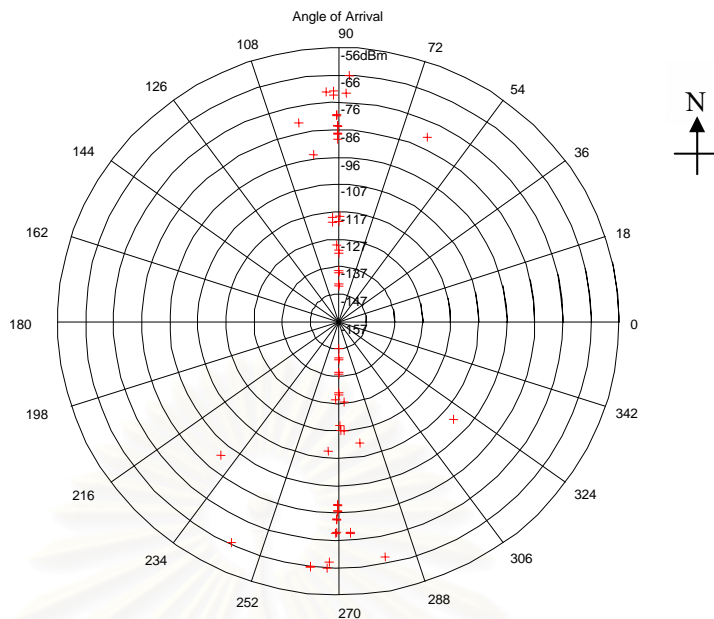
เมื่อทราบค่าการกระจายเวลาประวิงจะสามารถลดการเกิดการรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ (intersymbol interference, ISI) โดยการกำหนดให้อัตราการส่งสัญญาณ (signaling rate) มีค่าน้อยกว่า Δ^{-1} มากๆ [11] ค่าการกระจายเวลาประวิงของคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมแบบต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าการกระจายเวลาประวิงของคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมแบบต่างๆ

เมื่อแพร่กระจายใน	ค่าการกระจายเวลาประวิง (Δ , μs)
อาคาร	< 0.1
ที่โล่ง	< 0.2
เขตชานเมือง	0.5
เขตเมือง	3

การหามุมการมาถึงของคลื่น

การพิจารณาคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศส่งเป็นรังสี รังสีแต่ละรังสีที่แพร่กระจายออกไปและพุ่งเข้าสู่สายอากาศรับจะเดินทางในอากาศว่างตามกลไกการแพร่กระจายคลื่นทำให้รังสีจากสายอากาศส่งสามารถเดินทางมาถึงสายอากาศรับ การติดตามรอยทางเดินของรังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับตามกลไกการแพร่กระจายคลื่นนี้จะทำให้ทราบรอยทางเดินและทิศทางของรังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับ เมื่อนำข้อมูลกำลังสัญญาณและมุมของการมาถึงของรังสีแต่ละรังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับมาสร้างแผนภูมิดังรูปที่ 4.3 จะทำให้ทราบทิศทางที่มีรังสีพุ่งเข้าสู่สายอากาศรับมากและทิศที่เป็นจุดอับสัญญาณเนื่องจากไม่มีรังสีพุ่งเข้าสู่สายอากาศรับซึ่งนำไปใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหการเกิดจุดอับสัญญาณได้



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างแผนภูมิแสดงมุมของการมาถึงของรังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับของสถานีรับ
ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้พิกัดมุมบนแผนภูมิแสดงมุมของการมาถึงของคลื่นบน
ระนาบระดับ อ้างอิงกับทิศต่างๆดังนี้ ทิศตะวันออกอยู่ที่มุม 0° ทิศเหนืออยู่ที่มุม 90° ทิศตะวันตกอยู่ที่
มุม 180° และทิศใต้อยู่ที่มุม 270° ส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ของสถานีเคลื่อนที่จะอยู่ในทิศทางของ
มุม ϕ ใดๆ

เมื่อทราบการกระจายเวลาประวิงและมุมของการมาถึงของคลื่น สามารถนำค่าปัจจัยทั้งสองนี้
ไปวิเคราะห์ปัญหาปรากฏการณ์จางหาย (fading phenomena) [16] และหาอัตราการผลิตของข้อมูล
(bit error rate, BER) [17] ได้ ทำให้สามารถนำผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไปใช้ในการ
การแก้ไขปัญหาและวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่ได้ดียิ่งขึ้น หัวข้อต่อไปจะนำเสนอแผนภูมิแสดง
กำลังคลื่น ค่าการกระจายเวลาประวิง และมุมการมาถึงของคลื่นที่ได้จากการคำนวณในบริเวณคณะ
วิศวกรรมศาสตร์และบริเวณศาลาพระเกี้ยว ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริเวณถนนอังรีดูนังต์
เช่นเดียวกับผลการทดลองในบทที่ 3

ผลการคำนวณ

บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

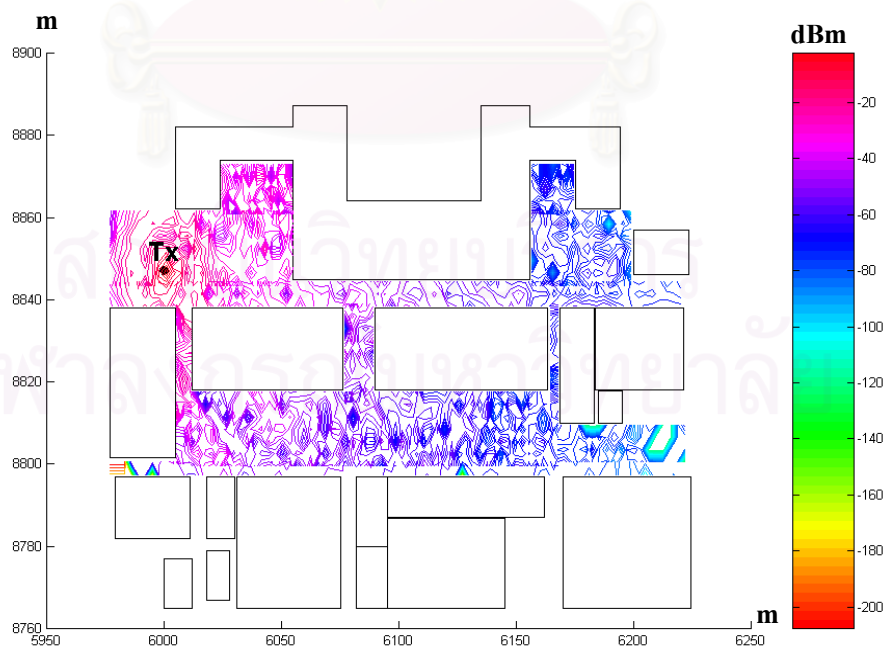
การพิจารณาการกระจายกำลังคลื่น การกระจายเวลาประวิง และมุมของการมาถึงของคลื่น บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจะคำนวณโดยตั้งสถานีฐานในกรณี ENG2, ENG3 และ ENG4 ซึ่งข้อมูลการตั้งสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่แสดงดังตารางที่ 3.1 ต่อไปจะเป็นผลการคำนวณค่าปัจจัยในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แผนภูมิแสดงกำลังคลื่น

แผนภูมิแสดงกำลังคลื่นบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 ค่าความสามารถครอบคลุมในกรณีที่สถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆแสดงในตารางที่ 4.2

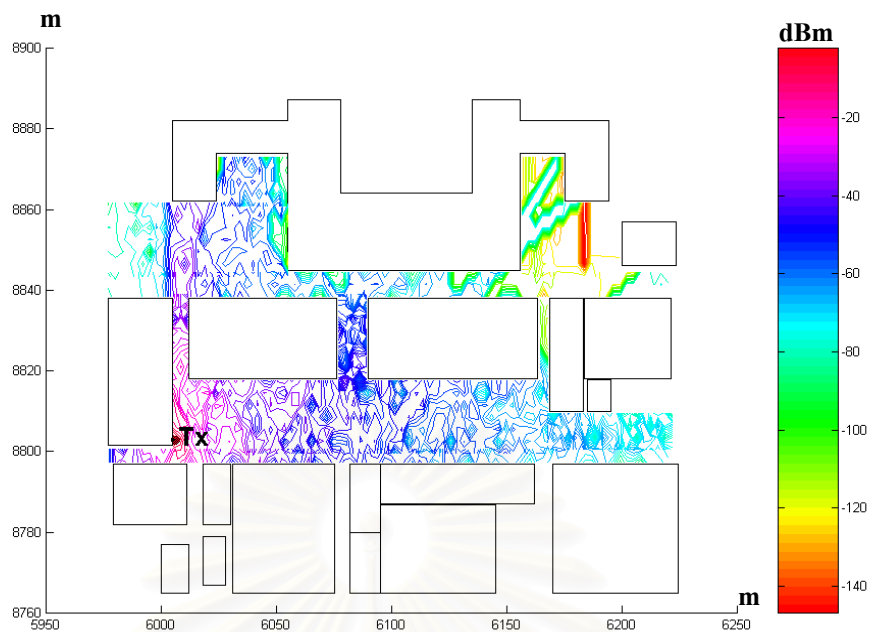
ตารางที่ 4.2 ค่าความสามารถครอบคลุม (C) เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณี	จำนวนจุดทดสอบทั้งหมด	จำนวนจุดทดสอบที่มีระดับสัญญาณสูงกว่าระดับอ้างอิง	C (%)
ENG2	1346	1282	95.24
ENG3	1346	1128	83.80
ENG4	1346	1267	94.13



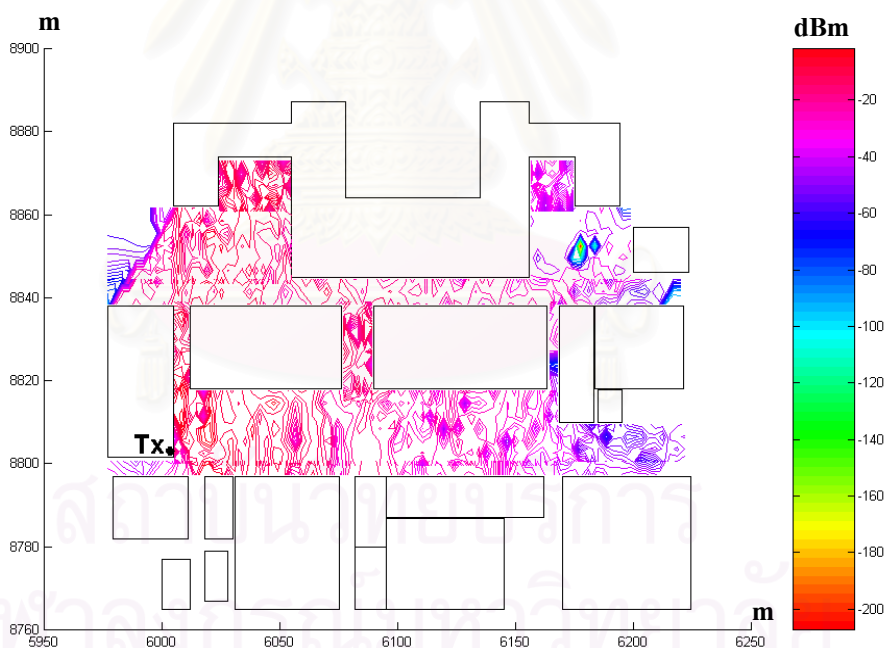
รูปที่ 4.4 การกระจายกำลังคลื่นบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในกรณี

ENG2



รูปที่ 4.5 การกระจายกำลังคลื่นบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในกรณี

ENG3



รูปที่ 4.6 การกระจายกำลังคลื่นบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในกรณี

ENG4

การกระจายกำลังคลื่นในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จะพบว่า เมื่อตั้งสถานีฐานในกรณี ENG2 และ ENG4 ค่าความสามารถครอบคลุมที่คำนวณได้จะมีค่าประมาณ 94 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับแผนภูมิการกระจายกำลังคลื่นในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.6 ส่วนใน

กรณี ENG3 ความสามารถครอบคลุมมีค่าต่ำกว่ากรณี ENG2 และ ENG4 เนื่องจากบริเวณที่ตั้งสถานีฐานในกรณี ENG3 คลื่นที่แพร่กระจายไปถึงบริเวณด้านหน้าศูนย์คอมพิวเตอร์และบริเวณลานระหว่างอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 3 และอาคาร อรุณ สรเทศน์ มีกำลังสัญญาณต่ำ เพราะคลื่นแพร่กระจายจากถนนด้านหลังอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 และอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 2 ไปยังถนนด้านหน้าอาคารทั้งสองได้น้อยเนื่องจากมีสภาพความเป็นโครงสร้างนำคลื่นของผนังอาคารเวดล้อมมีค่าน้อย คลื่นที่มีกำลังสูงจึงไม่สามารถแพร่กระจายไปยังบริเวณที่เป็นจุดบอดสัญญาณได้

รูปที่ 4.4 สถานีฐานตั้งอยู่ด้านหน้าของอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า การแพร่กระจายของคลื่นจะมีลักษณะเหมือนการแพร่กระจายของคลื่นในโครงสร้างนำคลื่นเนื่องจากสถานีฐานมีความสูงน้อยกว่าอาคารโดยรอบมาก คลื่นจึงแพร่กระจายไปตามถนนระหว่างอาคารโดยการสะท้อน ผลของคลื่นเลี้ยวเบนจะมีค่าน้อยแต่ในบริเวณที่ห่างไกลสถานีฐานออกไปมากๆและอยู่ในบริเวณเขตเงากำลังสัญญาณที่รับได้จะมาจากคลื่นเลี้ยวเบนร่วมกับคลื่นสะท้อนที่มีอันดับสูง จุดบอดสัญญาณที่เกิดขึ้นจะพบในบริเวณที่เป็นบริเวณเขตเงาที่อยู่ห่างไกลเนื่องจากกำลังของคลื่นสะท้อนมีค่าลดลงมากจากการสะท้อนหลายครั้งและกำลังของคลื่นเลี้ยวเบนมีค่าน้อยเนื่องจากสูญเสียในการเดินทางเป็นระยะทางไกล จุดบอดสัญญาณที่ได้จากการคำนวณจะอยู่บริเวณหลังอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและบริเวณระหว่างอาคารกิจการนิสิตและอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 4 ซึ่งเป็นบริเวณเขตเงาและอยู่ห่างไกลจากสถานีฐานกำลังสัญญาณเนื่องจากคลื่นสะท้อนและคลื่นเลี้ยวเบนจึงมีค่าน้อย

รูปที่ 4.5 สถานีฐานตั้งอยู่ด้านหลังอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ความสูงของสถานีฐานน้อยกว่าความสูงของอาคารโดยรอบ การแพร่กระจายของคลื่นจึงมีลักษณะคล้ายการแพร่กระจายของคลื่นในโครงสร้างนำคลื่นเช่นเดียวกับรูปที่ 4.4 แต่สภาพความเป็นโครงสร้างนำคลื่นของผนังอาคารเวดล้อมสถานีฐานในกรณี ENG3 มีต่ำกว่าในกรณี ENG2 เพราะการเรียงตัวของผนังอาคารเวดล้อมไม่เอื้ออำนวยต่อการแพร่กระจายของรังสีสะท้อนและรังสีเลี้ยวเบนจึงพบจุดบอดสัญญาณเป็นบริเวณกว้างที่บริเวณลานระหว่างอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 3 และอาคาร อรุณ สรเทศน์ และบริเวณหน้าศูนย์คอมพิวเตอร์คณะวิศวกรรมศาสตร์ ทำให้ค่าความสามารถครอบคลุมมีค่าเพียง 83.80 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.6 สถานีฐานตั้งอยู่บนชั้นดาดฟ้าของอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ความสูงของสถานีฐานมีค่ามากกว่าอาคารโดยรอบ คลื่นสามารถแพร่กระจายได้เป็นบริเวณกว้างเนื่องจากไม่ถูกบดบังจากอาคารโดยรอบเหมือนกรณีที่สถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคาร คลื่นจะถูกบดบังเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ใกล้ผนังอาคารที่ตั้งสถานีฐานซึ่งเป็นเขตเงาเนื่องมาจากอาคารที่ตั้งสถานีฐานเอง เมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ภายนอกบริเวณของเขตเงาเนื่องจากผนังอาคารเวดล้อม กำลังสัญญาณที่รับได้จะเกิดจากกลไกการแพร่กระจายคลื่นที่มีคลื่นตรงและคลื่นสะท้อนเป็นหลัก ในบริเวณเขตเงากำลังสัญญาณที่รับได้จะมาจากคลื่นสะท้อนที่ผนังอาคารและคลื่นเลี้ยวเบนจากสันแนวตั้ง สันแนวนอน และยอดอาคาร

เมื่อพิจารณาแผนภูมิการกระจายกำลังคลื่นจะพบว่าการกระจายกำลังคลื่นมีค่ามากกว่า -110 dBm โดยทั่วไป ในรูปที่ 4.6 พบจุดบอดสัญญาณบริเวณกลางลานระหว่างอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 3 และ อาคาร อรุณ สรเทศน์ เนื่องจากบริเวณที่เป็นจุดบอดสัญญาณนี้อยู่ในบริเวณเขตเงาและอยู่ห่างจาก สถานีฐาน คลื่นที่มาถึงจะเป็นคลื่นสะท้อนอันดับสูงซึ่งผ่านการสะท้อนหลายครั้งและคลื่นเลี้ยวเบนที่เดินทางมาไกลและอาจเกิดการหักล้างทางวิภาคของสัญญาณทำให้กำลังสัญญาณที่รับได้มีค่าต่ำ

ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับการตั้งสถานีฐานเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่บริการภายในคณะ- วิศวกรรมศาสตร์โดยทั่วถึงคือบริเวณชั้นดาดฟ้าอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า เนื่องจากสามารถทำให้คลื่นแพร่กระจายไปได้โดยทั่วถึงและมีกำลังสัญญาณอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ควรเพิ่มกำลัง ส่งให้มากขึ้นเพื่อให้กำลังของสัญญาณที่ไปถึงบริเวณที่เป็นจุดบอดสัญญาณมีค่าสูงขึ้นหรืออาจ ใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อเพิ่มสัญญาณไปยังบริเวณจุดบอดสัญญาณให้มากขึ้น นอกจากนี้การตั้งสถานี ฐานบนชั้นดาดฟ้ายังไม่บดบังทัศนวิสัยในการมองเห็นและไม่กีดขวางบริเวณที่อยู่อาศัยอีกด้วย

ค่าการกระจายเวลาประวิงและมุมการมาถึงของคลื่น

ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงในแต่ละกรณีของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแสดงดัง รูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 เมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆในรูปที่ 4.7 (ก) รูปที่ 4.8 (ก) และรูปที่ 4.9 (ก) และค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยในแต่ละกรณีของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแสดง ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ย ($\bar{\Delta}$) เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

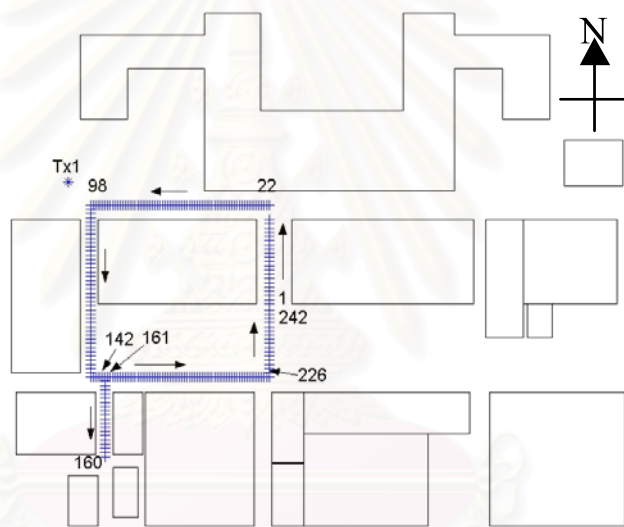
กรณี	ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ย (μ s)
ENG2	0.3843
ENG3	0.3033
ENG4	0.2830

รูปที่ 4.7 (ข) รูปที่ 4.8 (ค) และรูปที่ 4.9 (ค) แสดงตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงในกรณีที่ มีรังสีตรงจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่เมื่อสถานีฐานตั้งอยู่ในกรณี ENG2 ENG3 และ ENG4 ตามลำดับ จะพบว่ารังสีที่มีกำลังสูงที่สุดและมีเวลาประวิงน้อยที่สุดเป็นรังสีตรง รังสีที่เวลาต่อๆมา จะเป็นรังสีพหุวิถีเนื่องมาจากการสะท้อนและการเลี้ยวเบน

เมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณที่เป็นเขตเงา ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงในกรณีที่ไม่มี รังสีตรงจากสถานีฐานในกรณี ENG2 ENG3 และ ENG4 แสดงดังรูปที่ 4.7 (ค) รูปที่ 4.8 (ข) และรูปที่ 4.9

(๗) ตามลำดับ จะพบว่ารังสีที่มีกำลังสูงที่สุดจะไม่ใช่รังสีที่มีเวลาประวิงน้อยที่สุดเนื่องมาจากรังสีนั้นอาจเกิดจากการสะท้อนทำให้ต้องเดินทางเป็นระยะทางไกลจึงมีเวลาประวิงมากแต่เมื่อเทียบกับสัญญาณอื่นอาจมีการลดทอนของสัญญาณน้อยกว่า สอดคล้องกับกลไกการแพร่กระจายของสัญญาณพหุวิถีที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่ซึ่งอยู่ในบริเวณเขตเงา

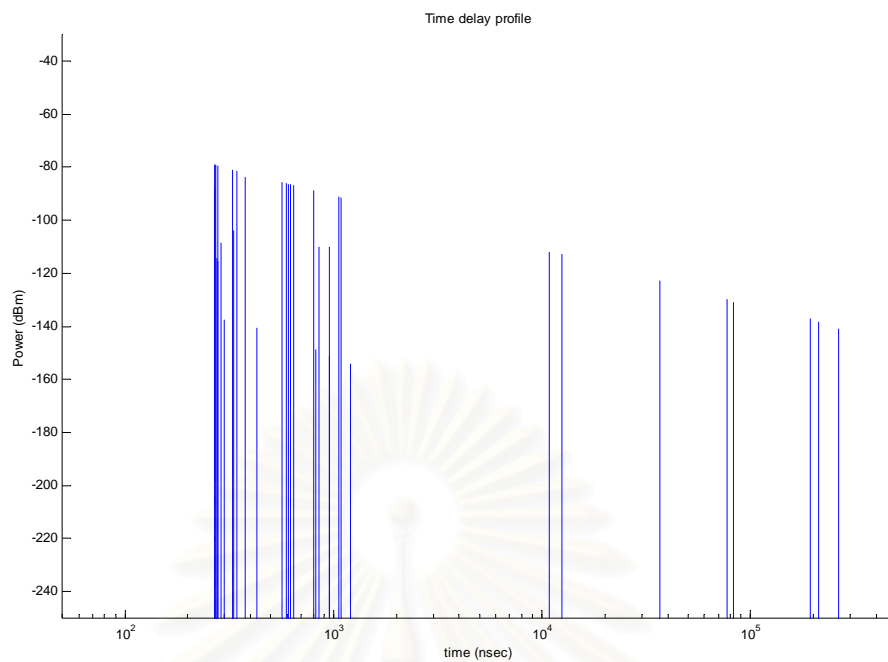
ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของกรณี ENG2 ENG3 และ ENG4 แสดงดังตารางที่ 4.3 จะพบว่าทั้งสามกรณีมีค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยใกล้เคียงกันและสอดคล้องกับตารางที่ 4.1 ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยในตารางที่ 4.3 มีค่าน้อยกว่าค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยในเขตเมืองในตารางที่ 4.1 เนื่องจากบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์มีพื้นที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับพื้นที่เขตเมืองในย่านธุรกิจ รังสีจึงเดินทางเป็นระยะทางไม่มากทำให้เสียเวลาในการเดินทางจากสายอากาศส่งมายังสายอากาศรับไม่มาก ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยจึงมีค่าน้อย



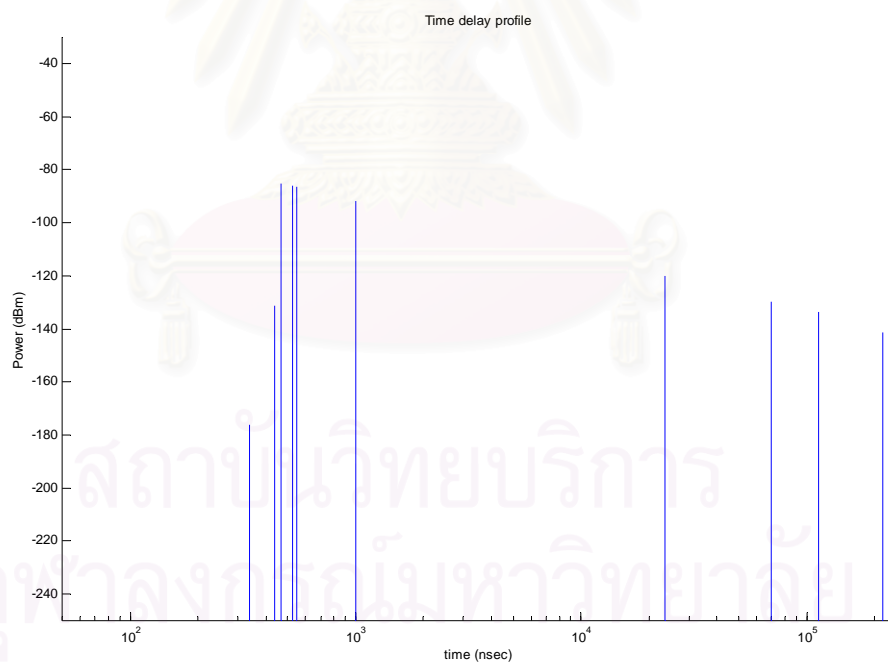
(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG2

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

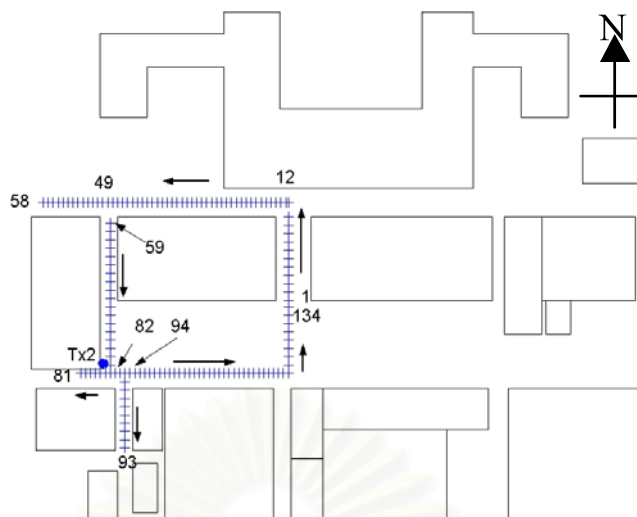


(ข) ตำแหน่งที่ 22

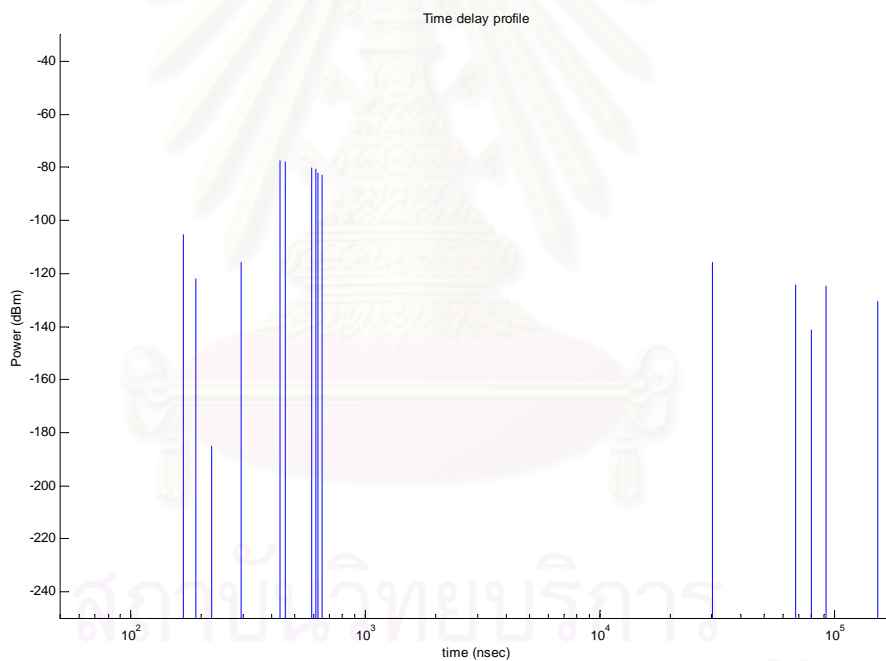


(ค) ตำแหน่งที่ 220

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG2 (ต่อ)

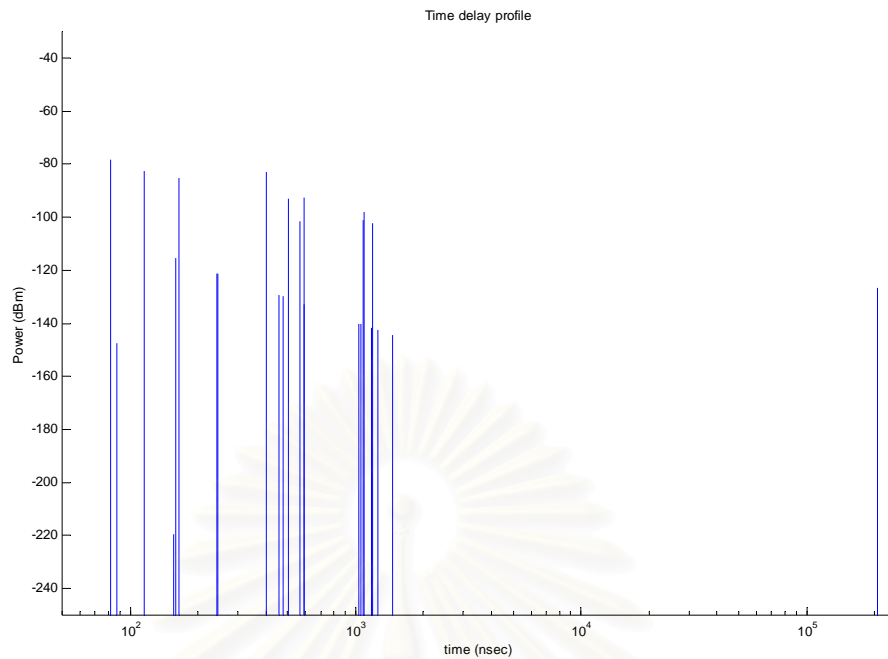


(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG3



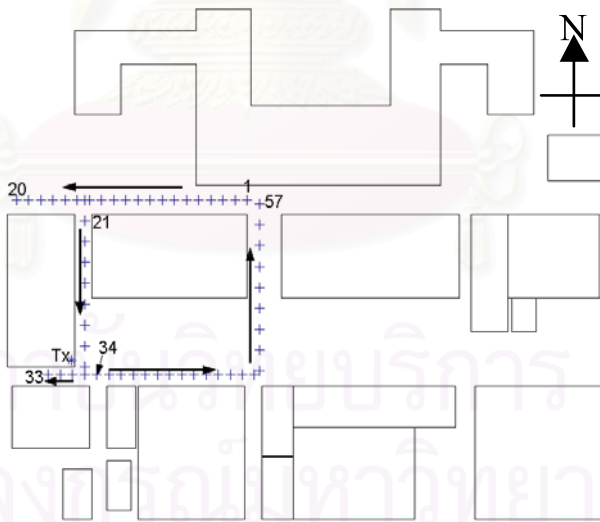
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
(ข) ตำแหน่งที่ 40

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG3



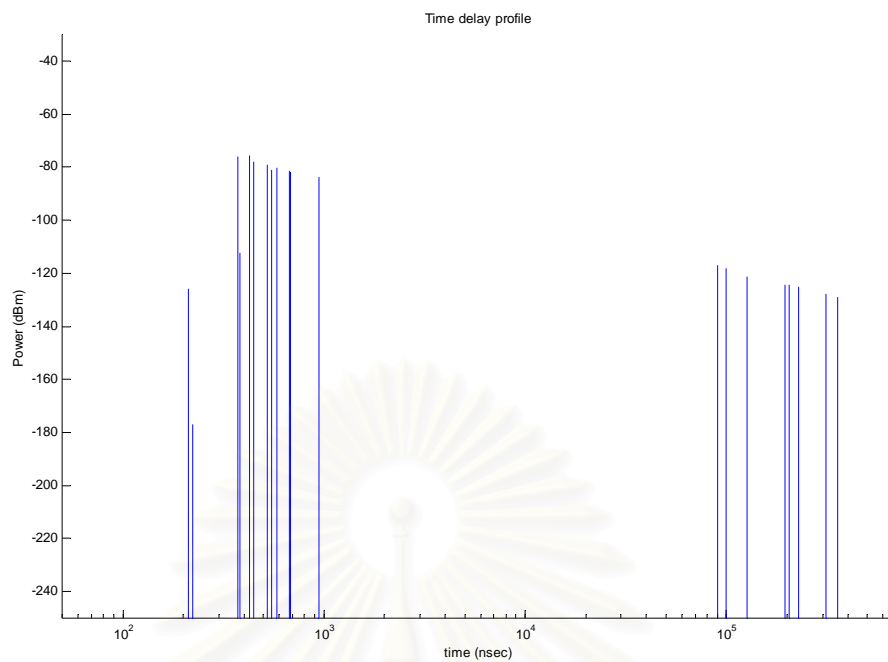
(ค) ตำแหน่งที่ 82

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG3 (ต่อ)

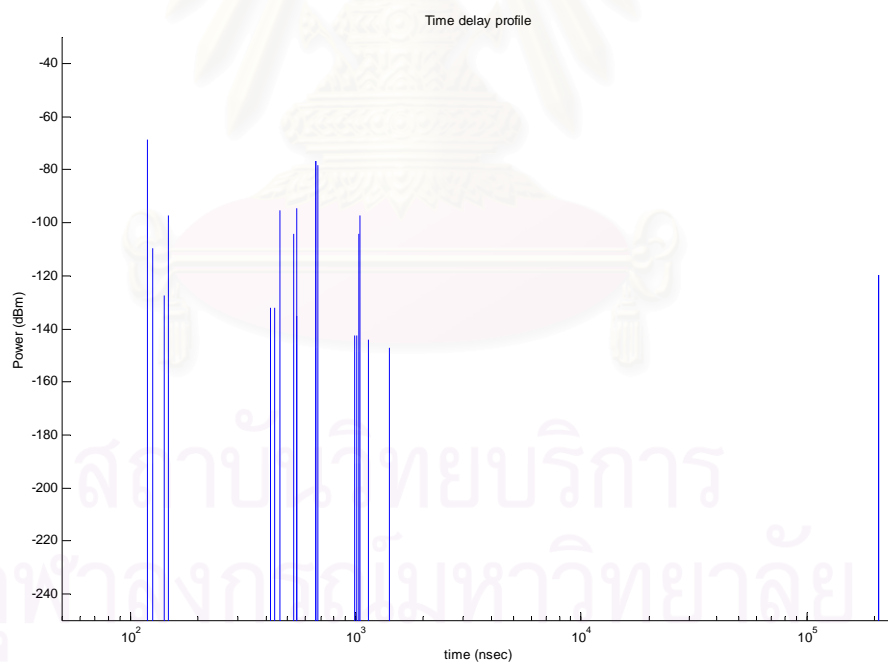


(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีฐานในการทดลองวัดสัญญาณกรณี ENG4

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG4



(ข) ตำแหน่งที่ 9

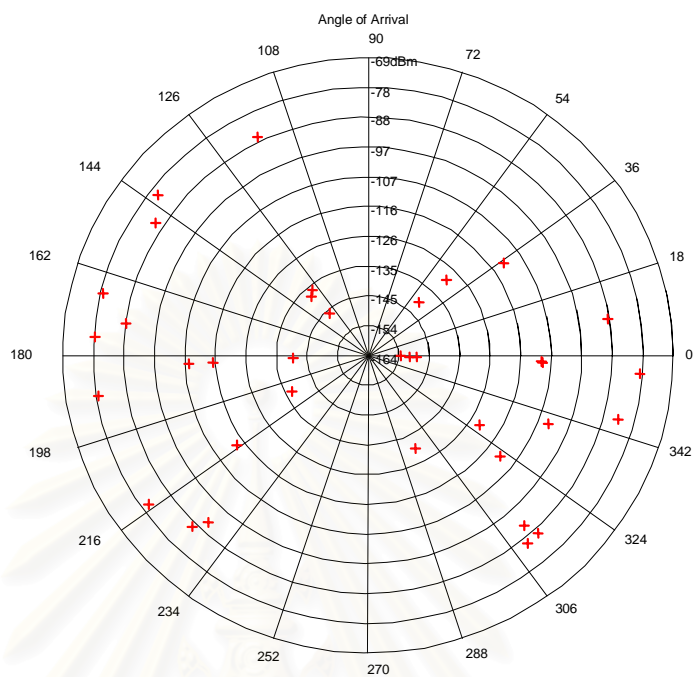


(ค) ตำแหน่งที่ 36

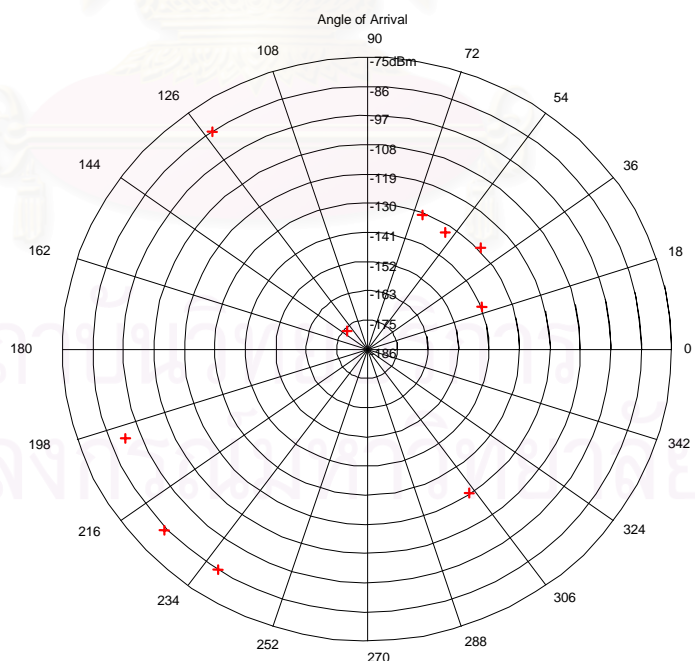
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG4 (ต่อ)

ตัวอย่างมุมการมาถึงคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆในรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 แสดงดังรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่

4.12

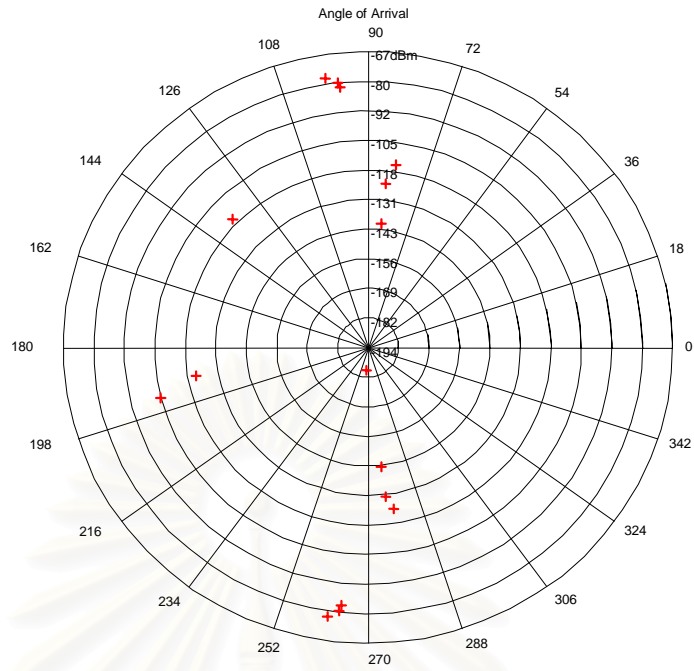


(ก) ตำแหน่งที่ 22

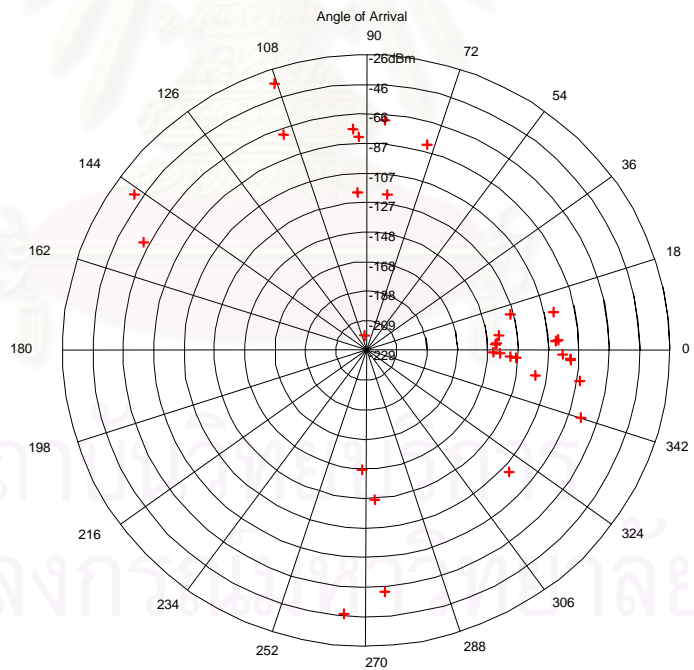


(ข) ตำแหน่งที่ 220

รูปที่ 4.10 ตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG2

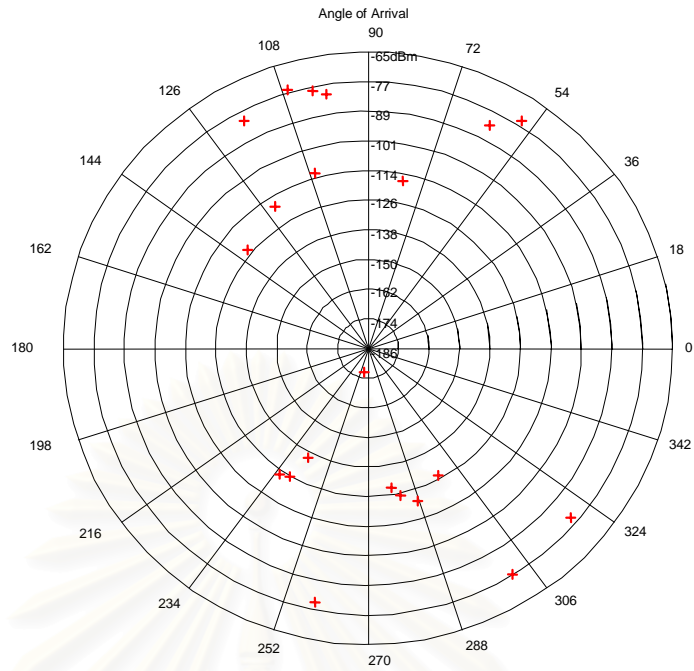


(ก) ตำแหน่งที่ 40

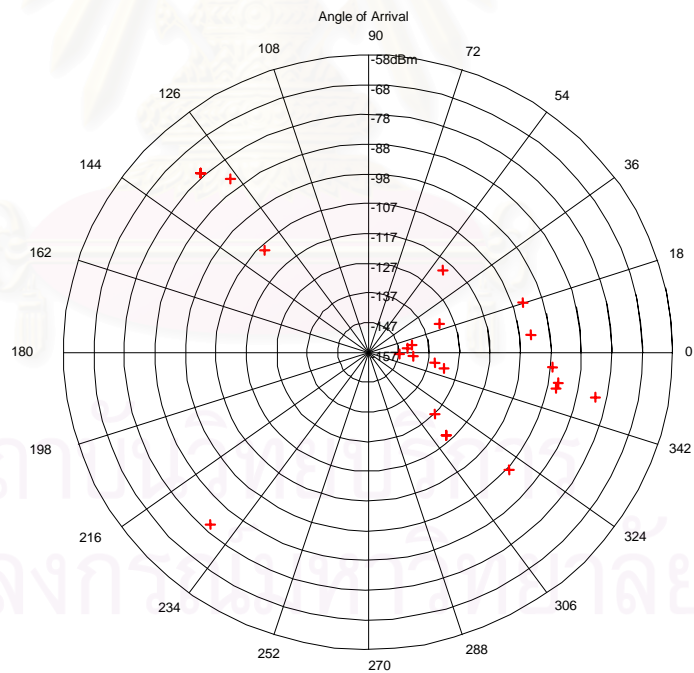


(ข) ตำแหน่งที่ 82

รูปที่ 4.11 ตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG3



(ก) ตำแหน่งที่ 9



(ข) ตำแหน่งที่ 36

รูปที่ 4.12 ตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี ENG4

รูปที่ 4.10 รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นในกรณี ENG2 ENG3 และ ENG4 ซึ่งเมื่อพิจารณาดำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่และสถานีฐานจะพบว่ามุมการมาถึงของคลื่นสอดคล้องกับตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ ตำแหน่งของสถานีฐาน และสิ่งแวดล้อมโดยรอบ รูปที่ 4.10 (ก) สถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งที่ 22 และกำลังเคลื่อนที่ไปทางทิศมุม 180° จะมีรังสีตรงเข้ามาในทิศมุม 176° สอดคล้องกับทิศทางที่ตั้งสถานีฐาน รังสีอื่นๆที่พุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่จะเกิดจากการสะท้อนและเลี้ยวเบนจากอาคารโดยรอบ

รูปที่ 4.10 (ข) สถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งที่ 220 และกำลังเคลื่อนที่ไปในทิศมุม 0° สถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ในบริเวณเขตเงา รังสีที่มาถึงสายอากาศรับจะมาจากการนำคลื่นผ่านถนนระหว่างอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 และถนนระหว่างอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 และอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 2 รังสีที่พุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่จึงอยู่ในทิศทาง $18^\circ-72^\circ$ และ $180^\circ\pm 72^\circ$

รูปที่ 4.11 (ก) สถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งที่ 40 และกำลังเคลื่อนที่ไปในทิศมุม 180° สถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ในบริเวณขอบเขตเงารังสีที่มาถึงสายอากาศรับจะมาจากการนำคลื่นผ่านถนนระหว่างอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและถนนระหว่างอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 และอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 2 รังสีที่พุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่จึงอยู่ในทิศทาง $\pm 82^\circ$ และ $180^\circ\pm 82^\circ$

รูปที่ 4.11 (ข) สถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งที่ 82 และกำลังเคลื่อนที่ไปในทิศมุม 0° สถานีฐานอยู่ทางทิศ 108° จึงมีรังสีตรงพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ในทิศมุม 108° และมีรังสีจากสัญญาณพหุวิถีพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่จากการสะท้อนและการเลี้ยวเบนจากผนังอาคารทางด้านข้างและด้านหน้าของทิศทางการเคลื่อนที่ของสถานีเคลื่อนที่ทางทิศมุม 90° , 270° และ 0° ตามลำดับ

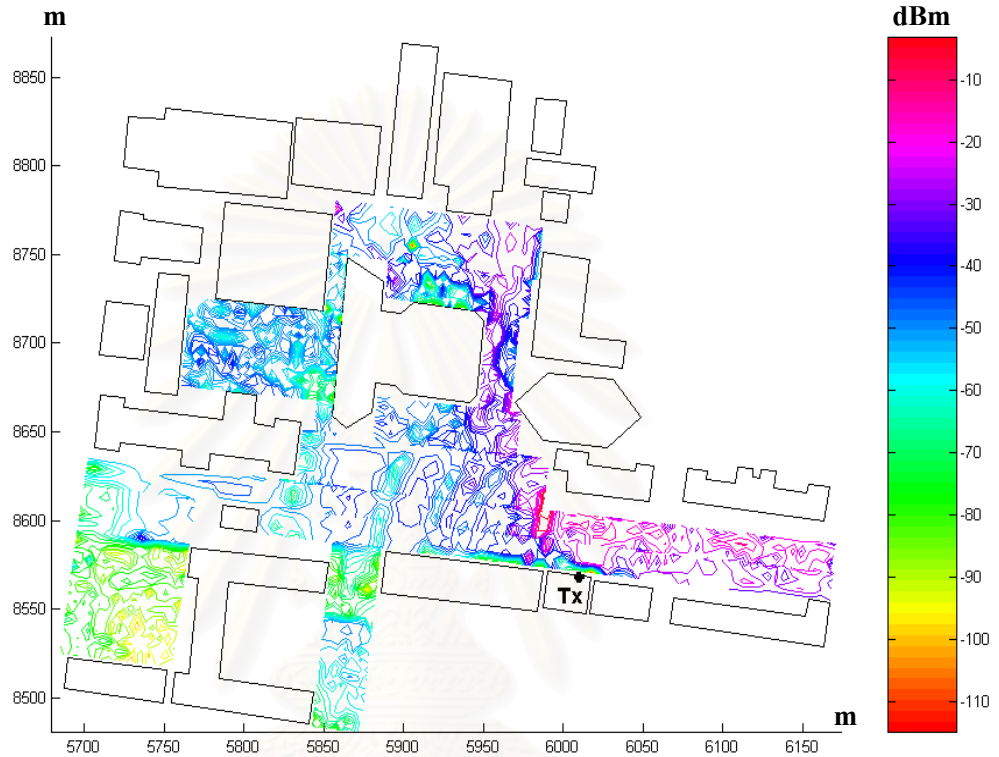
รูปที่ 4.12 (ก) สถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งที่ 9 และกำลังเคลื่อนที่ไปในทิศมุม 180° สถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ในเขตเงาของอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 รังสีที่มาถึงจึงเกิดจากการสะท้อนผนังของอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 3 แล้วเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่หรือสะท้อนต่อไปยังผนังของอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 แล้วจึงเข้าสู่สถานีฐานในทิศมุม $90^\circ\pm 36^\circ$ และ $270^\circ\pm 36^\circ$ ตามลำดับ

รูปที่ 4.12 (ข) สถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งที่ 36 และกำลังเคลื่อนที่ไปในทิศมุม 0° สถานีฐานอยู่ทางทิศ 130° จึงมีรังสีตรงพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ในทิศมุม 130° และมีรังสีจากสัญญาณพหุวิถีพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่จากการสะท้อนและเลี้ยวเบนจากผนังอาคารทางทิศมุม $\pm 54^\circ$ ทิศมุม 130° ถึง 136° และทิศมุม 230°

บริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกระจายกำลังคลื่น การกระจายเวลาประวิง และมุมการมาถึงของคลื่นบริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คำนวณโดยใช้สถานีฐานกรณี CHU1-1 ในตารางที่ 3.2 มีดังต่อไปนี้

แผนภูมิแสดงกำลังคลื่น



รูปที่ 4.13 การกระจายกำลังคลื่นบริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในกรณี CHU1-1

แผนภูมิแสดงกำลังคลื่นบริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในกรณี CHU1-1 แสดงดังรูปที่ 4.13 ค่าความสามารถครอบคลุมแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถครอบคลุม (C) บริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เมื่อสถานีฐานคือ CHU1-1

กรณี	จำนวนจุดทดสอบทั้งหมด	จำนวนจุดทดสอบที่มีระดับสัญญาณสูงกว่าระดับอ้างอิง	C (%)
CHU1-1	2317	2315	99.91

จากตารางที่ 4.5 ค่าความสามารถครอบคลุมของสถานีฐาน CHU1-1 เมื่อพิจารณาให้บริเวณรอบศาลาพระแก้วเป็นพื้นที่บริการมีค่าสูงถึง 99.91% สอดคล้องกับแผนภูมิแสดงกำลังคลื่นในรูป

ที่ 4.13 จะเห็นได้ว่ากำลังสัญญาณที่แพร่กระจายในพื้นที่บริการโดยทั่วไปมีค่าสูงกว่า -110 dBm แสดงว่าตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐาน ความสูงและมุมก้มของสายอากาศส่งได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมจึงเกือบจะไม่พบจุดที่มีกำลังสัญญาณต่ำกว่าที่ -110 dBm เลย

ค่าการกระจายเวลาประวิงและมุมการมาถึงของคลื่น

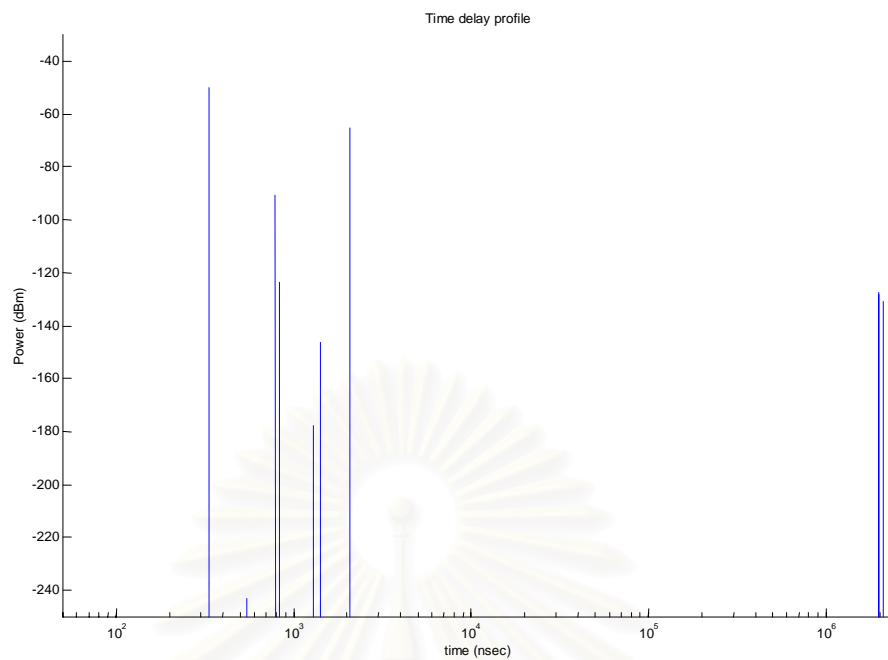
ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ ในกรณี CHU1-1 แสดงดังรูปที่ 4.14 เมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆในรูปที่ 4.14 (ก) ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแสดงดังตารางที่ 4.5 และตัวอย่างมุมการมาถึงคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.15



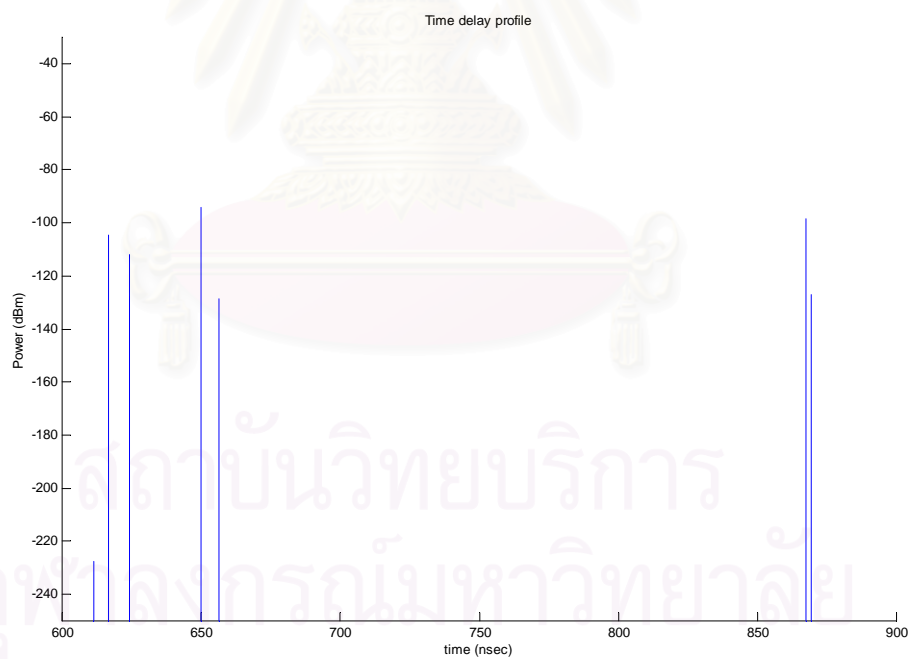
(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ในการทดลองวัดสัญญาณกรณี CHU1-1

(ภาพขยายอ้างอิงจากแผนที่มาตราส่วน 1:4000)

รูปที่ 4.14 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี CHU1-1



(ข) ตำแหน่งที่ 49

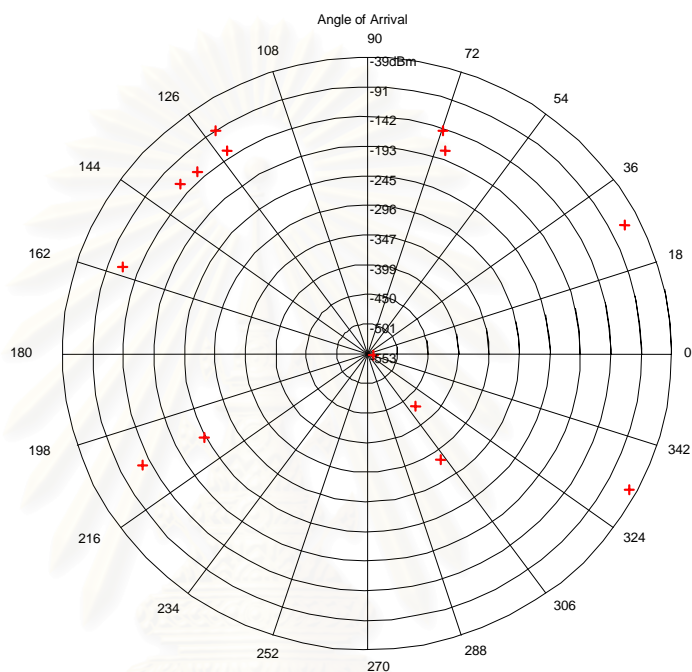


(ค) ตำแหน่งที่ 63

รูปที่ 4.14 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี CHU1-1 (ต่อ)

ตารางที่ 4.5 ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ย ($\bar{\Delta}$) เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ
บริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

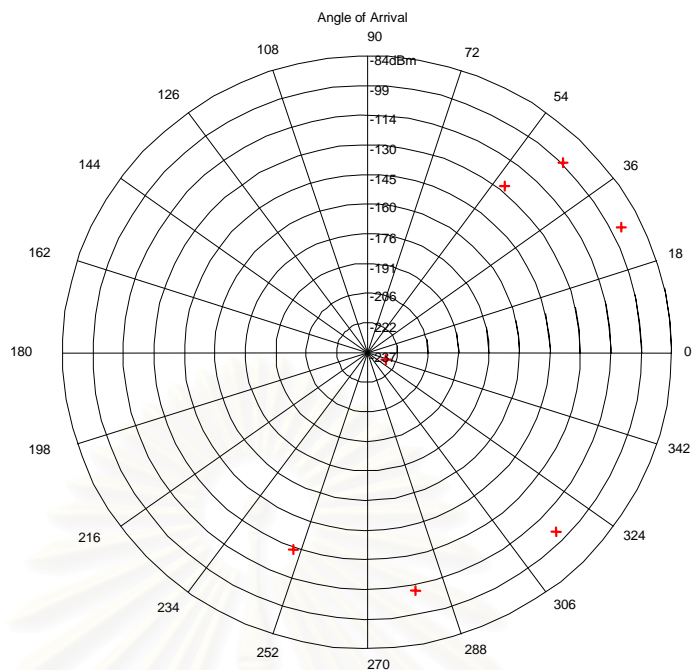
กรณี	ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ย (μs)
CHU1-1	0.3133



(ก) ตำแหน่งที่ 49

รูปที่ 4.15 ตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี CHU1-1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข) ตำแหน่งที่ 63

รูปที่ 4.15 ตัวอย่างมุมการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี CHU1-1 (ต่อ)

รูปที่ 4.14 (ข) แสดงการกระจายเวลาประวิงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งที่ 49 สถานีเคลื่อนที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บริเวณหน้าคณะเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สามารถมองเห็นสายอากาศส่งของสถานีฐานได้โดยไม่ถูกบดบังจากอาคารจึงมีรังสีตรงพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ ทางทิศทางมุม 340.7° โดยขณะนั้นสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งที่ E665922.62 N1518598.60 เมื่อเทียบกับตำแหน่งของสถานีฐานในตารางที่ 3.2 จะได้ทิศทางที่รังสีตรงพุ่งเข้ามาอยู่ในทิศทางมุม 340.7° ตรงกับผลการคำนวณในรูปที่ 4.15 (ก)

ส่วนรูปที่ 4.14 (ค) แสดงการกระจายเวลาประวิงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งที่ 63 เป็นตำแหน่งที่สถานีเคลื่อนที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บริเวณหน้าสระว่ายน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งเป็นบริเวณเขตเงาจึงไม่มีรังสีตรงพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ สังเกตได้จากรังสีที่มีกำลังสัญญาณแรงที่สุดไม่ใช่รังสีที่มีเวลาประวิงน้อยที่สุด รังสีที่พุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ที่มีกำลังแรงที่สุดจึงเกิดจากการสะท้อนและพุ่งเข้าในทิศทาง 28° ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ข)

ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณเมื่อสถานีฐานคือ CHU1-1 แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณมีค่าเท่ากับ $0.3133 \mu\text{s}$ ใกล้เคียงกับค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์และสอดคล้องกับค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณในเขตเมืองในตารางที่ 4.1

บริเวณถนนอังรีดูนังต์

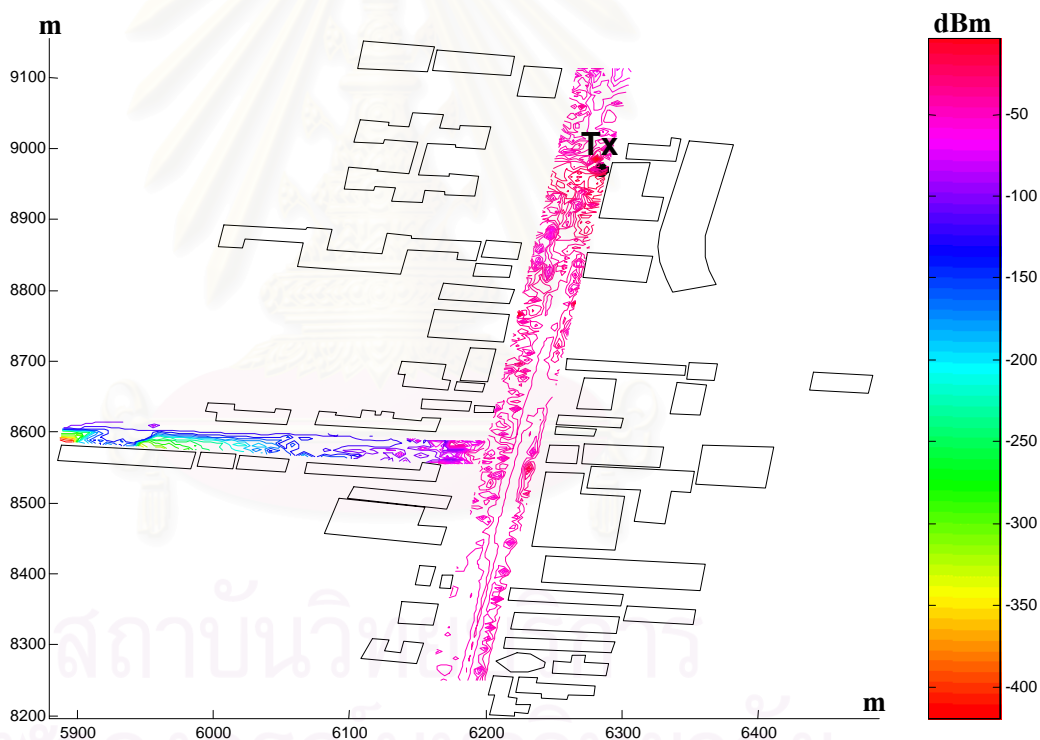
การกระจายกำลังคลื่น การกระจายเวลาประวิง และมุมการมาถึงของคลื่นบริเวณถนนอังรีดูนังต์ กำหนดโดยตั้งสถานีฐานกรณี HRDN-1 ในตารางที่ 3.2 มีดังต่อไปนี้

แผนภูมิแสดงกำลังคลื่น

แผนภูมิแสดงกำลังคลื่นบริเวณถนนอังรีดูนังต์ ในกรณี HRDN-1 แสดงดังรูปที่ 4.16 ค่าความสามารถครอบคลุมแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความสามารถครอบคลุม (C) บริเวณถนนอังรีดูนังต์เมื่อสถานีฐานคือ HRDN-1

กรณี	จำนวนจุดทดสอบทั้งหมด	จำนวนจุดทดสอบที่มีระดับสัญญาณสูงกว่าระดับอ้างอิง	C (%)
HRDN-1	2087	1828	87.59



รูปที่ 4.16 การกระจายกำลังคลื่นบริเวณถนนอังรีดูนังต์ ในกรณี HRDN-1

จากตารางที่ 4.7 ค่าความสามารถครอบคลุมของสถานีฐาน HRDN-1 เมื่อพิจารณาให้บริเวณถนนอังรีดูนังต์และถนนทางเข้าด้านคณะรัฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นพื้นที่บริการมีค่าเท่ากับ 87.59% สอดคล้องกับแผนภูมิแสดงกำลังคลื่นในรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่ากำลังสัญญาณที่แพร่กระจายในพื้นที่บริการบนแนวถนนอังรีดูนังต์มีค่าสูงกว่า -110 dBm แต่บริเวณแนวถนน

ทางเข้าด้านคณะรัฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีกำลังสัญญาณที่ต่ำกว่า -110 dBm มาก เนื่องจากสถานีฐาน HRDN นี้ได้ถูกออกแบบเพื่อรองรับการให้บริการเฉพาะบริเวณแนวถนนอังรีดูนังต์เท่านั้น บริเวณที่เหมาะสมในการตั้งสถานีฐานบริเวณนี้ควรอยู่บนอาคารภายในโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์แต่บริเวณภายในโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ไม่สามารถติดตั้งสถานีฐานได้เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจรบกวนอุปกรณ์เครื่องมือแพทย์ได้ ดังนั้นเพื่อให้บริการพื้นที่ภายในโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์และบริเวณโดยรอบจึงต้องตั้งสถานีฐานรอบๆโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ หากพิจารณาพื้นที่บริการเฉพาะบริเวณที่อยู่บนแนวถนนอังรีดูนังต์ จะพบว่าสถานีฐาน HRDN-1 มีค่าประสิทธิภาพพื้นที่ครอบคลุมสูงถึง 99.94% (จำนวนจุดทดสอบที่มีกำลังสัญญาณสูงกว่า -110 dBm เท่ากับ 1630 จุดจากจำนวนจุดทดสอบทั้งหมด 1631 จุด) ดังนั้นสถานีฐาน HRDN-1 ได้รับการออกแบบเพื่อให้สามารถรองรับผู้ใช้บริการบนถนนอังรีดูนังต์ได้เป็นอย่างดี

ค่ากระจายเวลาประวิงและมุมการมาถึงของคลื่น

ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ ในกรณี HRDN-1 แสดงดังรูปที่ 4.17 เมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 4.17 (ก) ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแสดงดังตารางที่ 4.7 และตัวอย่างมุมของการมาถึงคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.7 ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ย ($\bar{\Delta}$) เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ บริเวณถนนอังรีดูนังต์

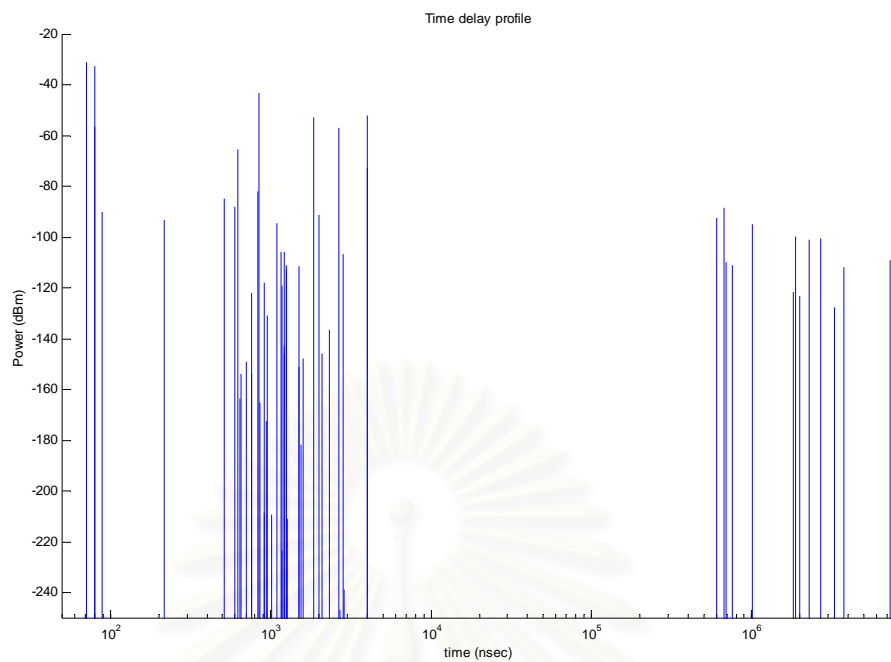
กรณี	ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ย (μs)
HRDN-1	0.5488

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

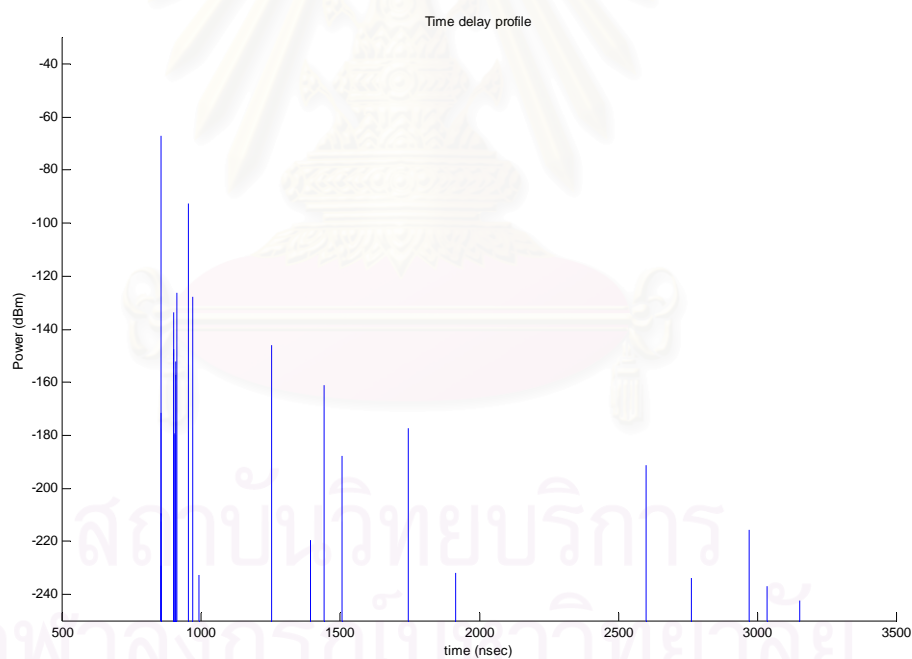


(ก) เส้นทางและตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ในการทดลองวัดสัญญาณกรณี HRDN-1
(ภาพขยายอ้างอิงจากแผนที่มาตราส่วน 1:4000)

รูปที่ 4.17 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี HRDN-1

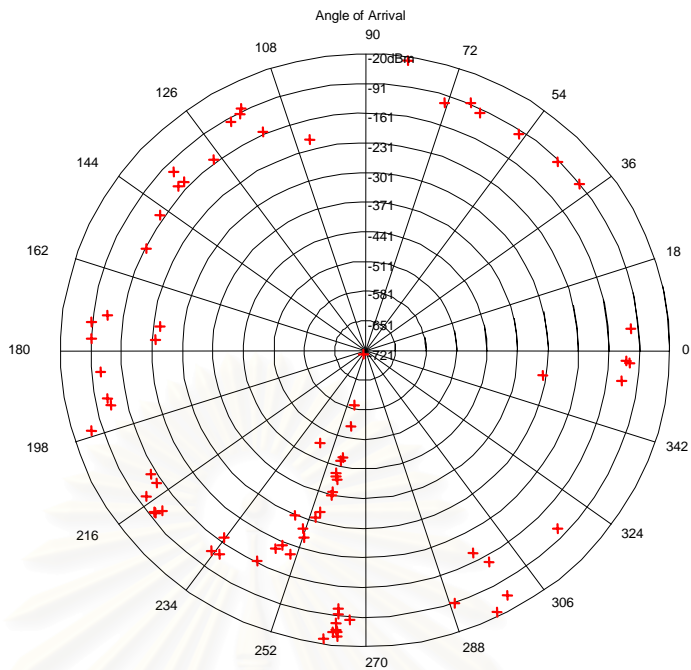


(ข) ตำแหน่งที่ 9

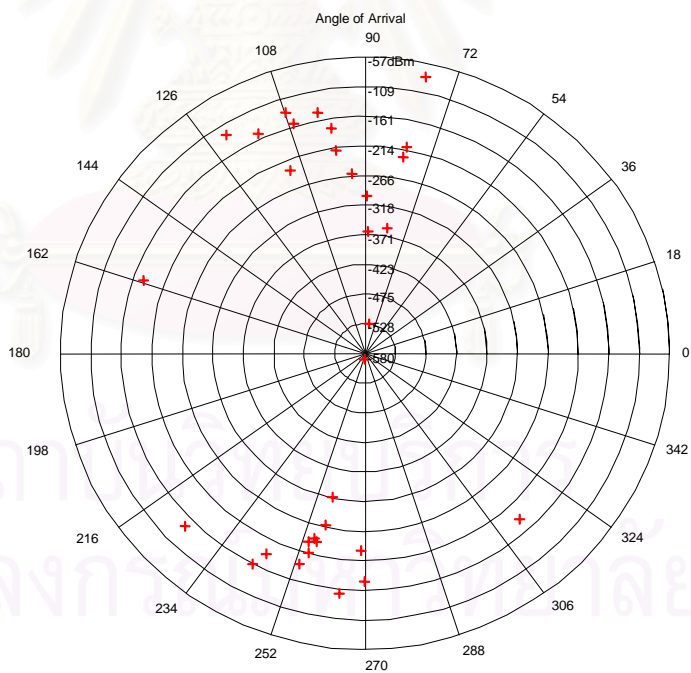


(ค) ตำแหน่งที่ 19

รูปที่ 4.17 ตัวอย่างการกระจายเวลาประวิงเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งต่างๆ กรณี HRDN-1 (ต่อ)



(ก) ตำแหน่งที่ 9



(ข) ตำแหน่งที่ 19

รูปที่ 4.18 ตัวอย่างมุมของการมาถึงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ กรณี HRDN-1

รูปที่ 4.17 (ข) แสดงการกระจายเวลาประวิงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่หยุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ 9 สถานีเคลื่อนที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บริเวณหน้าสนามม้าราชกรีฑาสโมสร เป็นตำแหน่งที่สามารถมองเห็นสายอากาศส่งของสถานีฐานได้โดยไม่ถูกบดบังจากอาคารจึงมีรังสีตรงพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ ทางทิศทางมุม 261.8° โดยขณะนั้นสถานีเคลื่อนที่หยุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ E666278.80 N1518989.40 เมื่อเทียบกับตำแหน่งของสถานีฐานในตารางที่ 3.2 จะได้ทิศทางที่รังสีตรงพุ่งเข้ามาอยู่ในทิศทางมุม 261.8° ตรงกับผลการคำนวณในรูปที่ 4.18 (ก)

ส่วนรูปที่ 4.17 (ค) แสดงการกระจายเวลาประวิงของคลื่นเมื่อสถานีเคลื่อนที่หยุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ 19 เป็นตำแหน่งที่สามารถมองเห็นสายอากาศส่งของสถานีฐานได้โดยไม่ถูกบดบังจากอาคารจึงมีรังสีตรงพุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ ทางทิศทางมุม 81.7° โดยขณะนั้นสถานีเคลื่อนที่หยุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ E666247.91 N1518716.10 เมื่อเทียบกับตำแหน่งของสถานีฐานในตารางที่ 3.2 จะได้ทิศทางที่รังสีตรงพุ่งเข้ามาอยู่ในทิศทางมุม 81.7° ตรงกับผลการคำนวณในรูปที่ 4.18 (ข)

ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณเมื่อสถานีฐานคือ HRDN-1 แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่าค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณมีค่าเท่ากับ $0.5488 \mu s$ มากกว่าค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์และบริเวณรอบศาลาพระเกียรติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื่องจากการค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของกรณีสถานีฐานคือ HRDN-1 เป็นค่าที่คำนวณจากการจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่ให้สถานีเคลื่อนที่เคลื่อนไปบนถนนอังรีดูนังต์ระยะทางประมาณ 200 เมตร คลื่นต้องเดินทางเป็นระยะทางมากกว่าจึงเสียเวลาในการเดินทางมากกว่าบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์และบริเวณรอบศาลาพระเกียรติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลการคำนวณค่าการกระจายเวลาประวิงที่ได้สอดคล้องกับค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณในเขตเมืองในตารางที่ 4.1

สรุป

การจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ตำแหน่งต่างๆในพื้นที่บริการทำให้สามารถสร้างแผนภูมิแสดงการกระจายกำลังคลื่นเพื่อใช้ในการออกแบบติดตั้งสถานีฐานเพื่อให้มีระดับกำลังสัญญาณที่เพียงพอต่อการติดต่อสื่อสารครอบคลุมทุกๆตำแหน่งในพื้นที่บริการ กำลังสัญญาณที่แต่ละตำแหน่งในพื้นที่บริการสามารถนำมาคำนวณค่าความสามารถครอบคลุมของสถานีฐานเพื่อใช้เป็นค่าปัจจัยบอกประสิทธิภาพของการตั้งสถานีฐานได้ นอกจากนี้การพิจารณาค้นคว้าเป็นรังสีทำให้สามารถสร้างแผนภูมิแสดงการกระจายเวลาประวิง เพื่อใช้หาค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณในพื้นที่บริการและสามารถสร้างแผนภูมิมุมการมาถึงของคลื่น ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยและมุมการมาถึงของคลื่นสามารถใช้ในการกำหนดอัตราการใช้สัญญาณและแก้ปัญหาค้นหาจางหายเพื่อปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณให้ดียิ่งขึ้น

ผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการตั้งสถานีฐานในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ควรอยู่บนอาคารสูงและมีกำลังส่งประมาณ 20 dBm จะทำให้การแพร่กระจายของคลื่นสัญญาณเป็นไปได้อย่างทั่วถึง ในบริเวณรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และถนนอังรีดูนังต์ สถานีฐาน CHU1-1 และ HRDN-1 สามารถให้บริการได้อย่างครอบคลุมทุกตำแหน่งในพื้นที่บริการ เนื่องจากมีความสามารถ-ครอบคลุมสูงมาก ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์และบริเวณรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริเวณถนนอังรีดูนังต์ มีค่าอยู่ในขอบเขตของค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยของสัญญาณในบริเวณเขตเมือง ค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าค่าการกระจายเวลาประวิงเฉลี่ยในเขตเมือง เนื่องจากบริเวณที่พิจารณาเป็นพื้นที่บริการมีขนาดไม่กว้างขวางมากนักเมื่อเทียบกับบริเวณเขตเมืองระบุนใน [11]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมืองด้วยกรรมวิธีเชิงรังสีในงานวิจัย [1] ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นทั้งในด้านความถูกต้องแม่นยำของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุและความรวดเร็วในการคำนวณและได้พัฒนาการจับเก็บผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในรูปแบบฐานข้อมูลเชิงรังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่เพื่อให้นำผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไปใช้ช่วยในการออกแบบและวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่

ในด้านความแม่นยำของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ จากการจัดทำฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางที่เป็นอาคารให้มีการจัดเก็บเป็นด้านของอาคารทำให้รูปทรงของอาคารจำลองมีความใกล้เคียงกับอาคารจริงมากขึ้นและเพิ่มสิ่งกีดขวางที่เป็นต้นไม้โดยการสมมุติให้มีส่วนพุ่มเป็นทรงกลมและมีลำต้นเป็นทรงกระบอกขนาดเล็ก เมื่อนำมาใช้ร่วมกับระเบียบวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีที่ใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนและฐานข้อมูลบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นทำให้สามารถคำนวณจุดที่รังสีตกกระทบแล้วสะท้อนหรือเลี้ยวเบนจากอาคาร จากนั้นนำจุดเหล่านี้มาสร้างรอยทางเดินของรังสีโดยการเชื่อมตำแหน่งของสถานีฐาน จุดตกกระทบ จุดสะท้อนหรือจุดเลี้ยวเบน และตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ ทำให้การติดตามรอยทางเดินของรังสีมีความแม่นยำมากกว่าวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีโดยการใช้ระเบียบวิธีปล่อยรังสีทดสอบและทรงกลมจุดรับ พร้อมกันนี้ได้เพิ่มชนิดของรอยทางเดินของรังสีจากงานวิจัย [1] ผลการคำนวณที่ได้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แย่งที่สุดและดีที่สุดเท่ากับ 0.4025 และ 0.9145 ในกรณี ENG4 และ HRDN-1 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เมื่อตัดค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดออกแล้วมีค่าเท่ากับ 0.7263 เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยเมื่อตัดค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดออกแล้วเท่ากับ 0.4433 ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้ยังคงมีความแตกต่างจากผลการวัด อาจเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางซึ่งยังไม่มีการสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางที่เป็นสิ่งก่อสร้างที่ลอยอยู่เหนือพื้นดิน เช่น ทางเชื่อมระหว่างอาคาร รวมทั้งการประมาณพื้นผิวของอาคารให้มีความเรียบและสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกันทุกอาคาร การประมาณรูปทรงของต้นไม้ให้มีลักษณะเป็นทรงกลมเพียงอย่างเดียวและมีค่าลดทอนกำลังคลื่นเท่ากันทั้งหมด ทำให้ลักษณะ

ทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางที่สร้างขึ้นยังมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงจึงทำให้ผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ได้มีความแม่นยำลดลง

ในด้านเวลาที่ใช้ในการคำนวณ การปรับปรุงวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีให้เป็นการติดตามรอยทางเดินของรังสีจากสถานีฐานไปยังจุดที่รังสีตกกระทบแล้วสะท้อนหรือเลี้ยวเบนเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ รังสีจะเดินทางเป็นเส้นตรงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งจนเกิดเป็นรอยทางเดินของรังสีจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่และการสร้างฐานข้อมูลบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นเพื่อช่วยลดเวลาที่ใช้ในการติดตามรอยทางเดินของรังสี ทำให้ใช้เวลาในการติดตามรอยทางเดินของรังสีน้อยลง การจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้เมื่อประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มี CPU แบบ Pentium II 400 MHz หน่วยความจำ 128 MB ในกรณี ENG1 ENG2 ENG3 และ ENG4 มีจุดทดสอบ 57-242 จุด มีอาคารกีดขวาง 18 อาคาร ใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 10-30 นาที และในกรณี CHU1-1 และ HRDN-1 มีจุดทดสอบ 127 จุด และ 41 จุด ตามลำดับ มีอาคารกีดขวางในกรณี CHU1-1 เท่ากับ 22 อาคาร และในกรณี HRDN-1 เท่ากับ 51 อาคาร ใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 30 นาที เทียบกับเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยเครื่องคอมพิวเตอร์สมรรถนะเท่ากันโดยแบบจำลองในงานวิจัย [1] ในกรณีทดสอบเดียวกัน จะใช้เวลาประมาณ 25-100 นาที จะเห็นได้ว่าผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในงานวิจัยนี้สิ้นเปลืองเวลาน้อยลง

การบันทึกข้อมูลรังสีที่พุ่งเข้าสู่สายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่เป็นฐานข้อมูลรังสี ทำให้สามารถนำฐานข้อมูลรังสีที่พุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่มาสร้างเป็นแผนภูมิการกระจายกำลังคลื่น แผนภูมิการกระจายเวลาประวิงและแผนภูมิมุมการมาถึงของคลื่นแล้วหาค่าความสามารถครอบคลุมและค่าการกระจายเวลาประวิง ทำให้สามารถระบุความสามารถในการแพร่กระจายสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่บริการของสถานีฐานที่มีปัจจัยในการติดตั้งต่างกันเพื่อเลือกตำแหน่งที่ตั้งและค่าปัจจัยอื่นๆ ที่เหมาะสมที่สุดในการตั้งสถานีฐานเพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้บริการในพื้นที่ที่ต้องการ และสามารถนำค่าการกระจายเวลาประวิง แผนภูมิการกระจายเวลาประวิง และแผนภูมิมุมการมาถึงของคลื่นไปใช้ในการกำหนดอัตราการส่งสัญญาณ และแก้ไขปัญหาการจางหายได้

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยกรรมวิธีเชิงรังสีเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพที่สามารถช่วยในการออกแบบและวางแผนโครงข่ายของระบบสื่อสารเคลื่อนที่ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ใช้ได้กับทุกสภาพแวดล้อมและสามารถนำผลการจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไปช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาของโครงข่ายระบบสื่อสารเคลื่อนที่ได้ หากพัฒนาระเบียบวิธีที่ใช้ในการติดตามรอยทางเดินของรังสีให้มีประสิทธิภาพและมีรูปแบบของรอยทางเดินของรังสีเพิ่มมากขึ้นประกอบกับการสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางให้ใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อมจริงมากที่สุดก็จะสามารถนำแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยกรรมวิธีเชิงรังสีนี้ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ช่วยให้ประหยัดเวลา เงินทุน และทรัพยากรในการสร้างโครงข่ายของระบบสื่อสารเคลื่อนที่

ข้อเสนอแนะ

แม้ว่าแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยกรรมวิธีเชิงรังสีในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพในด้านต่างๆ เพิ่มขึ้นจากงานวิจัย [1] และพัฒนาให้สามารถนำผลการจำลองแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไปใช้ในการออกแบบและวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่ แต่กรรมวิธีที่ใช้และแบบจำลองยังมีข้อบกพร่องอยู่ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนากรรมวิธีและรายละเอียดอื่นๆ อีก ดังจะกล่าวเป็นข้อๆ ดังนี้

1. ต้องพัฒนาฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางให้สามารถจัดเก็บสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นส่วนที่ยื่นออกไปหรือส่วนเชื่อมต่อ เช่น กันสาด ทางเดินเชื่อมต่อระหว่างอาคาร เป็นต้น เนื่องจากเป็นสิ่งกีดขวางที่มีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับตัวอาคารและควรใช้ฐานข้อมูลอาคารกีดขวางที่เป็นฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสำรวจและบันทึกโดยผู้เชี่ยวชาญในงานสำรวจโดยเฉพาะ เนื่องจากความถูกต้องของขนาดและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางมีผลกระทบโดยตรงต่อการตามรอยทางเดินของรังสี
2. น่าจะสร้างฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น เช่น ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของผนังแบบต่างๆ และอัตราการลดทอนกำลังของคลื่นในพุ่มไม้เมื่อมีความหนาแน่นของใบไม้ต่างกัน เพื่อเพิ่มลักษณะสมบัติของฐานข้อมูลสิ่งกีดขวางให้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด
3. ต้องพัฒนาระเบียบวิธีการลบเขตเงาบนผนังอาคารที่ใช้ในการสร้างฐานข้อมูลบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากระเบียบวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากยังไม่สามารถใช้กับผนังที่มีการเรียงตัวอย่างซับซ้อนมากๆ ได้ดีเพียงพอ และพัฒนาให้สามารถคำนวณบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอาคารในฐานข้อมูลอาคาร เพื่อให้สามารถปรับปรุงฐานข้อมูลบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นให้มีความถูกต้องได้อย่างรวดเร็ว
4. น่าจะมีการพัฒนาในส่วนการคำนวณการกระจายเวลาประวิงและมุมการมาถึงของคลื่น ให้สามารถนำผลที่ได้จากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไปวิเคราะห์ปรากฏการณ์คลื่นจางหาย และน่าจะประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีพันธุกรรม (genetic algorithm) เพื่อนำมาใช้หาค่าปัจจัยต่างๆ ของสถานีฐานที่เหมาะสม เช่น ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐาน มุมก้มและความสูงของสายอากาศส่ง เป็นต้น เพื่อให้สถานีฐานมีความสามารถครอบคลุมพื้นที่บริการมากที่สุด

จากข้อเสนอแนะและองค์ความรู้ในการสร้างฐานข้อมูลบริเวณเสาตอม่อกำลังคลื่นและฐานข้อมูลรังสีที่พุ่งเข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ที่ได้จากงานวิจัยนี้ ตลอดจนระเบียบวิธีการตามรอยทางเดินของรังสีการคำนวณขนาดของสนามไฟฟ้าที่ตกลงบนสายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่ การคำนวณค่าปัจจัยเชิงระบบได้แก่ ความสามารถครอบคลุม ค่าการกระจายเวลาประวิงและมุมการมาถึงของคลื่น รวมถึงโปรแกรมแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ได้พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยคาดหวังว่าจะมีผู้สนใจและนำ

สิ่งเหล่านี้ไปพัฒนาต่อเพื่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในวงการศึกษและเพื่อให้เป็นภูมิปัญญาที่พัฒนาโดยคนไทยเพื่ออุตสาหกรรมของประเทศไทยต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] วันชัย อัมพูนีวรรณ. การจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับการสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมือง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [2] G. E. Athanasiadou, A. R. Nix and J. P. McGeehan. A Microwave Ray-Tracing Propagation Model and Evaluation of its Narrow-Band and Wide Band Prediction. IEEE Journal on selected area in Communications. Vol. 18. No. 3. March 2000. pp. 323-335.
- [3] K. Rizk, J. F. Wagen and F. Gardial. Two-Dimensional Ray-Tracing Modelling for Propagation Prediction in Microcellular Environments. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 46. No. 2. May 1997. pp. 508-518.
- [4] B. E. Gschwendtner and F. M. Landstorfer. 3-D Propagation Modelling in Microcells Including Terrain Effects. Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 1995 (PIMRC'95. Wireless: Merging onto the Information Superhighway). Vol. 2. 1995. pp. 532-536.
- [5] M. J. Neve and G. B. Rowe. Mobile Radio Propagation Prediction in Irregular Cellular Topographies Using Ray Methods. IEE Proceedings on Microwave Antennas Propagation. Vol. 142. No. 6. December 1995. pp. 447-451.
- [6] E. K. Tameh, A. R. Nix and M. A. Beach. A 3-D Integrated Macro and Microcellular Propagation Model Based On the Use of Photogrammetric Terrain and Building Data. Vehicular Technology Conference. IEEE 47th. Vol. 3. 1997. pp. 1957-1961.
- [7] S. Y. Tan and H. S. Tan. A Microcellular Communications Propagation Model Based on the Uniform Theory of Diffraction and Multiple Image Theory. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 44. No. 10. October 1996. pp. 1317-1326.
- [8] C. A. Balanis. Advance Engineering Electromagnetics. USA. John Wiley & Sons, Inc. 1989.
- [9] A. Bronshtein, R. Mazar and I-Tai Lu. Analysis of Foliage Effects on Mobile Propagation in Dense Urban Environment. Radio Science. Vol. 35. No. 4. July-August 2000. pp. 941-953.
- [10] M. C. Lawton and J. P. McGeehan. The Application of a Deterministic Ray Launching Algorithm for the Prediction of Radio Channel Characteristics in Small-Cell Environments. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 43. November 1994. pp. 955-969.
- [11] W. C. Y. Lee. Mobile Communication Engineering: Theory and Applications. 2nd Edition. USA. McGraw-Hill companies, Inc. 1998.

- [12] F. A. Agelet, A. Formella, J. M. Rábanos, F.I. Vicente and F. P. Fontán. Efficient Ray-Tracing Acceleration Techniques for Radio Propagation Modeling. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol.49. No.6. November 2000. pp. 2089-2104.
- [13] ศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข. การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.
- [14] W. Amphuchineewan and C. Waiyapattanakorn. Radio Wave Propagation over Rooftop of Mixed Height Buildings. Symposium Proceedings 1999 International Wireless and Telecommunications Symposium (IWTS'99). Vol. 1. pp. 48-51.
- [15] P. A. Tirkas, C. M. Wangsvick and B. A. Balanis. Propagation Model for Building Blockage in Satellite Mobile Communication Systems. IEEE Transactions on Antenna and Propagation. Vol. 46. No. 7. July 1998. pp. 991-997.
- [16] R. P. Torres, S. Loredó, L. Valle and M. Domingo. An Accuracy and Afficient Method Based On Ray-Tracing for the Prediction of Local Flat-Fading Statistic in Picocell Radio Channels. IEEE Journal on selected areas in Communications. Vol.19. No.2. February 2001. pp. 170-178.
- [17] H. R. Anderson. Site-Specific BER Analysis in Frequency-Selective Channels Using a Ray-Tracing Propagation Model. IEEE Global Telecommunications Conference. 1994. GLOBECOM'94. Communication: The Global Bridge. Vol.3. 1994. pp. 1441-1445.
- [18] J. Maurer, O. Drumm, D Didascalou and W. Wiesbeck. A Novel Approach in the Determination of Visible Surfaces in 3D Vector Geometries for Ray-Optical Wave Propagation Modelling. IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceeding. 2000. VTC 2000-Springs Tokyo. Vol.3. 2000. pp. 1651- 1655.
- [19] D. F. Rogers. Procedural Elements for Computer Graphics. McGraw Hill, Inc. 1985.
- [20] K. Weiler. Hidden Surface Removal Using Polygon Area Sorting. Master's Thesis. Program of Computer Graphics, Cornell University, January 1978.
- [21] K. Weiler. Polygon Comparison Using a Graph Representation. Computer Graphic (Proceedings SIGGRAPH 80). Vol.14. 1980. pp. 10-18.



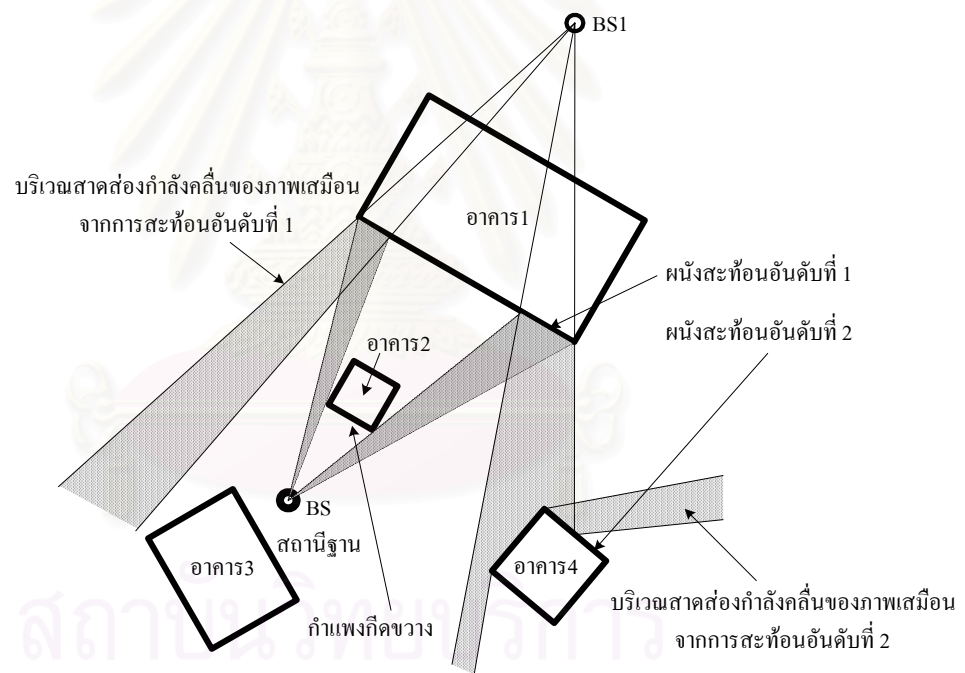
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่งกำลังคลื่น

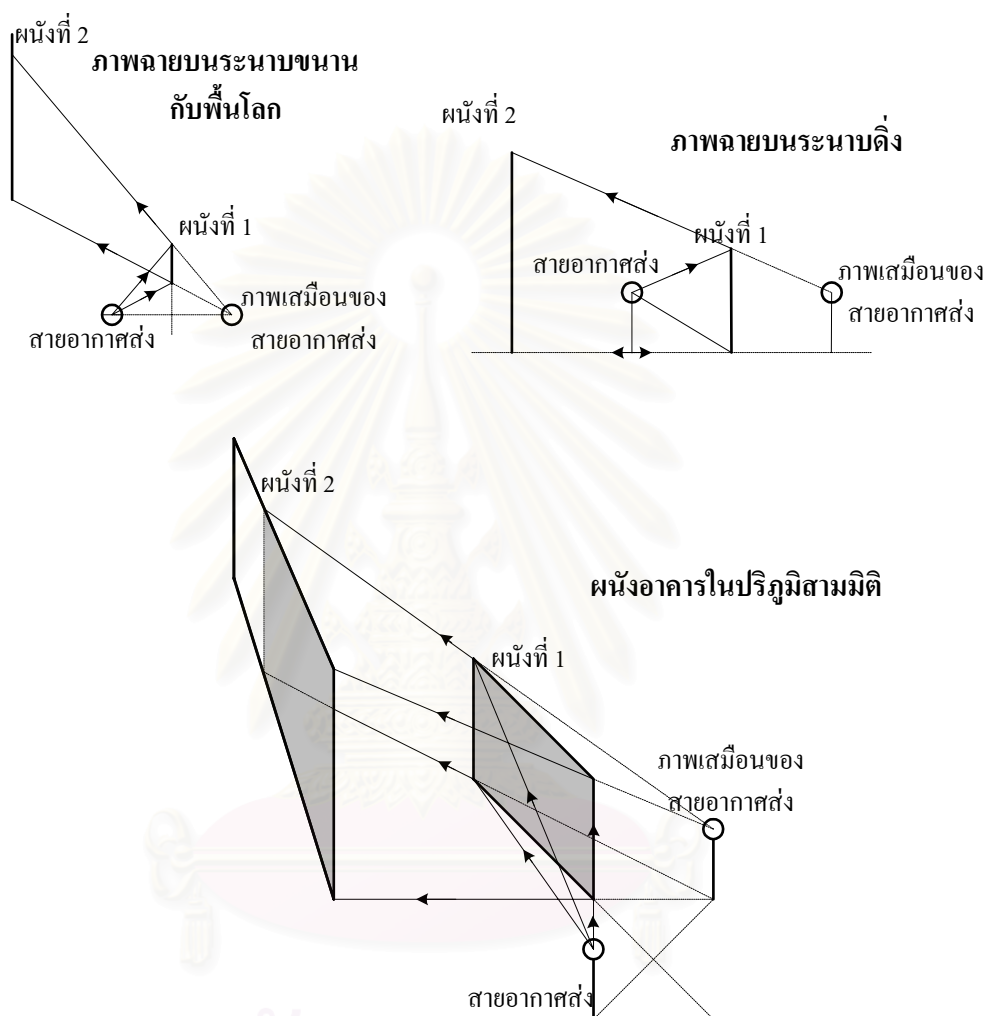
บริเวณสาตส่งกำลังคลื่น คือ บริเวณที่รังสีจากแหล่งกำเนิดสามารถพุ่งไปตกกระทบผนังอาคารในสิ่งแวดล้อมได้โดยไม่ถูกบดบัง การสร้างฐานข้อมูลบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นจะเริ่มจากการพิจารณาบริเวณบนผนังอาคารที่สามารถมองเห็นได้โดยสายอากาศส่งของสถานีฐาน บริเวณที่มองเห็นได้บนผนังนี้จะเรียกว่า บริเวณสาตส่งกำลังคลื่นบนผนังอาคาร ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่ถูกบดบังจากผนังอาคารอื่นๆในสิ่งแวดล้อม เมื่อพิจารณาบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นบนผนังอาคารครบทุกผนังในฐานข้อมูลด้านของอาคารแล้วจะสามารถสร้างบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นอันดับที่ 1 ซึ่งเป็นบริเวณที่รังสีจากสายอากาศส่งสามารถพุ่งตรงมาตกกระทบบนผนังได้โดยไม่ถูกบดบังดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ตัวอย่างบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นในสิ่งแวดล้อมจริง

บริเวณสาตส่งกำลังคลื่นอันดับที่ 2, 3 และอันดับสูงขึ้นไป จะมีกระบวนการสร้างเหมือนกับบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นอันดับที่ 1 บริเวณสาตส่งกำลังคลื่นอันดับที่ n ($n=1,2,3,\dots$) จะสร้างขึ้นจากบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นอันดับที่ $n-1$ เช่น บริเวณสาตส่งกำลังคลื่นอันดับที่ 2 (หรือเรียกว่า บริเวณสาตส่งกำลังคลื่นจากการสะท้อนอันดับที่ 1) จะสร้างจากภาพเสมือนของสถานีฐานซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดของรังสีที่เกิดจากการสะท้อนออกจากผนังที่บริเวณ

สาตส่องกำลังคลื่นอันดับที่ 1 ครอบคลุมอยู่ การพิจารณาบริเวณสาตส่องกำลังคลื่นบนผนังอาคาร จะพิจารณาบริเวณที่ถูกมองเห็นบนผนังโดยภาพเสมือนของบริเวณสาตส่องกำลังคลื่นอันดับที่ 1 มุมมองของภาพเสมือนของบริเวณสาตส่องกำลังคลื่นอันดับที่ 1 จะถูกจำกัดอยู่ในบริเวณสาตส่องกำลังคลื่นบนผนังต้นกำเนิดดังรูปที่ ก.2



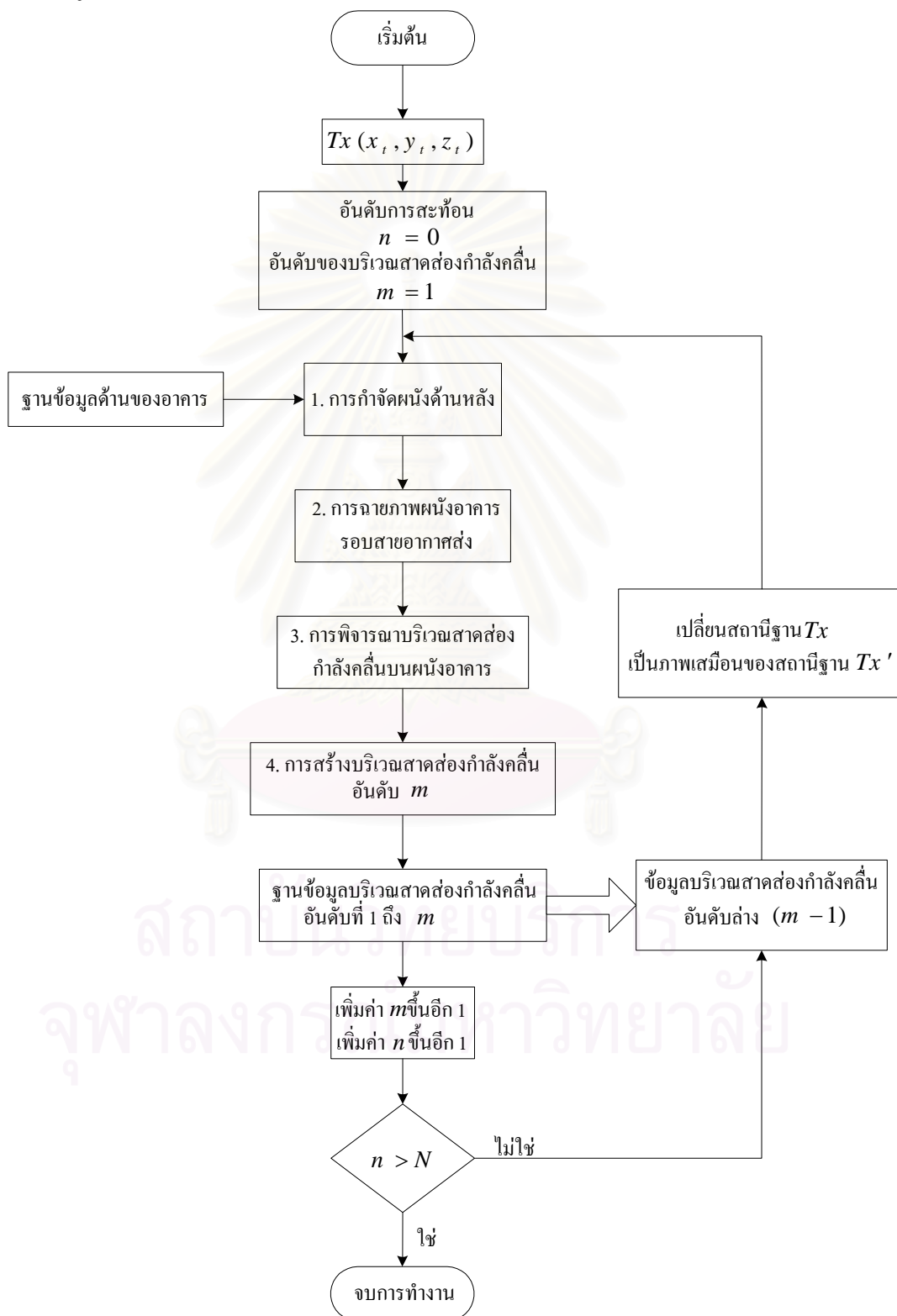
รูปที่ ก.2 ตัวอย่างมุมมองของภาพเสมือนจากการสะท้อนอันดับที่ 1

การพิจารณาผนังในฐานะข้อมูลผนังอาคาร จะพิจารณาเฉพาะผนังที่อยู่ภายในมุมมองของภาพเสมือนของบริเวณสาตส่องกำลังคลื่นอันดับที่ 1 เท่านั้น เมื่อพิจารณาบริเวณสาตส่องกำลังคลื่นบนผนังซึ่งอยู่ในขอบเขตมุมมองของภาพเสมือนได้แล้วก็สร้างบริเวณสาตส่องกำลังคลื่นอันดับที่ 2 (หรือบริเวณสาตส่องกำลังคลื่นจากการสะท้อนอันดับที่ 1) ได้ดังรูปที่ ก.1

บริเวณสาตส่องกำลังคลื่นอันดับ 3 และอันดับสูงขึ้นไปจะสามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการเดียวกันนี้ บริเวณสาตส่องกำลังคลื่นจะสร้างจากฐานข้อมูลผนังอาคารจนครบทุกอันดับของการ

สะท้อน โดยบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นอันดับที่ n ($n = 2, 3, 4, \dots$) บริเวณหนึ่ง จะเป็นบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นเนื่องจากการสะท้อนอันดับที่ $n - 1$

กระบวนการสร้างฐานข้อมูลบริเวณเสาตอมกำลังคลื่นเมื่อพิจารณาการสะท้อนเท่ากับ N ครั้ง แสดงดังรูปที่ ก.3 แต่ละขั้นตอนมีหลักการดังนี้

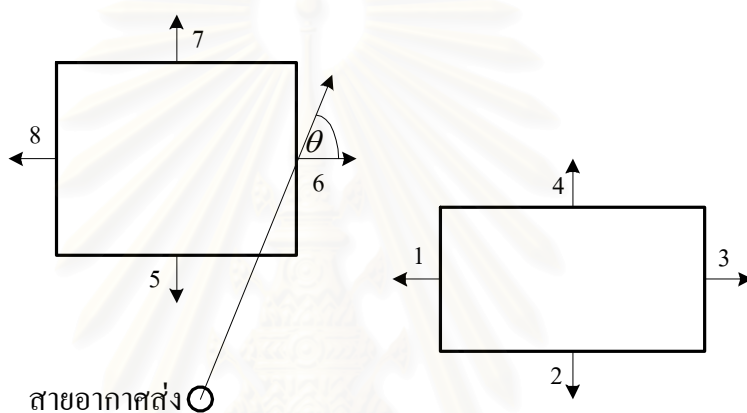


รูปที่ ก.3 กระบวนการสร้างฐานข้อมูลบริเวณเสาตอมกำลังคลื่น

1. การกำจัดผนังด้านหลัง

ผนังด้านหลังของอาคารจะเป็นผนังที่ไม่สามารถมองเห็นได้โดยสายอากาศส่ง การกำจัดผนังด้านหลัง (back face culling) จะช่วยลดจำนวนผนังอาคารที่ต้องพิจารณาให้น้อยลงช่วยให้กระบวนการสร้างบริเวณสาตส่งกำลังคลื่นรวดเร็วยิ่งขึ้น

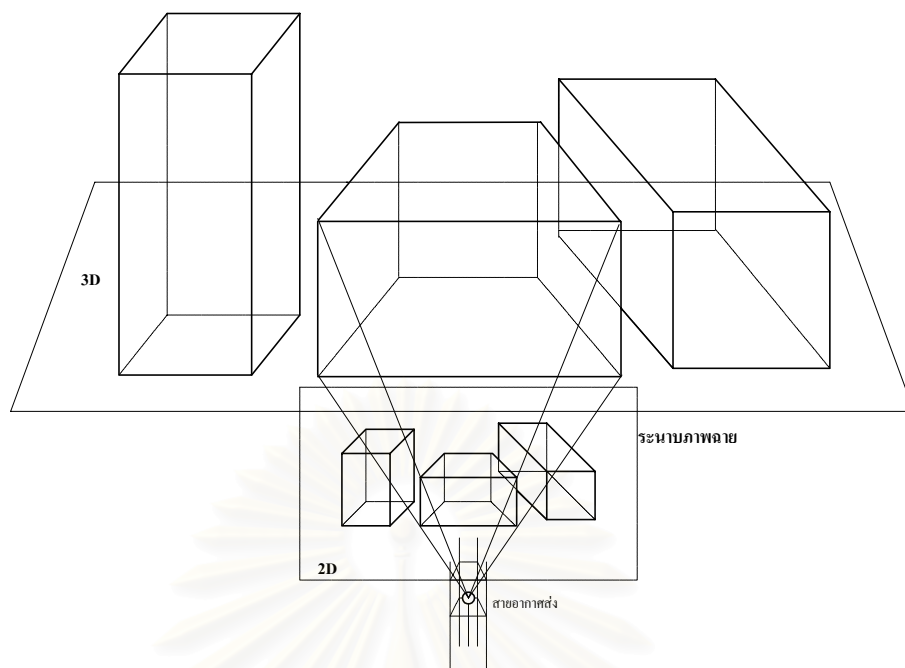
ตัวอย่างการกำจัดผนังด้านหลังแสดงดังรูป ก.4 ซึ่งเป็นภาพฉายของผนังอาคารบนพื้นโลกมุม θ เป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ปกติของผนังกับเวกเตอร์จากสายอากาศส่งไปยังกึ่งกลางภาพฉายของผนัง ผนังที่มีมุม $\theta < 90^\circ$ จะเป็นผนังที่อยู่ด้านหลังซึ่งรังสีตรงจากสายอากาศส่งไม่สามารถพุ่งไปตกกระทบได้ เช่น ผนังที่ 3, 4, 6, 7 และ 8 ผนังด้านหลังนี้จะไม่ถูกนำมาพิจารณาในขั้นตอนต่อไป



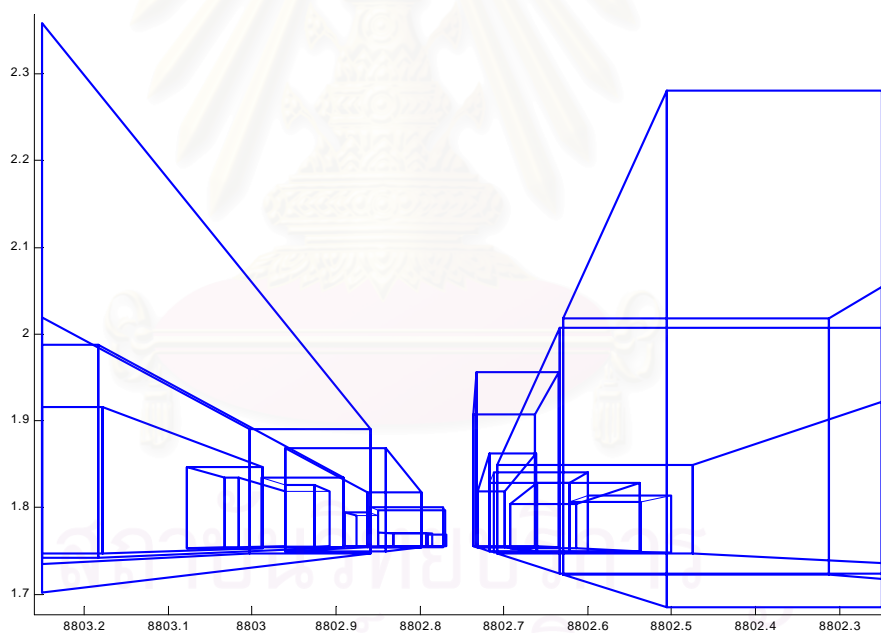
รูปที่ ก.4 การกำจัดผนังด้านหลัง

2. การพิจารณาผนังอาคารรอบสายอากาศส่ง

การพิจารณาผนังอาคารรอบสายอากาศส่งเป็นการลดรูปของปัญหาจากการพิจารณาผนังอาคารในปริภูมิสามมิติให้เป็นการพิจารณาภาพฉายของผนังอาคารบนระนาบสองมิติ ผนังอาคารรอบสายอากาศส่งจะถูกพิจารณาเป็นภาพฉายแบบเปอร์สเปกทีฟ (perspective projection) บนระนาบรอบสายอากาศส่งดังรูปที่ ก.5(1) ระนาบรอบสายอากาศส่งจะเป็นระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้าความสูงอนันต์วางรอบสายอากาศส่งทั้ง 4 ด้าน เมื่อนำภาพฉายของผนังอาคารบนระนาบทั้ง 4 มาประกอบกันจะทำให้ได้มุมมองรอบทิศทางของสายอากาศส่ง ตัวอย่างของภาพฉายของผนังอาคารในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ ก.5(2) และรูปที่ ก.5(3)



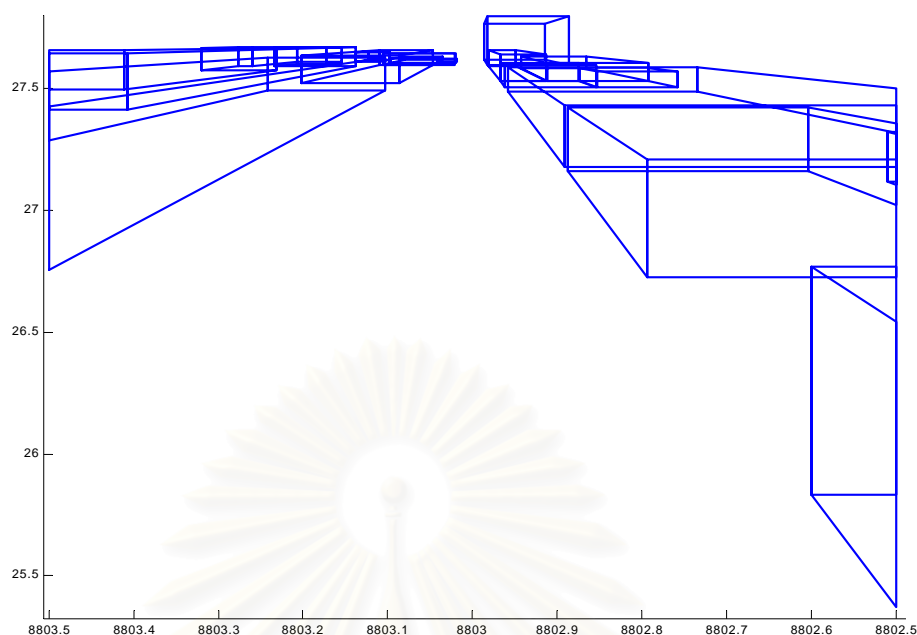
(1) ภาพฉายของผนังอาคารบนระนาบสองมิติ



(2) ภาพฉายของผนังอาคารในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อสถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคาร โคจรอบ

รูปที่ ก.5 ภาพฉายของผนังอาคารบนระนาบสองมิติ



(3) ภาพฉายของผนังอาคารในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อสถานีฐานอยู่บนยอดอาคาร

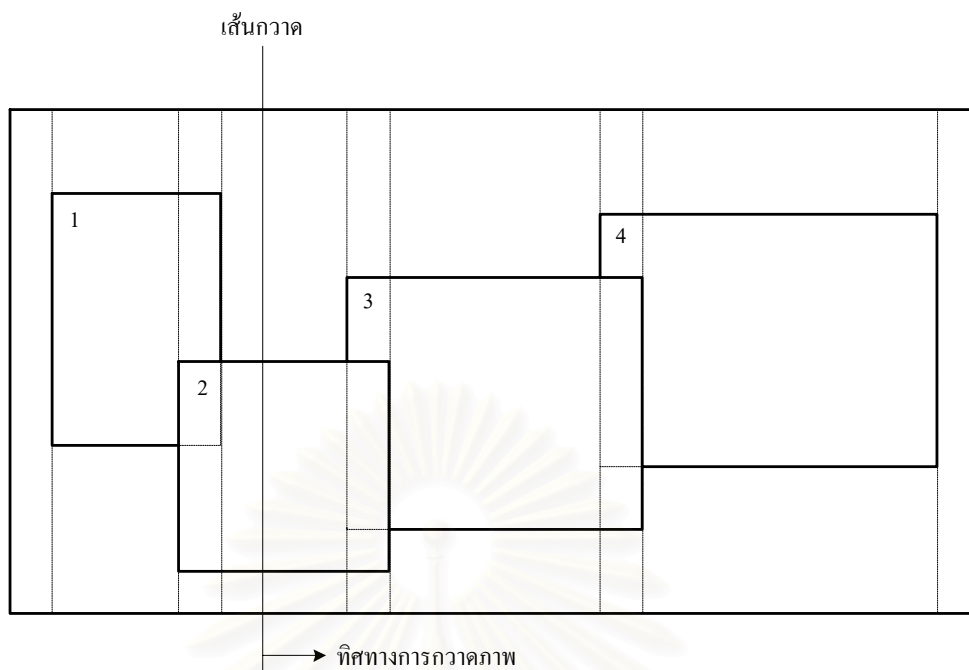
รูปที่ ก.5 ภาพฉายของผนังอาคารบนระนาบสองมิติ (ต่อ)

3. การพิจารณาบริเวณสาดส่องกำลังคลื่นบนผนังอาคาร

เมื่อได้ภาพฉายของผนังอาคารบนระนาบซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขั้นตอนการพิจารณาบริเวณสาดส่องกำลังคลื่นบนผนังอาคารจะประกอบด้วยกระบวนการย่อย 3 กระบวนการ [18] คือ

3.1 การกวาดภาพฉายของผนังอาคาร (sweep line algorithm)

เป็นกระบวนการสร้างลำดับของภาพฉายเพื่อพิจารณาการซ้อนทับกัน กระบวนการกวาดภาพฉายของผนังอาคารแสดงดังรูปที่ ก.6 เมื่อใช้กระบวนการกวาดภาพฉายของผนังอาคารจะเห็นได้ว่าไม่จำเป็นต้องทดสอบการซ้อนทับกันของภาพฉายหมายเลข 1 กับภาพฉายหมายเลข 3 และภาพฉายหมายเลข 4 เนื่องจากภาพฉายทั้งสองอยู่ห่างจากภาพฉายหมายเลข 1

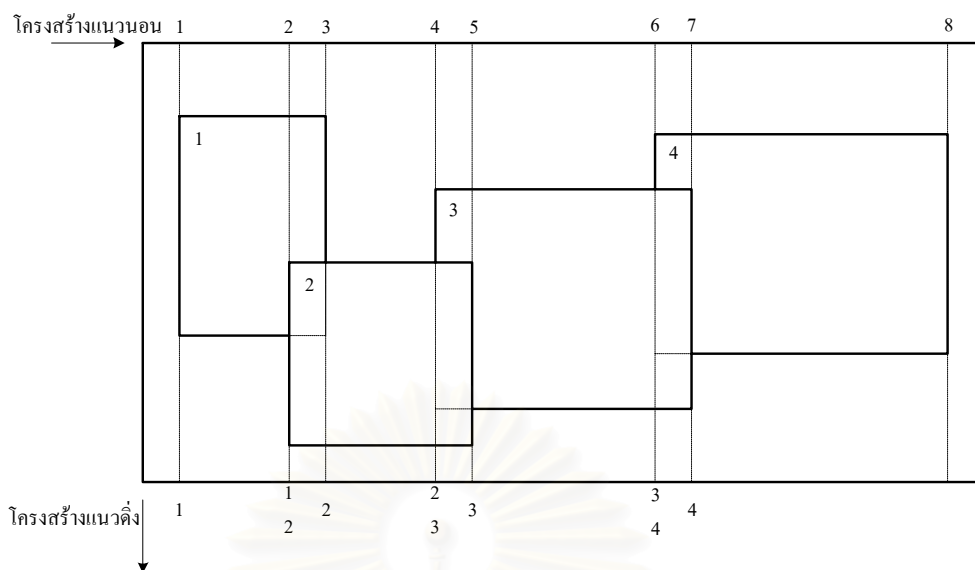


รูปที่ ก.6 ตัวอย่างการกวาดภาพฉายของผนังอาคาร

กระบวนการกวาดภาพฉายของอาคารดังรูปที่ ก. 6 จะกระทำโดยการกวาดเส้นตรงผ่านภาพฉายของผนังอาคาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาการพิจารณาลำดับภาพฉายในสองมิติให้เหลือเพียงการพิจารณาลำดับของภาพฉายในหนึ่งมิติ ภาพฉายจะถูกกวาดและมีสถานะสามสถานะคือ ภาพฉายที่ถูกกวาดแล้ว (dead polygon) เช่น ภาพฉายหมายเลข 1, ภาพฉายแอคทีฟ (active polygon) คือ ภาพฉายที่กำลังถูกเส้นกวาดกวาดผ่าน โดยเส้นกวาดไม่ได้หยุดอยู่ที่ขอบเขตสุดท้ายของภาพฉาย เช่น ภาพฉายหมายเลข 2 และภาพฉายสงบ (sleeping polygon) ซึ่งยังไม่ถูกกวาดผ่าน เช่น ภาพฉายที่ 3 และภาพฉายที่ 4 การกวาดภาพฉายจะเป็นการกวาดแบบไม่ต่อเนื่อง เส้นกวาดจะหยุดเมื่อกวาดเข้าสู่ภาพฉายหรือออกจากภาพฉาย ในรูปที่ ก.7 เส้นประคือตำแหน่งที่เส้นกวาดหยุดอยู่ ตำแหน่งที่เส้นกวาดหยุดอยู่จะถูกบันทึกใน โครงสร้างแนวนอนและภาพฉายแอคทีฟจะถูกบันทึกใน โครงสร้างแนวดิ่งโดยภาพฉายที่อยู่ใน โครงสร้างแนวดิ่งจะถูกตรวจสอบการซ้อนทับกันดังหัวข้อ 3.2

3.2 การลบเขตเงาของภาพฉายบนระนาบสองมิติ (2D polygon subtraction)

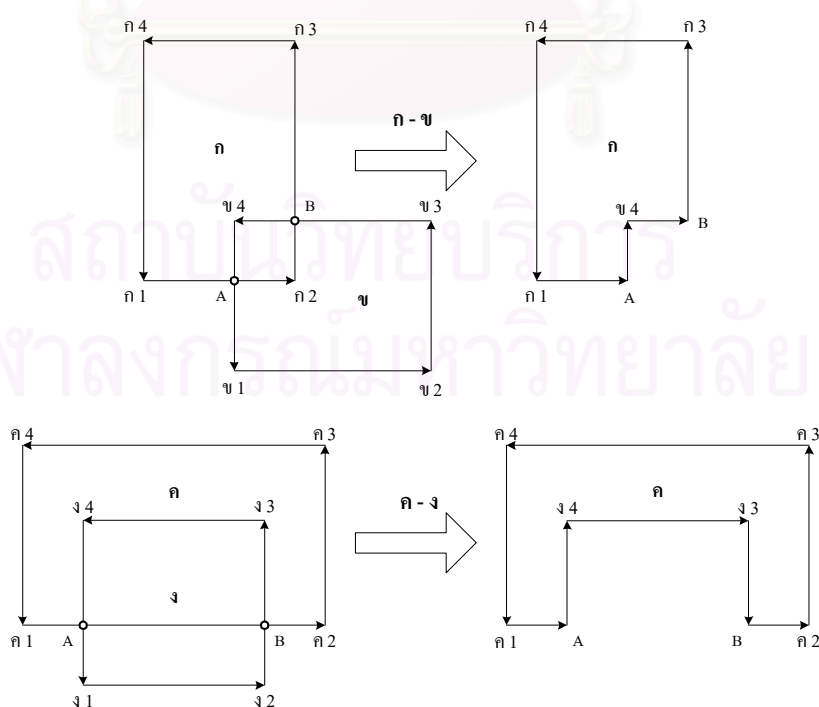
การลบเขตเงาของภาพฉายบนระนาบสองมิติเป็นการลบบริเวณของภาพฉายที่บังโดยภาพฉายอื่น ซึ่งเมื่อได้บริเวณที่ไม่ถูกบังแล้วจะคำนวณหาบริเวณสาดส่องกำลังคลื่นบนผนังได้ โดยกระบวนการในหัวข้อ 3.3 ต่อไป



รูปที่ ก.7 การกวาดภาพฉายของผนังอาคาร

การลบเขตเงาของภาพฉายบนระนาบสองมิติจะพิจารณาการซ้อนทับของภาพฉายที่อยู่ในโครงสร้างแนวดิ่งทุกภาพ เขตเงาของภาพฉายคำนวณได้จากจุดตัดของเวกเตอร์ที่เป็นด้านของภาพฉาย ดังรูปที่ ก.8

จากรูปที่ ก.8 ภาพฉาย ก และภาพฉาย ค จะถูกบดบังบางส่วนจากภาพฉาย ข และ ภาพฉาย ง ตามลำดับ ผลต่างของ ก-ข และ ค-ง จะเป็นบริเวณที่มองเห็นบนภาพฉาย ก และ ค การบันทึกข้อมูลของผนังจะบันทึกเป็นพิกัดมุมทั้งหมดของผนัง การลบเขตเงาของภาพฉายบนระนาบสองมิติจะใช้ระเบียบวิธีการตัดรูปเหลี่ยมของ Weiler-Atherton [19] รายละเอียดของวิธีการแสดงในภาคผนวก ข

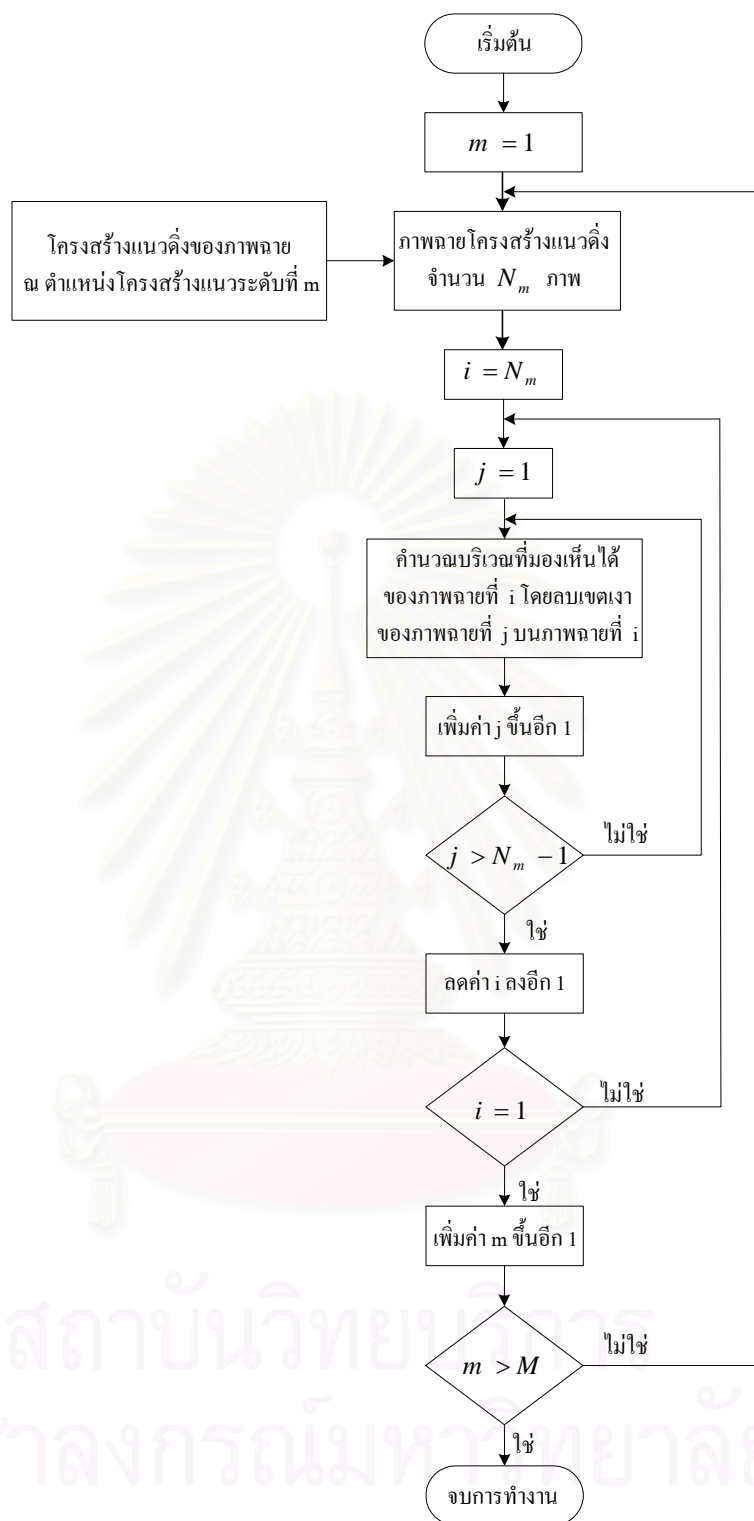


รูปที่ ก.8 การลบเขตเงาของภาพฉายบนระนาบสองมิติ

เมื่อสายอากาศส่งของสถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคารโดยรอบและมีจำนวนภาพฉายมากกว่าสองภาพในโครงสร้างแนวดิ่ง ณ ตำแหน่งที่เส้นกวาดหยุดอยู่ การคำนวณบริเวณที่มองเห็นของภาพฉายจะเริ่มจากการเรียงลำดับภาพฉาย โดยภาพฉายของผนังที่อยู่ใกล้ที่สุดจะเป็นภาพฉายที่มีลำดับอยู่หน้าสุด ($i = 1$) ซึ่งกำลังคลื่นจะสอดส่องได้โดยทั่ว ภาพฉายของผนังที่อยู่ห่างจากสายอากาศส่งออกไปจะเป็นภาพฉายลำดับถัดไปจนถึงภาพฉายลำดับสุดท้าย ($i = N$) ซึ่งอยู่ห่างจากสายอากาศส่งมากที่สุด จากนั้นจะคำนวณบริเวณที่มองเห็นได้ของภาพฉายหลังสุดซึ่งในเบื้องต้นจะกำหนดให้ภาพฉายหลังสุดสามารถมองเห็นได้โดยทั่วแล้วนำบริเวณที่มองเห็นได้นี้เทียบกับภาพฉายก่อนหน้าอันดับแรก ($j = 1$) ซึ่งก่อให้เกิดบริเวณที่เป็นเขตเงามากที่สุด แล้วจึงเทียบกับภาพฉายก่อนหน้าอันดับต่อมา ($j = 2, 3, 4, \dots, N-1$) จนครบทุกภาพก็จะได้บริเวณที่มองเห็นได้สุทธิของภาพฉายหลังสุด ($i = N$) การคำนวณบริเวณที่มองเห็นได้ของภาพฉายอื่นๆในโครงสร้างแนวดิ่งจะทำซ้ำกระบวนการเดียวกันโดยจะเทียบภาพฉายลำดับที่ i กับภาพฉายอันดับที่ $j = 1, 2, 3, \dots, i-1$

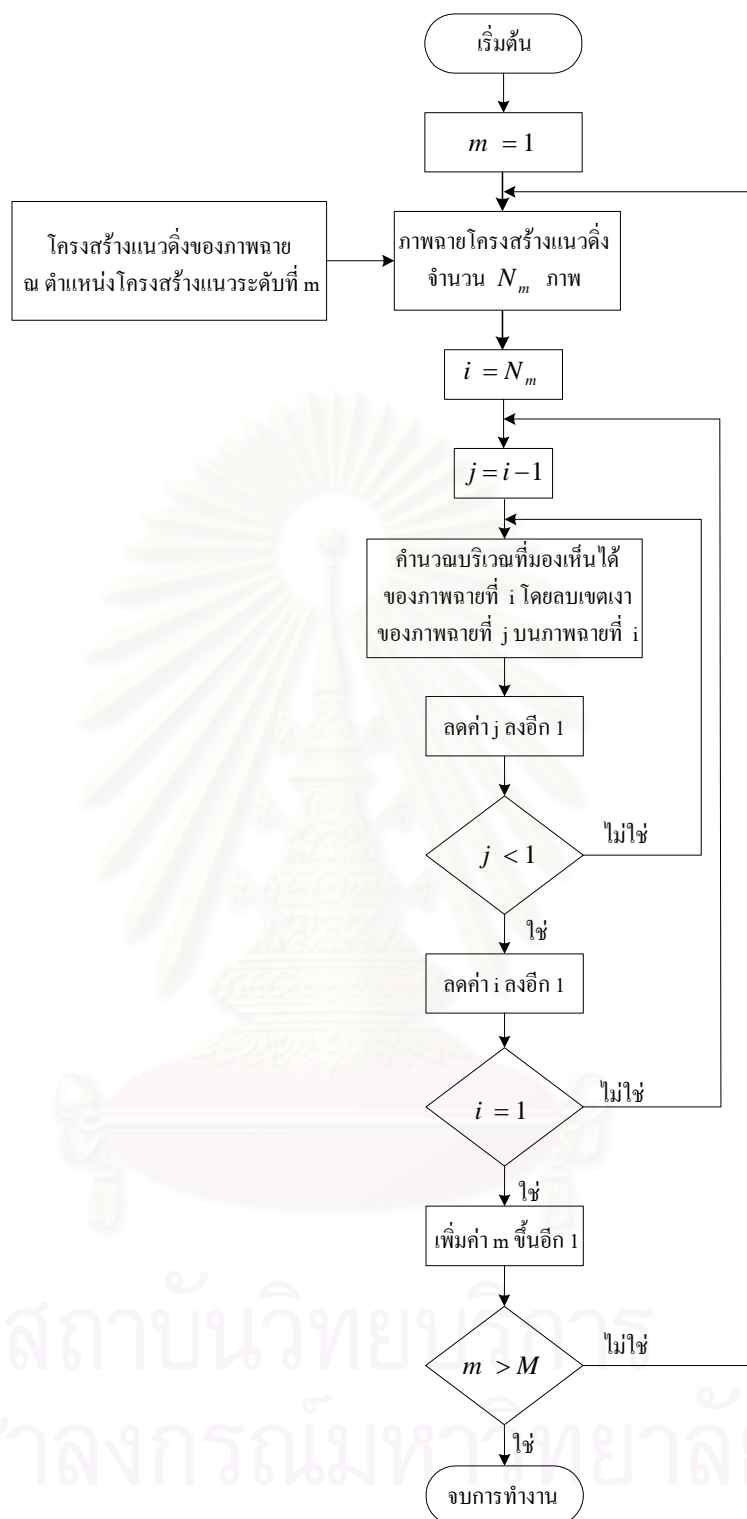
ในกรณีที่ภาพฉายปรากฏอยู่ในโครงสร้างแนวดิ่งที่ตำแหน่งของโครงสร้างแนวนอนต่างกันมากกว่าหนึ่งครั้ง ถ้าคำนวณบริเวณที่มองเห็นได้ของภาพฉายนั้นแล้วกระบวนการคำนวณบริเวณที่มองเห็นได้จะเป็นการนำบริเวณที่มองเห็นได้ที่ได้คำนวณแล้วนี้ไปเทียบกับภาพฉายอื่นๆในโครงสร้างแนวดิ่งใหม่ เมื่อคำนวณบริเวณที่มองเห็นได้ของภาพฉายบนระนาบรอบสายอากาศส่งครบทั้งสี่ด้านก็จะได้บริเวณที่มองเห็นได้ของภาพฉายของผนังรอบสายอากาศส่งครบทุกผนัง กระบวนการลบเขตเงาของภาพฉายบนระนาบสองมิติเมื่อสายอากาศส่งของสถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคารโดยรอบแสดงดังรูปที่ ก.9(1) โดยโครงสร้างแนวดิ่งประกอบด้วยภาพฉาย N_m ภาพ และโครงสร้างแนวดิ่งมีจำนวนเท่ากับตำแหน่งโครงสร้างแนวระดับ M ตำแหน่ง

เมื่อสายอากาศส่งของสถานีฐานอยู่บนยอดอาคารการพิจารณาบริเวณที่มองเห็นได้ของภาพฉายที่อยู่ในโครงสร้างแนวดิ่งเดียวกันจะทำเช่นเดียวกับกรณีเมื่อสายอากาศส่งของสถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคารโดยรอบแต่การลบเขตเงาของภาพฉายของผนังที่ i ($i = N, N-1, \dots, 3, 2, 1$) จะพิจารณาเทียบกับผนังที่ j เมื่อ $j = i-1, \dots, 3, 2, 1$ เนื่องจากภาพฉายของผนังลำดับก่อนหน้าที่อยู่ติดกันจะบดบังภาพฉายที่พิจารณามากที่สุด เมื่อพิจารณาภาพฉายกับภาพฉายก่อนหน้าที่อยู่ติดกันก่อนจะช่วยให้สามารถลบบริเวณเขตเงาส่วนมากออกไปได้ก่อน ทำให้การลบเขตเงาสามารถทำได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น การลบเขตเงาของภาพฉายบนระนาบสองมิติเมื่อสายอากาศส่งของสถานีฐานอยู่บนอาคารแสดงดังรูปที่ ก.9(2) โดยโครงสร้างแนวดิ่งประกอบด้วยภาพฉาย N_m ภาพ และโครงสร้างแนวดิ่งมีจำนวนเท่ากับตำแหน่งโครงสร้างแนวระดับ M ตำแหน่ง



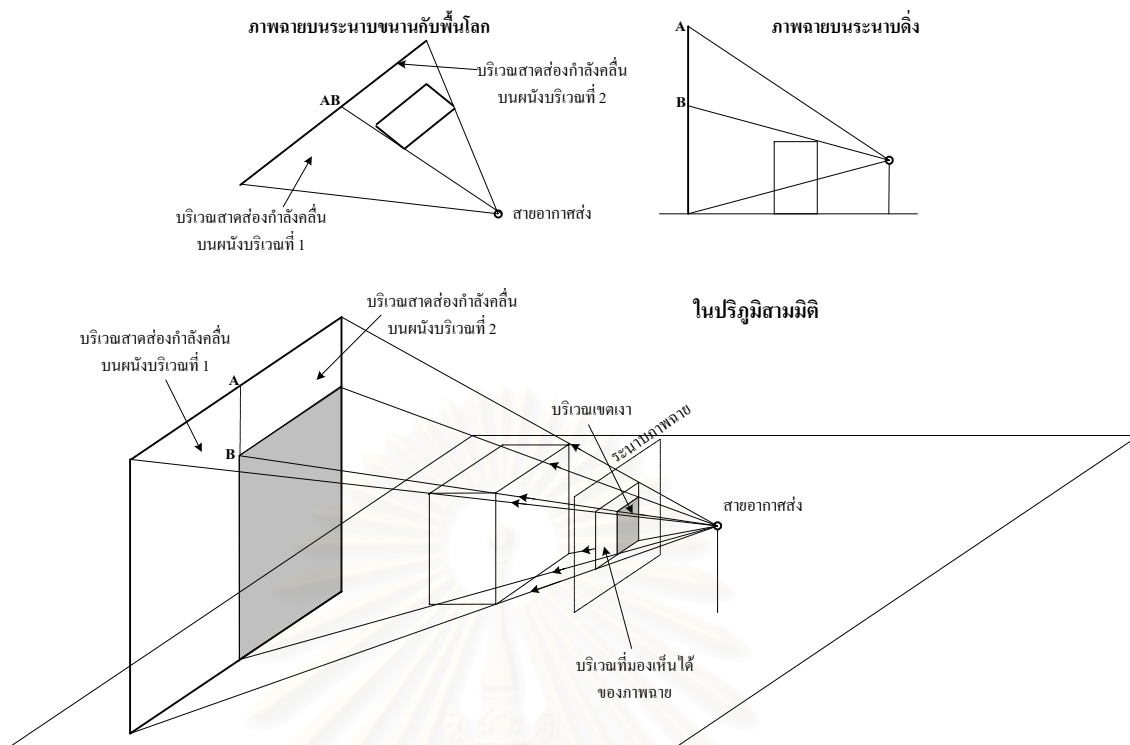
(1) เมื่อสายอากาศส่งของสถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคารโดยรอบ

รูปที่ ก.9 กระบวนการลบเขตเงาของภาพฉายบนระนาบสองมิติ



(2) เมื่อสายอากาศส่งของสถานีฐานอยู่บนยอดอาคาร

รูปที่ ก.9 (ต่อ) กระบวนการลบเขตเงาของภาพถ่ายบนระนาบสองมิติ



รูปที่ ก.11 บริเวณสายตาส่องกำลังคลื่นในปริภูมิสามมิติ

ภาคผนวก ข

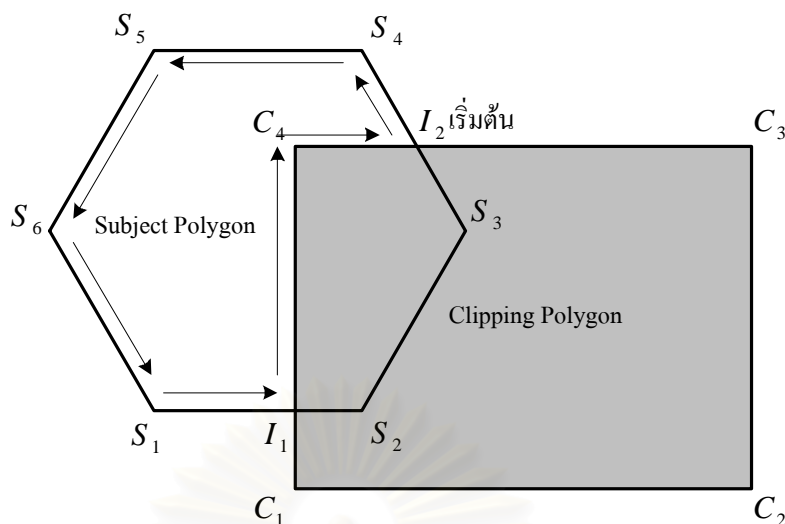
การประยุกต์ระเบียบวิธีตัดรูปหลายเหลี่ยมของ Weiler-Atherton ในการลบเขตเงา

บนภาพฉายผนังอาคาร

ในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ระเบียบวิธีการตัดรูปหลายเหลี่ยมของ Weiler-Atherton (Concave Polygon Clipping – Weiler-Atherton Algorithm) [19] ซึ่งใช้ในงานทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกมาใช้ในการลบเขตเงาของภาพฉายของผนังในแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton นี้เป็นระเบียบวิธีที่ใช้หาบริเวณที่ไม่ถูกบังและถูกบังของรูปหลายเหลี่ยมได้โดยทั่วไปแต่ระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton ก็มีข้อจำกัด ดังนั้นในการนำระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton มาประยุกต์ใช้ในการลบพื้นที่เขตเงาของภาพฉายของผนังจึงต้องมีการแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

1. ระเบียบวิธีการตัดรูปหลายเหลี่ยมของ Weiler-Atherton

ระเบียบวิธีการตัดรูปหลายเหลี่ยมของ Weiler-Atherton เป็นระเบียบวิธีที่สามารถใช้ตัดรูปหลายเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็น concave polygon รูปหลายเหลี่ยมที่จะถูกตัดเรียกว่า ซับเจกโพลีกอน (subject polygon) รูปหลายเหลี่ยมที่ทำหน้าที่เป็นหน้าต่างของการตัดภาพเรียกว่า คลิปปีงโพลีกอน (clipping polygon) ระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton นี้จะเรียงจุดมุมของซับเจกโพลีกอนและคลิปปีงโพลีกอนเป็นรายการแบบวงกลม โดยซับเจกโพลีกอนและคลิปปีงโพลีกอนอาจมีด้านที่ตัดกันหรือไม่ตัดกันก็ได้ หากไม่พบการตัดกันของด้านของรูปเหลี่ยม รูปเหลี่ยมทั้งสองอาจไม่ซ้อนทับกันหรือซ้อนทับกันโดยมีรูปเหลี่ยมรูปหนึ่งอยู่ภายในรูปเหลี่ยมอีกรูปหนึ่ง และหากพบการตัดกันของด้านของรูปเหลี่ยมจุดตัดที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นเป็นจำนวนคู่ซึ่งจะแบ่งเป็นจุดตัดที่ด้านของซับเจกโพลีกอนพุ่งเข้าสู่คลิปปีงโพลีกอนและจุดตัดที่ด้านของซับเจกโพลีกอนพุ่งออกจากคลิปปีงโพลีกอน ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการตัดรูปหลายเหลี่ยมของ Weiler-Atherton ในการลบเขตเงาบนภาพฉายผนังอาคารจะสนใจเฉพาะบริเวณของภาพฉายผนังที่อยู่นอกเขตเงา ระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton จึงเริ่มจากจุดตัดที่เป็นจุดที่พุ่งออกจากคลิปปีงโพลีกอนไล่ไปตามจุดมุมของซับเจกโพลีกอนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจนพบจุดตัดจุดต่อไป จากนั้นการไล่จุดมุมจะทำในทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนด้านของคลิปปีงโพลีกอนจนพบจุดตัดอีกครั้ง การไล่จุดมุมจะทำในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนด้านของซับเจกโพลีกอน การไล่จุดมุมจะกระทำเรื่อยไปเช่นนี้จนกระทั่งพบจุดเริ่มต้น ตัวอย่างการหาบริเวณนอกเขตเงาของซับเจกโพลีกอนแสดงดังรูปที่ ข.1 ซึ่งกระบวนการทั้งหมดแบ่งขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ ข.1 การไล่จุดมุมเพื่อหาบริเวณภายนอกเขตเงาของซับเจกโพลีกอน

ขั้นที่ 1 พิจารณาจุดตัดทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการตัดกันของด้านของซับเจกโพลีกอนและคลิปปีงโพลีกอน

เพิ่มจุดตัดทั้งหมดลงในรายการจุดมุมของซับเจกโพลีกอนและคลิปปีงโพลีกอนและใส่ลำดับของจุดตัดทั้งหมดในรายการของจุดของรูปเหลี่ยมทั้งสองเพื่อให้สามารถเชื่อมโยงรายการของจุดทั้งสองรายการได้

ขั้นที่ 2 สร้างรายการของจุดตัดที่พุ่งเข้าสู่คลิปปีงโพลีกอนและรายการของจุดตัดที่พุ่งออกจากคลิปปีงโพลีกอน

รายการของจุดตัดที่พุ่งเข้าสู่คลิปปีงโพลีกอน (entering list) จะเป็นรายการที่บันทึกจุดตัดที่เกิดจากด้านของซับเจกโพลีกอนพุ่งเข้าสู่คลิปปีงโพลีกอน ส่วนรายการของจุดตัดที่พุ่งออกจากคลิปปีงโพลีกอน (leaving list) จะเป็นรายการที่บันทึกจุดตัดที่เกิดจากด้านของซับเจกโพลีกอนพุ่งออกจากคลิปปีงโพลีกอน

ขั้นที่ 3 เริ่มการตัดภาพ

รูปเหลี่ยมที่เป็นส่วนหนึ่งของซับเจกโพลีกอนซึ่งอยู่นอกคลิปปีงโพลีกอนหาได้จากกระบวนการดังต่อไปนี้

3.1 ใช้จุดตัดในรายการจุดตัดที่พุ่งออกจากคลิปปีงโพลีกอนเป็นจุดเริ่มต้น หากจุดตัดในรายการถูกใช้ครบทั้งหมดแล้วจะเสร็จสิ้นกระบวนการ

3.2 ติดตามจุดในรายการจุดของซับเจกโพลีกอนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาโดยเริ่มต้นจากจุดตัดในข้อ 3.1 จนพบจุดตัดจุดต่อไป บันทึกจุดทั้งหมด

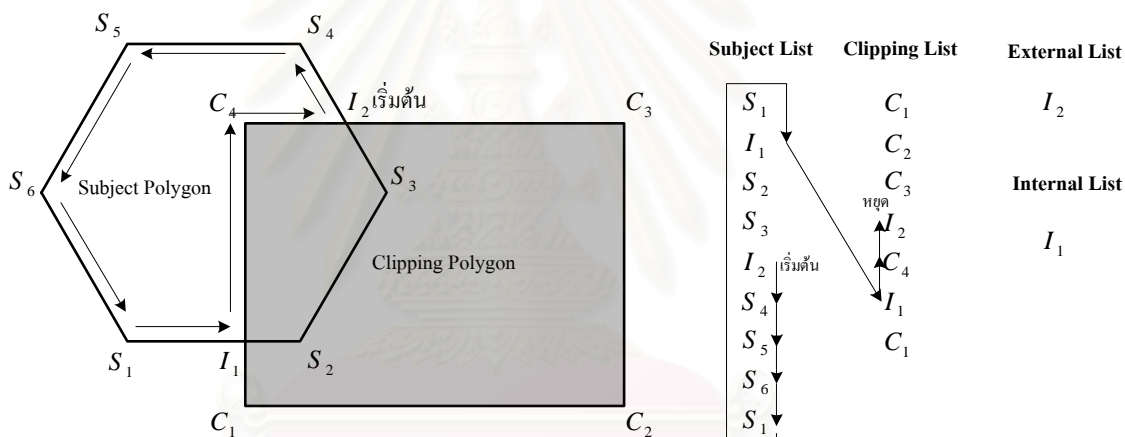
3.3 ใช้จุดตัดในข้อ 3.2 เป็นจุดเริ่มต้นติดตามจุดในรายการจุดของคลิปปีงโพลีกอนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจนกระทั่งพบจุดตัด บันทึกลงจุดทั้งหมด

3.4 ใช้จุดตัดในข้อ 3.3 เป็นจุดเริ่มต้นและติดตามจุดในรายการจุดของซับเจกโพลีกอนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจนกระทั่งพบจุดตัด บันทึกลงจุดทั้งหมด

3.5 ในการติดตามจุดในรายการจุดของซับเจกโพลีกอนและคลิปปีงโพลีกอน เมื่อพบจุดตัดจะใช้จุดตัดนั้นเป็นจุดเริ่มต้นในการติดตามจุดในรายการจุดของรูปเหลี่ยมอีกรูปโดยเมื่อทำซ้ำกระบวนการทั้งหมดจนพบจุดเริ่มต้นในข้อ 3.2 อีกครั้งจะได้รูปเหลี่ยมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของซับเจกโพลีกอนและอยู่ภายนอก

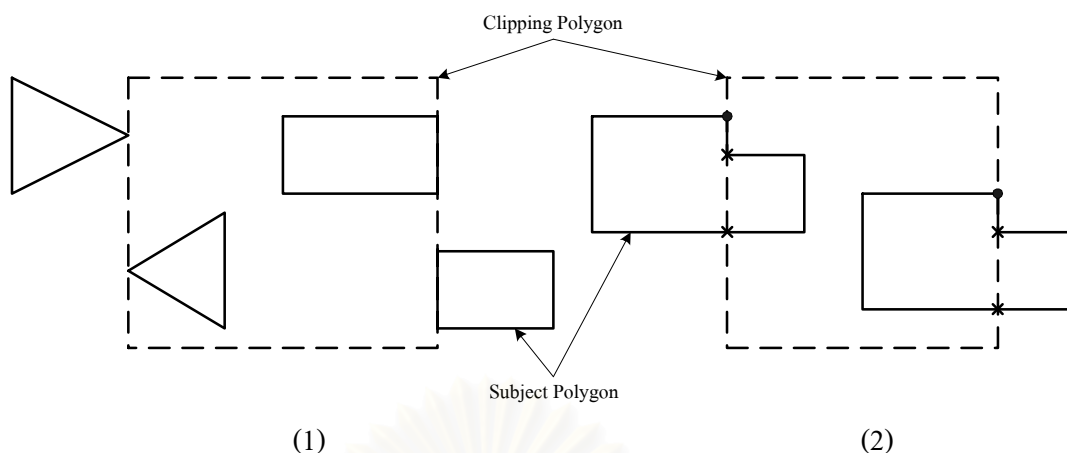
คลิปปีงโพลีกอนตามต้องการ

ตัวอย่างการใช้ระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton เพื่อหารูปเหลี่ยมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของซับเจกโพลีกอนและอยู่ภายนอกคลิปปีงโพลีกอนแสดงดังรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 การติดตามจุดเพื่อหาบริเวณที่อยู่นอกเขตเงาโดยระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton

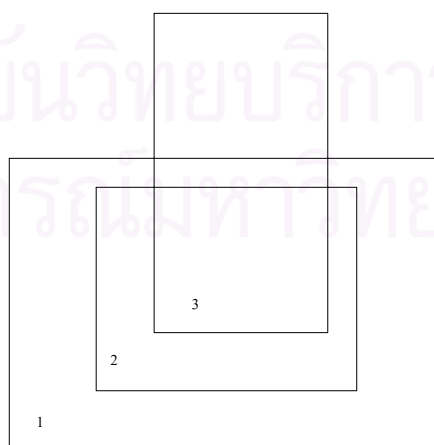
การใช้ระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton จำเป็นที่จะต้องระมัดระวังการเกิดขึ้นซ้ำซ้อนของจุดตัด เช่น กรณีที่มุมหรือด้านของซับเจกโพลีกอนอยู่บนด้านของคลิปปีงโพลีกอนดังรูปที่ ข.3 (1) และ (2) จุดตัดของคลิปปีงโพลีกอนและซับเจกโพลีกอนจำเป็นจะต้องพิจารณาไม่ให้เกิดการซ้ำซ้อนกัน เพื่อป้องกันการสร้างด้านของรูปเหลี่ยมภายนอกเขตเงาไม่ให้ซ้ำซ้อน ในตัวอย่างรูปที่ ข.3 (2) จุดตัดที่มีสัญลักษณ์ \times จะพิจารณาเป็นจุดตัด ในขณะที่จุดตัดที่มีสัญลักษณ์ \bullet จะไม่พิจารณาเป็นจุดตัด รายละเอียดเพิ่มเติมศึกษาได้จาก [20] และ [21]



รูปที่ ข.3 ตัวอย่างกรณีที่ทำให้ระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton เกิดความผิดพลาดและการแก้ไข

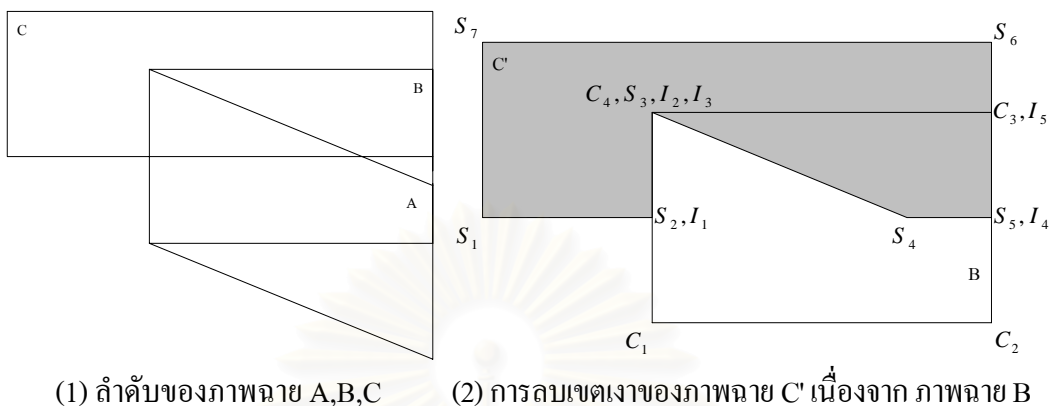
2. ปัญหาในการลบเขตเงาของภาพฉายผนังอาคารโดยระเบียบวิธีของ Weiler-Atherton และการแก้ไข

ปัญหาการซ้อนทับกันของภาพฉายผนังอาคารเมื่อสถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคาร โดยรอบจะมีลักษณะการซ้อนทับกันของภาพฉายดังรูปที่ ข.4 ภาพฉายที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานจะมีขนาดใหญ่จนอาจจะบดบังภาพฉายของผนังอาคารที่มีขนาดเล็กและอยู่ห่างออกไปให้เหลือเพียงบางส่วนของภาพฉายของผนังอาคารสูงที่อยู่ห่างออกไป ลำดับของภาพฉายที่อยู่หน้าสุดไปยังภาพฉายที่อยู่ด้านหลังจะเป็น (1,2,3) ภาพฉายที่ 1 จะอยู่หน้าสุดจึงไม่ถูกบดบัง ภาพฉายที่ 2 เป็นภาพฉายของผนังที่อยู่ถัดออกไปและมีขนาดเล็กกว่าภาพฉายที่ 1 จึงถูกบดบังหมดทั้งภาพ ภาพฉายที่ 3 เป็นภาพฉายของผนังของอาคารสูงซึ่งจะเหลือเพียงส่วนของภาพฉายด้านบนที่ไม่ถูกบดบัง เพื่อให้การลบเขตเงาเป็นไปอย่างรวดเร็วจะพิจารณาภาพฉายที่สนใจ (n) กับภาพฉายอันดับแรกเพื่อลบเขตเงาเนื่องจากภาพฉายอันดับแรกแล้วจึงนำส่วนที่ไม่ถูกบดบังไปเปรียบเทียบกับภาพฉายลำดับที่ 2,3,4,..., $n-1$ ก็จะได้ส่วนที่อยู่นอกเขตเงาของผนังนั้น



รูปที่ ข.4 ตัวอย่างภาพฉายของผนังอาคารเมื่อสถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคารโดยรอบ

เมื่อสถานีฐานอยู่บนยอดอาคารลักษณะการบดบังของอาคารจะต่างจากกรณีที่สถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคาร โดยรอบดังรูปที่ ข.5 (1) และ (2)



รูปที่ ข.5 ปัญหาเนื่องจากการซ้อนทับกันของภาพฉาย

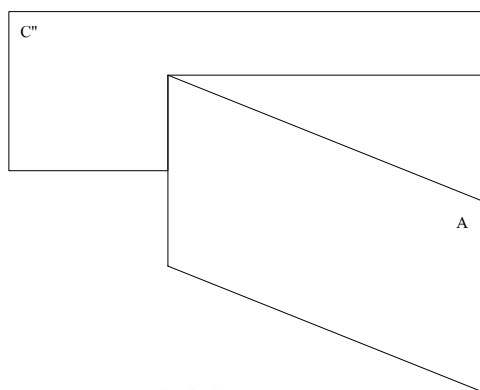
รูปที่ ข.5 (1) แสดงลำดับของภาพฉายโดยภาพฉาย A และ B เป็นด้านประกอบของสันขอบอาคารและอยู่หน้าภาพฉาย C รูปที่ ข.5 (2) เป็นการลบเงตเงาบนส่วนของภาพฉาย C' เนื่องจากภาพฉาย B ส่วนของภาพฉาย C' เป็นส่วนของภาพฉาย C ที่ไม่ถูกบดบังเนื่องจากภาพฉาย A ถ้าให้จุดมุมของภาพฉายเรียงในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ภาพฉาย B เป็นภาพฉายที่อยู่ด้านหน้าเรียกว่าคลิปปีงโพลีกอน ส่วนของภาพฉาย C' อยู่ด้านหลังเรียกว่า ซับเจกโพลีกอน จุดตัดของด้านของภาพฉาย $I_1 - I_5$ จะเป็นจุดเดียวกันกับจุดมุมของภาพฉาย B หรือส่วนของภาพฉาย C' เมื่อนำมาสร้างรายการของจุดบนภาพฉายจะทำให้เกิดการซ้ำซ้อน วิธีแก้ไขคือจุดตัดที่เป็นจุดเดียวกันกับจุดมุมของภาพฉาย (ยกเว้นจุดที่เป็นจุดมุมของภาพฉายทั้งสองภาพ) จุดมุมนั้นจะพิจารณาเป็นจุดตัดแทน การแก้ไขจะทำให้สร้างรายการของคลิปปีงโพลีกอน (clipping list) และรายการของซับเจกโพลีกอน (subject list) ได้ อย่างถูกต้องทำให้การคำนวณพื้นที่นอกเขตเงถูกต้อง รูปที่ ข.6 แสดงการหาพื้นที่นอกเขตเงก่อนและหลังแก้ไขปัญหาการซ้ำซ้อนของจุดบนภาพฉาย จุด I_2 เป็นจุดที่ไม่สามารถระบุได้ว่าด้านของส่วนของภาพฉาย C' ที่ตัดภาพฉาย B แล้วทำให้เกิดจุดตัดนั้นกำลังเข้าสู่หรือออกจากภาพฉาย B เนื่องจากเป็นจุดที่เกิดจากการตัดกันของด้าน S_2S_3 และด้าน S_3S_4 ของส่วนของภาพฉาย C' กับด้าน C_3C_4 ของภาพฉาย B

ก่อนแก้ไข			หลังแก้ไข		
Subject List	Clipping List	External List	Subject List	Clipping List	External List
S_1	C_1	I_4, I_5	S_1	C_1	I_4, I_5
S_2	C_2		I_1	C_2	
I_1	I_4		$S_3(I_2)$	I_4	
S_3	C_3		S_4	I_5	
I_2	I_5	Internal List	I_4	$C_4(I_2)$	Internal List
I_3	C_4	I_1	I_5	I_1	I_1
S_4	I_2		S_6	C_1	
S_5	I_3	Undefined	S_7		Undefined
I_4	I_1	I_2, I_3	S_1		I_2
I_5	C_1				
S_6					
S_7					
S_1					
Outside	$I_4 I_5 C_3 I_4$		Outside	$I_4 I_5 I_4$	
polygon	$I_5 S_6 S_7 S_1 S_2 I_1 I_3 S_4 S_5 I_4 C_2 C_1 I_1 S_3 I_2 C_4 I_5$		polygon	$I_5 S_6 S_7 S_1 I_1 C_4 I_5$	

รูปที่ ข.6 รายการของจุดในการลบเขตเงาก่อนและหลังแก้ไขปัญหาการซ้ำซ้อนของจุด

การแก้ไขปัญหานี้เนื่องจากจุดตัดที่ไม่สามารถระบุได้ว่าอยู่ในรายการของจุดตัดที่ออกจากคลิปปีงโพลีกอนหรือรายการของจุดตัดที่เข้าสู่คลิปปีงโพลีกอนนี้ จะยังคงให้จุดนี้มีคุณสมบัติเป็นจุดมุมของภาพฉายเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการติดตามลำดับของจุดในรายการของจุดของซบเจกโพลีกอนและรายการของจุดของคลิปปีงโพลีกอน ชุดของจุดบนภาพฉายเมื่อลบเขตเงาออกแล้วจะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของจุดตัดในรายการของจุดตัดที่พุ่งออกจากคลิปปีงโพลีกอน ในรูปที่ ข.6 มีชุดของจุดบนภาพฉายเมื่อลบเขตเงาแล้วสองชุด ชุดที่เกิดจากจุดตัด I_4 เป็นเพียงเส้นตรงจะไม่พิจารณาเป็นส่วนของภาพฉายที่ลบเขตเงา ส่วนชุดที่เกิดจากจุดตัด I_5 จะเป็นส่วนของภาพฉายที่ลบเขตเงาที่ถูกต้อง

นอกจากนี้ในกรณีที่มีภาพฉายของผนังซ้อนกันหลายรูปการพิจารณาความสัมพันธ์ของภาพฉายกับภาพฉายก่อนหน้าจากภาพฉายที่อยู่ติดกัน ไปยังภาพฉายอันดับแรกจะช่วยลดความยุ่งยากได้มาก เช่น ในรูปที่ ข.5 หากพิจารณาภาพฉาย C กับภาพฉาย B ก่อนจะได้ภาพฉาย C" เพื่อนำไปลบเขตเงาของภาพฉาย A ดังรูปที่ ข.7 จะพบว่าไม่มีการซ้อนทับกันของบริเวณภายในภาพฉายทั้งสอง จึงไม่เหลือบริเวณที่เป็นเขตเงาทำให้กระบวนการลบเขตเงาของภาพฉาย C ทำได้รวดเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับการลบเขตเงาของภาพฉายหน้าสุดมายังภาพฉายที่อยู่ติดกันเหมือนในกรณีที่สถานีฐานมีความสูงต่ำกว่าอาคารโดยรอบ



รูปที่ ข.7 การลบเขตเงาของภาพฉายจากภาพฉายหน้าที่อยู่ติดกันไปยังภาพฉายแรก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างสิ่งแวดล้อมการแพร่กระจายคลื่น

การวัดผลการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเปรียบเทียบทำในบริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบริเวณถนนอังรีดูนังต์ ซึ่งมีสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปดังนี้

บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาคารภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความสูงไม่มากนัก ความสูง โดยเฉลี่ยประมาณ 20 เมตร บริเวณนี้มีอาคารสูงเพียงอาคารเดียวคืออาคารวิศวกรรมศาสตร์ 4 ลักษณะโดยทั่วไปภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ ค.1 ต้นไม้ ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์มีลักษณะเป็นต้นไม้ใหญ่และต้นไม้ขนาดกลาง โดยบริเวณหน้าอาคาร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและบริเวณด้านหลังอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 และอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 2 มีลักษณะเป็นต้นไม้ใหญ่ทรงพุ่มหนาแน่น ส่วนบริเวณอื่นๆ เป็นต้นไม้ขนาดกลางทรงพุ่มบาง ตัวอย่าง ต้นไม้ที่ใช้วัดสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังคลื่นแสดงในรูปที่ ค.2 รูปที่ ค.3 แสดงการติดตั้งสถานี ฐานและสถานีเคลื่อนที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดทดสอบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายใน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(1) ถนนด้านหลังอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 3

รูปที่ ค.1 บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(2) ถนนด้านหน้าอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า



(3) ถนนด้านหลังอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1 และอาคารวิศวกรรมศาสตร์ 2

รูปที่ ค.1 บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ต่อ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(1) ต้นไม้ทรงพุ่มหนาแน่น



(2) ต้นไม้ทรงพุ่มบาง

รูปที่ ค.2 ตัวอย่างต้นไม้ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่ใช้ในการวัดสัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังคลื่น



(1) สถานีฐาน

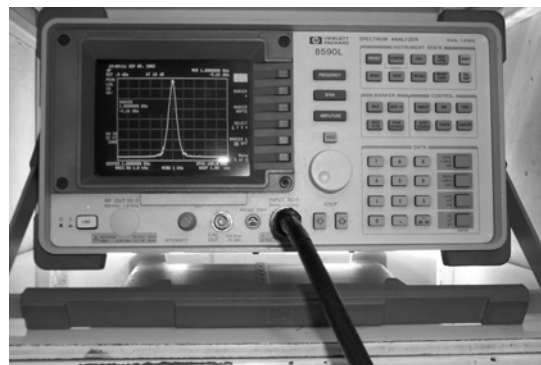


(2) สถานีเคลื่อนที่

รูปที่ ค.3 สถานีฐาน สถานีเคลื่อนที่ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดทดสอบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ



(3) เครื่องกำเนิดสัญญาณ รุ่น HP8648C



(4) เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ รุ่น HP8590L

รูปที่ ค.3 สถานีฐาน สถานีเคลื่อนที่ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ (ต่อ)

บริเวณรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาคารบริเวณรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความสูงต่ำสลับกัน ลักษณะโดยทั่วไปบริเวณรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ ค.4 ต้นไม้ในบริเวณนี้เป็นต้นไม้ใหญ่มีทรงพุ่มหนาแน่น รูปที่ ค.5 แสดงสถานีฐานซึ่งติดตั้งอยู่บนอาคารประชาธิปไตย - ราไพ พรณิ



(1) บริเวณด้านหน้าศาลาพระเกี้ยว เมื่อมองจากบริเวณด้านหน้าอาคารเปรมบวรจักร

รูปที่ ค.4 บริเวณรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(2) บริเวณลานจอดรถศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(3) ถนนด้านหลังอาคารจุลจักรพงษ์



(4) บริเวณถนนด้านหน้าศาลาพระเกี้ยวและอาคารเปรมบุรฉัตร

รูปที่ ก.4 บริเวณรอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ต่อ)



รูปที่ ค.5 สถานีฐานในกรณีทดสอบบริเวณรอบศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บริเวณถนนอังรีดูนังต์

อาคารในบริเวณถนนอังรีดูนังต์ ส่วนใหญ่เป็นอาคารสูงแต่อยู่ห่างกันเป็นช่วงๆ ยกเว้นบริเวณโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ อาคารในบริเวณนี้จะสร้างอยู่ติดกันอย่างหนาแน่นและมีความสูงต่ำปะปนกัน ในบริเวณถนนอังรีดูนังต์นี้จะปลูกต้นไม้บริเวณบาทวิถีและเกาะกลางถนน ต้นไม้บริเวณบาทวิถีจะมีขนาดใหญ่และมีทรงพุ่มหนาแน่นแต่ต้นไม้ที่ปลูกบนเกาะกลางถนนจะมีความสูงไม่มากนักและมีทรงพุ่มบาง ลักษณะโดยทั่วไปบริเวณถนนอังรีดูนังต์แสดงดังรูปที่ ค.6 สถานีฐานบริเวณถนนอังรีดูนังต์แสดงในรูปที่ ค.7



(1) ถนนอังรีดูนังต์ทางด้านสยามแสควร์

รูปที่ ค.6 บริเวณถนนอังรีดูนังต์



(2) ถนนอังรีดูนังต์ทางด้านสี่แยกอังรีดูนังต์

รูปที่ ก.6 บริเวณถนนอังรีดูนังต์ (ต่อ)



รูปที่ ก.7 สถานีฐานในกรณีทดสอบบริเวณถนนอังรีดูนังต์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุรเชษฐ กอสิริขจร เกิดเมื่อวันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2521 ณ เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และได้เข้าศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย