

การเคลื่อนย้ายและการกำจัดจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมของการบริการสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมือง



นางสาวอัชราภรณ์ เนตรนิล

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4776-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MIGRATION AND ELIMINATION OF BLIND SPOTS IN A COVERAGE AREA OF MOBILE  
COMMUNICATION SERVICE IN URBAN ENVIRONMENTS



Miss Aucharaporn Netnil

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 2003

ISBN 974-17-4776-4



อัคราภรณ์ เนตรนิล : การเคลื่อนย้ายและการกำจัดจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมของการบริการสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมือง (MIGRATION AND ELIMINATION OF BLIND SPOTS IN A COVERAGE AREA OF MOBILE COMMUNICATION SERVICE IN URBAN ENVIRONMENTS) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยภาพัฒนกร, 132 หน้า, ISBN 974-17-4776-4.

จุดบอดคือบริเวณเล็ก ๆ ในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน ซึ่งมีระดับสัญญาณต่ำหรือไม่มีสัญญาณเลย อาจเป็นบริเวณที่สัญญาณรบกวนมีระดับสูงกว่าระดับสัญญาณที่ต้องการ งานวิจัยนี้นิยามจุดบอดให้หมายถึงบริเวณที่มีความเข้มของสนามต่ำกว่า  $-100$  dBm การศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของจุดบอดและได้แนวทางเคลื่อนย้ายจุดบอดไปในบริเวณที่มีผู้ใช้น้อยหรือบริเวณที่สามารถกำจัดจุดบอดได้ การศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและความสูงของสถานีฐาน พบว่าเงื่อนไขที่จำเป็นของการเกิดจุดบอดคือตำแหน่งของเครื่องรับไม่สามารถรับรังสีตรงได้ การทำนายตำแหน่งของจุดบอดทำได้โดยการพิจารณารังสีที่มีนัยสำคัญสูงสองรังสี การหักล้างเชิงวิภาคของรังสีที่มีนัยสำคัญสูงที่มาถึงตำแหน่งของเครื่องรับสามารถใช้ในการทำนายตำแหน่งของจุดบอด ตำแหน่งที่มีความน่าจะเป็นการเป็นของจุดบอดสูงคือตำแหน่งที่ความต่างวิภาคของรังสีที่มีนัยสำคัญสูงมีค่าเป็น  $180 \pm 45$  องศา การกำจัดจุดบอดทำได้โดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบแบนราบ การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระเจิงจากตัวสะท้อนคลื่นใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ การติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีเงื่อนไขคือตัวสะท้อนคลื่นต้องสามารถรับรังสีตรงจากสถานีฐานและไม่มีการบดบังรังสีกระเจิงจากตัวสะท้อนคลื่นที่ไปยังตำแหน่งจุดบอด กำลังรับคำนวณได้จากผลรวมของสนามไฟฟ้าที่เดินทางมาถึงตำแหน่งจุดบอด การทดสอบวัดเพื่อตรวจสอบการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นทำโดยการตั้งสถานีฐานในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แล้ววัดทดสอบและวัดทดสอบในพื้นที่บริการของระบบสื่อสารเคลื่อนที่จริง ผลการทดลองในคณะวิศวกรรมศาสตร์สอดคล้องกับผลการคำนวณ เมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นกำลังรับที่ตำแหน่งจุดบอดเพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB ถึง 5 dB ในพื้นที่บริการจริงผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับผลการคำนวณ กำลังรับที่ตำแหน่งจุดบอดเพิ่มขึ้นประมาณ 2 dB ถึง 3 dB ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากความแม่นยำของฐานข้อมูลและการมียานพาหนะสัญจรในบริเวณทดสอบขณะที่ทดลอง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อกำจัดจุดบอด

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา ..... 2546 .....

# # 4470654421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: GEOMETRICAL OPTICS / UNIFORM THEORY OF DIFFRACTION / BLIND SPOT  
MIGRATION / BLIND SPOT ELIMINATION / MIGRATION MAP

AUCHARAPORN NETNIL : MIGRATION AND ELIMINATION OF BLIND SPOTS IN A  
COVERAGE AREA OF MOBILE COMMUNICATION SERVICE IN URBAN ENVIRONMENTS.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHATCHAI WAIYAPATTANAKORN, Ph.D., 132 pp.  
ISBN 974-17-4776 -4.

Blind spot is a small area in the coverage area of a base station that very weak signal or none at all exists. It may also be an area where the noise level is higher than the desired signal level. This research defines blind spot as an area that the field strength is lower than  $-100$  dBm. Blind spot migration is investigated in order to understand the moving behaviour and obtain some guideline for moving such spot to an area where there are fewer users or completely eliminating it. It is found from the study of blind spot migration, when the transmitter location and transmitter heights are changed, that the necessary condition of occurrence of the blind spot is non-line-of-sight receiver location. The prediction of blind spot location may be achieved by using a couple of highly significant rays. Phase cancellation of certain highly significant rays arriving at the receiver location is useful in blind spot location prediction. The location of high probability to be the blind spot has the phase difference of the highly significant rays in the range  $180 \pm 45$  degree. Blind spots can be eliminated by using a square flat conducting plate reflector. The scattered field from the reflector can be obtained by using the moment method. The location for placing the reflector is where it can receive direct ray from the base station and no obstruction to the scattered rays from the reflector to the blind spot location present. The received power is calculated from the vector sum of electric field arriving at the blind spot location. Experimental drive tests for verifying the elimination of blind spots by using a reflector have been carried out in the Faculty of Engineering Chulalongkorn University and in a real service area of a commercial mobile communication network. The experimental results in the Faculty of Engineering agree well with simulation results, the received power at the blind spot location increases by about 3 dB to 5 dB when the reflector is present. In real service area, the experimental results have the same tendency as the simulation results, the received power at the blind spot location increases by about 2 dB to 3 dB. The discrepancies arise as a consequence of the available database inaccuracy and the presence of some vehicles at the time of the experiments. Thus, the elimination of blind spots by using a reflector is a viable approach.

Department ..... Electrical Engineering ..... Student's signature .....

Field of study ..... Electrical Engineering ..... Advisor's signature .....

Academic year ..... 2003 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยยาพัฒนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพัฒน์มงคล รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ที่ได้กรุณาใช้เวลาให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.ศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข ดร.ธีรศักดิ์ อนันตกุล คุณวิลาศ วงศ์แจ่มบุญ และคุณสุรเชษฐ์ กอสิริขจร ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้และขอขอบคุณ คุณสุวิชาญ กาวาฮารา คุณณัฐพงศ์ คุ้มณา คุณคทา สุวรรณวัฒน์ คุณรชฏ ถาวรศิริ และคุณกุลธวัช ภูมิวงศ์พิทักษ์ ที่ให้คำปรึกษาและใช้เวลาให้ความช่วยเหลือในการทดลองงานวิจัยสำเร็จด้วยดี และขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ทุกคนทั้งที่อยู่ในศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีระบบโทรคมนาคมและที่อื่น ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและญาติ ๆ ทุกคนที่ช่วยสนับสนุนด้านการเรียนและเป็นกำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
หลักการและทฤษฎีที่ใช้.....	2
ทฤษฎีเบื้องต้น.....	2
การพิจารณาการเกิดจุดบอด.....	2
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
คำนิยามที่ใช้ในการวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	6
บทที่ 2 การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของจุดบอด.....	7
ความนำ.....	7
2.1 การเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ.....	8
2.1.1 การคำนวณจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ เมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐาน.....	8
2.1.2 การทดลองเพื่อศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด เมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐาน.....	21
2.2 การเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อสถานีฐานมีความสูงต่าง ๆ.....	22
2.2.1 การคำนวณด้วยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐาน.....	23

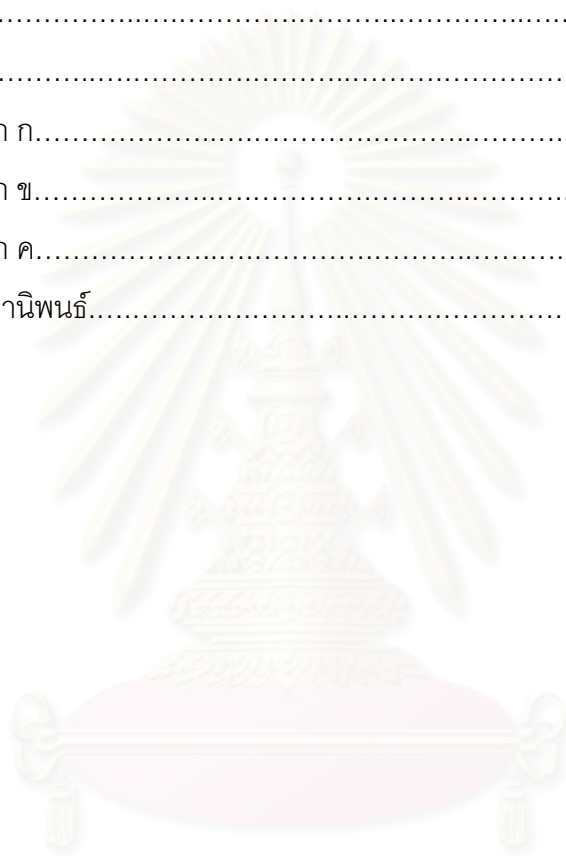
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.2 การทดลองเพื่อศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด เมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐาน.....	26
2.3 การทำนายการเกิดจุดบอดเบื้องต้น.....	27
สรุป.....	32
บทที่ 3 การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น.....	34
ความนำ.....	34
3.1 แนวคิดและขั้นตอนการวิเคราะห์.....	34
3.2 ระเบียบวิธีวิเคราะห์การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น.....	37
3.2.1 การดำเนินการตามระเบียบวิธีโมเมนต์.....	37
3.2.2 ระเบียบวิธีโมเมนต์สำหรับแผ่นโลหะตัวนำแบนราบ.....	40
3.3 การนำตัวสะท้อนคลื่นไปประกอบกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น.....	47
3.3.1 การปรับมุมตัวสะท้อนคลื่น.....	47
3.3.2 การหาค่าสนามไฟฟ้าตกกระทบบนแผ่นย่อยแต่ละแผ่น ของตัวสะท้อนคลื่น.....	51
3.3.3 การคำนวณสนามไฟฟ้ารับที่สถานีเคลื่อนที่รับได้.....	53
3.4 ผลการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น.....	55
3.4.1 ผลการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นภายใน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	57
3.4.2 ผลการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นบริเวณ ศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	79
3.4.3 เปรียบเทียบความสามารถครอบคลุม.....	91
สรุป.....	92
บทที่ 4 แนวทางในการเลือกค่าปัจจัยที่ช่วยลดจำนวนจุดบอด.....	94
ความนำ.....	94
4.1 ตำแหน่งสถานีฐาน.....	94
4.2 การติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น.....	99
สรุป.....	111



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปรงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	113
สรุปรงานวิจัย.....	113
ข้อเสนอแนะ.....	114
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก.....	119
ภาคผนวก ข.....	122
ภาคผนวก ค.....	128
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	132



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์และฐานข้อมูลการศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด.....	9
2.2 ผลการทำนายการเกิดจุดบอดบริเวณที่ 2 ( $BS_2$ ).....	29
2.3 ผลการทำนายการเกิดจุดบอดบริเวณที่ 1 ( $BS_1$ ).....	30
2.4 ผลการตรวจสอบความเป็นไปได้ที่จะเป็นจุดบอดของตำแหน่ง A และ I.....	31
3.1 ค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นในกรณีที่ 1 ตัวสะท้อนคลื่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น.....	65
3.2 ค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นในกรณีที่ 2 ตัวสะท้อนคลื่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น.....	67
3.3 ค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นในกรณีที่ 1 ตัวสะท้อนคลื่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น.....	73
3.4 ค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นในกรณีที่ 2 ตัวสะท้อนคลื่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น.....	75
3.5 การปรับมุมตัวสะท้อน.....	80
3.6 เปรียบเทียบความสามารถครอบคลุมภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์.....	91
4.1 รายละเอียดของสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่.....	95
4.2 ค่าปัจจัยต่าง ๆ ของตัวสะท้อนคลื่นเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx3.....	102
4.3 เปรียบเทียบความสามารถครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx3.....	106
4.4 ค่าปัจจัยต่าง ๆ ของตัวสะท้อนคลื่น 1 เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx1.....	108
4.5 เปรียบเทียบความสามารถครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx1 ตัวสะท้อนคลื่นอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1.....	109
4.6 ค่าปัจจัยต่าง ๆ ของตัวสะท้อนคลื่น 2 เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx1.....	110
4.7 เปรียบเทียบความสามารถครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx1 ตัวสะท้อนคลื่นอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2.....	111

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะการเกิดจุดบอด.....3	
(ก) ตัวอย่างภูมิลักษณะที่เกิดจุดบอด ตำแหน่งของสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่	
(ข) รัศมีที่พิจารณาที่ทำให้เกิดจุดบอดเมื่อทางเดินคลื่นถูกกีดขวางด้วยอาคารสูง	
(ค) แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมของภูมิลักษณะตามรูปที่ 1.1(ก) และบริเวณจุดบอด	
2.1 บริเวณศึกษาภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....8	
2.2 ตำแหน่งสถานีฐานเพื่อการศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 1.....9	
2.3 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 1.....10	
(ก) สถานีฐานตำแหน่งที่ 1 (ข) สถานีฐานตำแหน่งที่ 2 (ค) สถานีฐานตำแหน่งที่ 3	
(ง) สถานีฐานตำแหน่งที่ 4 (จ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 5 (ฉ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 6	
(ช) สถานีฐานตำแหน่งที่ 7 (ซ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 8 (ฌ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 9	
(ญ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 10 (ฎ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 11 (ฏ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 12	
2.4 ตำแหน่งจุดบอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 1.....13	
(ก) กลุ่มที่ 1 จุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 1-4	
(ข) กลุ่มที่ 2 จุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 5-6	
(ค) กลุ่มที่ 3 จุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 7-9	
(ง) กลุ่มที่ 4 จุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 10-12	
2.5 แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายสถานีฐานทั้ง 4 กลุ่ม.....13	
(ก) แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายจากสถานีฐานกลุ่มที่ 1 ไปกลุ่มที่ 2	
(ข) แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายจากสถานีฐานกลุ่มที่ 2 ไปกลุ่มที่ 3	
(ค) แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายจากสถานีฐานกลุ่มที่ 3 ไปกลุ่มที่ 4	
2.6 ตำแหน่งสถานีฐานเพื่อการศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 2.....18	
2.7 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจากการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 2.....19	
(ก) สถานีฐานตำแหน่งที่ 1 (ข) สถานีฐานตำแหน่งที่ 2	
(ค) สถานีฐานตำแหน่งที่ 3 (ง) สถานีฐานตำแหน่งที่ 4	
2.8 แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 2.....20	

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.9 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจากการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 2.....	21
(ก) สถานีฐานตำแหน่งที่ 1 (ข) สถานีฐานตำแหน่งที่ 2 (ค) สถานีฐานตำแหน่งที่ 3 (ง) สถานีฐานตำแหน่งที่ 4	
2.10 แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดที่ได้จากผลการทดลองในกรณีที่ 2.....	22
2.11 ตำแหน่งสถานีฐานเพื่อการศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐาน.....	23
2.12 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจากการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ความสูงสถานีฐานในกรณีที่ 1.....	24
(ก) สถานีฐานสูง 1.90 เมตร (ข) สถานีฐานสูง 5 เมตร (ค) สถานีฐานสูง 10 เมตร (ง) สถานีฐานสูง 15 เมตร (จ) สถานีฐานสูง 20 เมตร (ฉ) สถานีฐานสูง 25 เมตร	
2.13 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจากการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ความสูงสถานีฐานในกรณีที่ 2.....	26
(ก) สถานีฐานสูง 1.90 เมตร (ข) สถานีฐานสูง 7.05 เมตร (ค) สถานีฐานสูง 17.73 เมตร	
2.14 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจากการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ความสูงสถานีฐานในกรณีที่ 2.....	27
(ก) สถานีฐานสูง 1.90 เมตร (ข) สถานีฐานสูง 7.05 เมตร (ค) สถานีฐานสูง 17.73 เมตร	
2.15 ตำแหน่งสถานีฐานและตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่เพื่อทำนายการเกิดจุดบอดเบื้องต้น.....	28
2.16 การย้ายตำแหน่งโดยรอบตำแหน่งทดสอบ A และ I เพื่อการทำนายการเกิดจุดบอด.....	31
2.17 กระบวนการทำนายการเกิดจุดบอด.....	32
3.1 ลักษณะการวางตำแหน่งของตัวสะท้อนคลื่น.....	35
(ก) ทางเดินรังสีเมื่อไม่ใช้ตัวสะท้อนคลื่น (ข) ทางเดินของรังสีเมื่อใช้ตัวสะท้อนคลื่น	
3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น.....	36
3.3 ตัวอย่างของฟังก์ชันฐาน.....	38
(ก) entire domain (ข) subsectional	
3.4 แผ่นโลหะตัวนำสมบูรณ์แบนราบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 การขยายกระแสและประจุบนแผ่นโลหะที่วางอยู่บนระนาบ $xy$ .....	41
(ก) ภาพสองมิติการขยายกระแสและการขยายประจุไปตามแกน $x$	
(ข) ภาพสามมิติการขยายกระแสและการขยายประจุไปตามแกน $x$	
(ค) ภาพสองมิติการขยายกระแสและการขยายประจุไปตามแกน $y$	
(ง) ภาพสามมิติการขยายกระแสและการขยายประจุไปตามแกน $y$	
3.6 ระบบพิกัดแบบจำลองและระบบพิกัดตัวสะท้อนคลื่น.....	48
3.7 ระบบพิกัดตัวสะท้อนคลื่นเมื่อหมุนมุมรอบแกน $x'$ .....	49
3.8 ระบบพิกัดตัวสะท้อนคลื่นเมื่อหมุนมุมรอบแกน $y'$ .....	50
3.9 เรขาคณิตของสายอากาศขั้วคู่.....	51
3.10 สนามไฟฟ้าตกกระทบบนแผ่นย่อยแต่ละแผ่น.....	53
3.11 สนามไฟฟ้ากระเจิงจากแผ่นย่อยของตัวสะท้อนคลื่นมายังสถานีเคลื่อนที่.....	54
3.12 บริเวณศึกษาภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	56
3.13 บริเวณศึกษารอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	56
3.14 ตำแหน่งสถานีฐานและตัวสะท้อนคลื่นในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	57
3.15 แนวการปรับมุมของตัวสะท้อนคลื่นด้วยมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ และ $-45^\circ$ (อ้างอิงมุมตามรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8) .....	58
3.16 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น.....	59
3.17 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น.....	59
(ก) $\theta_{rot} = 90^\circ$ และ $\gamma_{rot} = -25^\circ$ (ข) $\theta_{rot} = 90^\circ$ และ $\gamma_{rot} = -45^\circ$	
3.18 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น.....	60
(ก) $\theta_{rot} = 90^\circ$ และ $\gamma_{rot} = -25^\circ$ (ข) $\theta_{rot} = 90^\circ$ และ $\gamma_{rot} = -45^\circ$	
3.19 ตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่รับรังสีตรงได้ที่ศึกษา.....	61
3.20 ตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่รับรังสีตรงไม่ได้ที่ศึกษา.....	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงได้ ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ และ $-45^\circ$ .....	62
3.22 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงได้ ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ และ $-45^\circ$ .....	62
3.23 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้ง ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ และ $-45^\circ$ .....	63
(ก) เส้นทางที่ 1      (ข) เส้นทางที่ 2      (ค) เส้นทางที่ 3	
3.24 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้ง ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ และ $-45^\circ$ .....	65
(ก) เส้นทางที่ 1      (ข) เส้นทางที่ 2      (ค) เส้นทางที่ 3	
3.25 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น.....	67
3.26 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น.....	68
3.27 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น.....	68
3.28 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น.....	69
3.29 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงได้ ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ และ $-45^\circ$ .....	70
3.30 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงได้ ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ และ $-45^\circ$ .....	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.31 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางการรับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้ง ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ และ $-45^\circ$ .....71 (ก) เส้นทางที่ 1      (ข) เส้นทางที่ 2      (ค) เส้นทางที่ 3	71
3.32 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางการรับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้ง ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ และ $-45^\circ$ .....73 (ก) เส้นทางที่ 1      (ข) เส้นทางที่ 2      (ค) เส้นทางที่ 3	73
3.33 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองกรณีที่ 1.....75 (ก) ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น (ข) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ (ค) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -45^\circ$	75
3.34 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองกรณีที่ 2.....77 (ก) ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น (ข) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -25^\circ$ (ค) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ปรับมุม $\theta_{rot} = 90^\circ$ และมุม $\gamma_{rot} = -45^\circ$	77
3.35 เส้นทางที่ศึกษาและตำแหน่งการวางตัวสะท้อนคลื่น.....79	79
3.36 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเกี้ยว.....80	80
3.37 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเกี้ยว.....81	81
3.38 เส้นทางที่ศึกษา เส้นทางย่อยและตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่.....82 (ก) เส้นทางที่ 1      (ข) เส้นทางที่ 2	82
3.39 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 1.....83	83
3.40 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 2.....83	83
3.41 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 3.....84	84
3.42 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเกี้ยว.....85	85
3.43 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเกี้ยว.....85	85
3.44 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 1.....86	86
3.45 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 2.....86	86

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.46 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 3.....	87
3.47 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองเส้นทางที่ 1.....	88
(ก) ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น (ข) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น	
3.48 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองเส้นทางที่ 2.....	89
(ก) ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น (ข) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น	
3.49 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองเส้นทางที่ 3 .....	90
4.1 ตำแหน่งสถานีฐาน.....	95
4.2 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ.....	96
(ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2 (ค) กรณีที่ 3 (ง) กรณีที่ 4	
(จ) กรณีที่ 5 (ฉ) กรณีที่ 6 (ช) กรณีที่ 7	
4.3 มุมก้มของสายอากาศ.....	97
4.4 ลักษณะการวางตัวสะท้อนคลื่น.....	99
(ก) ลักษณะการวางตัวสะท้อนคลื่น	
(ข) รัศมีของคลื่นที่เดินทางมาจากสถานีฐานมีการตกกระทบและสะท้อนไปยังบริเวณจุดยอด	
4.5 การแบ่งประเภทระเบียบวิธีวิเคราะห์.....	100
4.6 ตำแหน่งสถานีฐาน Tx3 และตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่น.....	102
4.7 พื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของสถานีฐาน Tx3.....	103
4.8 พื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของสถานีฐาน Tx3.....	103
(ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2 (ค) กรณีที่ 3 (ง) กรณีที่ 4	
(จ) กรณีที่ 5 (ฉ) กรณีที่ 6 (ช) กรณีที่ 7 (ซ) กรณีที่ 8	
(ณ) กรณีที่ 9 (ญ) กรณีที่ 10 (ฎ) กรณีที่ 11 (ฏ) กรณีที่ 12	
4.9 ตำแหน่งสถานีฐาน Tx1 และตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นทั้ง 2 ตำแหน่ง.....	107
4.10 พื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของสถานีฐาน Tx1.....	108
4.11 พื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งที่ 1 ของสถานีฐาน Tx1.....	108
(ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2 (ค) กรณีที่ 3 (ง) กรณีที่ 4	
4.12 พื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งที่ 2 ของสถานีฐาน Tx1.....	110
(ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2 (ค) กรณีที่ 3 (ง) กรณีที่ 4	
ก.1 ขั้นตอนการคำนวณสนามไฟฟ้าแบบกึ่งสามมิติ.....	119



## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.2 แนวรังสีในระนาบตั้งฉาก .....	120
(1) แนวรังสีเฉียงเบน (2) แนวรังสีตรงและรังสีสะท้อน	
ก.3 ระนาบเอียงและแนวตัดกับพื้นผิวสะท้อน.....	120
ก.4 เส้นทางเชื่อมระหว่างสายอากาศส่งมายังจุดขอบและจากจุดขอบไปยังสายอากาศรับ.....	121
ข.1 บริเวณทดสอบ.....	122
(1) บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
(2) บริเวณศาลาพระเกี้ยว	
ข.2 สถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ที่ใช้ทดลองภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์.....	124
(1) สถานีฐาน (2) สถานีเคลื่อนที่	
ข.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศชั่วคราว.....	125
ข.4 ตำแหน่งรับของสถานีเคลื่อนที่.....	125
ข.5 สถานีฐานของการทดลองบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	126
ข.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่เป็นสถานีฐานของการทดลอง บริเวณศาลาพระเกี้ยว.....	126
ข.7 ลักษณะตัวสะท้อนคลื่น.....	127
(1) ตัวสะท้อนคลื่นขนาด 2 เท่าความยาวคลื่น	
(2) ตัวสะท้อนคลื่นขนาด 3 เท่าความยาวคลื่น	
ค.1 ลักษณะเวกเตอร์ที่ขอบเฉียงเบน.....	129

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาและปรับปรุงการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยเฉพาะการปรับปรุงโครงข่ายระบบสื่อสารให้มีประสิทธิภาพสามารถครอบคลุมพื้นที่บริการได้อย่างทั่วถึง การศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายคลื่นวิทยุมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้เครื่องลูกข่ายและสถานีฐานสามารถติดต่อกันได้ในทุกบริเวณ นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาพฤติกรรมการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเชิงวิเคราะห์ที่ซึ่งถือเป็นเครื่องมือหลักของการออกแบบและวางแผนโครงข่ายระบบสื่อสารเคลื่อนที่ที่สามารถทำนายการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในบริเวณต่าง ๆ ได้ และมีความพยายามที่จะพัฒนาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเพื่อให้สามารถทำนายได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ยังผลให้การออกแบบและการวางแผนระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด

ในระบบสื่อสารเคลื่อนที่แม้จะมีการออกแบบและวางแผนระบบสำหรับการวางตำแหน่งสถานีฐานเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่บริการได้อย่างทั่วถึง แต่ยังคงพบว่ามีบริเวณครอบคลุมโดยสถานีฐานมีบริเวณที่รับสัญญาณได้ต่ำ เนื่องจากมีการกีดขวางทางเดินสัญญาณที่เดินทางจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่ที่เกิดเป็นพื้นที่เงา (shadow area) ที่มีกำลังรับระดับต่ำกว่าค่าที่กำหนดหรือต่ำกว่าความไว (sensitivity) ที่สถานีเคลื่อนที่จะรับได้ รวมถึงบริเวณที่ระดับสัญญาณรบกวน (noise) มีค่ามากจนทำให้ไม่สามารถสื่อสารได้ ซึ่งเรียกบริเวณดังกล่าวนี้ว่า จุดบอด (blind spot) การเกิดจุดบอดทำให้คุณภาพของสัญญาณลดลงและไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด (blind spot migration) การศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดจะทำให้รู้พฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงของจุดบอด เช่นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อสังเกตพฤติกรรมของจุดบอดและศึกษาวิธีการกำจัดจุดบอด แนวคิดการกำจัดจุดบอดของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในเขตเมืองมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มคุณภาพพื้นที่ครอบคลุมและปรับปรุงการให้บริการให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ปัจจุบันการกำจัดจุดบอดทำได้โดยการเพิ่มสถานีฐานเพื่อให้มีพื้นที่บริการครอบคลุมจุดบอด ข้อเสียของการเพิ่มสถานีฐาน คือค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสูงและการเพิ่มสถานีฐานทำให้มีจำนวนบริเวณครอบคลุมโดยสถานีฐาน (จำนวนเซลล์) เพิ่มขึ้น ซึ่งในระบบที่ใช้กรรมวิธีนำความถี่กลับมาใช้ (frequency reuse) จะต้องมีการจัดสรรความถี่ให้กับเซลล์ใหม่เพื่อไม่ให้เกิดการแทรกสอดกันของสัญญาณ หากระบบ

เดิมมีการวางแผนไม่ยืดหยุ่นเพียงพอการเพิ่มสถานีฐานก็ไม่สามารถทำได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอวิธีการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อสะท้อนสัญญาณไปยังจุดบอด การใช้ตัวสะท้อนคลื่นมีข้อดีคือค่าใช้จ่ายในการติดตั้งต่ำ ประหยัดพลังงานและไม่ต้องมีการจัดสรรความถี่ใหม่เพราะว่าจำนวนเซลล์ไม่ได้เพิ่มขึ้น

งานวิจัย [1,2] เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวสะท้อนคลื่นมาใช้ในการเพิ่มคุณภาพของสัญญาณแต่เป็นการเพิ่มคุณภาพของสัญญาณภายในอาคาร ซึ่งได้ทดลองนำตัวสะท้อนคลื่นแบบนูน (convex reflector) ไปวางยังมุมต่าง ๆ ของห้องสี่เหลี่ยมโดยละเลยผลของสัญญาณพหุวิถี (multipath) อันดับสูง ๆ พิจารณาเพียงรังสีตรง รังสีสะท้อนจากผนังห้องอันดับที่ 1 และรังสีสะท้อนจากตัวสะท้อนคลื่นที่สามารถเดินทางไปยังเครื่องรับได้ และเมื่อพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นที่จะใช้งานไม่ได้ (outage probability) พบว่าการใช้ตัวสะท้อนคลื่นทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะใช้งานไม่ได้มีค่าต่ำลง 1.5 dB ถึง 3 dB (มีคุณภาพสัญญาณดีขึ้น) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ใช้ตัวสะท้อนคลื่น และเสนอการเพิ่มคุณภาพของสัญญาณภายในอาคารโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นเนื่องจากมีราคาถูกและสร้างได้ง่าย

## **หลักการและทฤษฎีที่ใช้**

### ทฤษฎีเบื้องต้น

การพิจารณาพฤติกรรมของจุดบอดและการกำจัดจุดบอดได้นำทฤษฎีเชิงรังสีมาใช้ โดยมีพื้นฐานอยู่บนกรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต (Geometrical Optics, GO) ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป (Uniform Theory of Diffraction, UTD) ทฤษฎีเหล่านี้เป็นทฤษฎีที่ใช้การประมาณเข้ามาพิจารณาพฤติกรรมของคลื่นในย่านความถี่สูงเพื่อลดรูปของปัญหาให้มีความซับซ้อนน้อยลงและสะดวกในการแก้ปัญหาเมื่อเทียบกับการแก้ปัญหาโดยใช้ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิเคราะห์

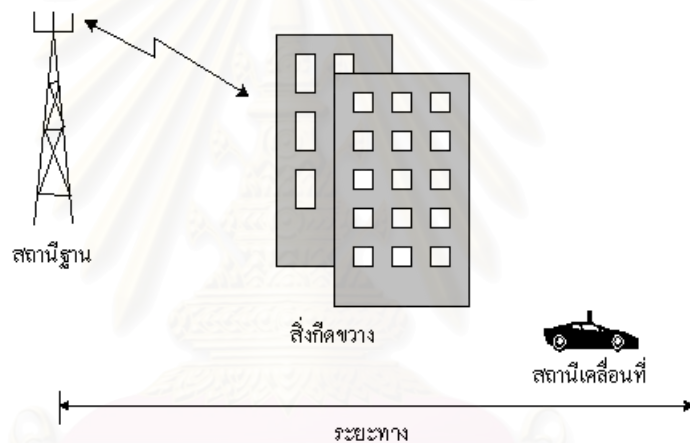
การคำนวณสนามที่สะท้อนจากตัวสะท้อนคลื่นสำหรับการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นได้นำระเบียบวิธีโมเมนต์ (Method of Moment) มาวิเคราะห์ เนื่องจากขนาดของตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้มีขนาดสองถึงห้าเท่าของความยาวคลื่น จึงใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์เพื่อให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้มีความถูกต้องกว่าการใช้กรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต

### การพิจารณาการเกิดจุดบอด

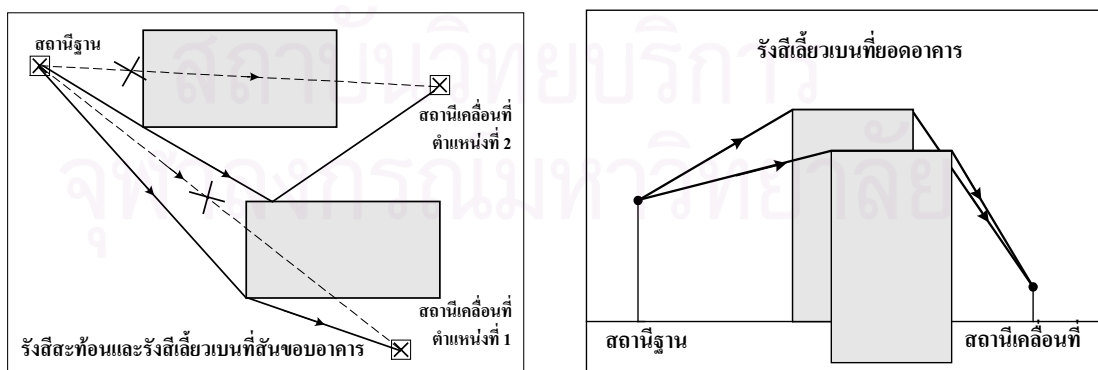
การพิจารณาการเกิดจุดบอดสำหรับการสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมืองโดยใช้ทฤษฎีเชิงรังสีทำได้โดยพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่สูงในลักษณะของลำรังสี เมื่อมีคลื่นแพร่กระจายออกไปในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวาง คลื่นจะสะท้อนและเลี้ยวเบนเกิดเป็นรังสีสะท้อนและรังสีเลี้ยวเบนไปยังบริเวณต่าง ๆ ทำให้สถานีเคลื่อนที่รับกำลังของสัญญาณได้แตกต่างกัน

บริเวณที่เป็นจุดบอดนั้นมักจะเป็นบริเวณที่ทางเดินคลื่นถูกกีดขวางด้วยสิ่งกีดขวาง เช่น อาคารสูง ทำให้รังสีตรงไม่สามารถเดินทางไปยังสถานีเคลื่อนที่ได้ รังสีที่สามารถเดินทางไปถึงสถานีเคลื่อนที่ที่บริเวณจุดบอดได้มีแต่เพียงรังสีสะท้อนและรังสีเลี้ยวเบนซึ่งเป็นกลไกการแพร่กระจายคลื่นที่พิจารณาที่จุดบอด เนื่องจากรังสีดังกล่าวมีค่าการลดทอนสูงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น [3] นอกจากนี้ บริเวณที่เป็นจุดบอดยังเกิดจากการหักล้างกันของรังสีที่เดินทางไปยังบริเวณจุดบอด เช่นบริเวณที่รับรังสีตรงได้แต่มีการหักล้างกับรังสีสะท้อน ส่งผลให้เกิดบริเวณจุดบอดซึ่งมีกำลังรับที่ต่ำ

โดยทั่วไปแล้วรังสีที่เดินทางไปยังจุดบอดซึ่งเกิดจากการกีดขวางด้วยอาคารสูงประกอบด้วยรังสีสะท้อนและรังสีเลี้ยวเบนที่ขอบ แต่ในกรณีที่สถานีฐานมีความสูงใกล้เคียงหรือสูงกว่า ความสูงของอาคารจะมีรังสีเลี้ยวเบนที่ยอดอาคารซึ่งควรนำมาพิจารณาด้วย รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างของการเกิดจุดบอด รังสีที่ไปยังจุดบอด และแผนภาพพื้นที่ครอบคลุม

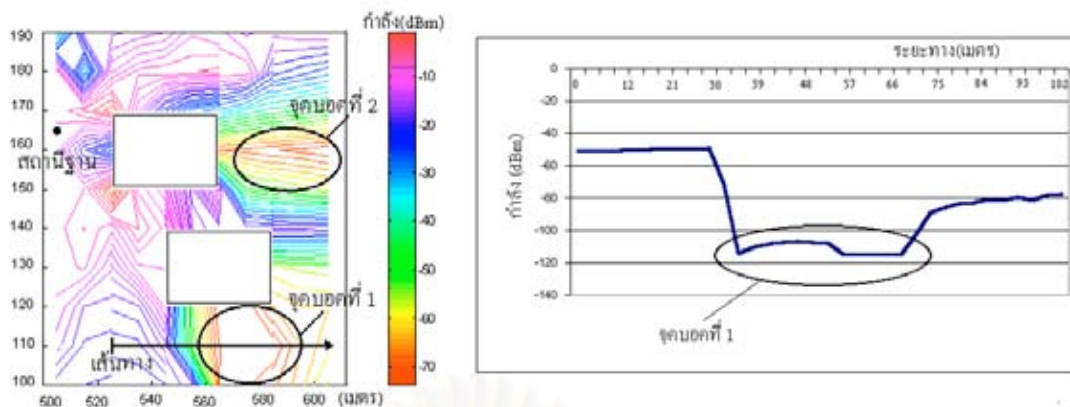


(ก) ตัวอย่างภูมิลักษณะที่ทำให้เกิดจุดบอด ตำแหน่งของสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่



(ข) รังสีที่พิจารณาที่จุดบอดเมื่อทางเดินคลื่นถูกกีดขวางด้วยอาคารสูง

รูปที่ 1.1 ลักษณะการเกิดจุดบอด



(ค) แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมของภูมิลักษณะตามรูปที่ 1.1(ก) และบริเวณจุดบอด

### รูปที่ 1.1 ลักษณะการเกิดจุดบอด (ต่อ)

ผลรวมของรังสีที่รับได้โดยสถานีเคลื่อนที่บริเวณใด ๆ นั้น จะเป็นตัวพิจารณาว่าบริเวณใดเป็นจุดบอด โดยสังเกตได้จากค่ากำลังรับ ซึ่งถ้ากำลังรับที่ได้มีค่าต่ำกว่าความไวของสถานีเคลื่อนที่ จะรับได้หรือมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด บริเวณนั้นจะพิจารณาว่าเป็นจุดบอด

งานวิจัยนี้ศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของจุดบอดจากแผนภาพแสดงพื้นที่ครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ และเสนอแนวคิดการกำจัดจุดบอดในระบบสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมือง โดยการใช้ตัวสะท้อนคลื่นมาสะท้อนสัญญาณจากบริเวณที่มีสัญญาณแรงพอไปยังจุดบอดเพื่อให้กำลังรับสูงขึ้น พิจารณาค่าปัจจัยที่ช่วยลดจำนวนจุดบอดรวมทั้งศึกษาเงื่อนไข และความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้งานจริง

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของจุดบอดจากแผนภาพแสดงพื้นที่ครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ
2. เสนอแนวคิดการใช้ตัวสะท้อนคลื่นที่มีลักษณะทางเรขาคณิตอย่างง่ายในการกำจัดจุดบอด
3. หาแนวทางในการเลือกค่าปัจจัยที่ช่วยลดจำนวนจุดบอดในระบบสื่อสารเคลื่อนที่

### ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษารวบรวมความรู้เชิงทฤษฎีเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดจุดบอดและแนวทางการกำจัดจุดบอดในระบบสื่อสารเคลื่อนที่
2. ศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของจุดบอดจากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมที่ได้จากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในเขตเมือง

3. ประยุกต์ใช้ตัวสะท้อนคลื่นที่มีลักษณะทางเรขาคณิตอย่างง่ายแบบแบนราบเพื่อกำจัดจุดบอดในระบบสื่อสารเคลื่อนที่
4. ทดลองวัดสนามเพื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถครอบคลุมของกรณีไม่ใช้ตัวสะท้อนคลื่นและเมื่อใช้ตัวสะท้อนคลื่นบริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและพื้นที่บริการจริง 1 ถึง 2 พื้นที่บริการ
5. ศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้ตัวสะท้อนคลื่นที่มีลักษณะทางเรขาคณิตอย่างง่ายแบบแบนราบเพื่อกำจัดจุดบอดในการใช้งานจริง

### **คำนิยามที่ใช้ในการวิจัย**

#### **ภาษาไทย**

ทัศนศาสตร์เรขาคณิต ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป การเคลื่อนย้ายของจุดบอด การกำจัดจุดบอด แผนภาพการเคลื่อนย้าย

#### **ภาษาอังกฤษ**

Geometrical Optics, Uniform Theory of Diffraction, Blind Spot Migration, Blind Spot Elimination, Migration Map

### **ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1. ทราบกลไกของการเกิดจุดบอดและลักษณะการเคลื่อนย้ายของจุดบอด
2. ให้ข้อเสนอแนะในการนำตัวสะท้อนคลื่นที่มีลักษณะทางเรขาคณิตอย่างง่ายไปประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณในพื้นที่ครอบคลุมของบริการสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมือง

### **วิธีดำเนินการวิจัย**

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่น การเคลื่อนย้ายของจุดบอด การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ครอบคลุมเมื่อสถานีฐานเปลี่ยนตำแหน่ง และปัจจัยที่ทำให้เกิดจุดบอด
2. ศึกษาแนวทางและวิธีนำตัวสะท้อนคลื่นที่มีลักษณะทางเรขาคณิตอย่างง่ายมากำจัดจุดบอด
3. วิเคราะห์และคำนวณผลการกำจัดจุดบอด
4. เสนอค่าปัจจัยและแนวทางแก้ไขที่เหมาะสม
5. สรุปงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

### ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน โดยบทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา และมูลเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ หลักการและทฤษฎีที่ใช้ วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และวิธีดำเนินการวิจัย บทที่ 2 กล่าวถึง การพิจารณาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดด้วยแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลอง การทำนายการเกิดจุดบอดเบื้องต้น ในบทที่ 3 กล่าวถึงระเบียบวิธีวิเคราะห์การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น ผลการคำนวณและผลการทดลองวัดค่ากำลังคลื่นเมื่อใช้ตัวสะท้อนคลื่น เปรียบเทียบค่าความสามารถครอบคลุมเมื่อใช้ตัวสะท้อนคลื่นกับเมื่อไม่ใช้ตัวสะท้อนคลื่น บทที่ 4 กล่าวถึงแนวทางในการเลือกค่าปัจจัยที่ช่วยลดจำนวนจุดบอดในระบบสื่อสารเคลื่อนที่ และบทที่ 5 เป็นส่วนของการสรุปและข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของจุดบอด

#### ความนำ

การเคลื่อนย้ายของจุดบอด คือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดบอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัย เช่นการเปลี่ยนตำแหน่งสถานีฐาน การเปลี่ยนภูมิลักษณะ การเปลี่ยนชนิดสายอากาศส่ง เป็นต้น การศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อให้ทราบพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของจุดบอดและสามารถเคลื่อนย้ายจุดบอดไปยังบริเวณที่มีผู้ใช้บริการจำนวนน้อยหรือบริเวณที่สามารถกำจัดจุดบอดได้ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบและวางแผนระบบ และหาแนวทางที่จะแก้ปัญหาจุดบอดที่เกิดในระบบสื่อสาร ในบทนี้จะกล่าวถึง การพิจารณาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ การพิจารณาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐาน และการทำนายการเกิดจุดบอดเบื้องต้น

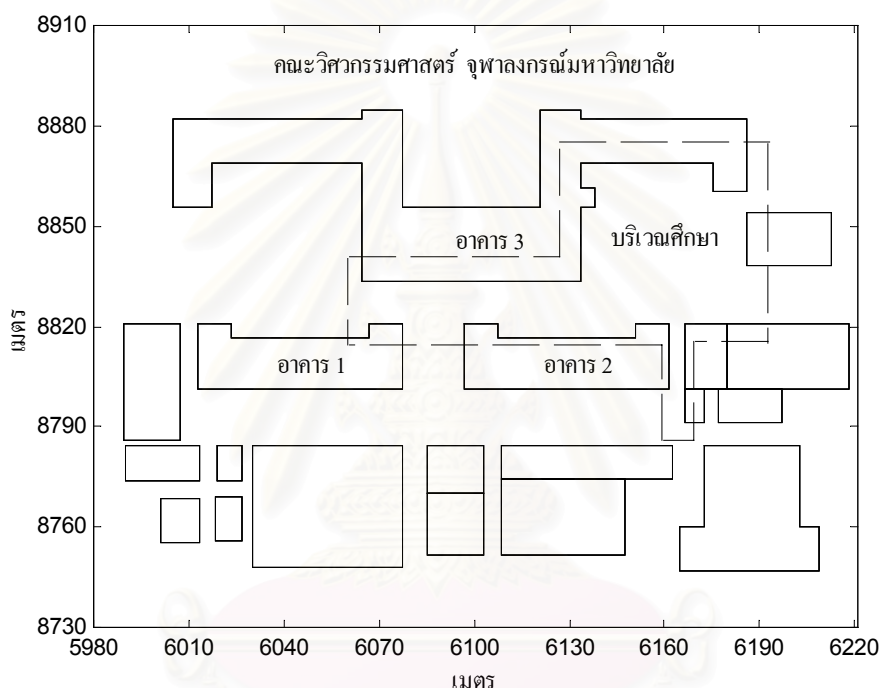
การศึกษากการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัย สามารถพิจารณาได้โดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับการสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมือง [4] มาทำนายพื้นที่ครอบคลุมและศึกษาพฤติกรรมของจุดบอด ซึ่งเป็นแบบจำลองเชิงรังสี ที่ใช้กรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป มาอธิบายพฤติกรรมของคลื่นที่มีความถี่สูง โดยกรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตใช้อธิบายการสะท้อนและการส่งผ่านพลังงานของคลื่นที่เดินทางจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ และบอกถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวกลางเอกพันธ์ว่าเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางมีการลดทอนอย่างไรหรือเมื่อมีการตกกระทบผนังหน้าคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร การเคลื่อนที่ของคลื่นเป็นไปตามหลักการของแฟร์มาต์และหลักการอนุรักษ์พลังงาน ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปใช้อธิบายการเลี้ยวเบนที่ขอบและยอดอาคาร โดยสนามที่สถานีเคลื่อนที่รับได้เป็นผลรวมสนามของรังสีทุกรังสีที่เดินทางจากสถานีฐานมาถึงสถานีเคลื่อนที่ได้ในระนาบแนวตั้ง ระนาบเอียง และรังสีเลี้ยวเบนที่ขอบมุมอาคาร ซึ่งระนาบแนวตั้งจะมีรังสีที่พิจารณาคือ รังสีตรงที่เดินทางจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่ รังสีสะท้อนพื้นดินก่อนถึงสถานีเคลื่อนที่ และรังสีที่เกิดจากการเลี้ยวเบนหลายครั้งที่ขอบยอดอาคาร และในระนาบเอียงจะพิจารณารังสีที่เกิดจากการสะท้อนหลายครั้ง รายละเอียดเกี่ยวกับกลไกการแพร่กระจายคลื่นที่พิจารณาในแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ [4] ได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ก.

การศึกษากการเคลื่อนย้ายของจุดบอดในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการพิจารณาเป็นการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ และการพิจารณาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อสถานีฐานมีความสูงต่าง ๆ ตามลำดับดังนี้



## 2.1 การเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ

บริเวณศึกษาของการพิจารณาการเคลื่อนย้าย คือบริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ 2.1 บริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีฐานข้อมูลค่อนข้างสมบูรณ์ไม่มีส่วนที่เป็นสะพานข้ามระหว่างอาคารและได้ปรับปรุงฐานข้อมูลให้ถูกต้องโดยได้วัดขนาดอาคาร และนำมาอ้างอิงพิกัดกับแผนที่ที่มีอยู่เพื่อให้สามารถใช้กับแบบจำลอง [4] ได้ ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุและผลการทดลอง โดยกล่าวไว้ในหัวข้อย่อยต่อไป



รูปที่ 2.1 บริเวณศึกษาภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.1.1 การคำนวณจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐาน

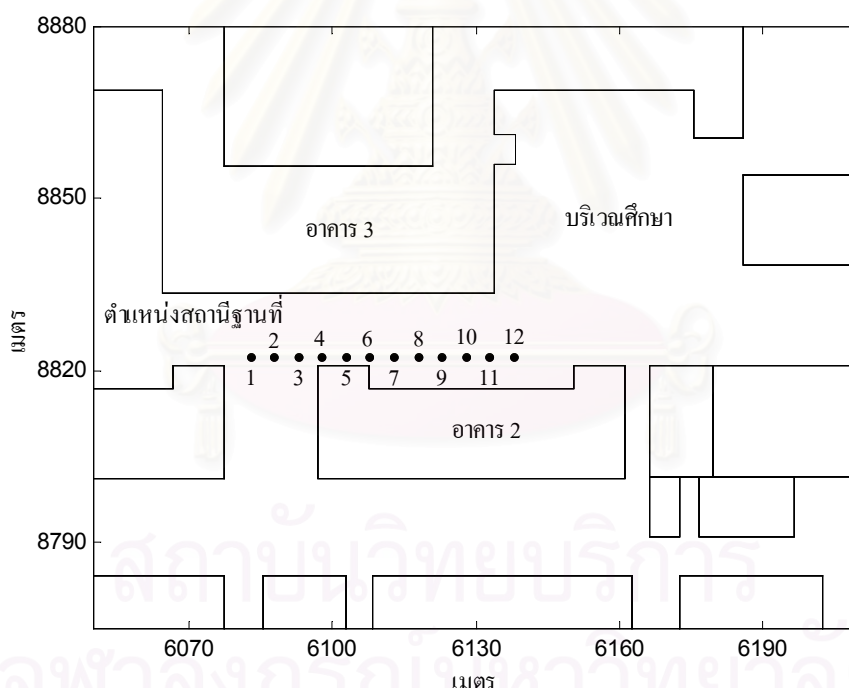
การคำนวณโดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของจุดบอดจะสังเกตการเคลื่อนย้ายเมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานเป็นระยะไม่มากนัก เพื่อให้เห็นพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของจุดบอดอย่างละเอียดและเห็นพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเบื้องต้น ซึ่งการคำนวณมีค่าลักษณะสมบัติที่สำคัญดังตารางที่ 2.1 และพิจารณาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเป็น 2 กรณี ตามระยะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานดังนี้

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์และฐานข้อมูลการศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด

ภูมิภาค (อาคาร)	บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ 2.1
ความถี่ปฏิบัติการ	1 GHz
สายอากาศส่ง	สายอากาศขั้วคู่ โพลาริเซชันแนวตั้ง ความสูง 1.90 เมตร กำลังส่ง 0 dBm
สายอากาศรับ	สายอากาศขั้วคู่ โพลาริเซชันแนวตั้ง ความสูง 1.46 เมตร อัตราขยาย 2.15 dBm
พารามิเตอร์วัสดุ	ความนำไฟฟ้า 0.002 S/m สภาพยอมทางไฟฟ้า 8 F/m
ชนิดรังสี	รังสีตรง รังสีสะท้อนพื้น รังสีสะท้อนผนังอันดับต่าง ๆ รังสีเลี้ยวเบนที่สันยอดอาคาร และการเลี้ยวเบนที่ขอบแนวตั้งของผนังอาคาร

### กรณีที่ 1 เปลี่ยนระยะการเคลื่อนที่สถานีฐานตำแหน่งละ 5 เมตร

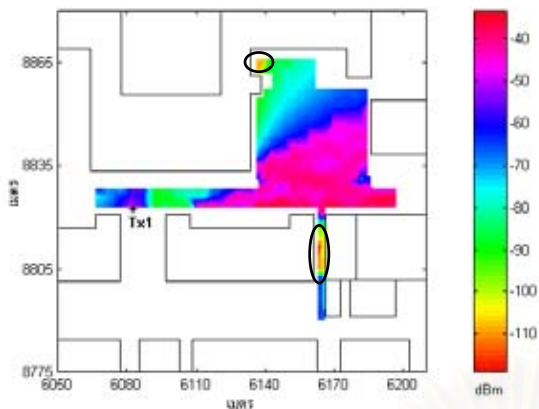
การคำนวณโดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเมื่อกำหนดค่าลักษณะสมบัติตามตารางที่ 2.1 และมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานโดยสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งหมด 12 ตำแหน่ง ตำแหน่งสถานีฐานแต่ละตำแหน่งมีระยะห่างกัน 5 เมตร ดังรูปที่ 2.2



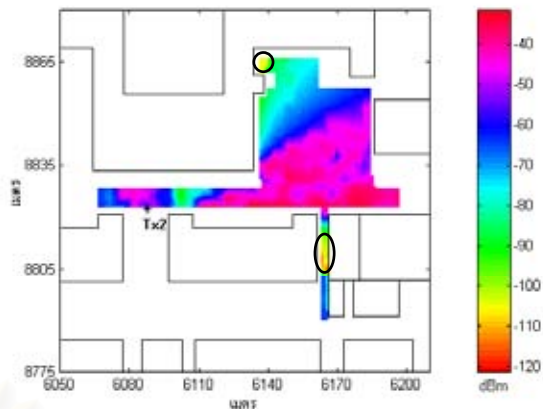
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งสถานีฐานเพื่อการศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 1

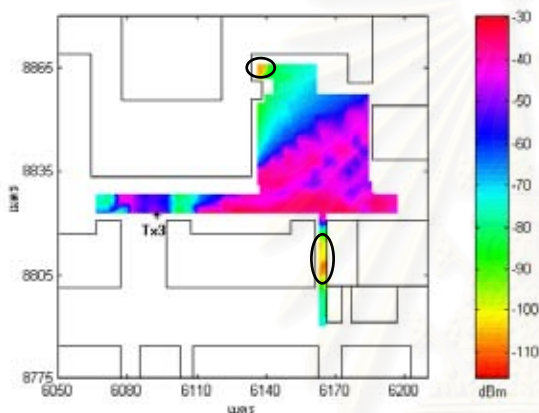
ผลการคำนวณเมื่อใช้ค่าคุณลักษณะตามตารางที่ 2.1 และตำแหน่งสถานีฐานตำแหน่งต่าง ๆ ดังในรูปที่ 2.2 แสดงเป็นแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมดังรูปที่ 2.3 เมื่อบริเวณภายในวงกลมเป็นจุดบอด



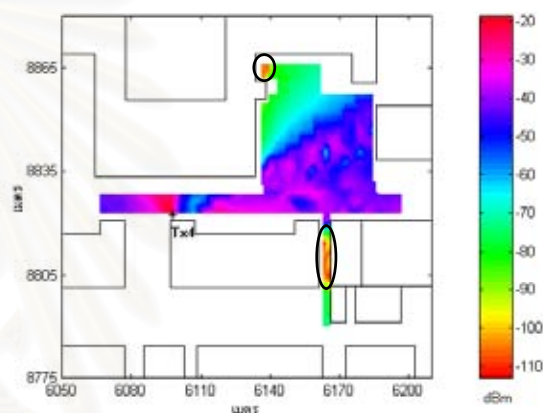
(ก) สถานีฐานตำแหน่งที่ 1



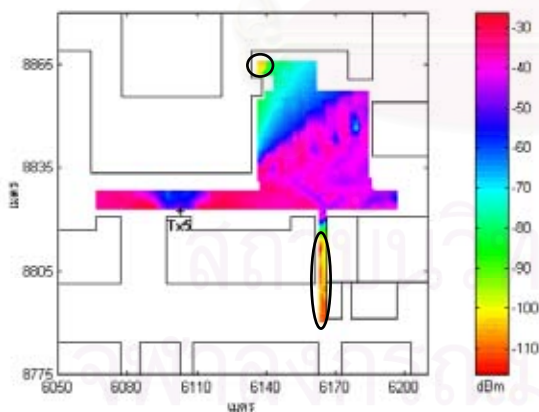
(ข) สถานีฐานตำแหน่งที่ 2



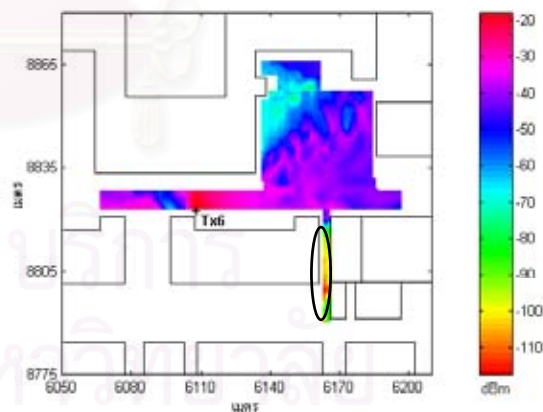
(ค) สถานีฐานตำแหน่งที่ 3



(ง) สถานีฐานตำแหน่งที่ 4

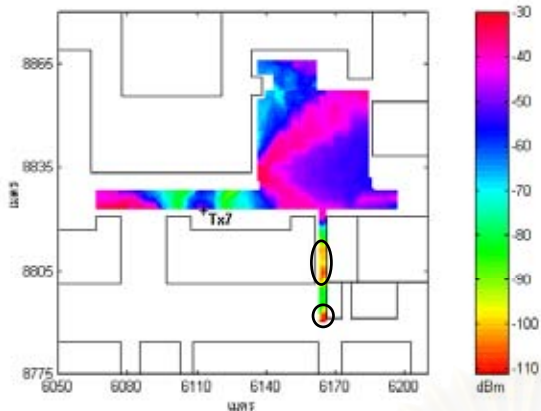


(จ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 5

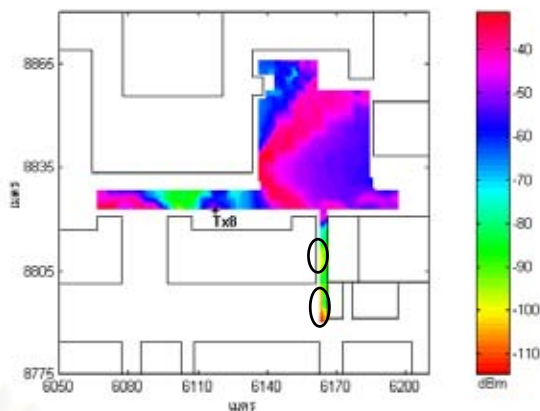


(ฉ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 6

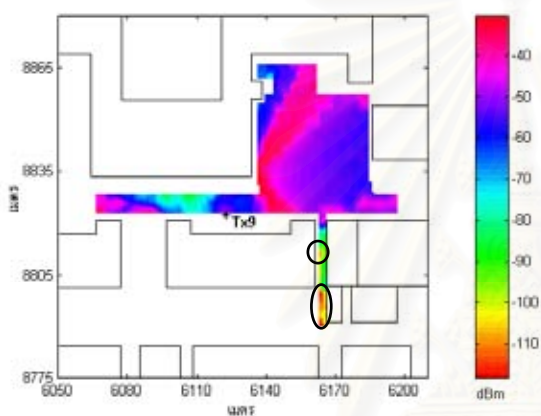
รูปที่ 2.3 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 1



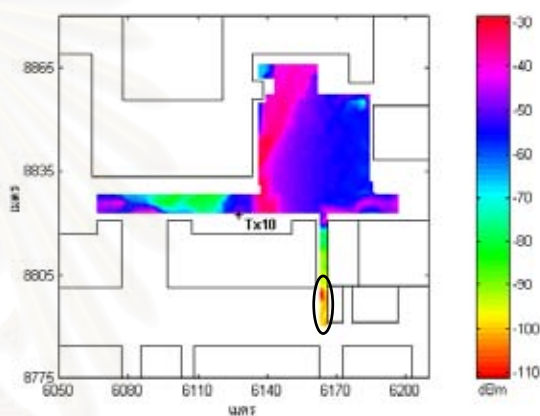
(ข) สถานีฐานตำแหน่งที่ 7



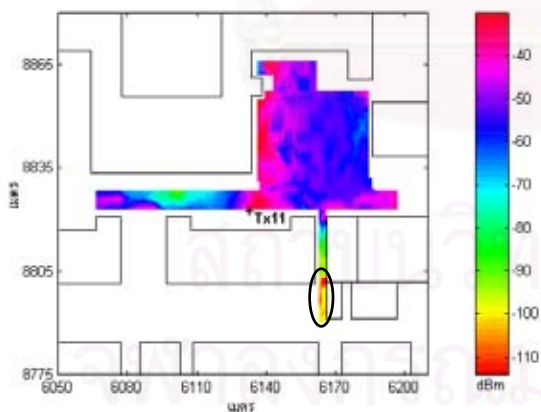
(ค) สถานีฐานตำแหน่งที่ 8



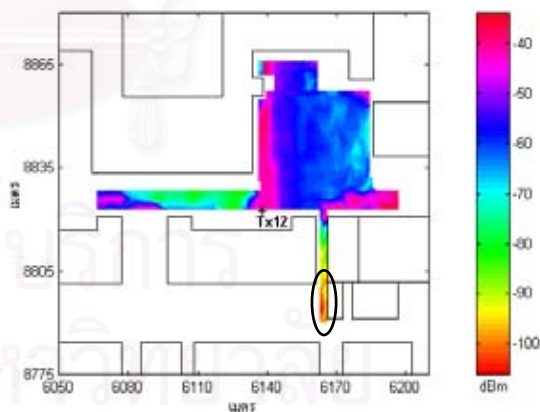
(ณ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 9



(ญ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 10



(ฎ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 11



(ฏ) สถานีฐานตำแหน่งที่ 12

รูปที่ 2.3 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 1(ต่อ)

พิจารณาแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมตามรูปที่ 2.3 เมื่อสถานีฐานมีความสูงต่ำกว่าความสูงของอาคาร (สถานีฐานสูง 1.90 เมตร) สภาพแวดล้อมที่พิจารณาการแพร่กระจายคลื่นถูกจำกัดบริเวณด้วยผนังอาคาร บริเวณที่มีกำลังรับสูงคือบริเวณที่สามารถรับรังสีตรงได้ บริเวณที่มีกำลังรับต่ำคือบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้และรังสีที่เดินทางไปถึงก็มีวิถีภาคหักล้างกัน ดังนั้นกำลังที่รับได้เกิดจากรังสีเลี้ยวเบนที่สันขอบอาคารและรังสีสะท้อนเท่านั้น โดยเฉพาะบริเวณที่มีผนังอาคารสองด้านและมีช่องที่คลื่นสามารถแพร่กระจายมายังสถานีเคลื่อนที่ได้เป็นช่องแคบ ๆ ทำให้ต้องมีการสะท้อนหลายครั้ง การเลี้ยวเบนในตำแหน่งรับที่อยู่ลึกและมีระยะห่างจากบริเวณที่รับรังสีตรงได้ก็อาจมีการสะท้อนจากผนังอาคารก่อนที่รังสีจะมาถึงสถานีเคลื่อนที่ทำให้กำลังที่รับได้ในบริเวณดังกล่าวมีค่าต่ำสำหรับบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้แต่มีผนังอาคารสองด้านที่ห่างกันจะทำให้มีช่องที่คลื่นสามารถแพร่กระจายมาถึงสถานีเคลื่อนที่ได้ โดยการแพร่กระจายจากบริเวณที่รับรังสีตรงได้ นั้นหมายความว่ามีการสะท้อนผนังอาคารเพียงครั้งเดียว แต่การสะท้อนที่ผนังอาคารหลายครั้งก็ยังคงมีอยู่ รังสีที่รับได้จะมีผลของรังสีสะท้อนอันดับต่ำ ๆ เช่น อันดับที่ 1 หรืออันดับที่ 2 ด้วย ทำให้กำลังรับมากกว่าบริเวณที่มีผนังสองข้างอยู่ใกล้กันแต่กำลังก็ยังคงลดลงตามระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ ซึ่งตามผลในรูปที่ 2.3 พบจุดบอดที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นบริเวณที่มีกำลังรับน้อยกว่า  $-100$  dBm (บริเวณที่วงกลมไว้ในรูปที่ 2.3) บริเวณพื้นที่ครอบคลุมที่พิจารณาสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ตามตำแหน่งจุดบอดที่เกิดขึ้นดังนี้

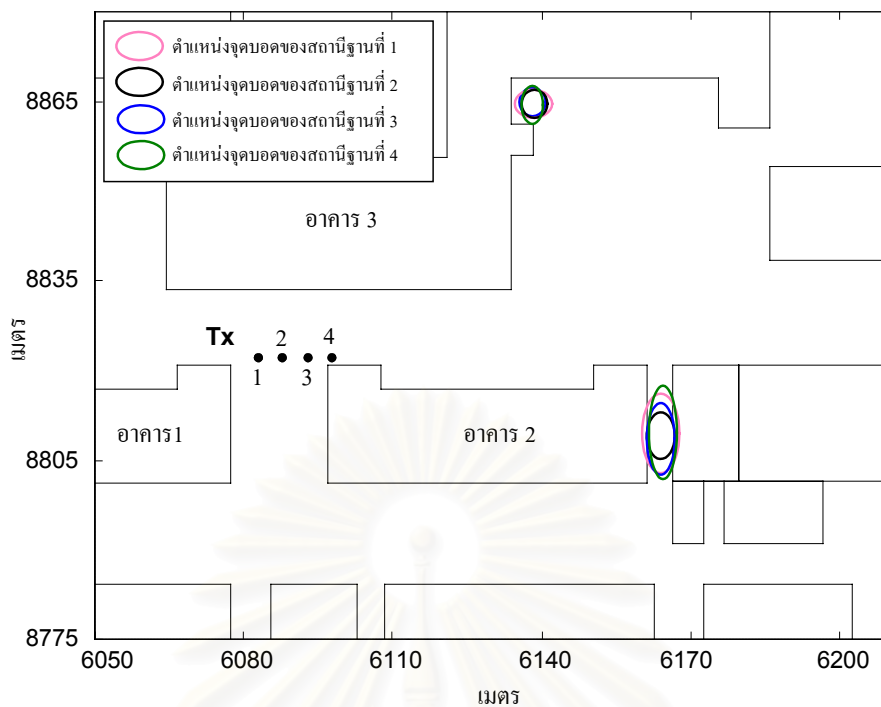
กลุ่มที่ 1 คือจุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 1-4 ระยะทางรวมทั้ง 4 สถานีเป็น 20 เมตร

กลุ่มที่ 2 คือจุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 5-6 ระยะทางรวมทั้ง 2 สถานีเป็น 10 เมตร

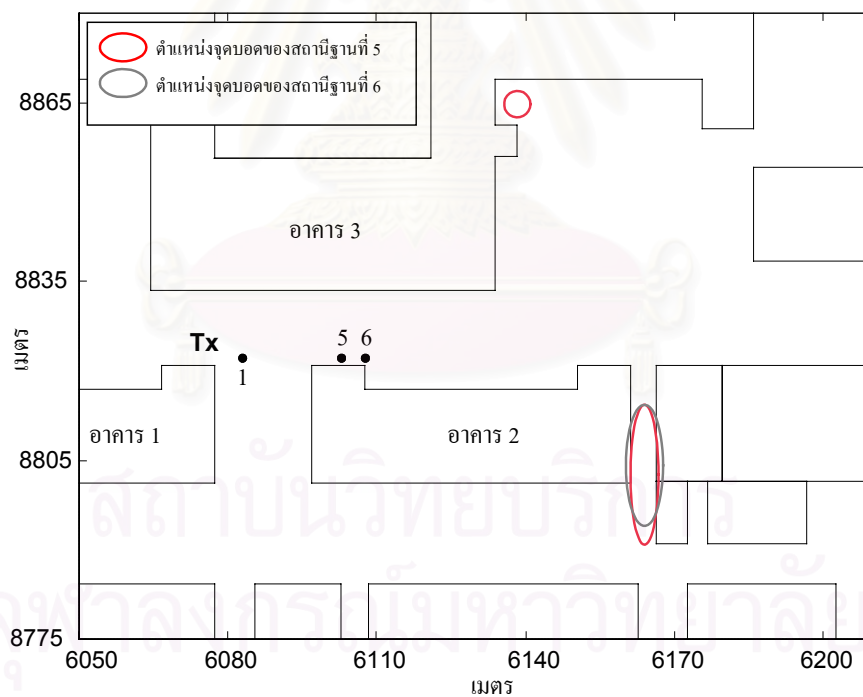
กลุ่มที่ 3 คือจุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 7-9 ระยะทางรวมทั้ง 3 สถานีเป็น 15 เมตร

กลุ่มที่ 4 คือจุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 10-12 ระยะทางรวมทั้ง 3 สถานีเป็น 15 เมตร

ตำแหน่งจุดบอดทั้ง 4 กลุ่มแสดงดังรูปที่ 2.4

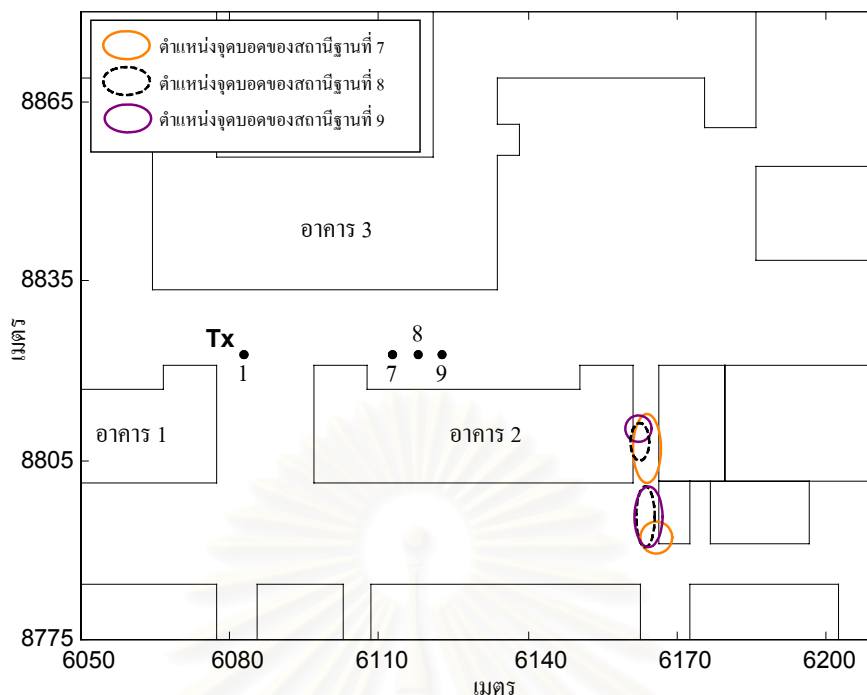


(ก) กลุ่มที่ 1 จุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 1-4

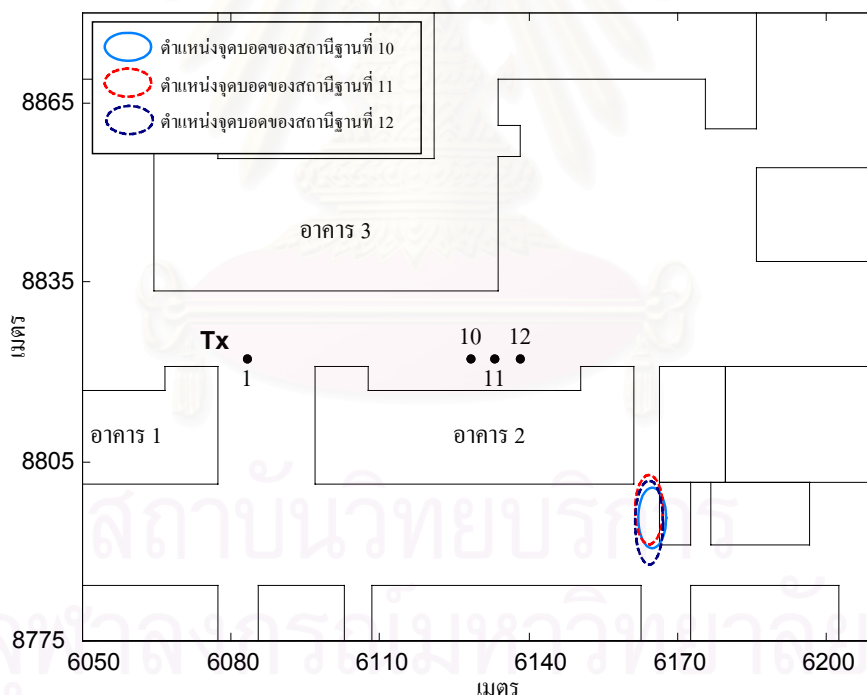


(ข) กลุ่มที่ 2 จุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 5-6

รูปที่ 2.4 ตำแหน่งจุดบอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 1



(ค) กลุ่มที่ 3 จุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 7-9

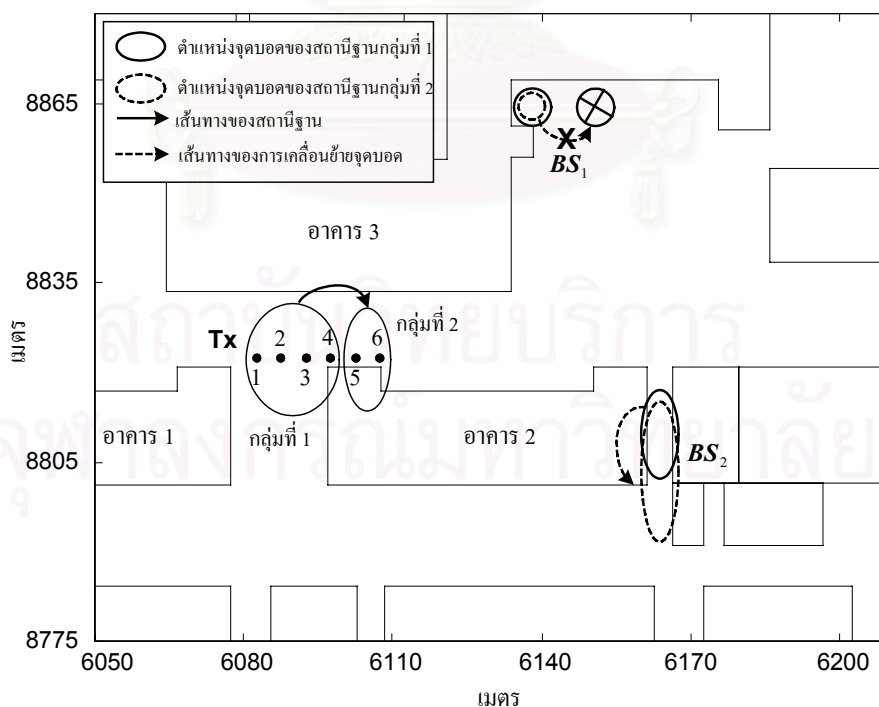


(ง) กลุ่มที่ 4 จุดบอดที่เกิดเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง 10-12

รูปที่ 2.4 ตำแหน่งจุดบอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 1(ต่อ)

ผลการคำนวณที่แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งให้เห็นว่าการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อสถานีฐานเปลี่ยนจากตำแหน่งที่ 1 ไปถึงตำแหน่งที่ 4 (กลุ่มที่ 1 ดังรูป 2.4(ก)) แตกต่างกันไปเล็กน้อยกับกลุ่มอื่น ๆ ที่แสดงดังรูปที่ 2.4(ข), (ค) และ (ง) เมื่อพิจารณาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดทั้งสี่กลุ่ม

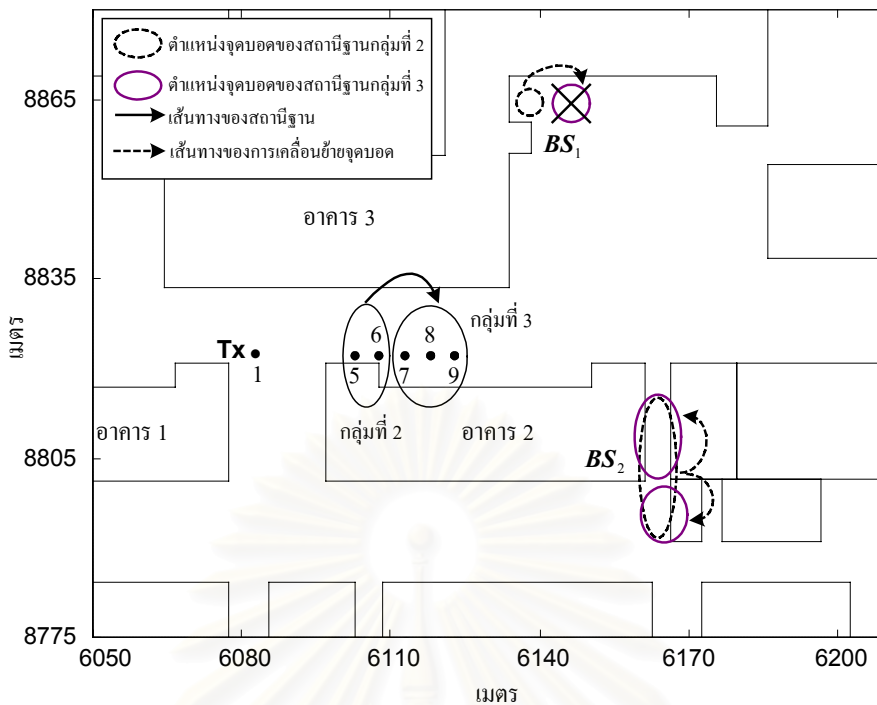
พบว่าเมื่อมีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานเป็นระยะประมาณ 15 เมตร จะเห็นการเคลื่อนย้ายของจุดบอดอย่างชัดเจนแสดงตามรูปที่ 2.4 เช่นเมื่อสถานีฐานแรกอยู่ที่ตำแหน่งสถานีฐานที่ 2 เพื่อให้เห็นการเคลื่อนย้ายของจุดบอดที่ชัดเจนสถานีฐานตำแหน่งถัดไปควรจะเป็นสถานีฐานตำแหน่งที่ 5 หรือตำแหน่งที่ 6 เป็นต้น สังเกตได้ว่าการเคลื่อนย้ายของจุดบอดของสถานีฐานทั้ง 4 กลุ่ม กำหนดด้วยรัศมีที่สามารถเดินทางไปถึงสถานีเคลื่อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ หากตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ใดมีรัศมีที่เดินทางไปถึงมีกำลังคลื่นต่ำ ตำแหน่งนั้นก็จะเป็นจุดบอดขึ้น สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานีฐานทั้ง 4 กลุ่มนี้ บริเวณที่จุดบอดเกิดขึ้นมีเพียงรัศมีเดี่ยวบนที่สั้นขอบของตึกเท่านั้นที่สามารถเดินทางไปถึงบริเวณจุดบอด และตำแหน่งสถานีฐานทั้ง 4 กลุ่มก็มีความแตกต่างทางกายภาพของบริเวณที่ล้อมรอบสถานีฐานอยู่ด้วย นั่นคือสถานีฐานกลุ่มที่ 1 อยู่ที่ตำแหน่งที่ด้านหลังไม่มีผนังอาคารคั่นจึงสามารถเดินทางมาด้านหลังอาคาร 1 และอาคาร 2 ได้มากแต่เมื่อย้ายตำแหน่งสถานีฐานมาเป็นกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 สถานีฐานจะมีผนังอาคารประกบทั้งสองด้านเคลื่อนที่เดินทางไปบริเวณหลังอาคาร 1 และอาคาร 2 มีความแรงน้อยลง แต่ในกลุ่มที่ 3 จะเข้ามาใกล้บริเวณที่เป็นจุดบอดมากขึ้นและไม่เกิดจุดบอดตรงอาคาร 3 สำหรับสถานีฐานกลุ่มที่ 4 เคลื่อนสามารถเดินทางไปยังบริเวณจุดบอดที่อาคาร 3 ได้กำลังสูงขึ้นจึงไม่เกิดจุดบอดและเกิดจุดบอดเพียงบริเวณในซอยข้างอาคาร 2 ที่อยู่ลึกเข้าไป ตามแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมสามารถเขียนแผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอด (migration map) ได้ดังรูปที่ 2.5



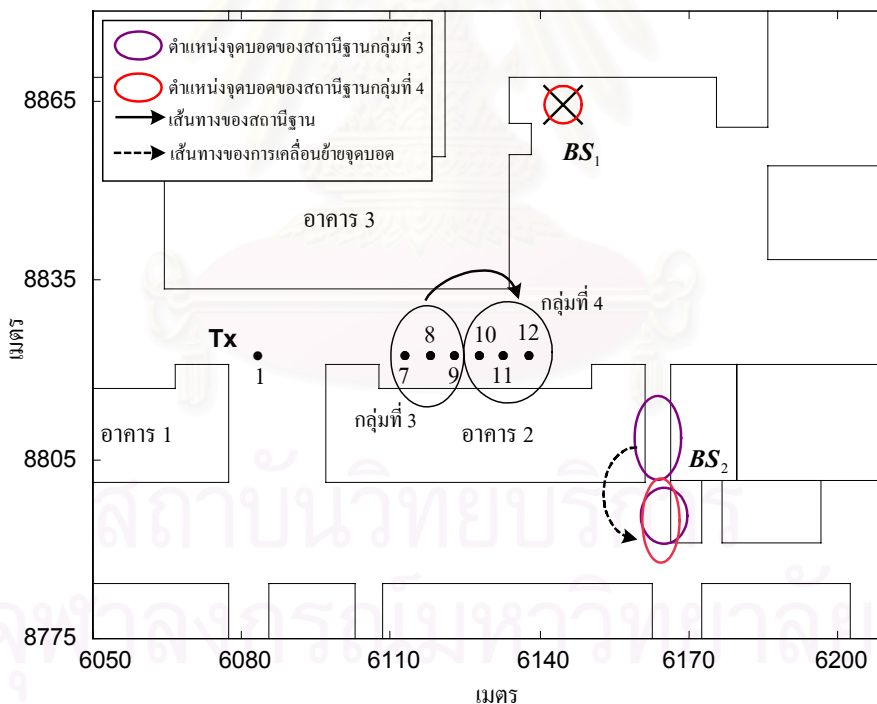
(ก) แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายจากสถานีฐานกลุ่มที่ 1 ไปกลุ่มที่ 2

รูปที่ 2.5 แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายสถานีฐานทั้ง 4 กลุ่ม





(ข) แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายจากสถานีฐานกลุ่มที่ 2 ไปกลุ่มที่ 3



(ค) แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายจากสถานีฐานกลุ่มที่ 3 ไปกลุ่มที่ 4

รูปที่ 2.5 แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายสถานีฐานทั้ง 4 กลุ่ม(ต่อ)

เมื่อ  $BS_m$  คือตำแหน่งจุดบอดบริเวณที่  $m$

พิจารณาแผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดพบว่าสถานีฐานตำแหน่งที่ 1 พบจุดบอดที่อยู่ในบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้และรังสีที่เดินทางไปถึงมีวิถีภาคหักล้างกันเกิดเป็นจุดบอด 2 บริเวณ ( $BS_1, BS_2$  ในรูปที่ 2.5) ดังรูปที่ 2.4(ก) และบริเวณจุดบอดจะมีขนาดเปลี่ยนไปเมื่อสถานีฐานเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไป หากย้ายตำแหน่งสถานีฐานเพียงจากสถานีฐานตำแหน่งที่ 1 ไปถึงตำแหน่งที่ 4 การเคลื่อนย้ายของจุดบอดเห็นได้ไม่ชัดเจนนักจึงจัดไว้เป็นสถานีฐานกลุ่มที่ 1 ในรูปที่ 2.5(ก) เช่นเดียวกับรูปที่ 2.4(ข) เมื่อย้ายตำแหน่งสถานีฐานจากตำแหน่งที่ 5 ไปตำแหน่งที่ 6 การเคลื่อนย้ายตำแหน่งจุดบอดที่เกิดขึ้นน้อย แต่พบว่าจุดบอดในบริเวณที่ 1 หายไปเนื่องจากสถานีฐานตำแหน่งที่ 6 อยู่ใกล้กับบริเวณจุดบอดที่ 1 มากขึ้น และตามตำแหน่งสถานีฐานที่ 6 สถานีฐานอยู่เลยจากผนังกำแพงอาคารมาแล้วทำให้รังสีที่เดินทางจากสถานีฐานที่ 6 มีอันดับการสะท้อนของรังสีสะท้อนลดลง ทำให้รังสีที่เดินทางไปยังจุดบอดบริเวณที่ 1 ของสถานีฐานที่ 5 ได้รับกำลังแรงขึ้นและวิถีภาคเปลี่ยนแปลงไปไม่เกิดการหักล้างกัน จึงไม่ปรากฏจุดบอดในบริเวณดังกล่าว

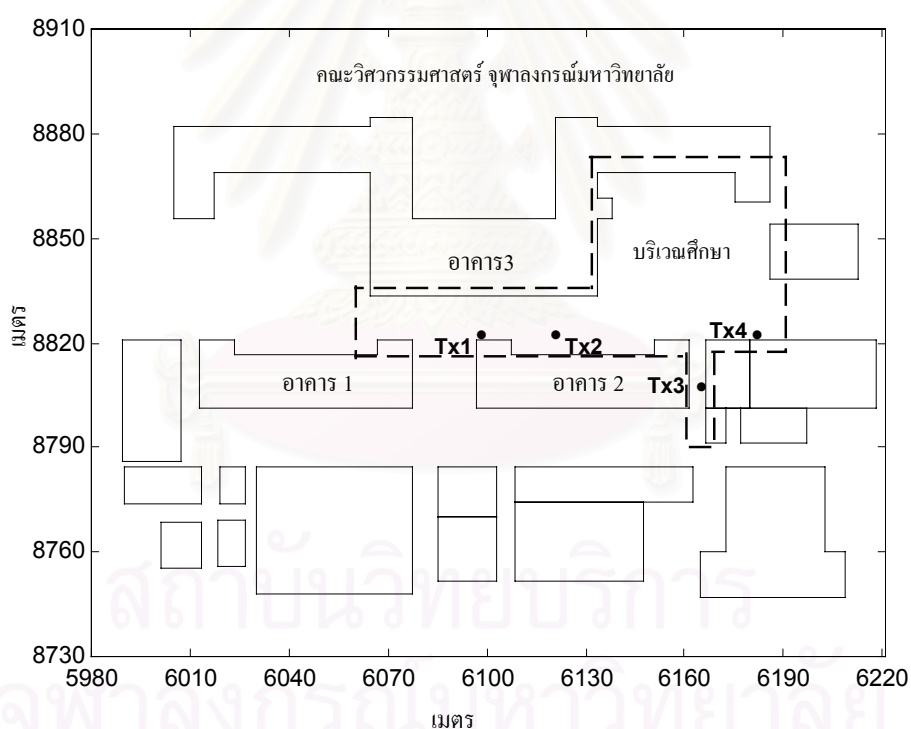
พิจารณาแผนภาพการเคลื่อนย้าย รูปที่ 2.5(ก) เมื่อเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานจากตำแหน่งสถานีฐานกลุ่มที่ 1 ไปเป็นกลุ่มที่ 2 พบว่าตำแหน่งจุดบอดในบริเวณที่ 2 มีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากเมื่อสถานีฐานเปลี่ยนตำแหน่งที่มากพอค่าหนึ่ง (ประมาณ 15 เมตร) ระยะที่คลื่นเดินทางก็เปลี่ยนแปลงทำให้วิถีภาคที่เกิดขึ้นหักล้างกันจึงเกิดจุดบอดในรูปที่ 2.4(ก) ในตำแหน่งที่เปลี่ยนไป จุดบอดจึงเคลื่อนย้ายลึกเข้าไปในซอยเมื่อได้ระยะทางที่เหมาะสมที่จะเกิดการหักล้างกันเชิงวิถีภาคทำให้เกิดจุดบอด แต่จุดบอดบริเวณที่ 1 ไม่มีการเคลื่อนย้ายเพียงมีขนาดบริเวณที่เล็กลง

เมื่อเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานไปตำแหน่งที่ 7, 8 และ 9 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.4(ค) การเคลื่อนย้ายของจุดบอดที่เกิดจากการย้ายตำแหน่งสถานีฐานทั้งสามไม่ต่างกันมากนัก ตำแหน่งจุดบอดในบริเวณที่ 2 จะแยกเป็นสองส่วนดังแสดงในรูป ซึ่งเป็นเพราะตำแหน่งสถานีฐานเคลื่อนที่เข้ามามากขึ้นทำให้บริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้อยู่ใกล้กับสถานีฐานมากขึ้น บริเวณที่เป็นจุดบอดส่วนที่หนึ่งที่ประกอบด้วยกำแพงสองด้านเกิดจากการหักล้างกันของรังสีที่เดินทางมาถึง สำหรับส่วนที่ 2 มีกำแพงด้านเดียวเกิดเป็นจุดบอดเพราะรังสีที่เดินทางไปถึงมีระดับกำลังรับที่ต่ำตามระยะทาง ในรูปที่ 2.4(ค) นี้ไม่พบจุดบอดในบริเวณที่ 1 เนื่องจากรังสีที่เดินทางจากสถานีฐานที่สามารถเดินทางไปถึงบริเวณดังกล่าวนั้นเป็นรังสีที่มีอันดับการสะท้อนต่ำและการเลี้ยวเบนที่สันขอบอาคารมีระยะทางไม่ไกลเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งสถานีฐานกลุ่มที่ 1 รวมทั้งการแพร่กระจายคลื่นที่มีระยะทางไม่ไกลนักทำให้กำลังรับบริเวณดังกล่าวมากขึ้นและไม่เกิดเป็นจุดบอดและจะเห็นการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานกลุ่มที่ 2 ไปกลุ่มที่ 3 ได้ ดังรูปที่ 2.5(ข)

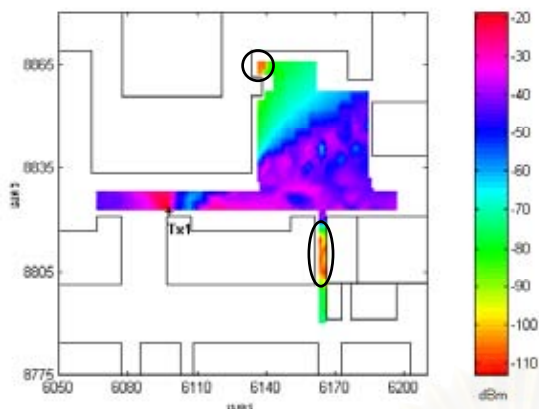
ในรูปที่ 2.4(ง) พบจุดบอดเพียงในบริเวณที่ 2 เนื่องจากสถานีฐานเข้ามาใกล้บริเวณที่เป็นจุดบอดบริเวณที่ 2 มากขึ้นทำให้เกิดจุดบอดที่อยู่ลึกเข้าไปในซอยเท่านั้น และไม่เกิดจุดบอดตรงส่วนที่ประกบด้วยผนังอาคารสองด้านเพราะระยะห่างจากสถานีฐานไม่มากนักและเกิดการเปลี่ยนแปลงวิถีภาคที่ไม่หักล้างกันจึงไม่เกิดจุดบอด การเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายสถานีฐานกลุ่มที่ 3 ไปกลุ่มที่ 4 แสดงดังรูปที่ 2.5(ค) เนื่องจากสถานีฐานกลุ่มที่ 4 อยู่ใกล้ซอยมากกว่า ดังนั้นคลื่นที่เดินทางเข้าไปในซอยจึงมีกำลังคลื่นแรงกว่าสถานีฐานกลุ่มที่ 3 และไม่พบจุดบอดบริเวณที่ 1 เช่นเดียวกับสถานีฐานตำแหน่งที่ 3 เพราะมีรังสีตรงสามารถเดินทางไปถึง

**กรณีที่ 2** เปลี่ยนระยะการเคลื่อนที่ของสถานีฐานตำแหน่งละไม่น้อยกว่า 15 เมตร

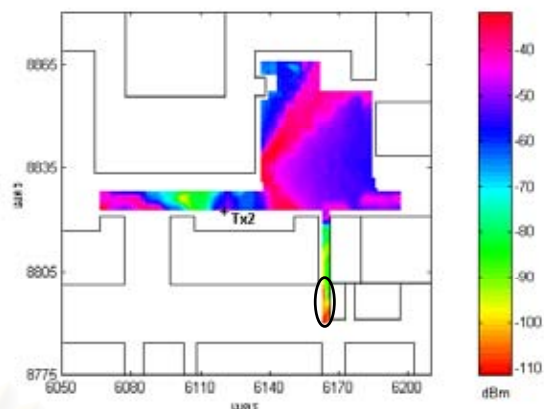
การคำนวณโดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเมื่อกำหนดค่าลักษณะสมบัติตามตารางที่ 2.1 และเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานโดยสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.6 ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ผลการคำนวณที่ได้แสดงเป็นแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมได้ดังรูปที่ 2.7



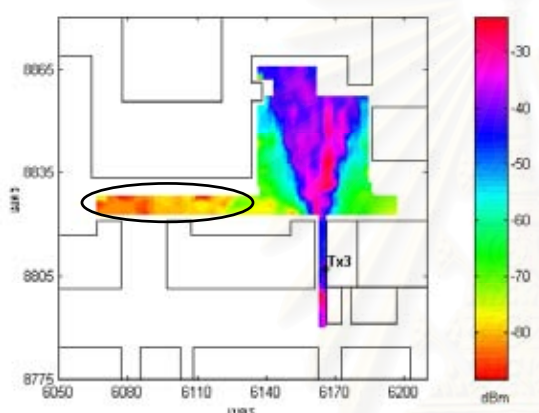
รูปที่ 2.6 ตำแหน่งสถานีฐานเพื่อการศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอด  
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 2



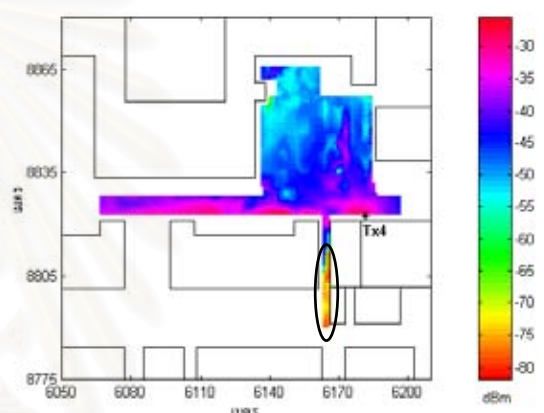
(ก) สถานีฐานตำแหน่งที่ 1



(ข) สถานีฐานตำแหน่งที่ 2



(ค) สถานีฐานตำแหน่งที่ 3

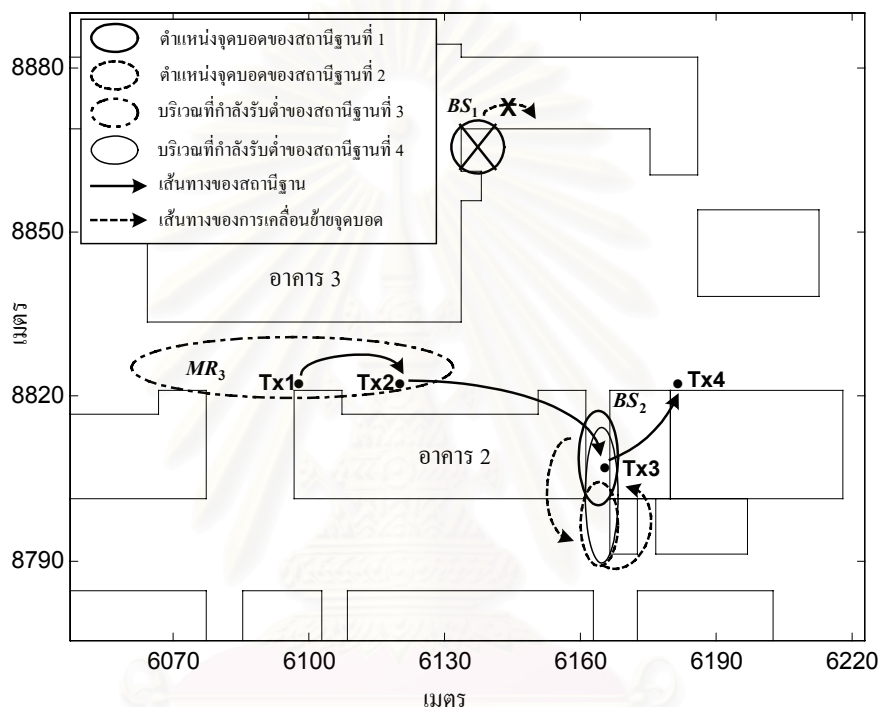


(ง) สถานีฐานตำแหน่งที่ 4

รูปที่ 2.7 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจากการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง  
ตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 2

กรณีนี้ที่ 2 นี้สถานีฐานตำแหน่งที่ 1 กับตำแหน่งที่ 2 มีระยะห่างกันเป็น 22.68 เมตร สถานีฐานตำแหน่งที่ 2 กับ 3 มีระยะห่างกันเป็น 60.98 เมตร และสถานีฐานตำแหน่งที่ 3 และ 4 มีระยะห่างกันเป็น 31.10 เมตร ซึ่งมีระยะห่างกันมากกว่า 15 เมตร ทำให้สามารถเห็นการเคลื่อนย้ายของจุดบอดได้อย่างชัดเจนเมื่อเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานทั้ง 4 สถานี แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมในรูปที่ 2.7(ก) แสดงให้เห็นว่าเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 เกิดจุดบอดซึ่งเป็นบริเวณที่มีกำลังรับต่ำกว่า  $-100$  dBm เช่นเดียวกับรูปที่ 2.7(ข) สถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 แต่จุดบอดที่เกิดขึ้นเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 จะอยู่ลึกเข้ามาในซอยมากกว่าเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 เนื่องจากสถานีฐานเคลื่อนที่เข้ามามากขึ้นทำให้ระยะทางที่ทำให้เกิดภูมิภาคที่หักล้างกันของรังสีที่เดินทางมาถึงตัวรับเปลี่ยนแปลงไปจุดบอดจึงมีการเคลื่อนย้ายเกิดขึ้น แต่เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งที่ 3 และ 4 ในแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมรูปที่ 2.7(ค) และ (ง) ตามลำดับ พบว่าเกิดบริเวณที่มีกำลังรับต่ำแต่ไม่เป็นจุดบอดโดยมีกำลังรับต่ำประมาณ  $-80$  dBm ซึ่งจะเรียกว่าเป็นบริเวณที่

กำลังรับต่ำสุด (minimum region) เนื่องจากตำแหน่งที่สถานีฐานตั้งอยู่เคลื่อนสามารถแพร่กระจายออกไปยังบริเวณที่รับรังสีตรงได้มากและการแพร่กระจายจากบริเวณที่รับรังสีตรงได้ไปยังบริเวณข้างเคียงก็มากเพราะช่องทางเดินกว้าง แต่สำหรับสถานีฐานตำแหน่งที่ 4 แม้บริเวณที่รับรังสีตรงได้จะแพร่กระจายไปในซอยแคบแต่เนื่องจากระยะทางไม่มากนักจึงยังมีกำลังรับได้มากและไม่เป็นจุดบอดเป็นเพียงบริเวณที่กำลังรับต่ำสุด สามารถเขียนเป็นแผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดจากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมได้ดังรูปที่ 2.8



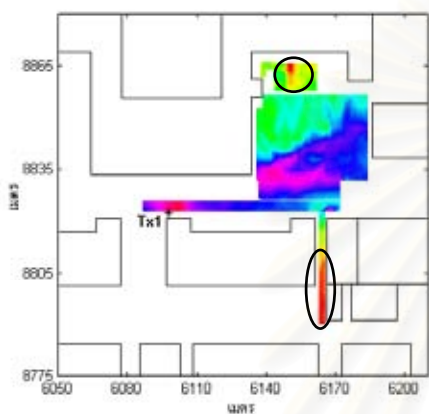
รูปที่ 2.8 แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดที่ได้จากการคำนวณในกรณีที่ 2

เมื่อ  $MS_m$  คือบริเวณที่มีกำลังรับต่ำสุดที่  $m$

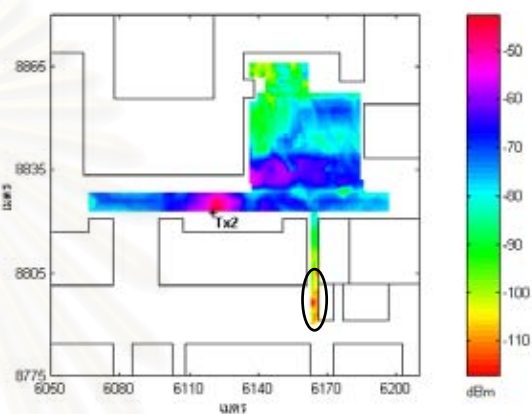
พิจารณาแผนภาพการเคลื่อนย้าย พบว่าเมื่อสถานีฐานอยู่ตำแหน่งที่ 1 เกิดจุดบอด 2 บริเวณคือ บริเวณที่ 1 ( $BS_1$ ) และบริเวณที่ 2 ( $BS_2$ ) แต่เมื่อย้ายสถานีฐานไปยังสถานีฐานที่ 2 จุดบอดที่เกิดบริเวณที่ 1 ไม่ปรากฏเนื่องจากสถานีฐานเข้ามาใกล้จุดบอดบริเวณที่ 1 มากขึ้นซึ่งเป็นระยะที่ภูมิภาคของรังสีที่เดินทางมาถึงไม่เกิดการหักล้างกันทำให้ไม่เกิดจุดบอดและเมื่อเคลื่อนย้ายสถานีฐานมาที่ตำแหน่งที่ 3 และ 4 ก็ไม่พบจุดบอดด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว

### 2.1.2 การทดลองเพื่อศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐาน

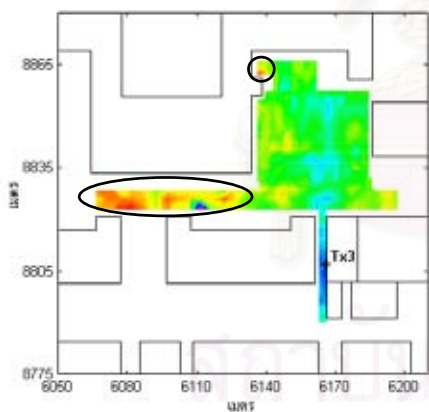
การทดลองกำหนดตำแหน่งสถานีฐานเช่นเดียวกับการจำลองสถานการณ์ดังรูปที่ 2.6 และใช้ค่าลักษณะสมบัติเช่นเดียวกันกับการคำนวณในกรณีที่ 2 เมื่อเปลี่ยนระยะการเคลื่อนที่สถานีฐานตำแหน่งละไม่น้อยกว่า 15 เมตร รายละเอียดการทดลองได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ข. ผลการทดลองที่ได้แสดงตามรูปที่ 2.9 ดังนี้



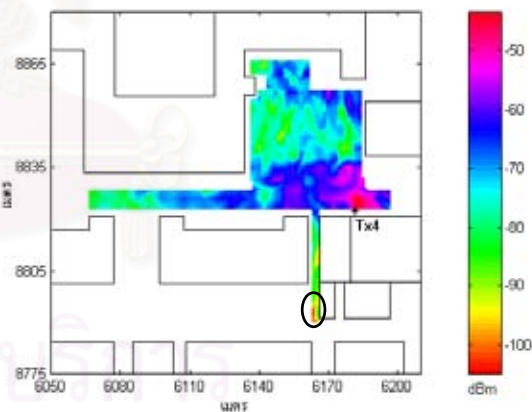
(ก) สถานีฐานตำแหน่งที่ 1



(ข) สถานีฐานตำแหน่งที่ 2



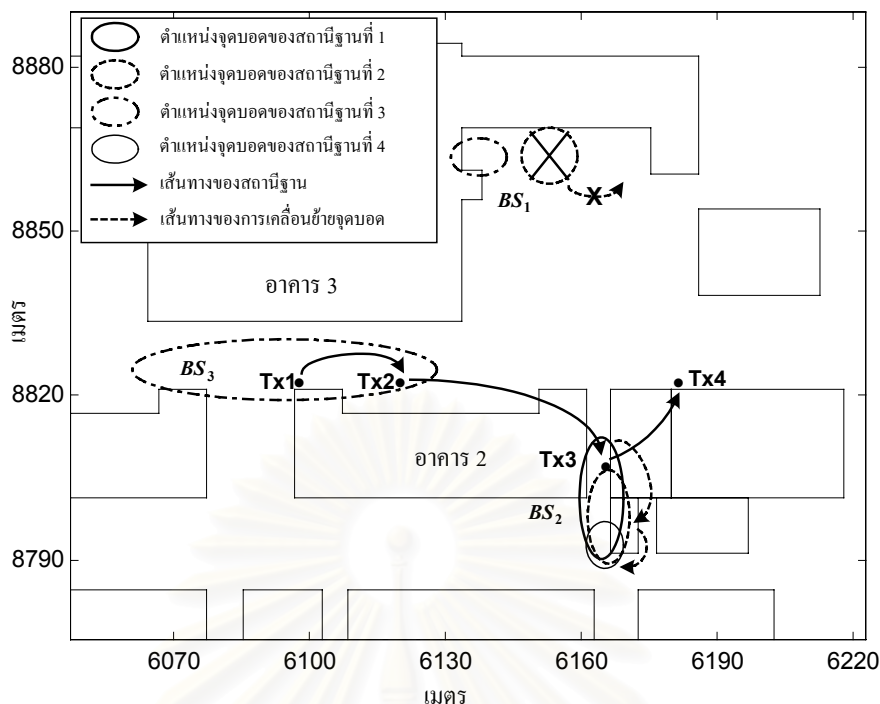
(ค) สถานีฐานตำแหน่งที่ 3



(ง) สถานีฐานตำแหน่งที่ 4

รูปที่ 2.9 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจากการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐานในกรณีที่ 2

เขียนเป็นแผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดที่ได้จากการทดลองในกรณีที่ 2

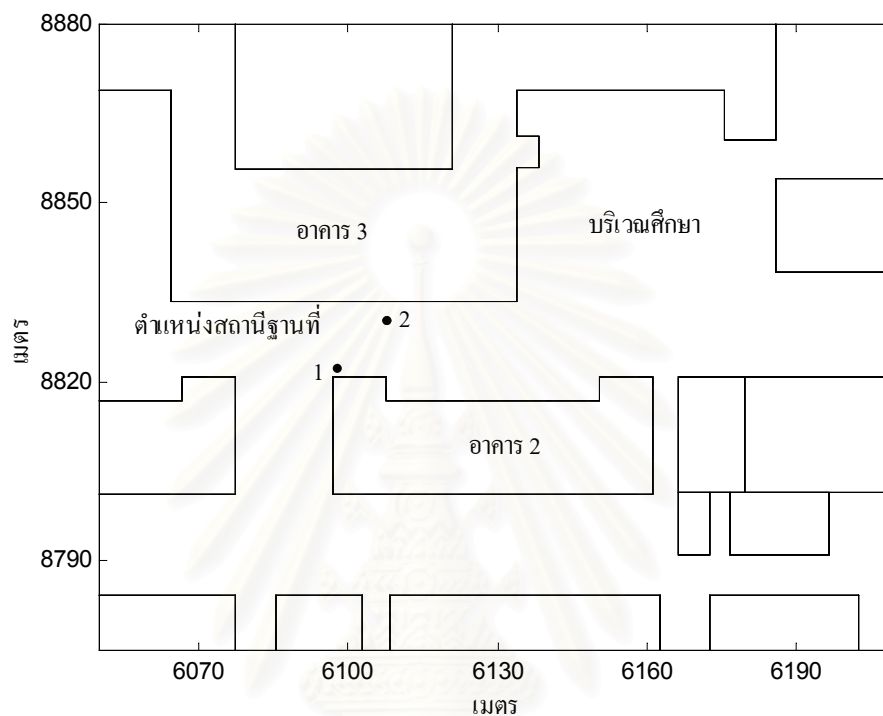
แผนภาพการเคลื่อนย้ายของจุดบอดที่ได้จากการทดลองเป็นดังรูปที่ 2.10 แผนภาพนี้สอดคล้องกับผลการคำนวณที่แสดงในรูปที่ 2.8 คือตำแหน่งที่เกิดจุดบอดทั้งสองแผนภาพอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เช่น ผลการทดลองเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 เกิดจุดบอดในบริเวณที่ 1 ซึ่งจุดบอดเลื่อนตำแหน่งไปแต่ยังอยู่ในบริเวณเดียวกันกับผลการคำนวณ ความแตกต่างของขนาดบริเวณจุดบอด และความแตกต่างของผลการคำนวณที่เป็นบริเวณที่กำลังรับต่ำสุดกลับกลายเป็นจุดบอดในผลของการทดลอง โดยความแตกต่างทั้งหมดน่าจะเป็นผลมาจากความละเอียดของฐานข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณและขณะทำการทดลองมีการรบกวนจากยานพาหนะที่สัญจรไปมา ณ บริเวณศึกษา

## 2.2 การเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อสถานีฐานมีความสูงต่าง ๆ

การศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานใช้บริเวณศึกษาและค่าลักษณะสมบัติเช่นเดียวกับการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐาน ผลการคำนวณจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ และผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

## 2.2.1 การคำนวณด้วยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐาน

การคำนวณเมื่อใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น [4] พิจารณาที่สถานีฐาน 2 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.11



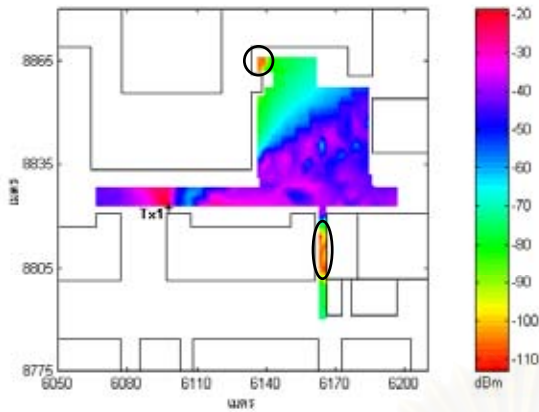
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งสถานีฐานเพื่อการศึกษาค่าการเคลื่อนย้ายของจุดบอด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐาน

ผลการคำนวณในทั้งสองตำแหน่งสถานีฐานเป็นดังต่อไปนี้

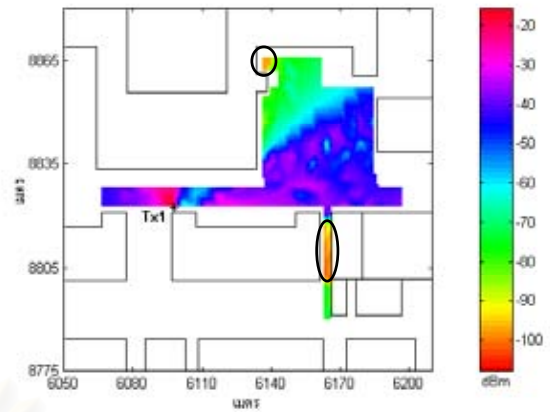
### กรณีที่ 1 สถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 (ในรูปที่ 2.11)

กรณีนี้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงสถานีฐานทั้งหมด 6 ค่า คือ 1.90, 5, 10, 15, 20 และ 25 เมตร ตามลำดับ โดยที่อาคาร 1 และอาคาร 2 สูงประมาณ 20 เมตร และอาคาร 3 สูงประมาณ 24 เมตร ใช้ค่าลักษณะสมบัติตามตารางที่ 2.1 เช่นเดียวกับการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสถานีฐาน ผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานพบว่าตำแหน่งการเกิดจุดบอดแตกต่างกันไม่มากและการเคลื่อนย้ายของจุดบอดไม่ชัดเจน มีเพียงขนาดของจุดบอดที่แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.12

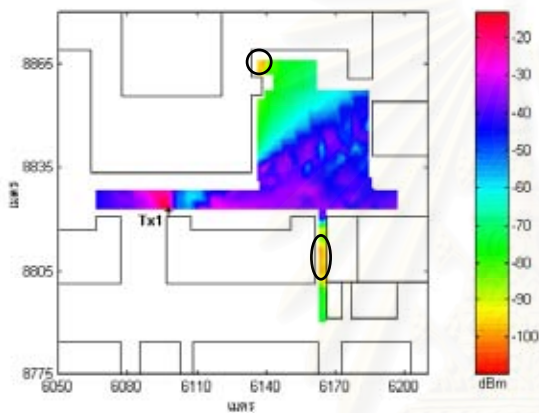




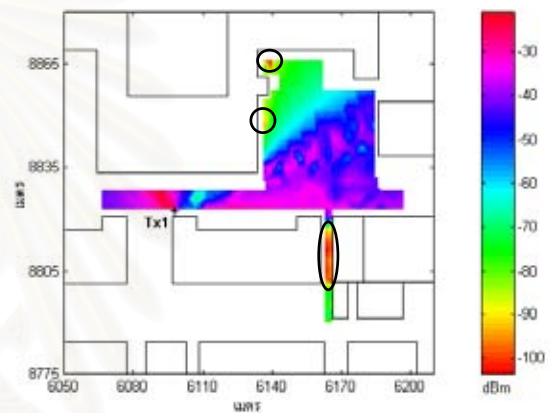
(ก) สถานีฐานสูง 1.90 เมตร



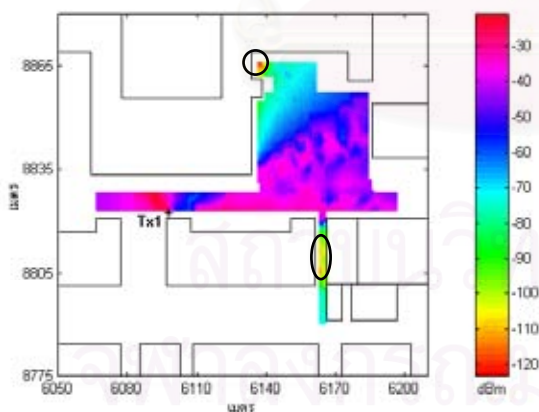
(ข) สถานีฐานสูง 5 เมตร



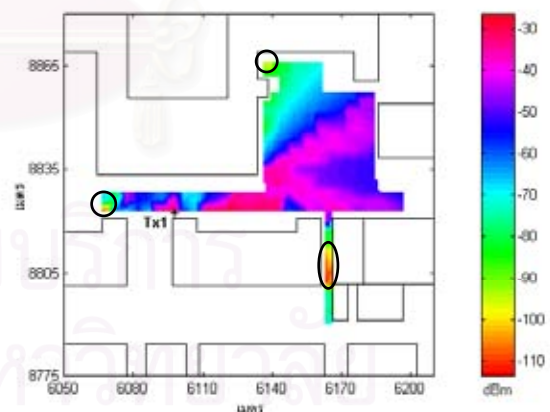
(ค) สถานีฐานสูง 10 เมตร



(ง) สถานีฐานสูง 15 เมตร



(จ) สถานีฐานสูง 20 เมตร



(ฉ) สถานีฐานสูง 25 เมตร

รูปที่ 2.12 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจากการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง  
ความสูงสถานีฐานในกรณีที่ 1

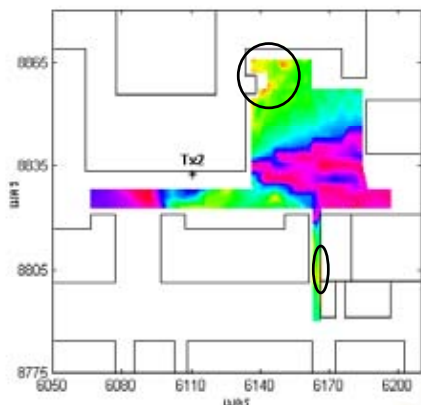
ผลการเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานพบว่าไม่ปรากฏการเคลื่อนย้ายตำแหน่งจุดบอดที่ชัดเจนนัก เนื่องจากเมื่อสถานีฐานมีความสูงเปลี่ยนแปลงไปจากความสูงที่ต่ำกว่าไปความสูงที่สูง

ชั้น (1.9, 5, 10, 15, 20 และ 25 เมตร) รังสีที่พิจารณาในกรณีที่มีความสูงเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับความสูงของอาคารคือรังสีเดี่ยวเบนที่สันของยอดอาคาร ทำให้รังสีที่มีนัยสำคัญที่สามารถเดินทางไปยังบริเวณที่เป็นจุดบอดไม่เป็นเพียงรังสีเดี่ยวเบนที่สันของอาคารแต่ยังมีส่วนของรังสีเดี่ยวเบนที่ขอบยอดอาคารด้วย การเปลี่ยนแปลงความสูงจะต้องพิจารณาความสูงอาคารและความสูงสถานีฐานซึ่งเมื่อสถานีฐานสูงมากขึ้นผลของรังสีเดี่ยวเบนที่ขอบยอดจะมากขึ้นและหากสถานีฐานสูงกว่าความสูงของอาคารก็อาจพบรังสีตรงที่สามารถเดินทางไปยังจุดบอดในกรณีที่สถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคาร ผลของรังสีตรงดังกล่าวจะทำให้ขนาดบริเวณจุดบอดเล็กลง ดังนั้นการเกิดจุดบอดในกรณีที่เปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานจึงต่างจากกรณีที่เคลื่อนย้ายตำแหน่งเพราะการเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานทำให้มีระยะทางในแนวระดับที่เปลี่ยนแปลงไป โดยระยะทางที่เปลี่ยนไปจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายของจุดบอดทำให้เห็นการเคลื่อนย้ายจุดบอดได้อย่างชัดเจนกว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะทางในแนวตั้ง แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงวิถีภาคในแนวตั้ง ไม่มากเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงวิถีภาคในแนวระดับ

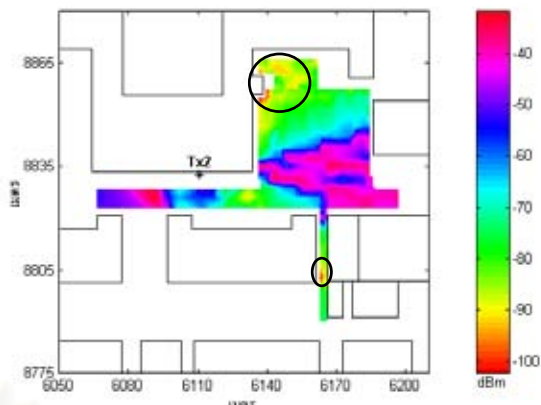
## **กรณีที่ 2** สถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 (ในรูปที่ 2.11)

สำหรับกรณีนี้จะพิจารณาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อสถานีฐานสูง 1.90, 7.05 และ 17.73 เมตร ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.13

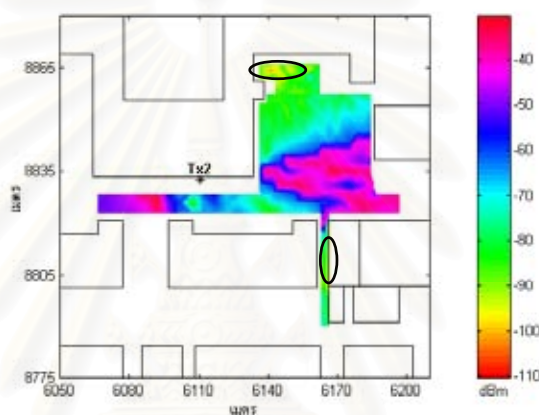
ผลการคำนวณเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 คือเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานแล้วพบว่า การเคลื่อนย้ายของจุดบอดที่เกิดขึ้นไม่ชัดเจน และมีขนาดของจุดบอดที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จากรูปที่ 2.13 ปรากฏจุดบอดอยู่ 2 บริเวณ และสังเกตได้ว่าเมื่อสถานีฐานสูง 1.90 เมตร (รูปที่ 2.13 (ก)) และสถานีฐานสูง 7.05 เมตร (รูปที่ 2.13(ข)) เกิดจุดบอดเป็นบริเวณที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานเพียง 5.25 เมตร แต่สำหรับสถานีฐานที่สูง 17.73 เมตรนั้น ความสูงของสถานีฐานเพิ่มขึ้นอีก 10.58 เมตร (เพิ่มขึ้นจาก 7.05 เมตร) พบว่าขนาดของจุดบอดเล็กลงในบริเวณหน้าอาคาร 3 เนื่องจากเมื่อสถานีฐานสูงขึ้นทำให้รังสีเดี่ยวเบนที่ขอบยอดอาคารสามารถเดินทางไปถึงบริเวณที่เป็นจุดบอดเดิมในรูปที่ 2.13(ก) และรูปที่ 2.13(ข) ได้ ส่งผลให้กำลังรับที่สถานีเคลื่อนที่สูงขึ้น



(ก) สถานีฐานสูง 1.90 เมตร



(ข) สถานีฐานสูง 7.05 เมตร



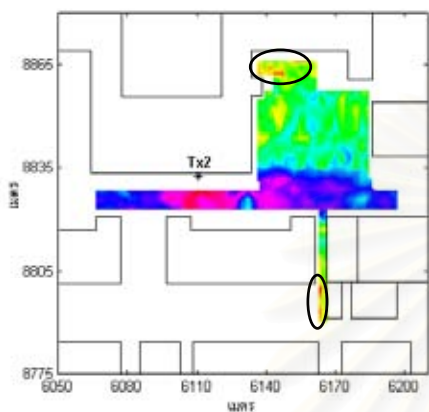
(ค) สถานีฐานสูง 17.73 เมตร

รูปที่ 2.13 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจากการคำนวณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง  
ความสูงสถานีฐานในกรณีที่ 2

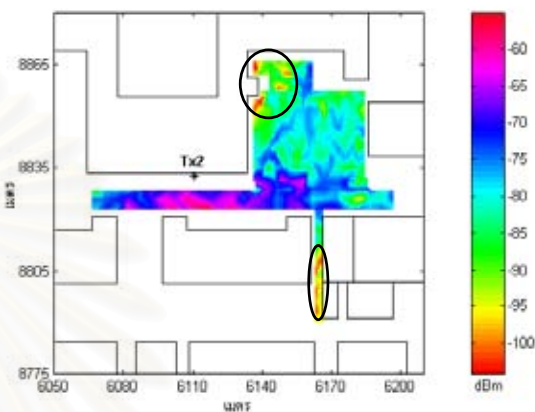
### 2.1.2 การทดลองเพื่อศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐาน

การทดลองเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานพิจารณาที่ตำแหน่งสถานีฐานและความสูงสถานีฐานเช่นเดียวกับกรณีที่ 2 ของการคำนวณ คือสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งสถานีฐานที่ 2 ในรูปที่ 2.11 และสถานีฐานสูง 1.90, 7.05, 17.73 เมตร โดยที่สถานีฐานตั้งบนพื้นถนน ตั้งอยู่บนระเบียงอาคาร 3 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.14 ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการคำนวณ โดยพบบริเวณที่เป็นจุดบอด 2 บริเวณ และเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานแล้วการเคลื่อนย้ายของจุดบอดที่เกิดขึ้นไม่ชัดเจน แต่ที่ความสูงสถานีฐานเป็น 17.73 เมตรในรูปที่ 2.14(ค) จะพบว่าบริเวณที่เป็นจุดบอดมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อสถานีฐานสูง 1.9 เมตร และ 7.05 เมตรในรูปที่ 2.14(ก) และ 2.14(ข) เนื่องจากเมื่อสถานีฐานสูงขึ้นแม้

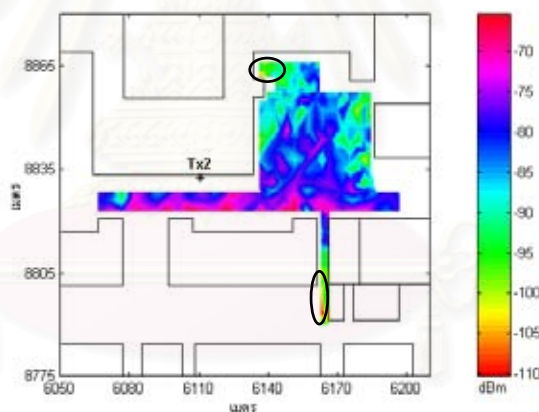
ว่าระยะทางจะเพิ่มขึ้นแต่รังสีที่สามารถเดินทางไปถึงสถานีเคลื่อนที่ก็มากขึ้น เช่นรังสีเดี่ยวเบนที่ขอบยอดอาคาร รังสีสะท้อนอันดับที่ 1 ที่เกิดขึ้นเมื่อสถานีฐานสูงขึ้น ส่งผลให้รังสีที่เดินทางไปยังสถานีเคลื่อนที่มีกำลังสูง แม้ว่าจะมีรังสีเดี่ยวเบนที่สันขอบแนวตั้งที่มีกำลังต่ำไปถึงสถานีเคลื่อนที่ แต่กำลังรับที่เกิดจากผลรวมแบบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าก็ยังคงมีค่าสูงจึงไม่เกิดจุดบอด แต่หากระยะทางที่ห่างจากสถานีฐานมากขึ้นก็ยังพบว่าเกิดจุดบอดขึ้นดังเช่นในรูปที่ 2.14(ค)



(ก) สถานีฐานสูง 1.90 เมตร



(ข) สถานีฐานสูง 7.05 เมตร



(ค) สถานีฐานสูง 17.73 เมตร

รูปที่ 2.14 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจากการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

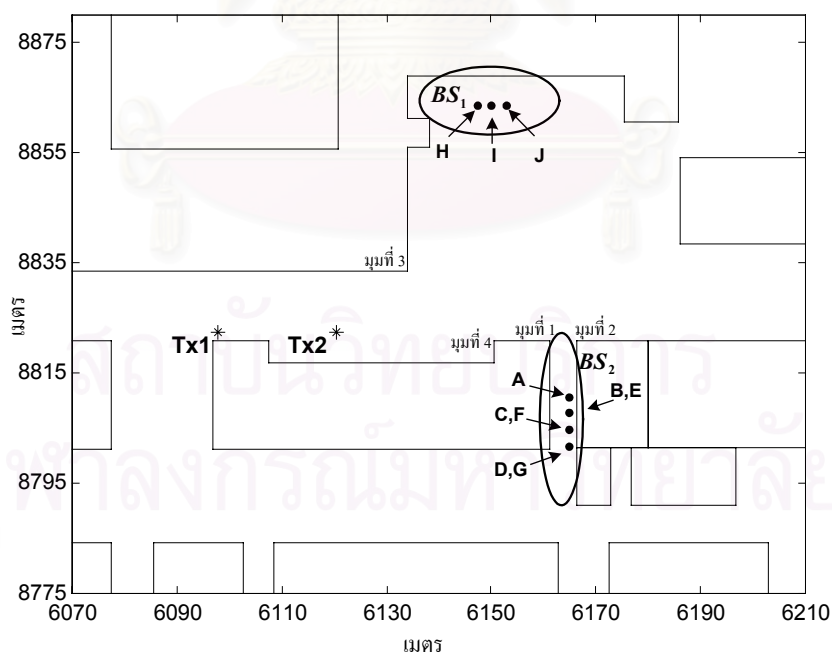
ความสูงสถานีฐานในกรณีที่ 2

### 2.3 การทำนายการเกิดจุดบอดเบื้องต้น

การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานและเมื่อสถานีฐานมีความสูงต่าง ๆ กันนั้น ทำให้เกิดแนวความคิดการทำนายการเกิดจุดบอดจากพฤติกรรมของจุดบอดที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของจุดบอดไม่ว่าจะเป็นผลการคำนวณและผลการทดลองในหัวข้อที่ 2.1 และหัวข้อที่ 2.2 ที่กล่าวมา ทำให้ได้สมมติฐานเบื้องต้น

ของการทำนายการเกิดจุดบอด คือบริเวณที่จะเกิดเป็นจุดบอดมักเป็นบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้ (non line of sight) ดังนั้นการทำนายการเกิดจุดบอดจึงสามารถทำได้โดยพิจารณารังสีที่สามารถเดินทางไปยังสถานีเคลื่อนที่ที่ตั้งอยู่ในบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้ โดยรังสีที่สามารถเดินทางไปยังบริเวณดังกล่าวและมีกำลังสูงหรือมีระยะทางระหว่างสถานีฐานไปยังบริเวณจุดบอดเป็นระยะทางสั้นที่สุด เรียกได้ว่าเป็นรังสีที่มีนัยสำคัญสูง (Highly Significant Ray, HSR)

การทำนายการเกิดจุดบอดโดยใช้รังสีที่มีนัยสำคัญสูง เมื่อพิจารณาผลการคำนวณและผลการทดลองการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งสถานีฐานในรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.10 พบบริเวณที่เป็นจุดบอดอยู่ 2 บริเวณคือ  $BS_1$  เป็นจุดบอดบริเวณที่ 1 และ  $BS_2$  เป็นจุดบอดบริเวณที่ 2 กรณีศึกษาการทำนายการเกิดจุดบอดจะพิจารณารูปที่ 2.15 สังเกตได้ว่ารังสีที่สามารถเดินทางไปถึงจุดบอดในบริเวณที่ 2 ดังรูปที่ 2.15 และมีระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่น้อยที่สุดคือรังสีเดี่ยวเบนที่สั้นขอบแนวตั้งของอาคารมุมที่ 1 และมุมที่ 2 รังสีทั้งสองรังสีถือเป็นรังสีที่มีนัยสำคัญสูงในกรณีนี้ เมื่อนำสนามไฟฟ้าของรังสีทั้งสองนี้มารวมกันแบบเวกเตอร์แล้วเกิดการหักล้างเชิงวิภาคอย่างสมบูรณ์ก็จะเกิดเป็นจุดบอดขึ้น โดยที่ความเข้มสนามไฟฟ้าของทั้งสองรังสีไม่ต่างกันมากเพื่อให้การหักล้างวิภาคมีผลต่อการเพิ่มหรือลดของกำลังคลื่น ไม่เช่นนั้น กำลังรับที่ได้จะขึ้นกับรังสีที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มากกว่า โดยอาจไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการหักล้างของวิภาคเลยเพราะการหักล้างวิภาคจะมีผลต่อการเพิ่มหรือลดของกำลังคลื่นไม่มาก



รูปที่ 2.15 ตำแหน่งสถานีฐานและตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่เพื่อทำนายการเกิดจุดบอดเบื้องต้น

การพิจารณารังสีเดี่ยวเบนที่สั้นขอบแนวตั้งของอาคาร โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอก-  
รูปเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าเดี่ยวเบนที่เข้าสู่สถานีเคลื่อนที่ทำได้โดยใช้นิพจน์ต่อไปนี้

$$E^d(s) = D E^i(Q_D) \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} e^{-jks} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E^i(Q_D)$  คือสนามตกกระทบที่จุดเลี้ยวเบน  $Q_D$  เป็นหน้าคลื่นทรงกลมโดยมีระยะทางจากแหล่งกำเนิดเป็น  $s'$

$D$  คือสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่ขอบ

$s'$  คือระยะทางที่รังสีเดินทางจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดเลี้ยวเบน

$s$  คือระยะทางที่รังสีเดินทางจากจุดเลี้ยวเบนไปยังสถานีเคลื่อนที่

รายละเอียดการคำนวณสนามไฟฟ้าที่เกิดจากรังสีเลี้ยวเบนที่สันขอบแนวตั้งของอาคารได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ค.

การทำนายการเกิดจุดบอดมุ่งเน้นที่การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงวิภาคของรังสีที่เดินทางจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่ วิภาคที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดจุดบอดเมื่อทำนายการเกิดจุดบอดโดยใช้รังสีที่มีนัยสำคัญสูง วิทยานิพนธ์นี้จะทำนายการเกิดจุดบอดโดยเปรียบเทียบค่ากำลังรับระหว่างผลการคำนวณสนามเลี้ยวเบนของรังสีที่มีนัยสำคัญสูงกับผลการทดลองเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ตามลำดับ และพิจารณาตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.15 ทั้งจุดบอดบริเวณที่ 1 และจุดบอดบริเวณที่ 2 การทำนายจุดบอดในบริเวณที่ 2 ที่มีรังสีที่มีนัยสำคัญสูงสองรังสี คือรังสีที่เลี้ยวเบนที่สันขอบจากมุมที่ 1 และมุมที่ 2 ซึ่งผลการคำนวณสนามเลี้ยวเบนของรังสีที่มีนัยสำคัญสูงและผลการทดลองเมื่อสถานีเคลื่อนที่ตั้งอยู่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูปที่ 2.15 แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลการทำนายการเกิดจุดบอดบริเวณที่ 2

ตำแหน่งสถานีฐาน	ตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่	ระยะทางที่รังสีเดินทาง		ค่าความต่างวิภาค (องศา)	กำลังรับ (dBm)	
		เส้นทางที่ 1 (มุมที่1)	เส้นทางที่ 2 (มุมที่2)		ผลการคำนวณจากสมการ (2.1)	ผลการทดลอง
Tx1	A	74.24	78.92	36.98	-97.01	-104.12
	B	77.12	81.89	143.34	-107.63	-110.85
	C	80.03	84.87	212.10	-109.72	-108.54
	D	82.99	87.85	99.81	-103.45	-110.95
Tx2	E	54.45	59.22	219.17	-103.53	-111.38
	F	57.37	62.20	149.99	-106.88	-114.67
	G	60.32	65.18	101.85	-100.26	-99.19

เมื่อ E, F และ G อยู่ตำแหน่งเดียวกันกับ B, C และ D ตามลำดับ

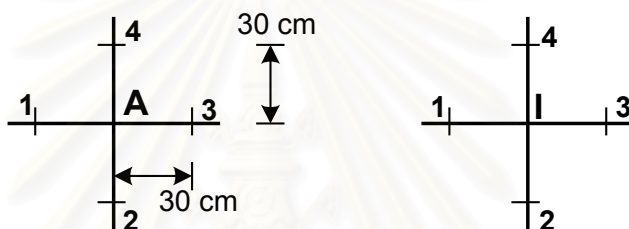
สำหรับตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ H, I และ J เป็นตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ในจุดขอบบริเวณที่ 1 ดังรูป 2.15 เมื่อพิจารณารังสีที่เดินทางจากสถานีฐานที่ 1 มายังสถานีเคลื่อนที่ดังกล่าวพบว่ารังสีที่สามารถเดินทางมาถึงสถานีเคลื่อนที่ตำแหน่งดังกล่าวมีหลายรังสี แต่การพิจารณาเพื่อทำนายการเกิดจุดขอบจะพิจารณาเพียงสองรังสีที่มีระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่น้อยที่สุดหรือในที่นี้ถือว่าเป็นรังสีที่มีนัยสำคัญสูงก็คือรังสีเดี่ยวเบนจากมุมที่ 3 และมุมที่ 4 ในรูปที่ 2.15 ผลการทำนายการเกิดจุดขอบบริเวณที่ 1 เป็นดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการทำนายการเกิดจุดขอบบริเวณที่ 1

ตำแหน่งสถานีฐาน	ตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่	ระยะทางที่รังสีเดินทาง		ค่าความต่างวิทยุภาค (องศา)	กำลังรับ (dBm)	
		เส้นทางที่ 3 (มุมที่3)	เส้นทางที่ 4 (มุมที่4)		ผลการคำนวณจากสมการ (2.1)	ผลการทดลอง
Tx1	H	70.86	95.75	159.60	-98.91	-102.02
	I	72.00	95.63	87.13	-92.67	-113.04
	J	73.38	95.67	67.81	-91.91	-104.15

เมื่อพิจารณาผลการคำนวณในตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 พบว่าเมื่อรังสีที่มีนัยสำคัญสูงสองรังสีเดินทางมาถึงสถานีเคลื่อนที่ในรูปที่ 2.15 มีค่าความต่างวิทยุภาคเป็น  $180 \pm 45$  องศา จะพบว่าตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่นั้นมีโอกาสที่จะเป็นจุดขอบสูง ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยที่ตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ B, C, E และ F อยู่ในบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้ และมีค่าความต่างวิทยุภาคเป็น  $180 \pm 45$  องศา ตำแหน่งดังกล่าวจึงเป็นจุดขอบ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่าความต่างวิทยุภาคของรังสีที่มีนัยสำคัญสูงเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นเงื่อนไขหนึ่งสำหรับการทำนายการเกิดจุดขอบ แต่ยังคงพบว่ามีตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่บางตำแหน่งที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้ คือที่ตำแหน่ง A, D, G, I และ J ซึ่งจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าตำแหน่งดังกล่าวนี้เป็นจุดขอบ แต่จากการคำนวณค่าความต่างวิทยุภาคแล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไข จึงย้อนกลับไปทีนยามของจุดขอบว่าจุดขอบไม่ใช่เป็นจุดแต่เป็นบริเวณ ดังนั้นจึงพิจารณาดำแหน่งที่คาดว่าจะเป็จุดขอบที่อยู่ในบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้ โดยการเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ตำแหน่งที่พิจารณาว่าเป็นจุดขอบเพื่อตรวจสอบว่าตำแหน่งที่พิจารณาอยู่ในพื้นที่ที่เป็นจุดขอบหรือไม่ รูปที่ 2.16 ซึ่งแสดงการเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ตำแหน่งที่พิจารณาว่าเป็นจุดขอบ A และ I ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง และมีระยะห่างจากตำแหน่งที่พิจารณาไม่มากนัก จากรูปประมาณหนึ่งความยาวคลื่นหรือในที่นี้คือ 30 เซนติเมตร เมื่อคำนวณสนามไฟฟ้าจากรังสีที่มีนัยสำคัญสูงทั้ง 4 ตำแหน่ง แล้วพบค่าความต่างวิทยุภาคเป็นไปตามเงื่อนไข คือมีค่าความต่างวิทยุภาคเป็น  $180 \pm 45$  องศา ที่

ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งรอบตำแหน่งที่พิจารณา กล่าวได้ว่าตำแหน่งที่พิจารณาคือเป็นจุดยอดหรืออยู่ในบริเวณที่มีกำลังรับที่ต่ำมาก ผลการคำนวณเมื่อเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานไปรอบตำแหน่ง A และ I แสดงดังตารางที่ 2.4 พบว่าตำแหน่งที่อยู่รอบ ๆ ตำแหน่ง A มีตำแหน่งที่เป็นไปตามเงื่อนไขค่าความต่างวิภาคอยู่ 2 ตำแหน่ง สำหรับตำแหน่ง I มีตำแหน่งที่เป็นไปตามเงื่อนไขค่าความต่างวิภาคอยู่ 1 ตำแหน่ง ดังนั้นแม้ว่าจะพิจารณาที่ตำแหน่ง A และตำแหน่ง I แล้วไม่เป็นที่ไปตามเงื่อนไขค่าความต่างวิภาค (ดังตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 ตามลำดับ) แต่ที่ตำแหน่งรอบ ๆ ตำแหน่ง A และตำแหน่ง I เป็นไปตามเงื่อนไขค่าความต่างวิภาค (ดังตารางที่ 2.4) ก็ยังคงกล่าวได้ว่าตำแหน่ง A และ I มีความน่าจะเป็นของการเป็นจุดยอดสูงและจากการทดลองตำแหน่งทั้งสองก็เป็นจุดยอดด้วย กระบวนการทำนายการเกิดจุดยอดแสดงดังรูปที่ 2.17

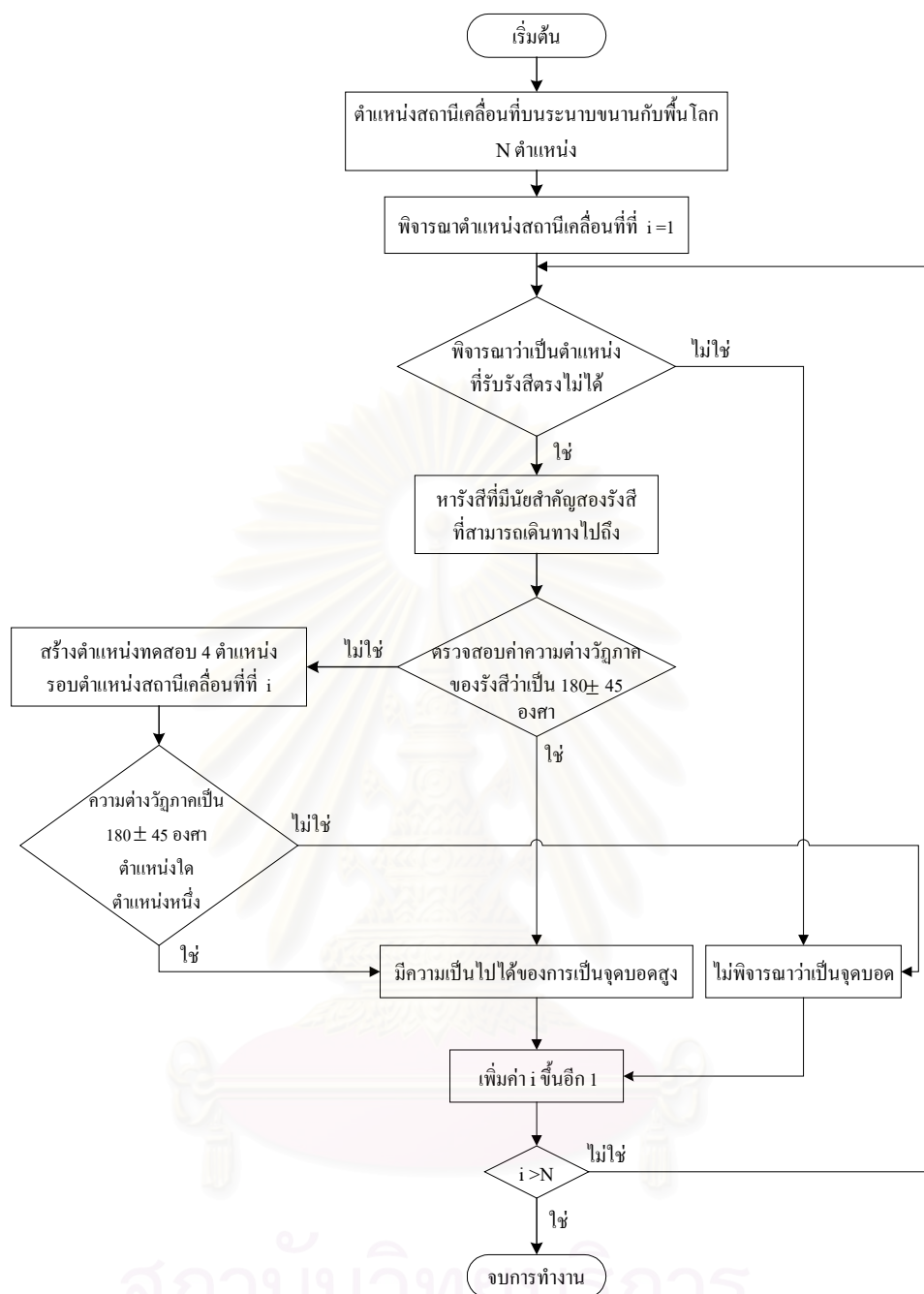


รูปที่ 2.16 การย้ายตำแหน่งโดยรอบตำแหน่งทดสอบ A และ I  
เพื่อการทำนายการเกิดจุดยอด

ตารางที่ 2.4 ผลการตรวจสอบความเป็นไปได้ที่จะเป็นจุดยอดของตำแหน่ง A และ I

ตำแหน่ง ทดสอบ	ตำแหน่ง สถานี เคลื่อนที่	ค่าความต่าง วิภาค (องศา)	กำลังรับ (dBm)	
			ผลการคำนวณ จากสมการ (2.1)	ผลการ ทดลอง
A	1	210.62	-107.65	-104.12
	2	49.97	-97.51	
	3	225.01	-104.57	
	4	22.92	-96.62	
I	1	97.98	-93.06	-113.04
	2	44.51	-91.83	
	3	87.50	-92.48	
	4	129.04	-109.49	





รูปที่ 2.17 กระบวนการทำนายการเกิดจุดบอด

## สรุป

การศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานและเปลี่ยนความสูงสถานีพบว่าเมื่อสถานีฐานมีความสูงต่ำกว่าอาคารมาก ๆ (สถานีฐานสูง 1.9 เมตร อาคารสูงประมาณ 20 ถึง 25 เมตร) การแพร่กระจายคลื่นจะจำกัดบริเวณด้วยผนังอาคารจึงทำให้บริเวณที่เป็นจุดบอดมักเป็นบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้และการเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานเป็นระยะทางที่เหมาะสมประมาณ 15 เมตร (50 เท่าของความยาวคลื่น) จะทำให้เห็นการเคลื่อนย้าย

ตำแหน่งจุดยอดได้ชัดเจน สำหรับกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานการเคลื่อนย้ายตำแหน่งจุดยอดไม่ชัดเจนนักเนื่องจากเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูงสถานีฐานรังสีที่ต้องพิจารณาเมื่อความสูงใกล้เคียงกับความสูงอาคารคือรังสีเฉียงเบนที่ขอบยอดอาคาร แม้ว่าสถานีฐานจะสูงขึ้นและระยะทางที่รังสีเดินทางไปยังจุดยอดมีระยะทางมากขึ้น ก็ไม่ได้หมายความว่าบริเวณที่เป็นจุดยอดจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับความสูงอาคารและความสูงสถานีฐาน และหากสถานีฐานมีความสูงที่เหมาะสมก็จะทำให้บริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้และเป็นจุดยอดสามารถรับรังสีตรงได้และไม่เกิดเป็นจุดยอดทำให้ประสิทธิภาพของพื้นที่ครอบคลุมเพิ่มขึ้นได้ นอกจากนี้ตำแหน่งของสถานีฐานที่เหมาะสมจะทำให้ได้พื้นที่ครอบคลุมที่ดีตามต้องการด้วย

การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของจุดยอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและความสูงพบว่าบริเวณที่เป็นจุดยอดมักเป็นบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้ จึงสามารถทำนายการเกิดจุดยอดเบื้องต้นได้โดยพิจารณารังสีที่มีนัยสำคัญสูง (Highly Significant Ray, HSR) หากรังสีที่มีนัยสำคัญสูงสองรังสีมีค่าความต่างวิถีภาค  $180 \pm 45$  องศา บริเวณนั้นก็มีความเป็นไปได้ของการเกิดจุดยอดสูง และตรวจสอบตำแหน่งที่คาดว่าจะจะเป็นจุดยอดโดยการเคลื่อนย้ายสถานีเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ตำแหน่งที่คาดว่าจะจะเป็นจุดยอดโดยมีระยะห่างจากตำแหน่งที่พิจารณาประมาณหนึ่งความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ตำแหน่ง หากพบว่าบริเวณรอบ ๆ ตำแหน่งที่พิจารณาว่าเป็นจุดยอดมีตำแหน่งที่มีค่าความต่างวิถีภาคของรังสีที่มีนัยสำคัญสูง  $180 \pm 45$  องศา ก็ถือว่าตำแหน่งที่พิจารณาอยู่นั้นมีความเป็นไปได้ของการเกิดจุดยอดสูง เพราะแท้จริงแล้วจุดยอดไม่ได้เป็นจุดแต่เกิดเป็นบริเวณ

เมื่อทราบถึงพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายของจุดยอดแล้ว เพื่อเพิ่มคุณภาพพื้นที่ครอบคลุมจึงเสนอการกำจัดจุดยอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น ระเบียนวิธีที่ใช้วิเคราะห์ตัวสะท้อนคลื่น ผลการคำนวณและผลการทดลองก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น และหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น และการเปรียบเทียบค่าความสามารถครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น จะกล่าวในบทต่อไป

## บทที่ 3

### การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น

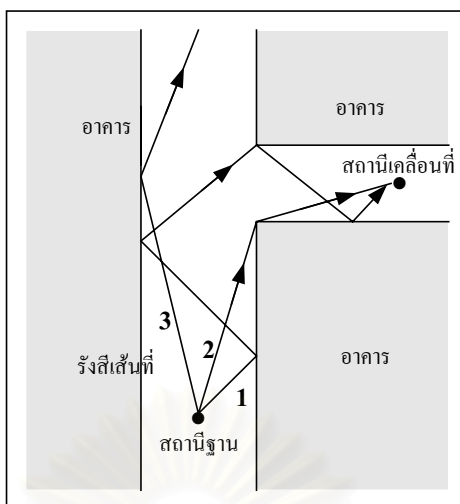
#### ความนำ

การกำจัดจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมบริการสื่อสารเคลื่อนที่นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณภาพพื้นที่ครอบคลุมและปรับปรุงการให้บริการให้มีประสิทธิภาพสูงสุด วิทยานิพนธ์นี้เสนอการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น มาสะท้อนสัญญาณไปยังบริเวณที่เป็นจุดบอด วิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวสะท้อนคลื่นที่มีลักษณะทางเรขาคณิตอย่างง่าย เป็นแบบแบนราบ (flat reflector) มีขนาดและลักษณะการจัดวางที่แตกต่างกัน

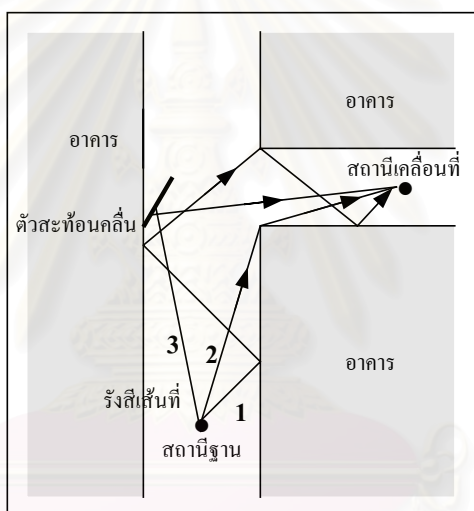
การใช้ตัวสะท้อนคลื่นมากำจัดจุดบอดต้องอาศัยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ เริ่มต้นจากการใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในการทำนายพื้นที่ครอบคลุม เพื่อหาจุดบอดสัญญาณ เมื่อทราบบริเวณที่เป็นจุดบอดแล้วก็หาตำแหน่งวางตัวสะท้อนคลื่นที่เหมาะสมซึ่งต้องเป็นบริเวณที่มีกำลังมากพอและมีภูมิภาคที่เหมาะสมเพื่อสะท้อนคลื่นไปยังจุดบอดได้ นอกจากตำแหน่งของตัวสะท้อนแล้ว ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงอีกก็คือ ขนาด ลักษณะการจัดวางและรูปร่างของตัวสะท้อนที่จะใช้ เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อกำลังคลื่นที่เดินทางไปยังจุดบอด [1,2] ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและขั้นตอนการวิเคราะห์ ระเบียบวิธีวิเคราะห์การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น การนำตัวสะท้อนคลื่นไปประกอบกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น ผลการคำนวณการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น และผลการทดลองการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น

#### 3.1 แนวคิดและขั้นตอนการวิเคราะห์

การนำตัวสะท้อนคลื่นมาใช้กำจัดจุดบอดมีหลักการ คือการเปลี่ยนแปลงทิศทางของคลื่นที่เดินทางไปในบริเวณพื้นที่ครอบคลุม โดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นสะท้อนคลื่นที่มีสัญญาณแรงเพียงพอจากบริเวณหนึ่งไปยังบริเวณที่เป็นจุดบอดแล้วทำให้บริเวณจุดบอดมีกำลังรับที่สูงขึ้น รูปที่ 3.1 เป็นตัวอย่างของรังสีที่เดินทางจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่ รูปที่ 3.1(ก) แสดงเส้นทางของรังสีที่เดินทางตามเส้นทางที่ 1, 2 และ 3 รังสีแต่ละรังสีที่เดินทางจากสถานีฐานมีทิศทางต่างกัน อาจเดินทางไปถึงสถานีเคลื่อนที่หรือไม่ก็ได้ ตามรูปพบว่ารังสีเส้นที่ 3 มีทิศทางที่ไม่ไปยังสถานีเคลื่อนที่ การเปลี่ยนทางเดินรังสีที่ 3 น่าจะเพิ่มกำลังรับ ณ สถานีเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงได้นำตัวสะท้อนคลื่นมาใช้เพื่อเปลี่ยนทิศทางของรังสีเส้นที่ 3 โดยลักษณะการวางตำแหน่งของตัวสะท้อนคลื่นเพื่อเปลี่ยนทิศทางของรังสีให้เดินทางไปยังตำแหน่งที่ต้องการเป็นดังรูปที่ 3.1(ข)



(ก) ทางเดินรังสีเมื่อไม่ใช้ตัวสะท้อนคลื่น



(ข) ทางเดินของรังสีเมื่อใช้ตัวสะท้อนคลื่น

### รูปที่ 3.1 ลักษณะการวางตำแหน่งของตัวสะท้อนคลื่น

การวางตำแหน่งของตัวสะท้อนคลื่นที่เหมาะสมจะทำให้รังสีสะท้อนจากตัวสะท้อนคลื่นเดินทางไปยังจุดบอดและเกิดการเสริมกันของภูมิภาคทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 3.1(ก) สมมติว่ารังสีที่ 1 และ 2 เดินทางไปยังจุดบอด (สถานีเคลื่อนที่ตามรูป) มีสนามไฟฟ้ารวมกันเป็นค่า ๆ หนึ่ง แต่เมื่อนำตัวสะท้อนคลื่นมาใช้และวางตำแหน่งได้เหมาะสมตามรูปที่ 3.1(ข) จะทำให้มีรังสีเดินทางไปยังจุดบอดเพิ่มขึ้น โดยที่รังสีแต่ละรังสีต้องกำลังแรงพอสมควรและมีภูมิภาคเสริมกัน เพื่อให้มีผลรวมของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อมีการใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อกำจัดจุดบอดต้องมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของอาคารที่บดบังโดยตัวสะท้อนคลื่นและคำนวณรังสีที่เดินทางไปยังตัวสะท้อนคลื่นแล้วสะท้อนไปยังจุดบอดเพื่อนำไปคำนวณสนามไฟฟ้าของรังสีแต่ละรังสีที่เดินทางไปถึงจุดบอดโดยการรวมสัญญาณแบบเวกเตอร์ เมื่อได้สนามไฟฟ้ารวมแล้วจึงนำสนามไฟฟ้ารวมมาคำนวณเป็นกำลังที่รับได้ แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวัดเพื่อยืนยันความถูกต้องของการคำนวณ หลังจากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าความสามารถครอบคลุม (coverability) ที่ได้จากการใช้ตัวสะท้อนคลื่นและการไม่ใช้ตัวสะท้อนคลื่น ความสามารถครอบคลุมในวิทยานิพนธ์นี้ คืออัตราส่วนของจุดทดสอบที่รับกำลังได้มากกว่าค่าที่กำหนดต่อจำนวนจุดทดสอบทั้งหมด โดยมีนิพจน์คณิตศาสตร์แสดงในหัวข้อที่ 3.4.3



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น

รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การกำจัดจุดยอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น โดยอาศัยแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นช่วยหาจุดยอดก่อนที่จะมีการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมโดยประมาณ สำหรับติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น เมื่อได้ตำแหน่งที่เหมาะสมแล้วก็ทดสอบติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น จากนั้นทดลองวัดกำลังคลื่นแล้วนำไปเปรียบเทียบกับกำลังคลื่นที่คำนวณจากสนามไฟฟ้ากรณีที่มีการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณ หากผลการคำนวณสอดคล้องกับการทดลองวัด ก็จะได้ชุดสมการหรือแบบจำลองที่จะใช้คำนวณสนามไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น โดยผลของการกำจัดจุดยอดจะเปรียบเทียบค่าความสามารถครอบคลุมของกรณีใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อกำจัดจุดยอดกับเมื่อไม่ใช้ตัวสะท้อนคลื่น หลังจากนั้นเปลี่ยนค่าปัจจัยที่สนใจ ในที่นี้ คือลักษณะการจัดวาง หรือตำแหน่งการติดตั้ง และขนาดของตัวสะท้อนคลื่น สังเกตการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ครอบคลุมว่าการนำตัวสะท้อนคลื่นไปใช้กำจัดจุดยอดจะทำอย่างไรให้มีผลกระทบต่อพื้นที่ครอบคลุมบริเวณอื่นที่ไม่ใช่จุดยอดน้อยที่สุด และมีค่าความสามารถครอบคลุมที่สูง เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อกำจัดจุดยอดต่อไป

### 3.2 ระเบียบวิธีวิเคราะห์การกำจัดจุดยอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น

การคำนวณสนามไฟฟ้าที่สะท้อนออกจากตัวสะท้อนคลื่นสำหรับการกำจัดจุดยอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นได้นำระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ทั้งที่ปรากฏในรูปของสมการอนุพันธ์หรือสมการปริพันธ์ และนิยมใช้สำหรับปัญหาย่านความถี่ต่ำเนื่องจากขนาดของตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้มีขนาดสองถึงห้าเท่าของความยาวคลื่น มาคำนวณความหนาแน่นกระแสพื้นผิว (surface current density,  $J$ ) ก่อนจะคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่สะท้อนออกจากตัวสะท้อนคลื่น เพื่อให้ค่าสนามที่ได้มีความถูกต้องกว่าการใช้กรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต ซึ่งเป็นระเบียบวิธีประมาณพฤติกรรมของคลื่นในย่านความถี่สูง ต่อไปจะกล่าวถึงการดำเนินการตามระเบียบวิธีโมเมนต์และการวิเคราะห์ตัวสะท้อนคลื่นโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์

#### 3.2.1 การดำเนินการตามระเบียบวิธีโมเมนต์

การแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์มีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้ [5,6]

1. เลือกฟังก์ชันฐาน (basis function) หรือฟังก์ชันการขยาย (expansion function) สำหรับการประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าที่สนใจ
2. เลือกฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weighting function) หรือฟังก์ชันทดสอบ (testing function) สำหรับช่วยในการประมาณผลเฉลยและแปลงรูปสมการ
3. แก้ระบบสมการเชิงเส้นเพื่อหาผลเฉลยที่ต้องการ

การแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์จะต้องทราบสมการสำหรับปัญหาที่สนใจก่อนจึงจะสามารถดำเนินการตามขั้นตอนของระเบียบวิธีโมเมนต์ได้ ดังนี้

พิจารณาสมการของปัญหาที่สนใจในรูปทั่วไป

$$LI = Y \quad (3.1)$$

เมื่อ  $I$  คือ ตัวแปรไม่ทราบค่าที่สนใจ

$L$  คือ ตัวดำเนินการ

$Y$  คือ ฟังก์ชันกระตุ้น (excitation function) หรือแหล่งกำเนิดกำลังงานคลื่น

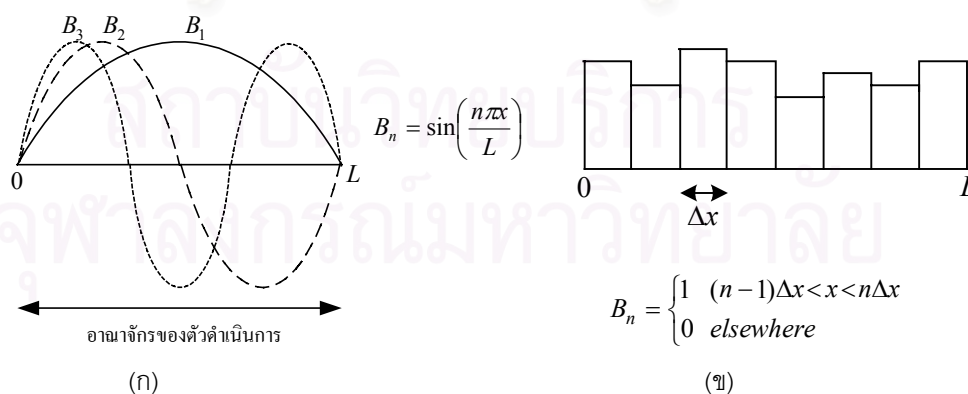
เลือกฟังก์ชันฐานเพื่อประมาณตัวแปรไม่ทราบค่า  $I$  ซึ่งอยู่ในอาณาจักร (domain) ของตัวดำเนินการ  $L$  เขียนได้ดังนี้

$$I = \sum_{n=1}^N \alpha_n B_n \quad (3.2)$$

เมื่อ  $B_n$  คือ เซตของฟังก์ชันฐาน,  $\{B_1, B_2, B_3, \dots\}$

$\alpha_n$  คือ เซตของสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า

โดยทั่วไปแล้วฟังก์ชันฐานมี 2 ชนิด คือฟังก์ชัน entire domain ซึ่งเซตของฟังก์ชันฐาน ( $B_n$ ) จะครอบคลุมทั้งอาณาจักรของตัวดำเนินการ โดยรูปร่างของฟังก์ชันจะเปลี่ยนแปลงตาม  $n$  และอีกชนิดหนึ่งคือ ฟังก์ชัน subsectional ลักษณะของฟังก์ชันฐานนี้คือ  $B_n$  จะมีค่าต่างกันในแต่ละส่วนย่อยของอาณาจักรของตัวดำเนินการ ลักษณะของฟังก์ชันฐานทั้งสองเป็นตามรูปที่ 3.3 [7]



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างของฟังก์ชันฐาน (ก) entire domain (ข) subsectional

เมื่อประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าด้วยฟังก์ชันฐานได้แล้ว แทนค่าสมการ (3.2) ในสมการ (3.1) จะได้ว่า

$$\alpha_n \sum_{n=1}^N LB_n = Y_N \quad (3.3)$$

เลือกฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักเพื่อประมาณคำตอบ ในที่นี้สมมติเป็น  $\{W_m\}$  ซึ่งอยู่ในพิสัย (range) ของตัวดำเนินการ และหาค่าผลคูณภายใน (inner product) ของ  $W_m$  กับ สมการ (3.3) ได้ดังนี้

$$\alpha_n \sum_{n=1}^N \langle LB_n, W_m \rangle = \langle Y, W_m \rangle \quad (3.4)$$

โดยที่ ผลคูณภายในของฟังก์ชัน  $f(x)$  และ  $g(x)$  ใดๆ หาได้จาก

$$\langle f, g \rangle = \int_D f(x)g^*(x) dx \quad (3.5)$$

เมื่อ  $D$  คืออาณาจักรของตัวดำเนินการ

\* คือสังยุคเชิงซ้อน

สมการ (3.4) สามารถเขียนในรูปของระบบสมการ  $N$  สมการ กับตัวแปรที่ไม่ทราบค่า  $N$  ตัวแปรได้เป็น

$$\begin{aligned} \alpha_1 \langle LB_1, W_1 \rangle + \alpha_2 \langle LB_2, W_1 \rangle + \dots + \alpha_N \langle LB_N, W_1 \rangle &= \langle Y, W_1 \rangle \\ \alpha_1 \langle LB_1, W_2 \rangle + \alpha_2 \langle LB_2, W_2 \rangle + \dots + \alpha_N \langle LB_N, W_2 \rangle &= \langle Y, W_2 \rangle \\ \dots & \\ \alpha_1 \langle LB_1, W_N \rangle + \alpha_2 \langle LB_2, W_N \rangle + \dots + \alpha_N \langle LB_N, W_N \rangle &= \langle Y, W_N \rangle \end{aligned} \quad (3.6)$$

เขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[Z_{mn}][\alpha_n] = [y_m] \quad (3.7)$$

ถ้า  $[Z_{mn}]$  ไม่เกิดค่าเอกฐาน (singular) จะได้ว่า

$$[\alpha_n] = [Z_{mn}]^{-1}[y_m] \quad (3.8)$$

เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนแล้วจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าปัจจัยตามต้องการ

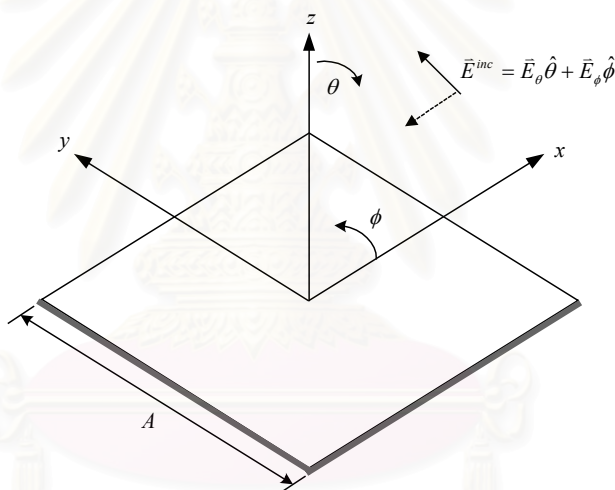


### 3.2.2 ระเบียบวิธีโมเมนต์สำหรับแผ่นโลหะตัวนำแบนราบ (flat conducting plate)

การวิเคราะห์ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อใช้กำจัดจุดบอดโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์จะพิจารณา เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์การกระเจิงของคลื่นเมื่อตกกระทบพื้นผิวใด ๆ [7-13] ในวิทยานิพนธ์ นี้ได้ดำเนินการตามเอกสารอ้างอิง [7] เริ่มต้นพิจารณาแผ่นโลหะตัวนำสมบรูณ์แบนราบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสวางอยู่บนระนาบ  $x = 0, y = 0, z = 0$  มีสนามไฟฟ้าเป็นคลื่นระนาบที่มีองค์ประกอบตามแนวแกน  $x$  และ  $y$  สาดส่องเข้ามาบนแผ่นโลหะดังในรูปที่ 3.4 สมการปริพันธ์สนามไฟฟ้า (electric field integral equation, EFIE) ของแผ่นโลหะตัวนำแบนราบเขียนในรูปของสมการสเกลาร์ได้ดังนี้

$$-E_x^{inc}(\vec{r}) = \left[ -j\omega A_x(\vec{r}) - \frac{\partial}{\partial x} \Phi(\vec{r}) \right] \quad (3.9)$$

$$-E_y^{inc}(\vec{r}) = \left[ -j\omega A_y(\vec{r}) - \frac{\partial}{\partial y} \Phi(\vec{r}) \right] \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.4 แผ่นโลหะตัวนำสมบรูณ์แบนราบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

เมื่อศักดาเวกเตอร์แม่เหล็ก (magnetic vector potential,  $A(\vec{r})$ ) และศักดาสเกลาร์ไฟฟ้า (electric scalar potential,  $\Phi(\vec{r})$ ) หาได้จาก

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \iint J(\vec{r}') \frac{e^{-jk|r-r'|}}{|r-r'|} dx' dy' \quad (3.11)$$

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iint \rho(\vec{r}') \frac{e^{-jk|r-r'|}}{|r-r'|} dx' dy' \quad (3.12)$$

$\mu$  คือ ความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (permeability) ในปริภูมิเสรีมีค่าเป็น  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m

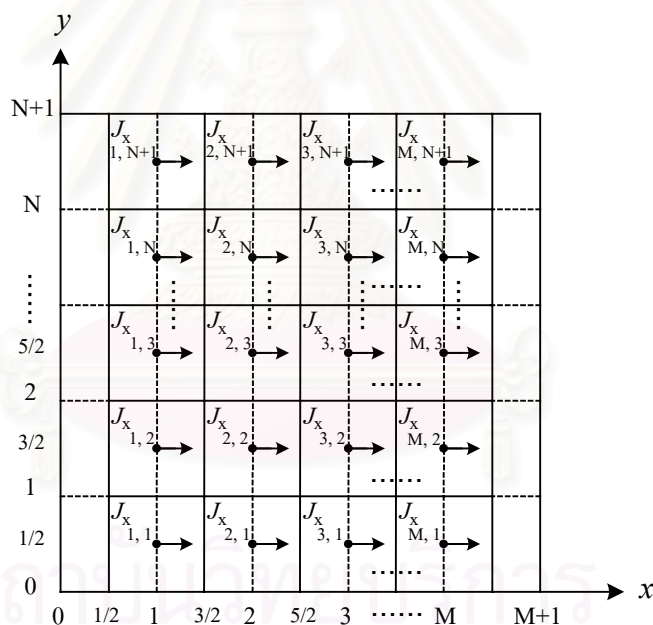
$\epsilon$  คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) ในปริภูมิเสรีมีค่าเป็น  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m

$k$  คือ เลขคลื่นมีค่าเป็น  $\frac{2\pi}{\lambda}$  เมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น

$\rho$  คือ ความหนาแน่นประจุพื้นผิว (surface charge density) ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแสพื้นผิว ( $\vec{J}$ ) ดังนี้

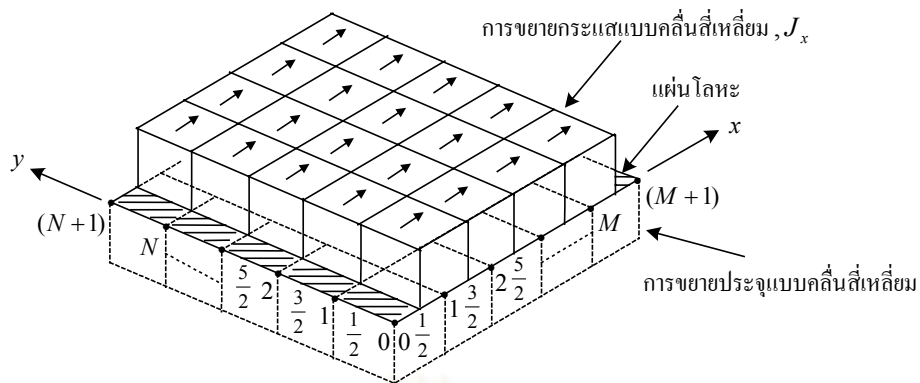
$$-j\omega\rho = \nabla \cdot \vec{J} = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} \quad (3.13)$$

ระเบียบวิธีโมเมนต์จะเริ่มต้นโดยการประมาณนิพจน์ของกระแสพื้นผิว ( $\vec{J}_x, \vec{J}_y$ ) บนแผ่นโลหะกำหนดให้กระแสอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่าของฟังก์ชันฐานที่มีองค์ประกอบตามแนวแกน  $x$  และแนวแกน  $y$  เนื่องจากแผ่นโลหะวางอยู่บนระนาบ  $xy$  ฟังก์ชันฐานที่ใช้คือฟังก์ชันคลื่นสี่เหลี่ยม (pulse function) ดังนั้นกระแสที่ขยายบนแผ่นโลหะตัวนำเป็นดังรูปที่ 3.5 และมีนิพจน์ของกระแสดังสมการ (3.14) และสมการ (3.15)

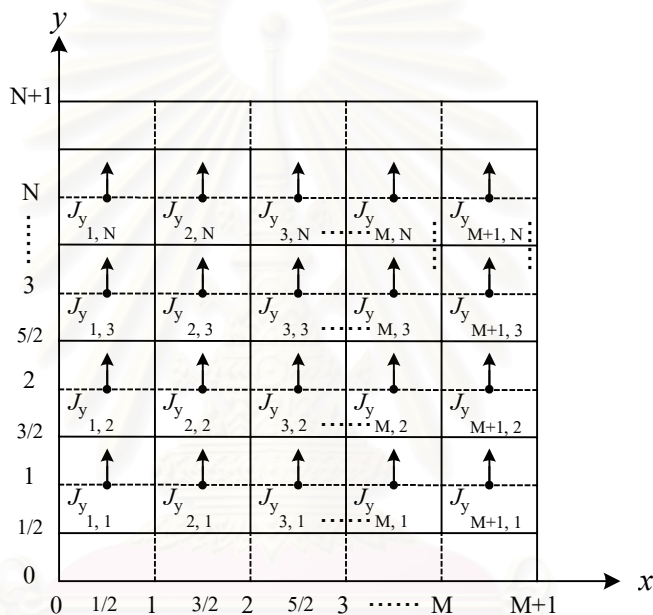


(ก) ภาพสองมิติการขยายกระแสและการขยายประจุไปตามแกน  $x$

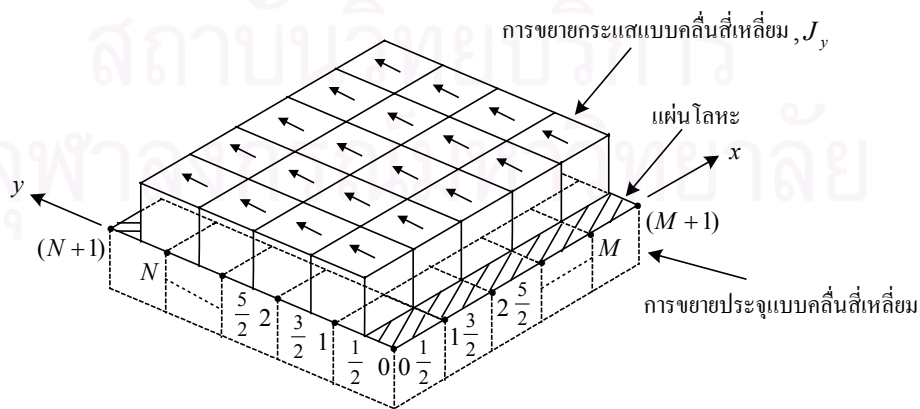
รูปที่ 3.5 การขยายกระแสและประจุบนแผ่นโลหะที่วางอยู่บนระนาบ  $xy$



(ข) ภาพสามมิติการขยายกระแสและการขยายประจุไปตามแกน  $x$



(ค) ภาพสองมิติการขยายกระแสและการขยายประจุไปตามแกน  $y$



(ง) ภาพสามมิติการขยายกระแสและการขยายประจุไปตามแกน  $y$

รูปที่ 3.5 การขยายกระแสและประจุบนแผ่นโลหะที่วางอยู่บนระนาบ  $xy$  (ต่อ)

$$J_x(\vec{r}) = \sum_{n=1}^{N+1} \sum_{m=1}^M J_x^{mn} P_{J_x}^{mn}(\vec{r}) \quad (3.14)$$

$$J_y(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} J_y^{mn} P_{J_y}^{mn}(\vec{r}) \quad (3.15)$$

เมื่อ

$$P_{J_x}^{mn}(\vec{r}) = \begin{cases} 1 & \begin{cases} x_{m-1/2} < x < x_{m+1/2} \\ y_{n-1} < y < y_n \end{cases} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$P_{J_y}^{mn}(\vec{r}) = \begin{cases} 1 & \begin{cases} x_{m-1} < x < x_m \\ y_{n-1/2} < y < y_{n+1/2} \end{cases} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3.17)$$

จากนั้นแทนค่าการขยายกระแส (current expansion) ในสมการ (3.11) จะได้

$$\vec{A}_x(\vec{r}) = \sum_{n=1}^{N+1} \sum_{m=1}^M \int_{x_{m-1/2}}^{x_{m+1/2}} \int_{y_{n-1}}^{y_n} J_x^{mn} G(\vec{r}, \vec{r}') dy' dx' \quad (3.18)$$

$$\vec{A}_y(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1/2}}^{y_{n+1/2}} J_y^{mn} G(\vec{r}, \vec{r}') dy' dx' \quad (3.19)$$

โดยที่ฟังก์ชันกรีนในปริภูมิเสรีเป็น

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{e^{-jk|r-r'|}}{|r-r'|} \quad (3.20)$$

เมื่อ  $\vec{r}$  คือเวกเตอร์บอกตำแหน่งของจุดสังเกตใด ๆ  $(x, y, z)$

$\vec{r}'$  คือเวกเตอร์บอกตำแหน่งของแหล่งกำเนิด  $(x', y', z')$

สำหรับการขยายประจุ (charge expansion) ใช้ฟังก์ชันฐานเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกับการขยายกระแสพื้นผิว การขยายประจุเป็นดังสมการ (3.21)

$$P_\rho^{mn}(\vec{r}) = \begin{cases} 1 & \begin{cases} x_{m-1} < x < x_m \\ y_{n-1} < y < y_n \end{cases} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3.21)$$

ใช้การประมาณผลต่างจำกัด จะได้สมการ (3.13) เป็น

$$\rho(\vec{r}) = \frac{j}{\omega} \sum_{n=1}^{N+1} \sum_{m=1}^M \left[ \frac{J_x^{mn} - J_x^{m-1,n}}{\Delta x} + \frac{J_y^{mn} - J_y^{m,n-1}}{\Delta y} \right] P_\rho^{mn}(\vec{r}) \quad (3.22)$$

และเมื่อแทนเงื่อนไขขอบเขตของกระแส โดยให้กระแสในทิศทางตั้งฉากที่ขอบมีค่าเป็นศูนย์ สามารถเขียนสมการ (3.22) ได้ใหม่ดังนี้

$$\rho(\vec{r}) = \frac{j}{\omega} \left[ \sum_{n=1}^{N+1} \sum_{m=1}^M J_x^{mn} \left( \frac{P_\rho^{mn}(\vec{r})}{\Delta x} - \frac{P_\rho^{m+1,n}(\vec{r})}{\Delta x} \right) + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} J_y^{mn} \left( \frac{P_\rho^{mn}(\vec{r})}{\Delta y} - \frac{P_\rho^{m,n+1}(\vec{r})}{\Delta y} \right) \right] \quad (3.23)$$

แทนค่า  $\rho(\vec{r})$  ในสมการ (3.12) และแทนค่า  $\Phi(\vec{r})$  ในสมการ (3.9) และสมการ (3.10) ซึ่งเป็นไปตาม ขั้นตอนการดำเนินการของระเบียบวิธีโมเมนต์ คือได้เลือกฟังก์ชันฐานเพื่อประมาณตัวแปรไม่ทราบค่าที่สนใจ ต่อไปจะเป็นการถ่วงน้ำหนักเพื่อประมาณคำตอบ จัดรูปสมการและหาผลเฉลยที่ต้องการ

ศักดาสมการไฟฟ้าตามสมการ (3.9) และสมการ (3.10) อยู่ในรูปของอนุพันธ์ย่อย (partial derivative) ดังนั้นจึงเลือกฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักของ  $E_x$  และ  $E_y$  เป็นฟังก์ชันเดลต้า

$$\begin{aligned} P_{J_x}^{mn}(\vec{r})\delta(y - y_{n-1/2}) & \quad \text{สำหรับ } E_x \\ P_{J_y}^{mn}(\vec{r})\delta(x - x_{m-1/2}) & \quad \text{สำหรับ } E_y \end{aligned}$$

เมื่อถ่วงน้ำหนักศักดาสมการไฟฟ้า และหาผลคูณภายใน จะได้ศักดาสมการไฟฟ้าของ  $E_x$  ในสมการ (3.9) และศักดาสมการไฟฟ้าของ  $E_y$  ในสมการ (3.10) เป็นดังสมการ (3.24) และสมการ (3.25) ตามลำดับดังนี้

$$\int_{x_{m-1/2}}^{x_{m+1/2}} -\frac{\partial}{\partial x} \Phi(\vec{r}) dx = -\Phi(x_{m+1/2}, y_{n-1/2}) + \Phi(x_{m-1/2}, y_{n-1/2}) \quad (3.24)$$

$$\int_{y_{n-1/2}}^{y_{n+1/2}} -\frac{\partial}{\partial y} \Phi(\vec{r}) dy = -\Phi(x_{m-1/2}, y_{n+1/2}) + \Phi(x_{m-1/2}, y_{n-1/2}) \quad (3.25)$$

การถ่วงน้ำหนักทำให้ศักดาสมการไฟฟ้าไม่ติดอยู่ในรูปของอนุพันธ์ย่อย สำหรับศักดาเวกเตอร์แม่เหล็ก ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักที่ใช้เช่นเดียวกับศักดาสมการไฟฟ้าและสามารถประมาณค่าปริพันธ์ได้ดังนี้

$$\int_{\Delta x} f(x) dx \approx f(\text{midpoint}) \cdot \Delta x \quad (3.26)$$

จะได้ศักดาเวกเตอร์แม่เหล็กที่ถ่วงน้ำหนักแล้วเป็น

$$A_x \approx \int_{x_{m-1/2}}^{x_{m+1/2}} \int_{y_{n-1}}^{y_n} J_x^{mn} G(x_m, y_{n-1/2}, \vec{r}') dy' dx' \cdot \Delta x_m \quad (3.27)$$

$$A_y \approx \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1/2}}^{y_{n+1/2}} J_y^{mn} G(x_{m-1/2}, y_n, \vec{r}') dy' dx' \cdot \Delta y_n \quad (3.28)$$

เช่นเดียวกัน สนามไฟฟ้าตกกระทบที่ถ่วงน้ำหนักแล้วมีนิพจน์เป็น

$$\int \vec{E}_x dx \approx E_{x_i, y_{j-1/2}} \cdot \Delta x = E_x^{ij} \quad (3.29)$$

$$\int \vec{E}_y dy \approx E_{x_{i-1/2}, y_j} \cdot \Delta y = E_y^{ij} \quad (3.30)$$

แทนค่าศักดาเวกเตอร์แม่เหล็กตามสมการ (3.27) และสมการ (3.28) ศักดาสเกลาร์ไฟฟ้าตามสมการ (3.24) และสมการ (3.25) ลงในสมการ (3.9) และสมการ (3.10) ทำให้ได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned}
 E_x(\vec{r}) = & -\sum_{n=1}^{N+1} \sum_{m=1}^M j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{x_{m-1/2}}^{x_{m+1/2}} \int_{y_{n-1}}^{y_n} J_x^{mn} G(\vec{r}, \vec{r}') dy' dx' \\
 & - \frac{1}{4\pi\epsilon} \iint \rho(x_{m+1/2}, y_{n-1/2}, \vec{r}') G(x_{m+1/2}, y_{n-1/2}, r') dy' dx' \\
 & + \frac{1}{4\pi\epsilon} \iint \rho(x_{m-1/2}, y_{n-1/2}, \vec{r}') G(x_{m-1/2}, y_{n-1/2}, r') dy' dx' \quad (3.31)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_y(\vec{r}) = & -\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1/2}}^{y_{n+1/2}} J_y^{mn} G(\vec{r}, \vec{r}') dy' dx' \\
 & - \frac{1}{4\pi\epsilon} \iint \rho(x_{m-1/2}, y_{n+1/2}, \vec{r}') G(x_{m-1/2}, y_{n+1/2}, r') dy' dx' \\
 & + \frac{1}{4\pi\epsilon} \iint \rho(x_{m-1/2}, y_{n-1/2}, \vec{r}') G(x_{m-1/2}, y_{n-1/2}, r') dy' dx' \quad (3.32)
 \end{aligned}$$

จากนั้นแทนค่าการขยายประจุ ( $\rho$ ) จากสมการ (3.23) ลงในสมการ (3.31) และสมการ (3.32) พร้อมทั้งกำหนดขอบเขตของการหาปริพันธ์ตามอาณาจักรของฟังก์ชันคลื่นสี่เหลี่ยม จากนั้นจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการ (3.33) และสมการ (3.34) ที่แทนนิพจน์ศักดาสเกลาร์ไฟฟ้าและศักดาเวกเตอร์แม่เหล็กบนแผ่นย่อยแต่ละแผ่นของแผ่นโลหะเป็นดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 E_x^{ij} = & \sum_{n=1}^{N+1} \sum_{m=1}^M J_x^{mn} \left[ -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{x_{m-1/2}}^{x_{m+1/2}} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_i, y_{j-1/2}, \vec{r}') dy' dx' \cdot \Delta x_i \right. \\
 & + \frac{j}{4\pi\omega\epsilon\Delta x} \left( - \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i+1/2}, y_{j-1/2}, \vec{r}') dy' dx' \right. \\
 & + \int_{x_m}^{x_{m+1}} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i+1/2}, y_{j-1/2}, \vec{r}') dy' dx' \\
 & + \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i-1/2}, y_{j-1/2}, \vec{r}') dy' dx' \\
 & \left. \left. - \int_{x_m}^{x_{m+1}} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i-1/2}, y_{j-1/2}, \vec{r}') dy' dx' \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} J_y^{mn} \frac{j}{4\pi\omega\epsilon\Delta y} \left[ - \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i+1/2}, y_{j-1/2}, \bar{r}') dy' dx' \right. \\
& \quad + \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_n}^{y_{n+1}} G(x_{i+1/2}, y_{j-1/2}, \bar{r}') dy' dx' \\
& \quad + \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i-1/2}, y_{j-1/2}, \bar{r}') dy' dx' \\
& \quad \left. - \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_n}^{y_{n+1}} G(x_{i-1/2}, y_{j-1/2}, \bar{r}') dy' dx' \right]
\end{aligned} \tag{3.33}$$

$$\begin{aligned}
E_y^{ij} = & \sum_{n=1}^{N+1} \sum_{m=1}^M J_x^{mn} \frac{j}{4\pi\omega\epsilon\Delta x} \left[ - \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i-1/2}, y_{j+1/2}, \bar{r}') dy' dx' \right. \\
& + \int_{x_m}^{x_{m+1}} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i-1/2}, y_{j+1/2}, \bar{r}') dy' dx' \\
& + \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i-1/2}, y_{j-1/2}, \bar{r}') dy' dx' \\
& \left. - \int_{x_m}^{x_{m+1}} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i-1/2}, y_{j-1/2}, \bar{r}') dy' dx' \right] \\
& + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} J_y^{mn} \left[ -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1/2}}^{y_{n+1/2}} G(x_{i-1/2}, y_j, \bar{r}') dy' dx' \cdot \Delta y_j \right. \\
& + \frac{j}{4\pi\epsilon\omega\Delta y} \left( - \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i-1/2}, y_{j+1/2}, \bar{r}') dy' dx' \right. \\
& + \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_n}^{y_{n+1}} G(x_{i-1/2}, y_{j+1/2}, \bar{r}') dy' dx' \\
& + \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_{n-1}}^{y_n} G(x_{i-1/2}, y_{j-1/2}, \bar{r}') dy' dx' \\
& \left. \left. - \int_{x_{m-1}}^{x_m} \int_{y_n}^{y_{n+1}} G(x_{i-1/2}, y_{j-1/2}, \bar{r}') dy' dx' \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.34}$$

เขียนเป็นสมการอย่างย่อได้เป็น

$$E_x^{ij} = \sum_{n=1}^{N+1} \sum_{m=1}^M J_x^{mn} (A_x^{mn} + \Phi_x^{mn}) + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} J_y^{mn} \Phi_y^{mn} \tag{3.35}$$

$$E_y^{ij} = \sum_{n=1}^{N+1} \sum_{m=1}^M J_x^{mn} \Phi_x^{mn} + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M+1} J_y^{mn} (A_y^{mn} + \Phi_y^{mn}) \tag{3.36}$$

สำหรับสนามไฟฟ้าของคลื่นระนาบที่ตกกระทบ ( $E_x^{ij}, E_y^{ij}$ ) จะกล่าวในหัวข้อถัดไป สมการ (3.35) และสมการ (3.36) สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[B] = [A][X] \quad (3.37)$$

เมื่อ  $A$  คือ ตัวดำเนินการ ในที่นี้หมายถึงนิพจน์ศักดาสมการสนามไฟฟ้าและศักดาเวกเตอร์แม่เหล็ก  $B$  คือ สนามไฟฟ้าของคลื่นระนาบที่มาจากกระทบ ( $E_x^{ij}$  และ  $E_y^{ij}$ ) และ  $X$  คือตัวแปรไม่ทราบค่า ( $J_x$  และ  $J_y$  บนแผ่นย่อยแต่ละแผ่น)

ค่า  $J_x$  และ  $J_y$  จะนำไปคำนวณสนามไฟฟ้ากระแสเชิงในองค์ประกอบ  $x$  และ  $y$  ที่จุดสังเกตใด ๆ ที่มีระยะห่างจากตัวสะท้อนคลื่นเป็นระยะทาง  $r$  ดังสมการต่อไปนี้

$$E_x^s = \frac{-j\omega\mu}{4\pi} \iint J_x(x', y') \frac{e^{-jkr}}{r} ds' \quad (3.38)$$

$$E_y^s = \frac{-j\omega\mu}{4\pi} \iint J_y(x', y') \frac{e^{-jkr}}{r} ds' \quad (3.39)$$

ค่าสนามไฟฟ้ากระแสเชิงที่คำนวณได้จะนำไปคำนวณหาสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากตัวสะท้อนคลื่นไปยังสถานีเคลื่อนที่นั่นเอง สำหรับการนำตัวสะท้อนคลื่นไปประกอบกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

### 3.3 การนำตัวสะท้อนคลื่นไปประกอบกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น

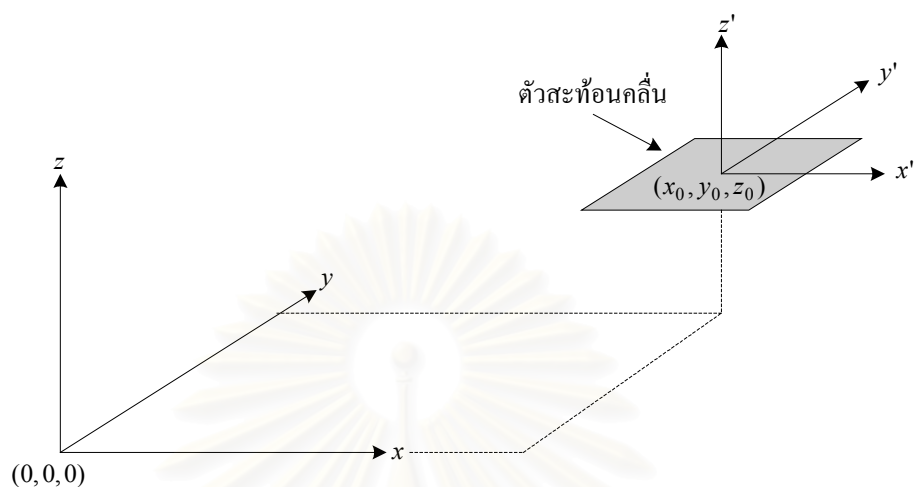
การวิเคราะห์ตัวสะท้อนคลื่นโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์สามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่กระเจิงจากตัวสะท้อนคลื่นมายังสถานีเคลื่อนที่ได้ แต่สนามไฟฟ้าที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีโมเมนต์ในหัวข้อที่ 3.2.2 ยังเป็นการคำนวณในระบบพิกัดของตัวสะท้อนคลื่นซึ่งเป็นพิกัดเฉพาะที่ (local coordinate) ดังนั้นการประกอบตัวสะท้อนคลื่นกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นจึงต้องแปลงระบบพิกัดของตัวสะท้อนคลื่นให้อยู่ในระบบพิกัดเดียวกันกับระบบพิกัดของแบบจำลองซึ่งถือว่าเป็นพิกัดทั่วไป (global coordinate) เพื่อให้สามารถคำนวณสนามไฟฟ้ารับที่สถานีเคลื่อนที่ สามารถรับได้ หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการปรับมุมตัวสะท้อนคลื่น การหาค่าสนามไฟฟ้าตกกระทบที่แผ่นย่อยแต่ละแผ่นของตัวสะท้อนคลื่นและคำนวณสนามไฟฟ้ารับที่สถานีเคลื่อนที่รับได้

#### 3.3.1 การปรับมุมตัวสะท้อนคลื่น

การปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นพิจารณาจากระบบพิกัดของแบบจำลองเป็นดังรูปที่ 3.6 โดยที่ระนาบ  $xy$  เป็นระนาบขนานพื้นดิน และแกน  $z$  อยู่บนระนาบตั้งฉากกับพื้นดิน สำหรับระบบพิกัดของตัวสะท้อนคลื่นมีโพลาริเซชันเช่นเดียวกับแบบจำลอง (ทิศทางของแกน  $x, y$  และ  $z$  เหมือนกัน) แต่อยู่ตำแหน่งที่ต่างกันดังรูปที่ 3.6 โดยที่ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน  $x'y'z'$  เกิดจากการย้ายจุดกำเนิด  $xyz$  ไปอยู่ที่  $(x_0, y_0, z_0)$  ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัด  $x'y'z'$  กับระบบพิกัด  $xyz$  เป็นดังสมการ (3.39)

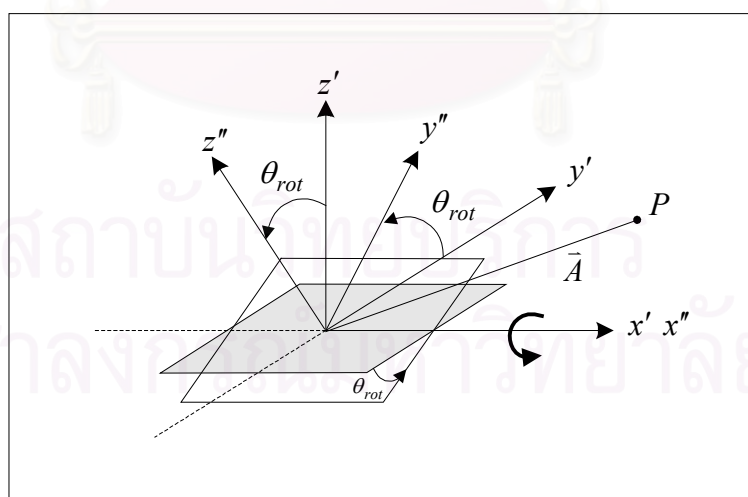


$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$



รูปที่ 3.6 ระบบพิกัดแบบจำลองและระบบพิกัดตัวสะท้อนคลื่น

เมื่อพิจารณาระบบพิกัดตัวสะท้อนคลื่นดังรูปที่ 3.6 พบว่าตัวสะท้อนคลื่นยังอยู่ในระนาบขนานพื้นดิน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับมุมของตัวสะท้อนคลื่น เริ่มต้นจากการปรับตัวสะท้อนคลื่นในแนวตั้ง (ก้ม-เงย) โดยการหมุนมุมรอบแกน  $x'$  ในทิศทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม  $\theta_{rot}$  ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ระบบพิกัดตัวสะท้อนคลื่นเมื่อหมุนมุมรอบแกน  $x'$

การหมุนมุมรอบแกน  $x'$  ทำให้เกิดระบบพิกัด  $x''y''z''$  ซึ่งเสมือนว่าเกิดการหมุนแกน  $z'$  รอบแกน  $x'$  เป็นมุม  $\theta_{rot}$  ในทิศทวนเข็มนาฬิกา ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัด  $x''y''z''$  กับระบบพิกัด  $x'y'z'$  สามารถหาได้จากเวกเตอร์บอกตำแหน่ง  $\vec{A}$  ที่จุด  $P$  ใด ๆ ของพิกัดทั้งสอง เมื่อพิจารณารูปที่ 3.7 เวกเตอร์บอกตำแหน่ง  $\vec{A}$  เป็นดังสมการ

$$\vec{A} = x'\hat{a}_{x'} + y'\hat{a}_{y'} + z'\hat{a}_{z'} = x''\hat{a}_{x''} + y''\hat{a}_{y''} + z''\hat{a}_{z''} \quad (3.41)$$

โดยที่  $\hat{a}_{x'}$ ,  $\hat{a}_{y'}$ ,  $\hat{a}_{z'}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของระบบพิกัด  $x'y'z'$  และ  $\hat{a}_{x''}$ ,  $\hat{a}_{y''}$ ,  $\hat{a}_{z''}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของระบบพิกัด  $x''y''z''$

เมื่อนำเวกเตอร์บอกตำแหน่ง  $\vec{A}$  มาหาผลคูณเชิงสเกลาร์กับเวกเตอร์หนึ่งหน่วย  $\hat{a}_{x''}$ ,  $\hat{a}_{y''}$ ,  $\hat{a}_{z''}$  จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัด  $x''y''z''$  กับระบบพิกัด  $x'y'z'$  ในรูปที่ 3.7 เป็นดังสมการ

$$\begin{aligned} x'' &= \vec{A} \cdot \hat{a}_{x''} = x'(\hat{a}_{x'} \cdot \hat{a}_{x''}) + y'(\hat{a}_{y'} \cdot \hat{a}_{x''}) + z'(\hat{a}_{z'} \cdot \hat{a}_{x''}) = x' \\ y'' &= \vec{A} \cdot \hat{a}_{y''} = x'(\hat{a}_{x'} \cdot \hat{a}_{y''}) + y'(\hat{a}_{y'} \cdot \hat{a}_{y''}) + z'(\hat{a}_{z'} \cdot \hat{a}_{y''}) = y' \cos \theta_{rot} + z' \sin \theta_{rot} \\ z'' &= \vec{A} \cdot \hat{a}_{z''} = x'(\hat{a}_{x'} \cdot \hat{a}_{z''}) + y'(\hat{a}_{y'} \cdot \hat{a}_{z''}) + z'(\hat{a}_{z'} \cdot \hat{a}_{z''}) = -y' \sin \theta_{rot} + z' \cos \theta_{rot} \end{aligned} \quad (3.42)$$

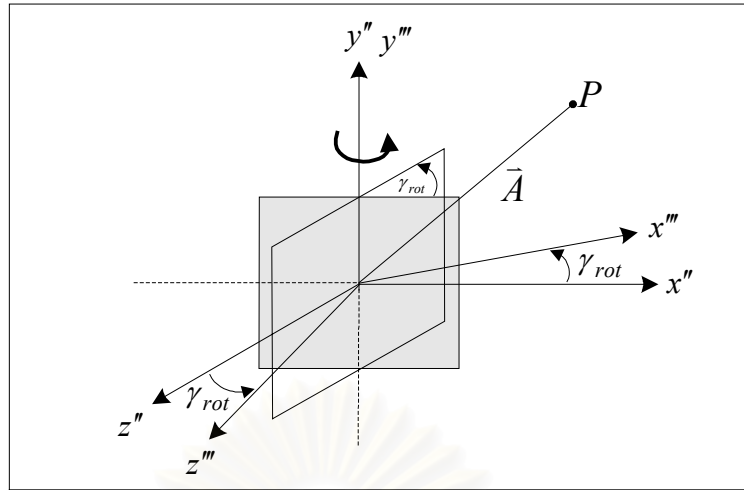
สมการ (3.42) เมื่อเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{rot} & \sin \theta_{rot} \\ 0 & -\sin \theta_{rot} & \cos \theta_{rot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

นำสมการ (3.40) แทนลงในสมการ (3.43) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเฉพาะที่และพิกัดทั่วไป ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{rot} & \sin \theta_{rot} \\ 0 & -\sin \theta_{rot} & \cos \theta_{rot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

การหมุนมุมรอบแกน  $x'$  จะทำให้สามารถปรับมุมของตัวสะท้อนคลื่นในแนวตั้ง ดังรูปที่ 3.7 ได้ แต่ยังคงขาดการปรับมุมในแนวระดับ (ซ้าย-ขวา) ซึ่งทำได้โดยการหมุนรอบแกน  $y'$  ในทิศทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม  $\gamma_{rot}$  ดังรูปที่ 3.8 และพิจารณาเช่นเดียวกับการหมุนมุมรอบแกน  $x'$  จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัด  $x''y''z''$  กับระบบพิกัด  $x''y''z''$  ในรูปที่ 3.8 เป็นดังสมการ (3.45)



รูปที่ 3.8 ระบบพิกัดตัวสะทอนเคลื่อนเมื่อหมุนมุมรอบแกน  $y'$

$$\begin{aligned}
 x''' &= \bar{A} \cdot \hat{a}_{x'''} = x''(\hat{a}_{x'} \cdot \hat{a}_{x'''}) + y''(\hat{a}_{y'} \cdot \hat{a}_{x'''}) + z''(\hat{a}_{z'} \cdot \hat{a}_{x'''}) = x'' \cos \gamma_{rot} - z'' \sin \gamma_{rot} \\
 y''' &= \bar{A} \cdot \hat{a}_{y'''} = x''(\hat{a}_{x'} \cdot \hat{a}_{y'''}) + y''(\hat{a}_{y'} \cdot \hat{a}_{y'''}) + z''(\hat{a}_{z'} \cdot \hat{a}_{y'''}) = y'' \cos \gamma_{rot} \\
 z''' &= \bar{A} \cdot \hat{a}_{z'''} = x''(\hat{a}_{x'} \cdot \hat{a}_{z'''}) + y''(\hat{a}_{y'} \cdot \hat{a}_{z'''}) + z''(\hat{a}_{z'} \cdot \hat{a}_{z'''}) = x'' \sin \gamma_{rot} + z'' \cos \gamma_{rot}
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

สมการ (3.45) เมื่อเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{rot} & 0 & -\sin \gamma_{rot} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_{rot} & 0 & \cos \gamma_{rot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \tag{3.46}$$

นำสมการ (3.44) แทนลงในสมการ (3.46) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเฉพาะที่และพิกัดทั่วไป ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{rot} & 0 & -\sin \gamma_{rot} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_{rot} & 0 & \cos \gamma_{rot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{rot} & \sin \theta_{rot} \\ 0 & -\sin \theta_{rot} & \cos \theta_{rot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \tag{3.47}$$

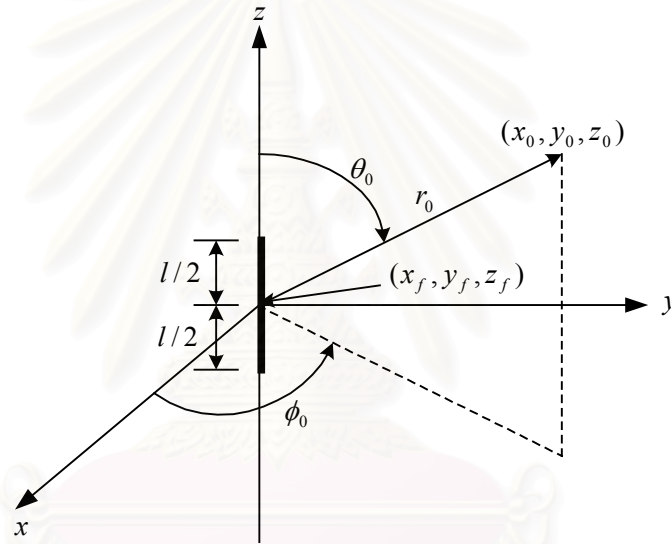
เมื่อปรับมุมทั้งสองแนวได้แล้วการคำนวณก็จะสามารถปรับมุมของตัวสะทอนเคลื่อนได้ตามต้องการซึ่งการปรับมุมขึ้นอยู่กับมุม  $\theta_{rot}$  และ  $\gamma_{rot}$  และสามารถเขียนสมการเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดทั่วไปและพิกัดเฉพาะที่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A^{-1}_{trans} \begin{bmatrix} x''' \\ y''' \\ z''' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \tag{3.48}$$

$$\text{เมื่อกำหนดให้ } A_{trans} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{rot} & 0 & -\sin \gamma_{rot} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_{rot} & 0 & \cos \gamma_{rot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{rot} & \sin \theta_{rot} \\ 0 & -\sin \theta_{rot} & \cos \theta_{rot} \end{bmatrix}$$

### 3.3.2 การหาค่าสนามไฟฟ้าตกกระทบบนแผ่นย่อยแต่ละแผ่นของตัวสะท้อนคลื่น

การหาสนามไฟฟ้าตกกระทบบนแผ่นย่อยแต่ละแผ่นได้แบ่งการพิจารณาเป็น 2 บริเวณคือ สนามไฟฟ้าตกกระทบจากสถานีฐานบริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถานีฐานบริเวณศาลาพระเกียรติวนอาคารจุลจักรพงษ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในกรณีของสถานีฐานบริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ การหาสนามไฟฟ้าตกกระทบบนแผ่นย่อยจะพิจารณาสถาณการแผ่พลังงานของสายอากาศชั่วคราวรูปที่ 3.9 ซึ่งมีสนามการแผ่พลังงานเป็นดังนี้ [7]



รูปที่ 3.9 เรขาคณิตของสายอากาศชั่วคราว

$$E_r = \eta \frac{I_0 l \cos \theta_0}{2\pi r_0} \left[ 1 + \frac{1}{jkr_0} \right] e^{-jkr_0} \quad (3.49)$$

$$E_\theta = j\eta \frac{kI_0 l \sin \theta_0}{4\pi r_0} \left[ 1 + \frac{1}{jkr_0} - \frac{1}{(kr_0)^2} \right] e^{-jkr_0} \quad (3.50)$$

$$E_\phi = 0 \quad (3.51)$$

เมื่อ  $\eta$  คืออิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติของตัวกลางมีค่าเท่ากับ  $120\pi$

$I_0$  คือค่ายอดของกระแสมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{\frac{2P_t \lambda^2}{80\pi^2 l^2}}$  เมื่อ  $P_t$  คือกำลังงานส่ง (วัตต์)

$k$  คือเลขคลื่นมีค่าเท่ากับ  $\frac{2\pi}{\lambda}$  (เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น)

$l$  คือความยาวของสายอากาศชั่วคราว

$r_0$  คือระยะทางจากจุดกึ่งกลางของสายอากาศชั่วคราวไปยังจุดสังเกต ในที่นี้ก็คือแผ่นย่อยของตัวสะท้อนคลื่นในพิกัดทั่วไป มีค่าเป็น  $\sqrt{(x_0 - x_f)^2 + (y_0 - y_f)^2 + (z_0 - z_f)^2}$

สนามการแผ่พลังงานจากสายอากาศชั่วคราวก็คือสนามไฟฟ้าตกกระทบ  $E_{inc}$  บนจุดกึ่งกลางของตัวสะท้อนคลื่น การคำนวณสนามไฟฟ้ากระเจิงจากตัวสะท้อนคลื่นโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ตามหัวข้อที่ 3.2.2 ค่าสนามไฟฟ้าตกกระทบต้องอยู่ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน เนื่องจากฟังก์ชันกระตุ้นที่ต้องการคือ  $E_x^{inc}$  และ  $E_y^{inc}$  และต้องอยู่ในระบบพิกัดเฉพาะที่ของตัวสะท้อนคลื่นเมื่อมีการปรับมุมของตัวสะท้อนคลื่น ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดคาร์ทีเซียนและระบบพิกัดทรงกลมเป็นดังรูปที่ 3.9 เมื่อ  $(x_f, y_f, z_f)$  คือตำแหน่งจุดกึ่งกลางของสายอากาศและ  $(x_0, y_0, z_0)$  คือตำแหน่งกึ่งกลางของตัวสะท้อนคลื่นเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}_{inc} = \begin{bmatrix} \sin \theta_0 \cos \phi_0 & \cos \theta_0 \cos \phi_0 & -\sin \phi_0 \\ \cos \theta_0 \cos \phi_0 & \cos \theta_0 \sin \phi_0 & \cos \phi_0 \\ \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_\theta \\ E_\phi \end{bmatrix}_{inc} \quad (3.52)$$

เมื่อ 
$$\theta_0 = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{(x_0 - x_f)^2 + (y_0 - y_f)^2}}{z_0 - z_f} \right)$$

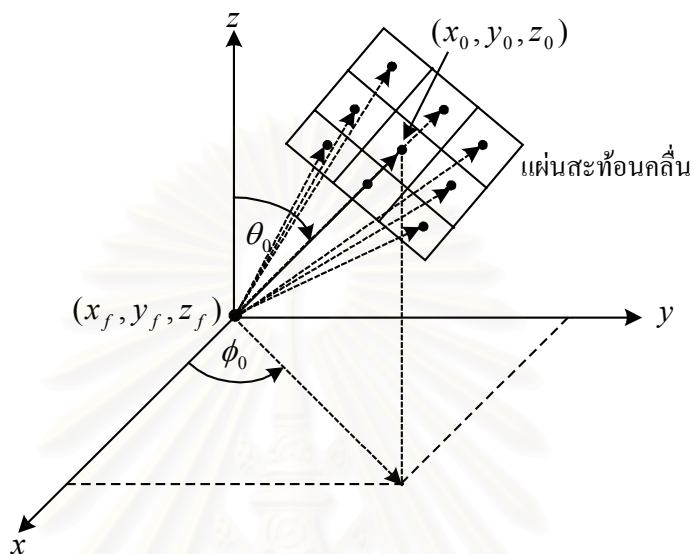
$$\phi_0 = \tan^{-1} \left( \frac{y_0 - y_f}{x_0 - x_f} \right)$$

สนามไฟฟ้าตกกระทบตามสมการ (3.52) อยู่ในระบบพิกัดทั่วไป จึงต้องแปลงพิกัดให้อยู่ในระบบพิกัดเฉพาะที่ตามการปรับมุมของตัวสะท้อนคลื่น โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดเฉพาะที่และพิกัดทั่วไปเป็นเช่นเดียวกันกับสมการ (3.47) ดังนั้นสนามไฟฟ้าตกกระทบในระบบพิกัดเฉพาะที่หาได้จาก

$$\begin{bmatrix} E_{x''} \\ E_{y''} \\ E_{z''} \end{bmatrix}_{inc} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{rot} & 0 & -\sin \gamma_{rot} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_{rot} & 0 & \cos \gamma_{rot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{rot} & \sin \theta_{rot} \\ 0 & -\sin \theta_{rot} & \cos \theta_{rot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}_{inc} \quad (3.53)$$

การหาสนามไฟฟ้าตกกระทบตัวสะท้อนคลื่นข้างต้นได้พิจารณาเพียงสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบกึ่งกลางตัวสะท้อนคลื่น วิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาสถาปัตยกรรมไฟฟ้าที่ไปตกกระทบบนแผ่นย่อยแต่ละแผ่นของตัวสะท้อนคลื่นดังรูปที่ 3.10 เนื่องจากตามระเบียบวิธีโมเมนต์จะทราบตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นย่อยของตัวสะท้อนคลื่น  $(x_{mid}, y_{mid}, z_{mid} = 0)$  ซึ่งอยู่ในระบบพิกัดเฉพาะที่ จึงต้องแปลงระบบพิกัดให้อยู่ในพิกัดทั่วไปดังสมการ (3.48) เพื่อนำไปแทนค่าหาสนามไฟฟ้าตกกระทบตาม

สมการ (3.49) ถึงสมการ (3.51) และดำเนินการตามสมการ (3.52) และสมการ (3.53) จะได้สนามไฟฟ้าตกกระทบบนแผ่นย่อยแต่ละแผ่น  $E_x^{ij}$  และ  $E_y^{ij}$  ของสมการ (3.33) และสมการ (3.34) จากนั้นจึงแก้สมการตามระเบียบวิธีโมเมนต์หาค่าของกระแส  $J_x$  และ  $J_y$  เพื่อนำไปหาสนามไฟฟ้ากระเจิงที่เดินทางไปถึงสถานีเคลื่อนที่



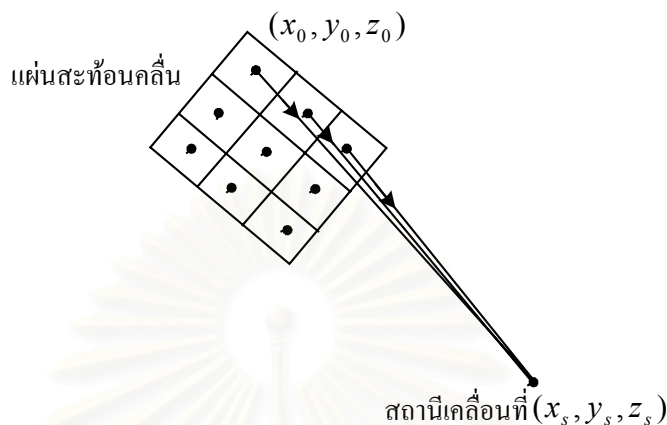
รูปที่ 3.10 สนามไฟฟ้าตกกระทบบนแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

การหาสนามไฟฟ้าตกกระทบบนแผ่นย่อยของตัวสะท้อนคลื่น กรณีสถานีฐานอยู่บริเวณศาลาพระเกี้ยวบนอาคารจุลจักรพงษ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นสถานีฐานของโทรศัพท์ระบบ GSM 900 จะพิจารณาจากฐานข้อมูลของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบระดับ (horizontal pattern) แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบตั้ง (vertical pattern) อัตราขยายของสายอากาศ มุมก้ม ทิศทางและความสูงของสายอากาศ แทนที่จะใช้สนามการแผ่พลังงานของสายอากาศตามสมการ (3.49) ถึงสมการ (3.51) และดำเนินการเช่นเดียวกับกรณีสถานีฐานอยู่ในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์

### 3.3.3 การคำนวณสนามไฟฟ้ารับที่สถานีเคลื่อนที่รับได้

สนามไฟฟ้ารับที่สถานีเคลื่อนที่รับได้เป็นผลรวมแบบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางไปถึงสถานีเคลื่อนที่ ประกอบด้วยสนามไฟฟ้า 2 ส่วน คือสนามไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น ( $\vec{E}_{model}$ ) ในเอกสารอ้างอิง [4] ผ่านกลไกการแพร่กระจายคลื่นต่าง ๆ คำนวณโดยใช้กรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป และสนามไฟฟ้ากระเจิงจากตัวสะท้อนคลื่น ( $\vec{E}_s$ ) ที่คำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ สำหรับรายละเอียดการคำนวณหาสนามไฟฟ้าของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเป็นดังเอกสารอ้างอิง [4] ส่วนการ

หาสนามไฟฟ้ากระเจิงจากตัวสะท้อนคลื่นคำนวณได้ดังสมการ (3.38) และสมการ (3.39) ซึ่งจะคำนวณสนามไฟฟ้ากระเจิงจากแผ่นย่อยแต่ละแผ่นแล้วนำมารวมกัน ลักษณะสนามไฟฟ้ากระเจิงจากแผ่นย่อยของตัวสะท้อนคลื่นมายังสถานีเคลื่อนที่ที่เป็นดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 สนามไฟฟ้ากระเจิงจากแผ่นย่อยของตัวสะท้อนคลื่นมายังสถานีเคลื่อนที่

สนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณโดยระเบียบวิธีโมเมนต์จะอยู่ในรูปของพิกัดเฉพาะที่ ดังนั้นต้องแปลงพิกัดให้อยู่ในพิกัดทั่วไปก่อนที่จะนำสนามไฟฟ้าไปรวมกับสนามไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น สนามไฟฟ้ารวมที่สถานีเคลื่อนที่รับได้มีค่าเป็น

$$\vec{E}_{total} = \vec{E}_{model} + \vec{E}_s \quad (3.54)$$

กำลังคลื่นที่มาถึงสถานีเคลื่อนที่คำนวณได้จากสูตรการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission formula) ดังสมการ (3.55)

$$P_r = S \cdot A_{er} = \frac{1}{2} \frac{E_{total}^2}{\eta_0} \cdot \left( G_r \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \quad (3.55)$$

$A_{er}$  คือขนาดช่องเปิดประสิทธิภาพของสายอากาศรับ โดยทั่วไปจะเท่ากับ  $G_r \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}$  เมื่อ  $G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ในการหาสนามไฟฟ้าที่เดินทางจากแหล่งกำเนิดมาตกกระทบตัวสะท้อนคลื่น แล้วกระเจิงออกไปยังสถานีเคลื่อนที่ สำหรับคลื่นที่เดินทางไปในสิ่งแวดล้อมได้ใช้ระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตและทฤษฎีเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปมาพิจารณากลไกการแพร่กระจายคลื่นแบบต่าง ๆ แล้วเข้าสู่สายอากาศรับของ

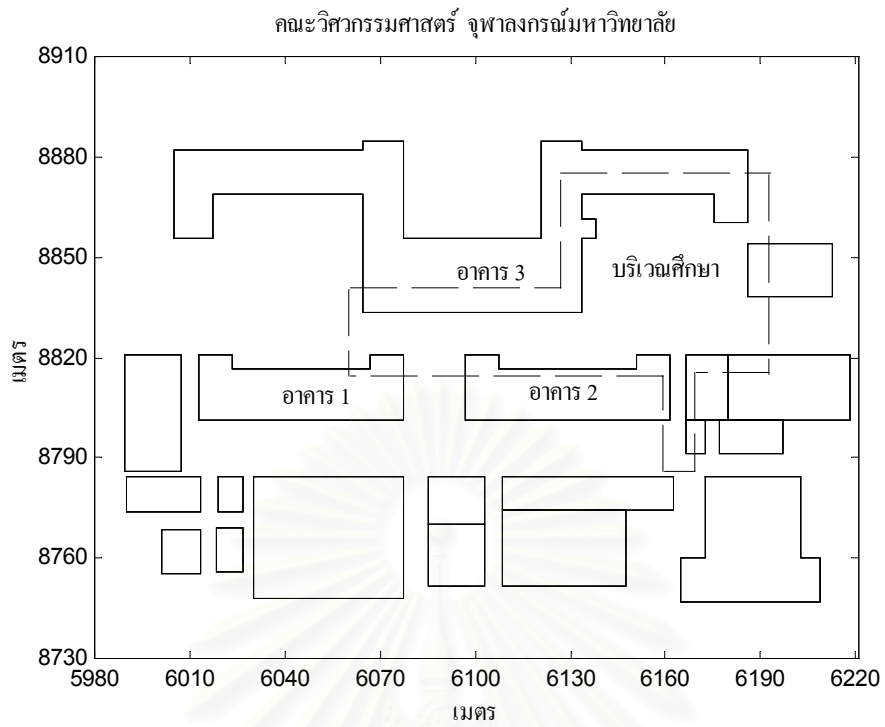
สถานีเคลื่อนที่ จากนั้นคำนวณสนามไฟฟ้ารวมที่สถานีเคลื่อนที่รับได้ ซึ่งมีทั้งสนามไฟฟ้าที่ได้จากกลไกการแพร่กระจายคลื่น และสนามไฟฟ้าที่กระเจิงจากตัวสะท้อนคลื่น กำลังไฟฟ้าที่สถานีเคลื่อนที่รับได้ก็จะเป็นผลรวมของคลื่นพหุวิถีที่มีโพลาริเซชันเหมือนกับสายอากาศรับ

หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงผลการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น ซึ่งจะมีทั้งผลการคำนวณและผลการทดลองในทั้ง 2 บริเวณ คือบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์และบริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

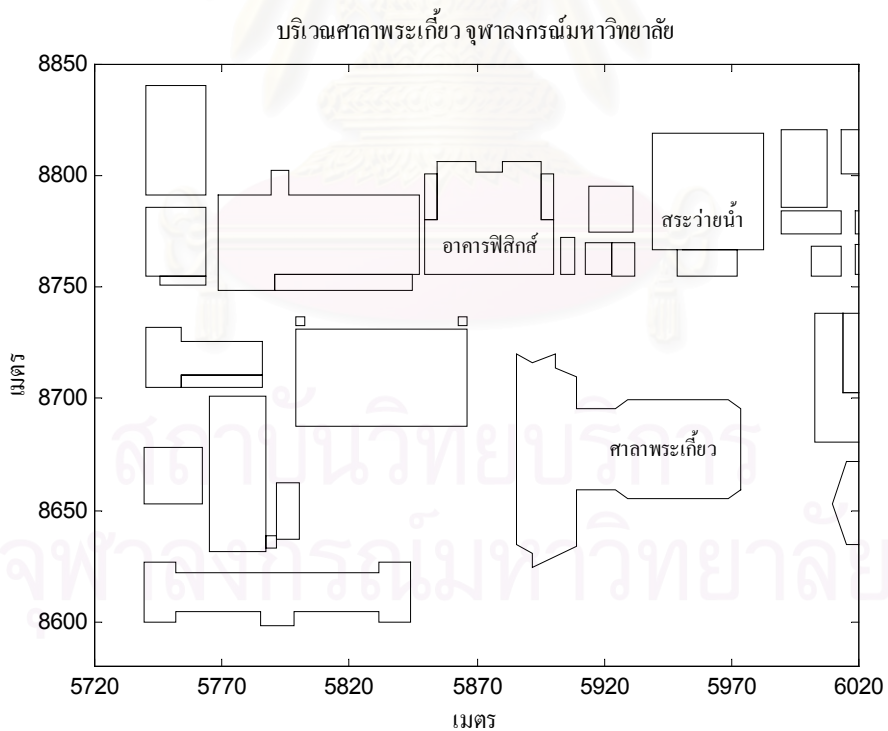
### 3.4 ผลการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น

หัวข้อนี้จะแสดงผลการคำนวณกำลังคลื่นเมื่อมีการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเพื่อเพิ่มกำลังรับที่ตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในบริเวณศึกษาเปรียบเทียบกับผลการวัดการแพร่กระจายคลื่นวิทยุจริง ผลการคำนวณและผลการทดลองจะเปรียบเทียบกำลังคลื่นที่รับได้ก่อนที่จะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นกับหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้เพื่อกำจัดจุดบอดเป็นตัวสะท้อนคลื่นแบบแบนราบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดต่าง ๆ กัน บริเวณที่ใช้เป็นบริเวณศึกษาได้แก่บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 แผนที่บริเวณศึกษาที่ใช้ได้มาจากการวัดพิกัดของตัวอาคารและประมาณความสูงของอาคารประกอบกันกับภาพขยายจากแผนที่ในระบบพิกัด UTM ในเอกสารอ้างอิง [4,15] การทดลองวัดกำลังคลื่นในคณะวิศวกรรมศาสตร์ได้ตั้งสถานีฐานและออกอากาศแพร่กระจายคลื่นวิทยุ พร้อมทั้งติดตั้งสายอากาศรับและชุดอุปกรณ์รับคลื่นวิทยุบนรถเข็นขนาดเล็กและเคลื่อนที่ไปในบริเวณศึกษาเพื่อวัดและบันทึกค่ากำลังคลื่นในแต่ละตำแหน่งที่สถานีเคลื่อนที่หยุดอยู่ พิกัดของสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ได้จากการวัดเทียบกับอาคารแล้วนำไปอ้างอิงกับแผนที่ที่มีอยู่ ส่วนในบริเวณศาลาพระแก้วใช้สถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM 900 และสายอากาศรับใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งได้ลงโปรแกรม Net monitor ซึ่งสามารถอ่านกำลังคลื่นในเซกเตอร์ที่ต้องการได้ การทดลองวัดดำเนินการโดยใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เดินไปตามถนนและบันทึกกำลังคลื่น สำหรับพิกัดสถานีเคลื่อนที่ได้จากการวัดเทียบกับอาคารเช่นเดียวกับในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ การทดลองทั้งสองบริเวณได้วัดกำลังคลื่นทั้งก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น และเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นด้วยค่าลักษณะสมบัติเดียวกัน เพียงแต่การทดลองเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นจะต้องบันทึกตำแหน่งพิกัดและความสูงของตัวสะท้อนคลื่นด้วย การคำนวณสามารถทำได้เมื่อทราบพิกัดของสถานีเคลื่อนที่ที่ใช้ทดลองและค่าปัจจัยอื่น ๆ จากนั้นนำค่าที่คำนวณและทดลองวัดทั้งก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น และหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมาสร้างแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมและกราฟการเปรียบเทียบจุดต่อจุด





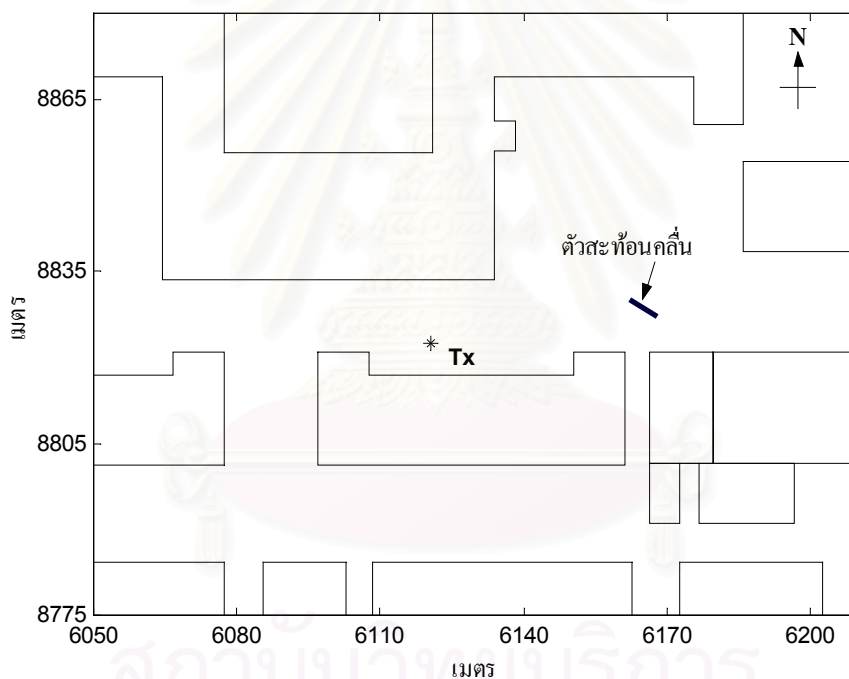
รูปที่ 3.12 บริเวณศึกษาภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



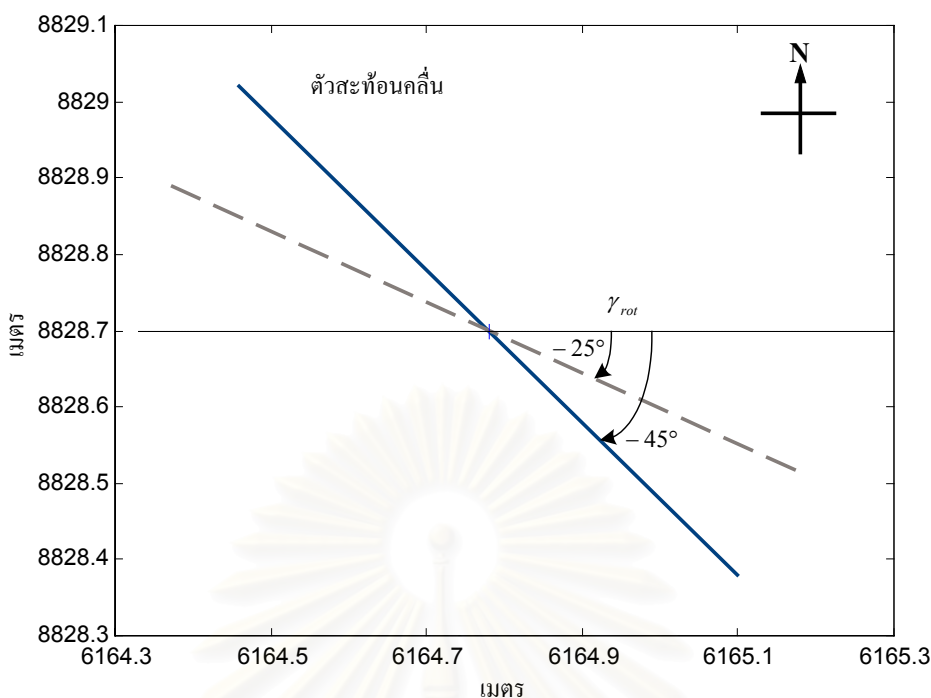
รูปที่ 3.13 บริเวณศึกษารอบศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.4.1 ผลการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้ตั้งสถานีฐานขึ้นเองโดยที่สถานีฐานต่ำกว่าอาคารโดยรอบคือมีความสูง 1.9 เมตร ความถี่ปฏิบัติงานเป็น 1 GHz กำลังส่ง 0 dBm สถานีเคลื่อนที่สูง 1.46 เมตร เคลื่อนที่ไปในบริเวณศึกษาที่พิจารณาสำหรับตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้เป็นตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น และ 3 เท่าของความยาวคลื่น ความสูงของตัวสะท้อนคลื่นวัดจากพื้นถึงกึ่งกลางตัวสะท้อนคลื่นเป็น 1.9 เมตร รูปที่ 3.14 แสดงตำแหน่งของสถานีฐาน (Tx) และตำแหน่งติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับตัวสะท้อนคลื่นประมาณ 44.22 เมตร และแนวการปรับมุมของตัวสะท้อนคลื่นในการศึกษาจะพิจารณาที่มุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$  แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งสถานีฐานและตัวสะท้อนคลื่นในบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.15 แนวการปรับมุมของตัวสะท้อนคลื่นด้วยมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$  (อ้างอิงมุมตามรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8)

เงื่อนไขเบื้องต้น การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นในวิทยานิพนธ์นี้มีเงื่อนไขว่าตัวสะท้อนคลื่นต้องสามารถรับรังสีตรงได้ไม่มีการบดบังจากอาคาร เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าตกกระทบพื้นผิวของการสะท้อนที่มากพอ เนื่องจากตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้มีขนาดไม่ใหญ่นักเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นที่ความถี่ปฏิบัติการ

ผลการคำนวณและผลการทดลองการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นเป็นดังต่อไปนี้

#### 3.4.1.1 ผลการคำนวณการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น

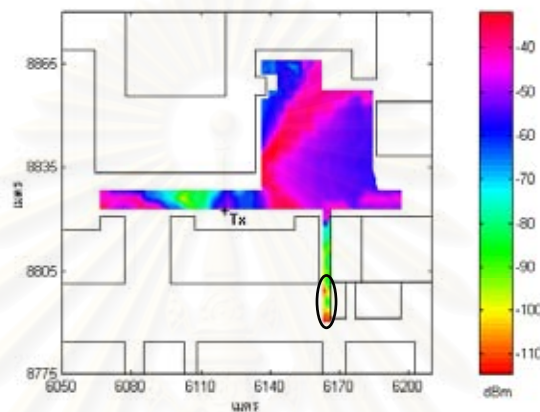
การคำนวณได้คำนวณกำลังคลื่นทั้งก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเพื่อเปรียบเทียบระดับความแรงของสัญญาณ การพิจารณาทำดังต่อไปนี้

#### การพิจารณาผลการคำนวณการกำจัดจุดบอดจากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุม

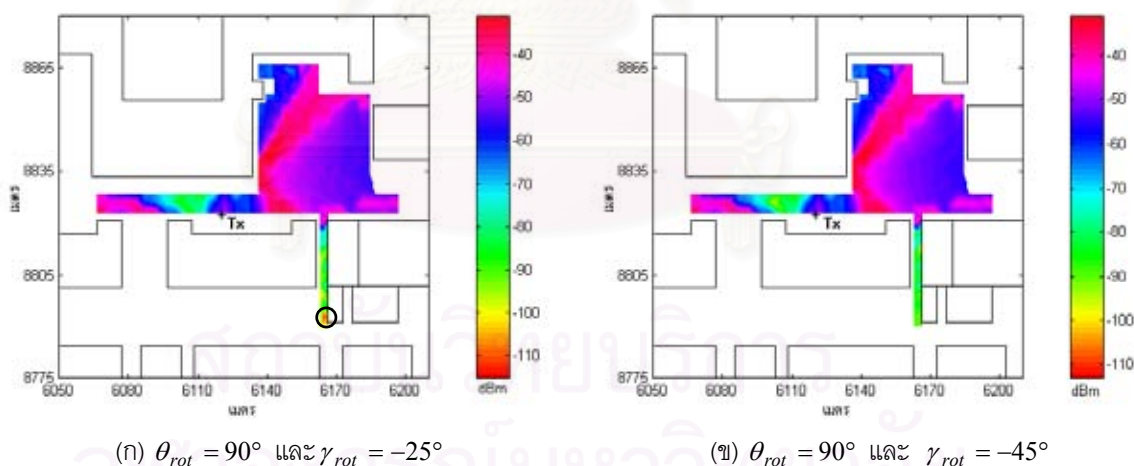
แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจะแสดงให้เห็นภาพโดยรวมของการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น ซึ่งแบ่งออกเป็น

กรณีที่ 1 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น (60 เซนติเมตร)

การคำนวณโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่นเป็นตัวสะท้อนคลื่นที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ใช้ในการศึกษา ผลการคำนวณก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นแสดงเป็นแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมดังรูปที่ 3.16 ผลการคำนวณหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเมื่อตัวสะท้อนคลื่นอยู่ที่ตำแหน่งดังรูปที่ 3.14 และการปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นดังรูปที่ 3.15 แสดงด้วยแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมดังรูปที่ 3.17 (บริเวณภายในวงรีคือบริเวณจุดบอด)



รูปที่ 3.16 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น



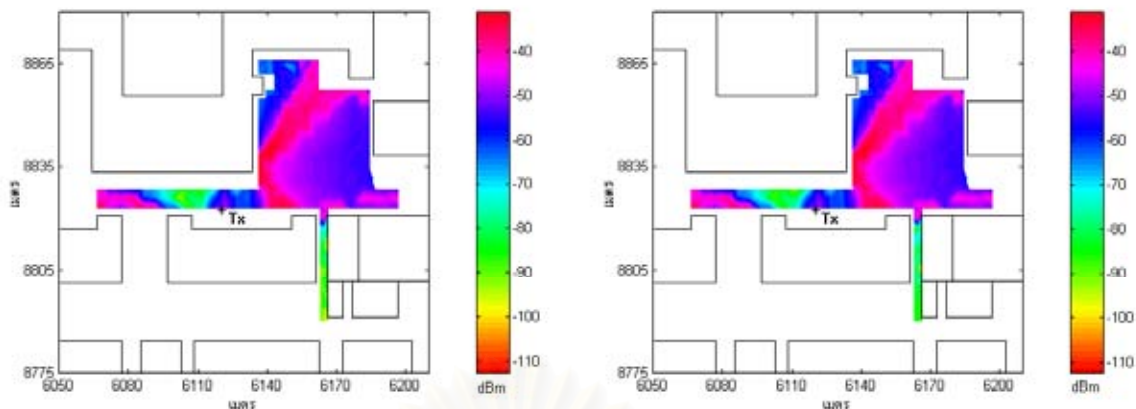
(ก)  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และ  $\gamma_{rot} = -25^\circ$

(ข)  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และ  $\gamma_{rot} = -45^\circ$

รูปที่ 3.17 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น

กรณีที่ 2 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น (90 เซนติเมตร)

ผลการคำนวณกำลังคลื่นก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นดังรูปที่ 3.16 และผลการคำนวณหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น แสดงด้วยแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมดังรูปที่ 3.18

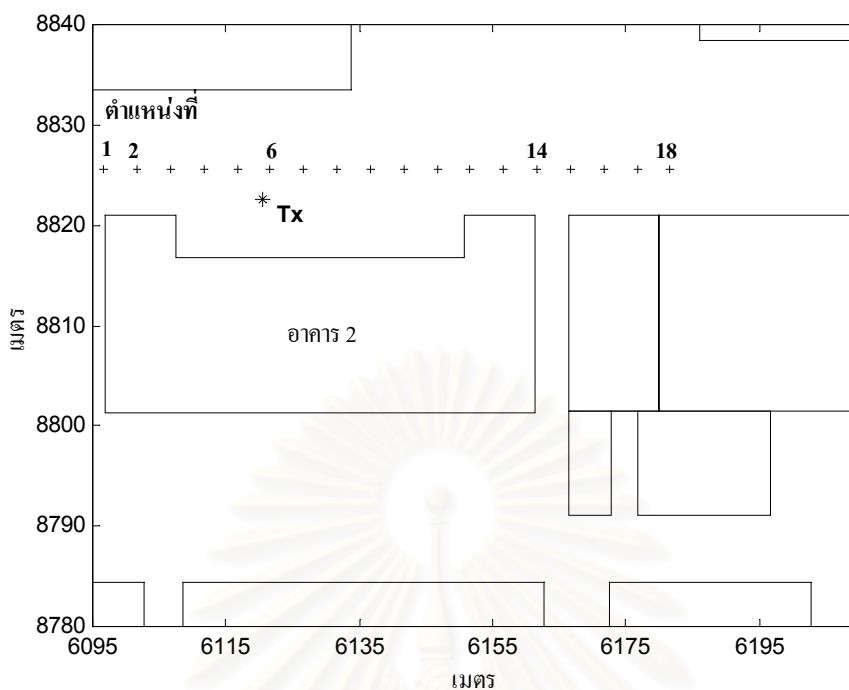
(ก)  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และ  $\gamma_{rot} = -25^\circ$ (ข)  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และ  $\gamma_{rot} = -45^\circ$ 

รูปที่ 3.18 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น  
สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น

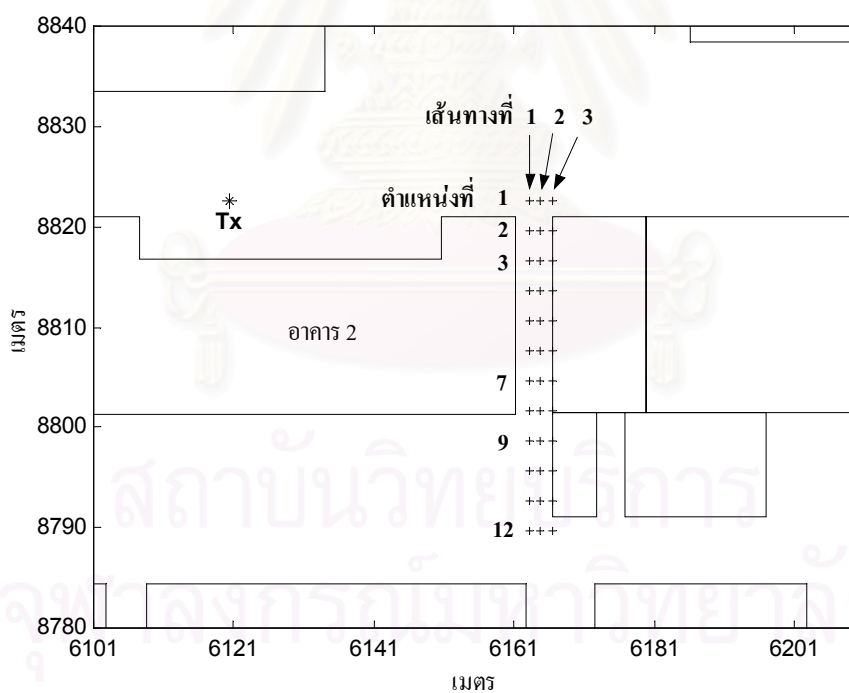
ผลการคำนวณทั้ง 2 กรณีพบว่า การนำตัวสะท้อนคลื่นมาใช้สามารถเพิ่มระดับสัญญาณได้ สังเกตได้จากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมในรูปที่ 3.16 ถึงรูปที่ 3.18 ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีบริเวณที่เป็นจุดบอด (บริเวณที่มีกำลังรับต่ำกว่า  $-100$  dBm) แต่เมื่อนำตัวสะท้อนคลื่นขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่นไปติดตั้งพบว่าบริเวณจุดบอดมีขนาดเล็กดังในรูปที่ 3.17(ก) แต่ไม่พบบริเวณจุดบอดในรูปที่ 3.17(ข) ดังนั้นกล่าวได้ว่าการปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นที่สถานีเคลื่อนที่สามารถรับได้ และเมื่อตัวสะท้อนคลื่นมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่า ความยาวคลื่น การปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นทั้ง 2 มุม ก็ไม่พบบริเวณจุดบอดดังรูปที่ 3.18

#### การพิจารณาผลการคำนวณการกำจัดจุดบอดจากกราฟการเปรียบเทียบจุดต่อจุด

บริเวณที่เป็นจุดบอดในรูปที่ 3.16 เป็นบริเวณที่อยู่ในซอย และเป็นบริเวณที่สนใจศึกษา การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น ดังนั้นเพื่อแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นที่ชัดเจน จึงนำเสนอด้วยกราฟการเปรียบเทียบจุดต่อจุด โดยจะพิจารณาดำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ในรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 ซึ่งเป็นตัวอย่างของตำแหน่งที่รับรังสีตรงได้ 18 ตำแหน่ง และบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง เส้นทางละ 12 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.19 ตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่รับรังสีตรงได้ที่ศึกษา

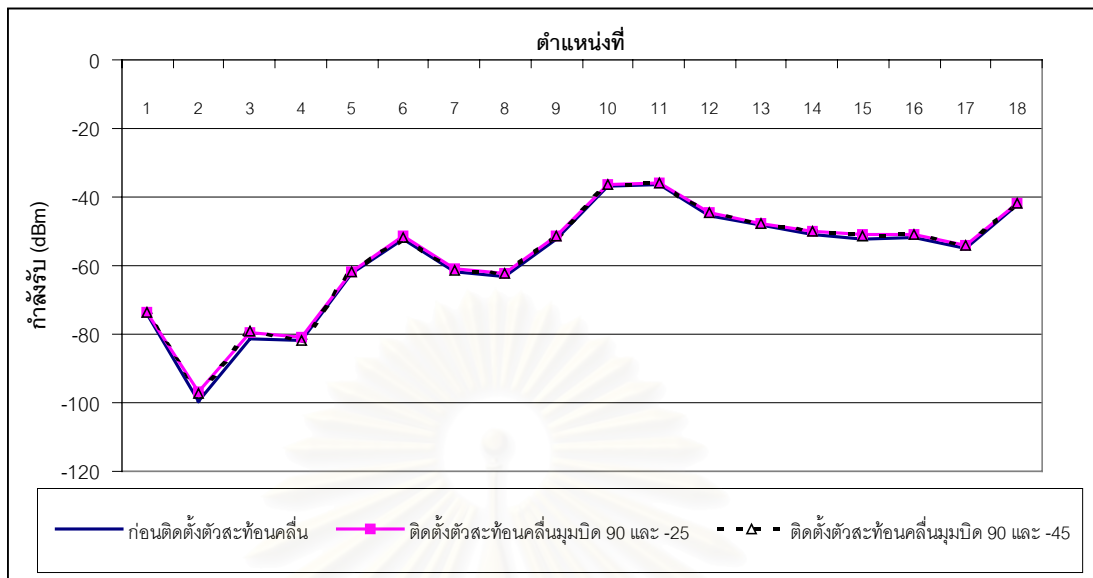


รูปที่ 3.20 ตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่รับรังสีตรงไม่ได้ที่ศึกษา

### เส้นทางที่รับรังสีตรงได้

กราฟการเปรียบเทียบจุดต่อจุดของการคำนวณในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 เมื่อพิจารณาตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ในรูปที่ 3.19 ซึ่งรับรังสีตรงได้เป็นดังนี้

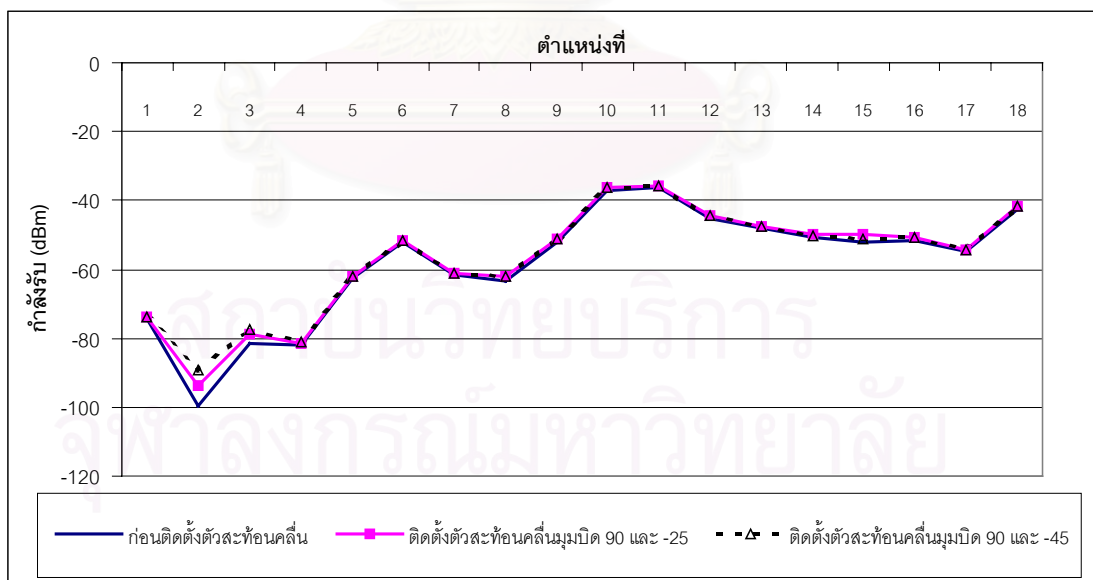
กรณีที่ 1 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น



รูปที่ 3.21 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงได้ ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น

ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$

กรณีที่ 2 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น



รูปที่ 3.22 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงได้ ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น

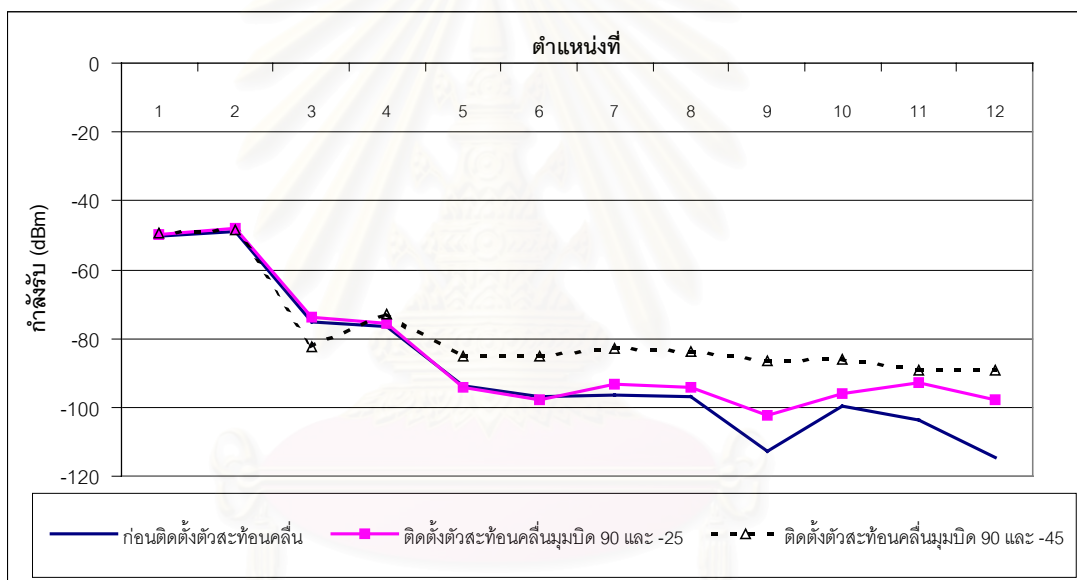
ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$

กำลังคลื่นที่รับได้ที่ตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ที่รับรังสีตรงได้ทั้ง 2 กรณี พบการเปลี่ยนแปลงของกำลังคลื่นไม่มากนัก นั้นหมายความว่าผลของรังสีที่กระเจิงมาจากตัวสะท้อนคลื่นมีอิทธิพลน้อยกว่าผลของรังสีตรงสำหรับบริเวณที่รับรังสีตรงได้ ทำให้ระดับของกำลังคลื่นไม่แตกต่างกันสังเกตได้จากรูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22

เส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้

พิจารณาเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ในรูปที่ 3.20 การเปรียบเทียบจุดต่อจุดของการคำนวณในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 กรณีละ 3 เส้นทาง เป็นระยะทางแต่ละเส้นทางประมาณ 33 เมตร เป็นดังนี้

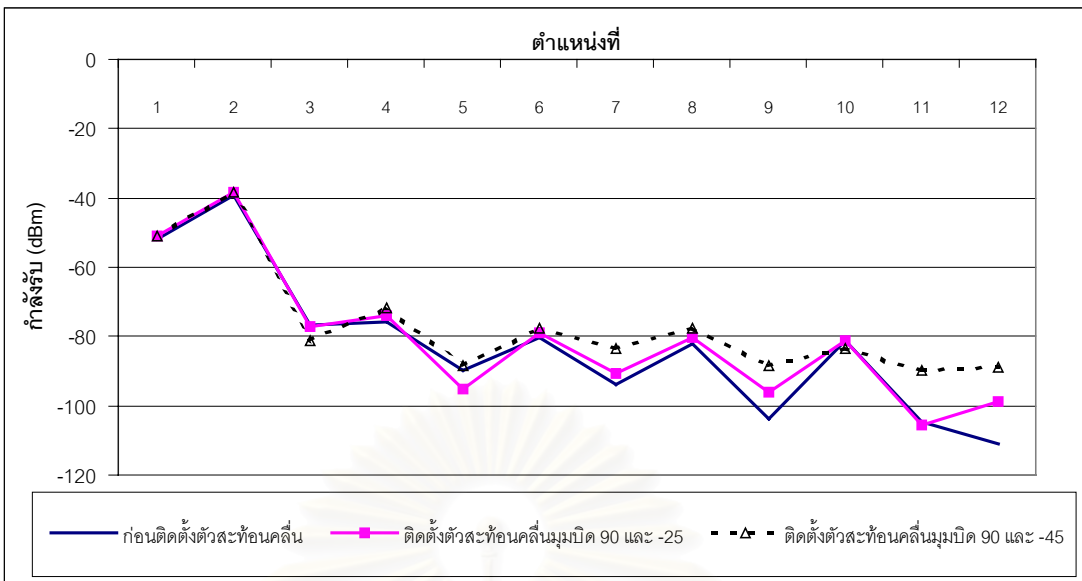
กรณีที่ 1 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น



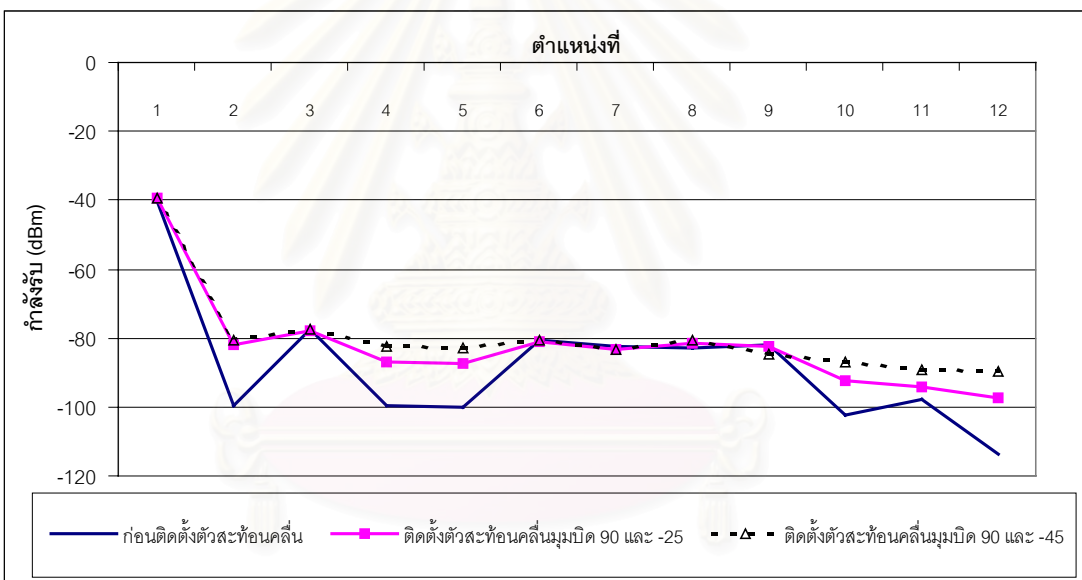
(ก) เส้นทางที่ 1

รูปที่ 3.23 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$





(ข) เส้นทางที่ 2



(ค) เส้นทางที่ 3

รูปที่ 3.23 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$  (ต่อ)

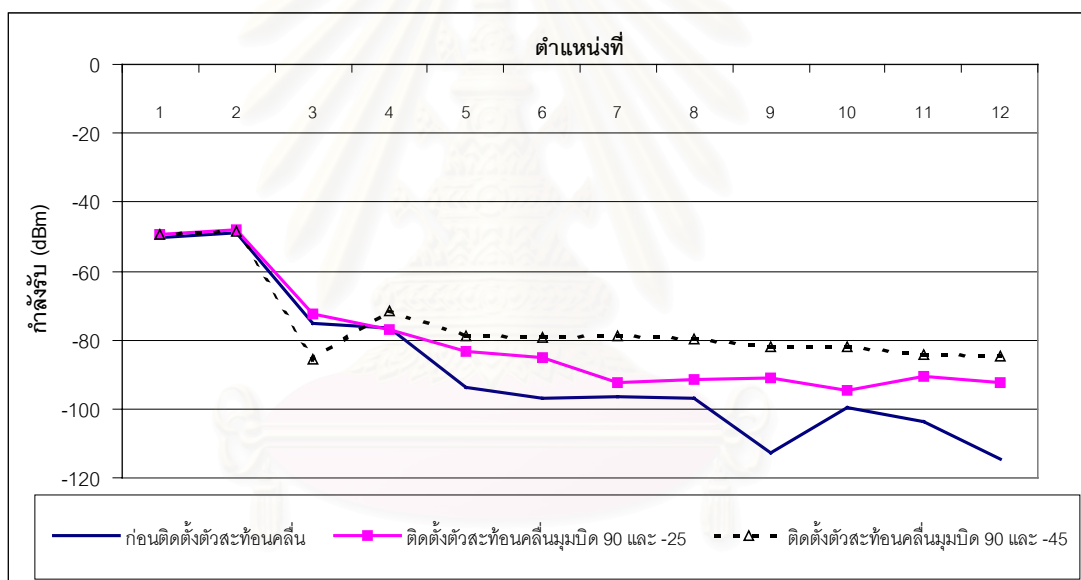
ผลการคำนวณพบว่า การนำตัวสะท้อนคลื่นไปใช้เพื่อเพิ่มความแรงของสัญญาณสามารถทำให้บริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้ และบริเวณจุดบอดมีกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่ติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นแสดงดังรูปที่ 3.23 แม้จะยังคงมีจุดบอด (กำลังคลื่นต่ำกว่า  $-100$  dBm) ณ ตำแหน่งที่ 9 ของเส้นทางที่ 1 และตำแหน่งที่ 11 ของเส้นทางที่ 2 นอกจากนี้การปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นที่ต่างกันก็จะให้ค่ากำลังรับที่แตกต่างกัน จากการศึกษพบว่าบริเวณศึกษาตามเส้นทางในรูป

ที่ 3.20 การปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นให้  $\gamma_{rot} = -45^\circ$  จะทำให้กำลังรับที่สถานีเคลื่อนที่รับได้สูงกว่า เมื่อมีการปรับมุมตัวสะท้อน  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  สังเกตได้จากค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นในเส้นทาง แต่ละเส้นทางดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นในกรณีที่ 1

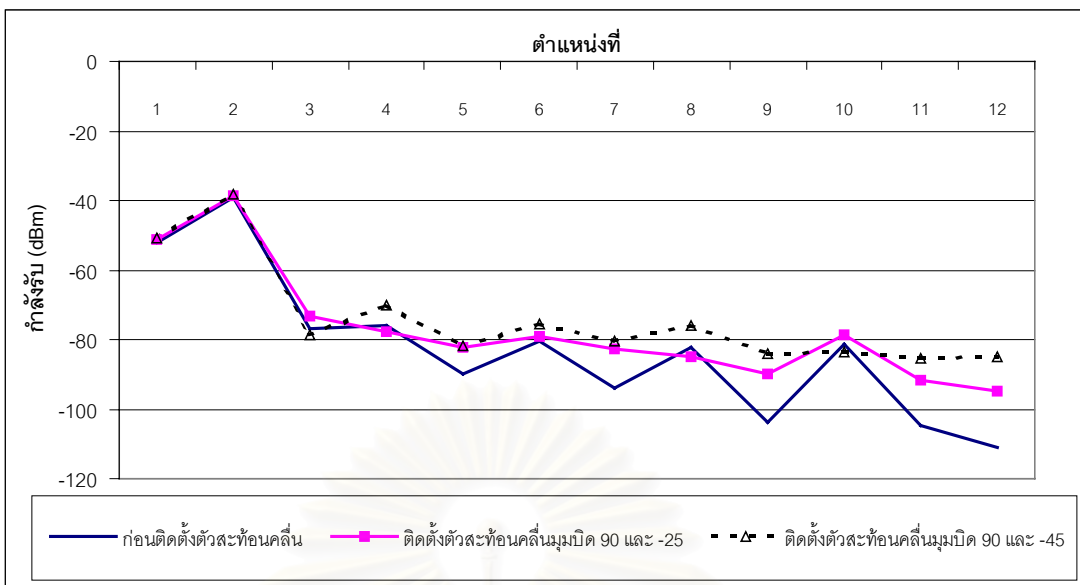
เส้นทาง	ค่าเฉลี่ยกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้น (dBm)	
	$\gamma_{rot} = -25^\circ$	$\gamma_{rot} = -45^\circ$
1	4.11	10.38
2	1.93	5.93
3	6.04	8.41

กรณีที่ 2 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น

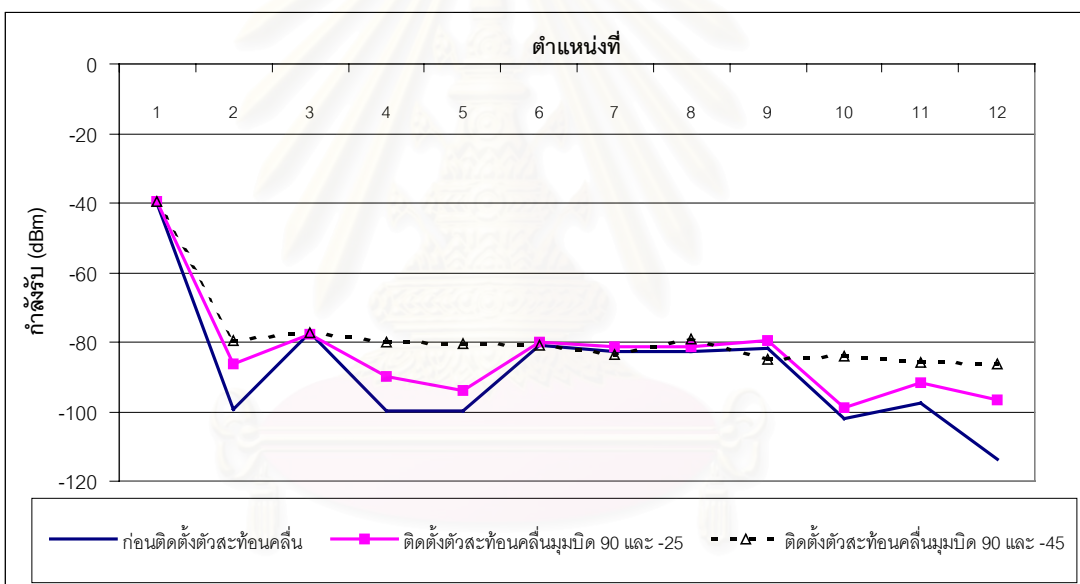


(ก) เส้นทางที่ 1

รูปที่ 3.24 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้ง ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$



(ข) เส้นทางที่ 2



(ค) เส้นทางที่ 3

รูปที่ 3.24 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$  (ต่อ)

ผลการเปรียบเทียบแบบจุดต่อจุดในกรณีนี้ที่ 2 นี้ ตัวสะท้อนคลื่นมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 3 เท่าของความยาวคลื่น พบว่าลักษณะกราฟคล้ายคลึงกับกรณีที่ 1 เมื่อตัวสะท้อนคลื่นมีขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น นั่นคือตัวสะท้อนคลื่นสามารถสะท้อนกำลังคลื่นไปยังบริเวณที่เป็นจุดบอดเพื่อกำจัดจุดบอดได้ และสามารถเพิ่มกำลังคลื่นได้ รูปที่ 3.24 จึงไม่พบจุดบอดในบริเวณศึกษา ค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นเป็นดังตารางที่ 3.2 การใช้ตัวสะท้อนคลื่นขนาดเป็น 3 เท่าของ

ความยาวคลื่นมีค่าเฉลี่ยของกำลังที่เพิ่มขึ้นของทั้ง 3 เส้นทางดีกว่าการใช้ตัวสะท้อนคลื่นขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น เมื่อปรับมุม  $\gamma_{rot}$  เท่ากับ  $-25^\circ$  และ  $-45^\circ$  เฉลี่ยแล้วประมาณ 2 dBm

ตารางที่ 3.2 ค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นในกรณีที่ 2

เส้นทาง	ค่าเฉลี่ยกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้น (dBm)	
	$\gamma_{rot} = -25^\circ$	$\gamma_{rot} = -45^\circ$
1	8.07	13.41
2	5.48	8.44
3	5.11	9.79

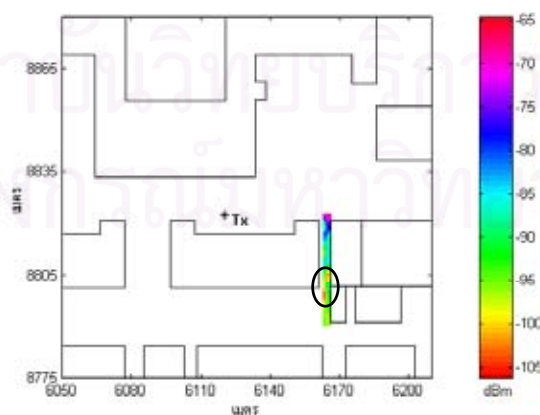
การศึกษานำตัวสะท้อนคลื่นมากำจัดจุดบอดในเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ พบว่าขนาดของตัวสะท้อนคลื่นและการปรับมุมที่ต่างกันจะทำให้ได้กำลังรับแตกต่างกัน

#### 3.4.1.2 ผลการทดลองกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น

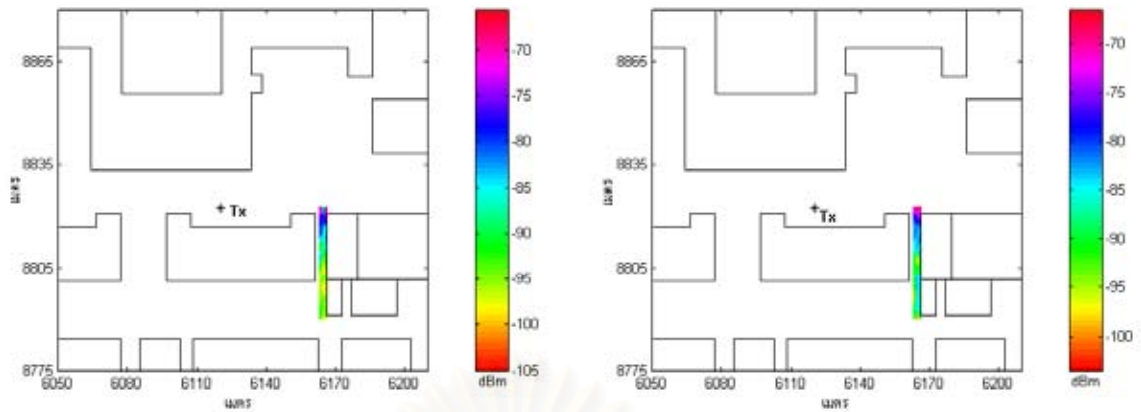
การทดลองภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์พิจารณาเช่นเดียวกับการคำนวณคือแบ่งการทดลองเป็น 2 กรณี คือ กรณีตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น และกรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น และการทดลองได้ทดลองเพียงบริเวณตำแหน่งรับดังรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 เท่านั้น เนื่องจากเป็นบริเวณที่สนใจที่จะกำจัดจุดบอดและมีการพิจารณาแบบจุดต่อจุด ผลการคำนวณเป็นดังนี้

การพิจารณาผลการทดลองกำจัดจุดบอดจากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุม

กรณีที่ 1 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น

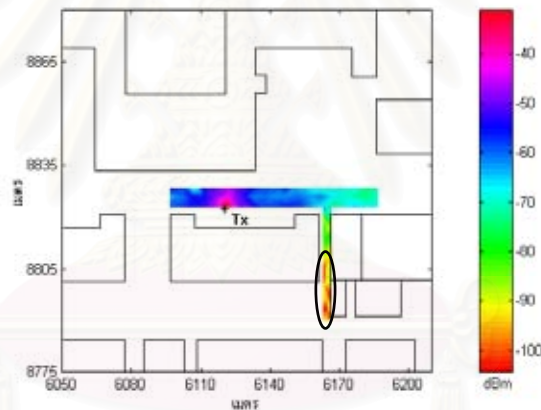


รูปที่ 3.25 แผนภาพพื้นที่ที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น

(ก)  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และ  $\gamma_{rot} = -25^\circ$ (ข)  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และ  $\gamma_{rot} = -45^\circ$ 

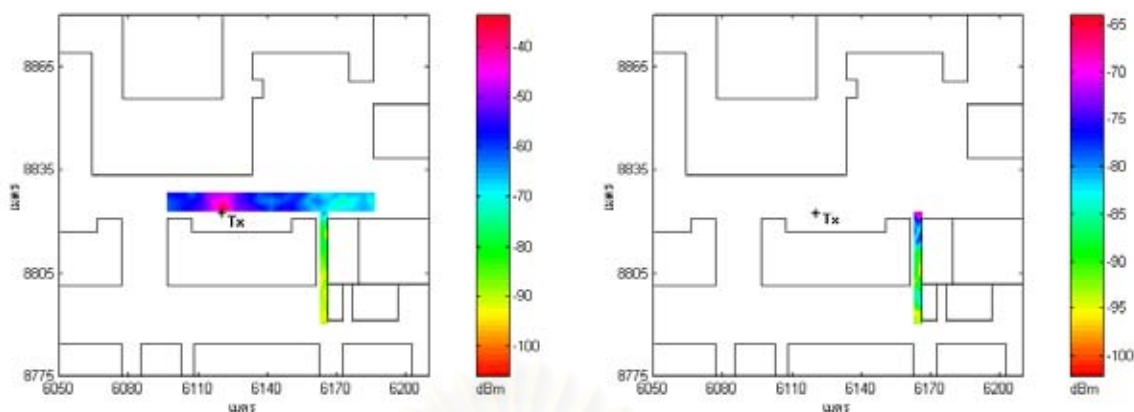
รูปที่ 3.26 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น  
สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น

กรณีที่ 2 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น



รูปที่ 3.27 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก)  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และ  $\gamma_{rot} = -25^\circ$ (ข)  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และ  $\gamma_{rot} = -45^\circ$ 

รูปที่ 3.28 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น  
สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น

การทดลองทั้ง 2 กรณีพบว่าก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีลักษณะของจุดบอดที่ต่างกัน นั่นคือในกรณีที่ 1 ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนมีบริเวณจุดบอดเกิดขึ้น ดังแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมในรูปที่ 3.25 เป็นบริเวณแคบกว่ากรณีที่ 2 ในรูปที่ 3.27 เนื่องจากได้ทำการทดลองต่างวันกัน แต่สังเกตได้ว่าบริเวณจุดบอดยังคงเกิดขึ้นในบริเวณเดียวกันแต่มีขนาดของบริเวณจุดบอดที่ต่างกัน สำหรับการทดลองกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น พบว่าการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสามารถกำจัดจุดบอดได้ เนื่องจากไม่ปรากฏบริเวณจุดบอดในแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมทั้ง 2 กรณี และการรับมุมทั้ง 2 มุม แต่เพื่อให้เห็นการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นที่ชัดเจนขึ้นจึงแสดงผลการทดลองเป็นกราฟการเปรียบเทียบเทียบจุดต่อจุดดังนี้

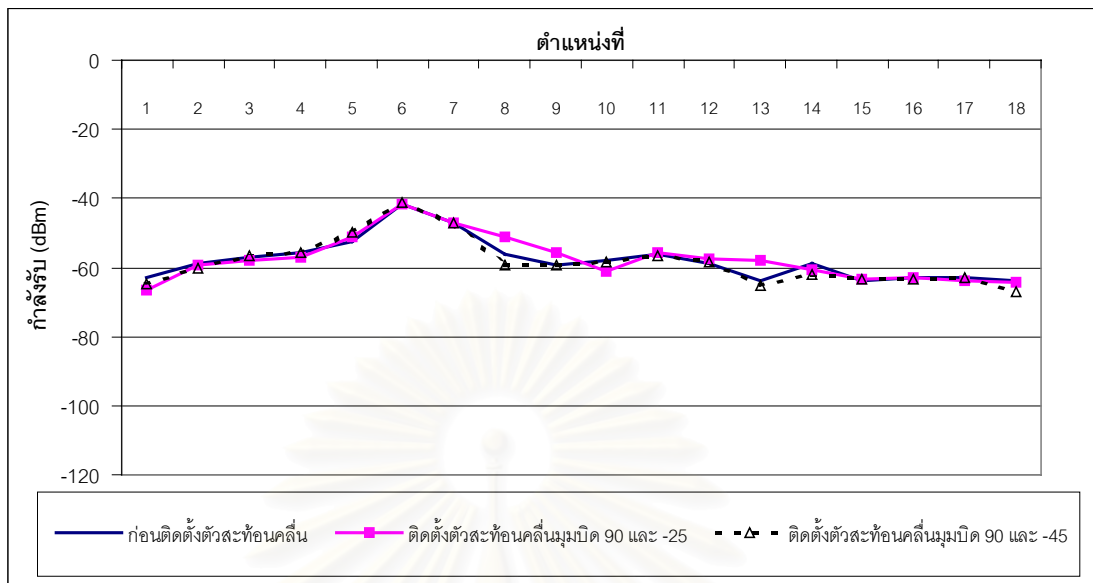
#### การพิจารณาผลการทดลองกำจัดจุดบอดจากกราฟการเปรียบเทียบจุดต่อจุด

การเปรียบเทียบจุดต่อจุดพิจารณาเช่นเดียวกับการคำนวณ โดยแบ่งเส้นทางศึกษาเป็นเส้นทางที่รับรังสีตรงได้ และเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ ดังในรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 จากนั้นจะแสดงค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น

#### เส้นทางที่รับรังสีตรงได้

การทดลองวัดตามเส้นทางดังรูปที่ 3.19 และพิจารณา 2 กรณีดังนี้

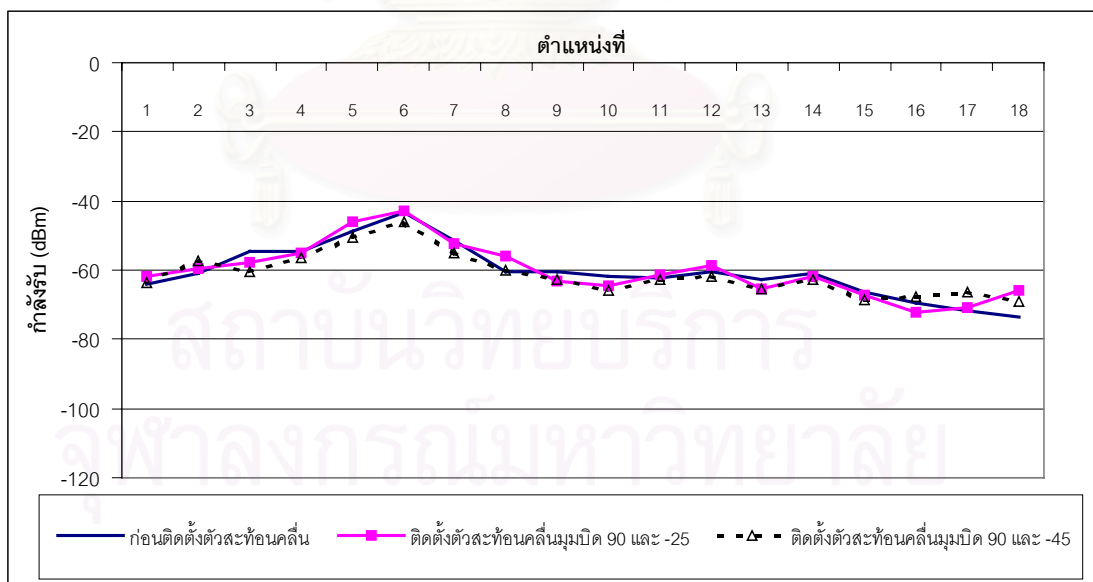
กรณีที่ 1 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น



รูปที่ 3.29 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงได้ ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น

ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$

กรณีที่ 2 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น



รูปที่ 3.30 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงได้ ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น

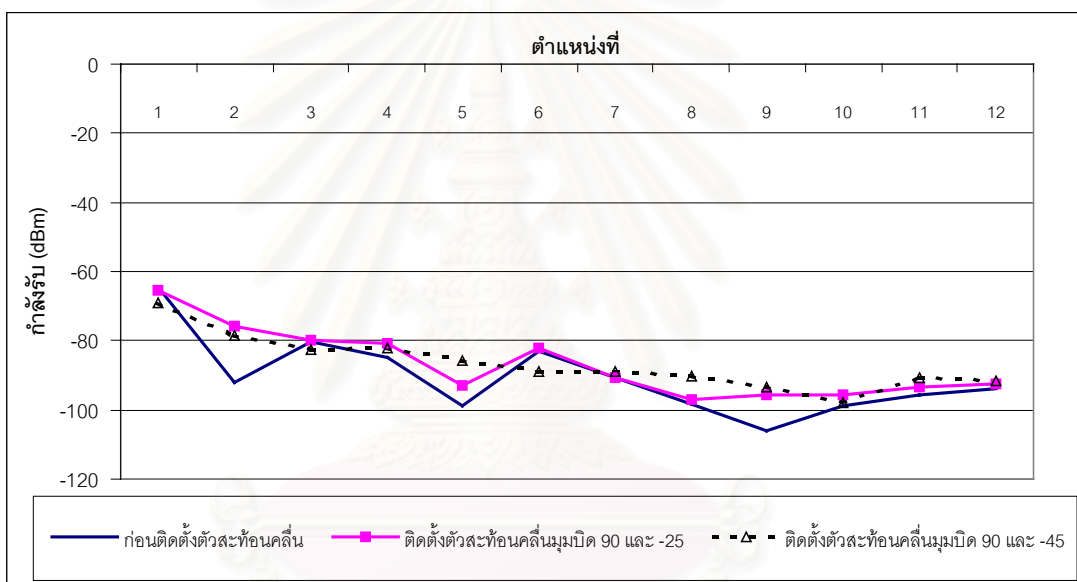
ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$

กำลังคลื่นที่วัดได้เมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีระดับของสัญญาณไม่ต่างจากเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมากนัก เช่นเดียวกับผลการคำนวณที่ผ่านมา เนื่องจากรังสีตรงมีอิทธิพลต่อกำลังคลื่นที่รับได้มากกว่ารังสีกระเจิงที่มาจากตัวสะท้อนคลื่น

### เส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้

การทดลองวัดได้วัดตามเส้นทางในรูปที่ 3.20 แบ่ง เป็น 2 กรณี การทดลองมีเส้นทางทดสอบ 3 เส้นทาง เส้นทางละ 12 ตำแหน่ง เช่นเดียวกับการคำนวณที่ได้พิจารณาไปข้างต้น เพื่อให้เห็นการเพิ่มขึ้นของกำลังรับเมื่อมีการติดตั้งตัวสะท้อนจึงพิจารณาด้วยกราฟแบบจุดต่อจุดดังนี้

กรณีที่ 1 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น

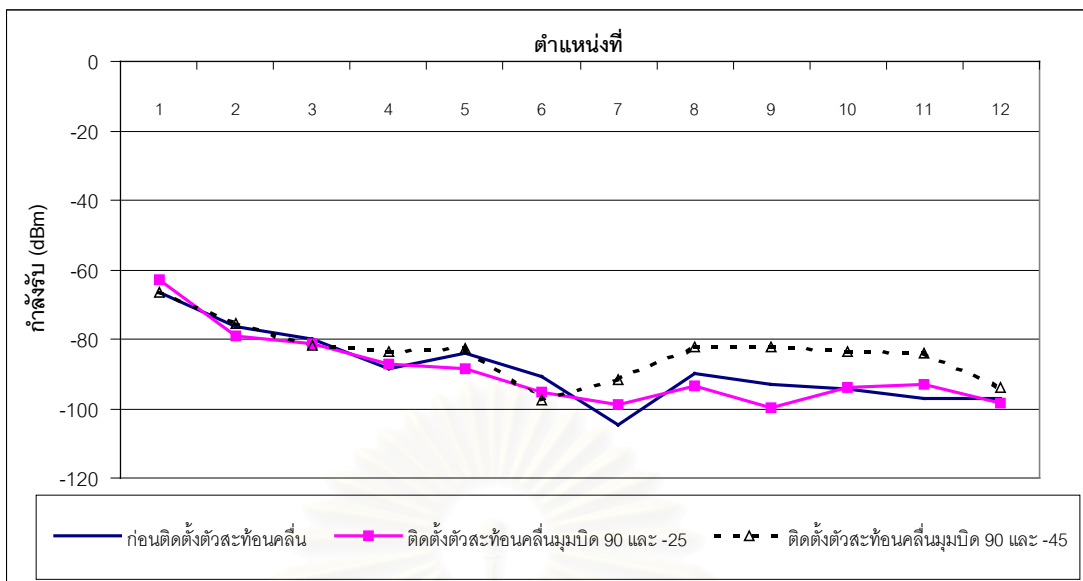


(ก) เส้นทางที่ 1

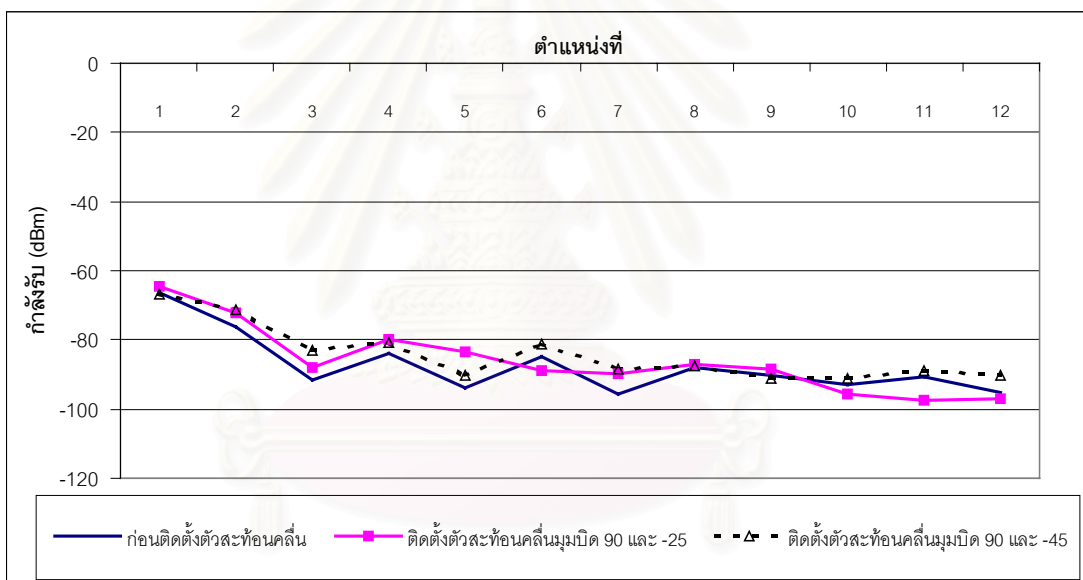
รูปที่ 3.31 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น

ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$





(ข) เส้นทางที่ 2



(ค) เส้นทางที่ 3

รูปที่ 3.31 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$  (ต่อ)

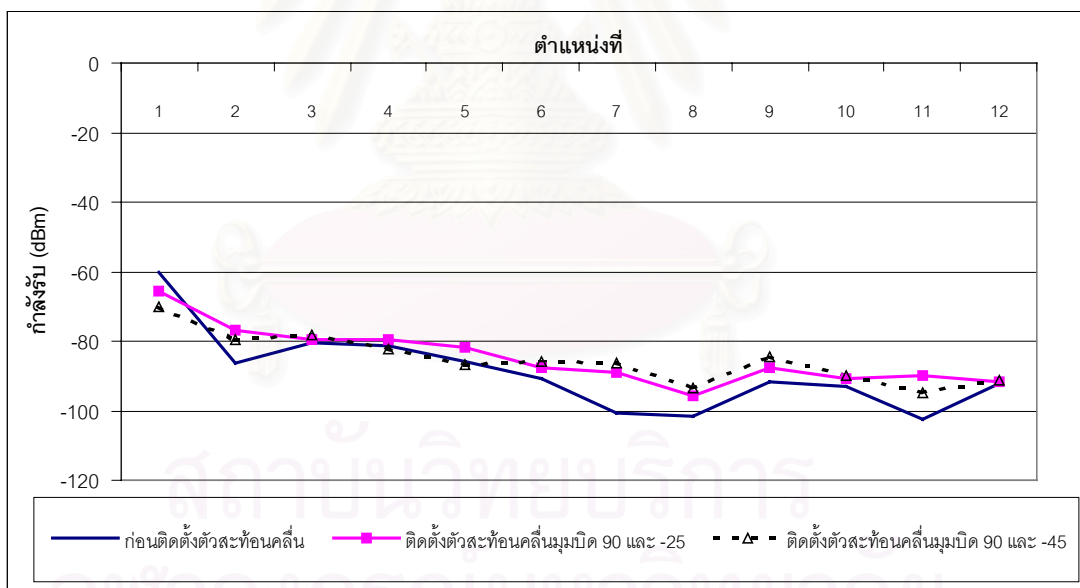
การติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสามารถกำจัดจุดบอดและเพิ่มระดับกำลังคลื่นในบริเวณศึกษาได้ สังเกตได้จากรูปที่ 3.31 พบว่า เส้นทางที่ 1 ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นพบจุดบอดที่ตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ที่ 9 แต่เมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นก็สามารถกำจัดจุดบอดได้ และยังเพิ่มกำลังคลื่นในตำแหน่งรับอื่น ๆ ได้ ทั้งสองลักษณะการปรับมุม สำหรับเส้นทางที่ 2 ผลการทดลองก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นพบจุดบอดในตำแหน่งที่ 7 และเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นแล้วสามารถกำจัดจุดบอด

ได้ แม้ว่าการปรับมุมที่มุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  จะพบตำแหน่งรับที่มีระดับกำลังคลื่นลดลงจากก่อนที่จะมีการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น แต่ก็ยังไม่เกิดจุดบอดขึ้น และเส้นทางที่ 3 การทดลองก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นไม่พบว่าเกิดจุดบอดขึ้นแต่การใช้ตัวสะท้อนคลื่นก็สามารถเพิ่มระดับกำลังคลื่นได้ เมื่อพิจารณาแนวโน้มผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือสามารถเพิ่มระดับกำลังคลื่น และกำจัดจุดบอดได้ แม้จะมีระดับค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นที่แตกต่างกัน ค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของการทดลองในกรณีนี้ที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นในกรณีนี้ที่ 1

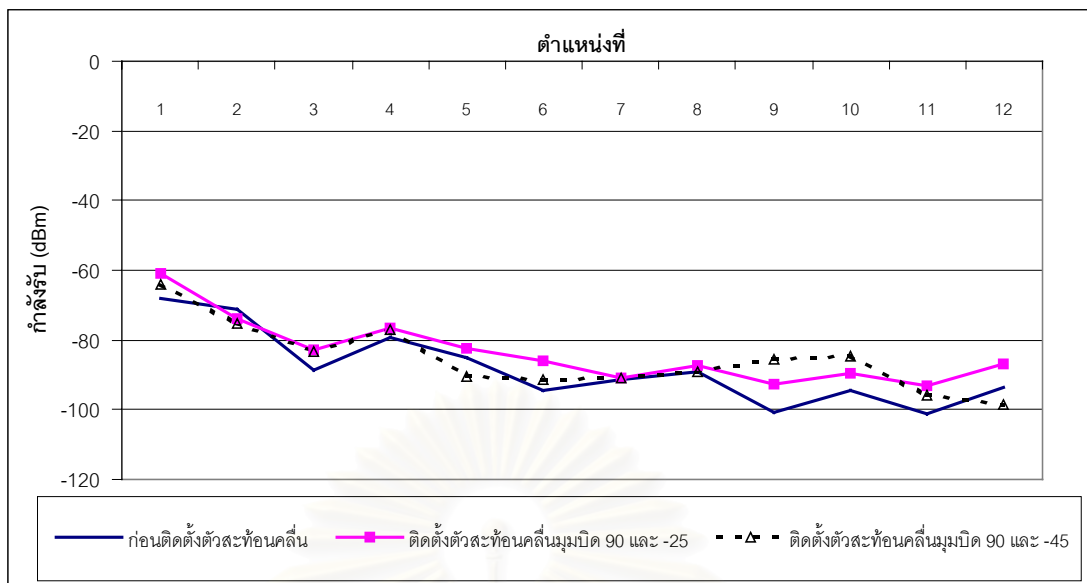
เส้นทาง	ค่าเฉลี่ยกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้น (dBm)	
	$\gamma_{rot} = -25^\circ$	$\gamma_{rot} = -45^\circ$
1	3.85	4.03
2	-0.76	4.78
3	1.49	3.25

กรณีนี้ที่ 2 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น

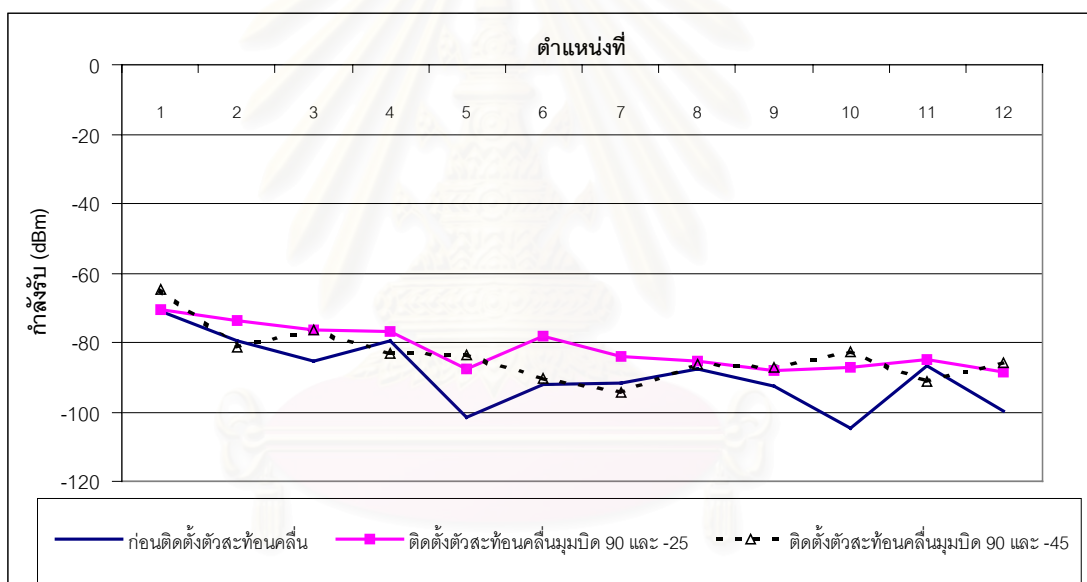


(ก) เส้นทางที่ 1

รูปที่ 3.32 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$



(ข) เส้นทางที่ 2



(ค) เส้นทางที่ 3

รูปที่ 3.32 เปรียบเทียบกำลังคลื่นเส้นทางที่รับรังสีตรงไม่ได้ 3 เส้นทาง ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  และ  $-45^\circ$  (ต่อ)

กำลังคลื่นที่สถานีเคลื่อนที่สามารถรับได้หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นตามเส้นทางที่ 1 ในรูปที่ 3.32 พบว่าการบิดมุมทั้งสองช่วยให้กำลังคลื่นเพิ่มขึ้น และกำจัดจุดบอดได้ สำหรับเส้นทางที่ 2 ก็เช่นเดียวกันเพียงแต่การบิดมุม  $\gamma_{rot} = -45^\circ$  มีตำแหน่งที่กำลังคลื่นที่รับได้ต่ำกว่ากำลังคลื่นก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น แต่ก็ยังช่วยกำจัดจุดบอดได้ สำหรับเส้นทางที่ 3 เมื่อติดตั้งตัวสะท้อนก็ช่วย

กำจัดจุดบอดได้เช่นกัน แนวโน้มผลการคำนวณและผลการทดลองก็เป็นไปในทางเดียวกัน และค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นสำหรับกรณีที่ 2 เป็นดังนี้

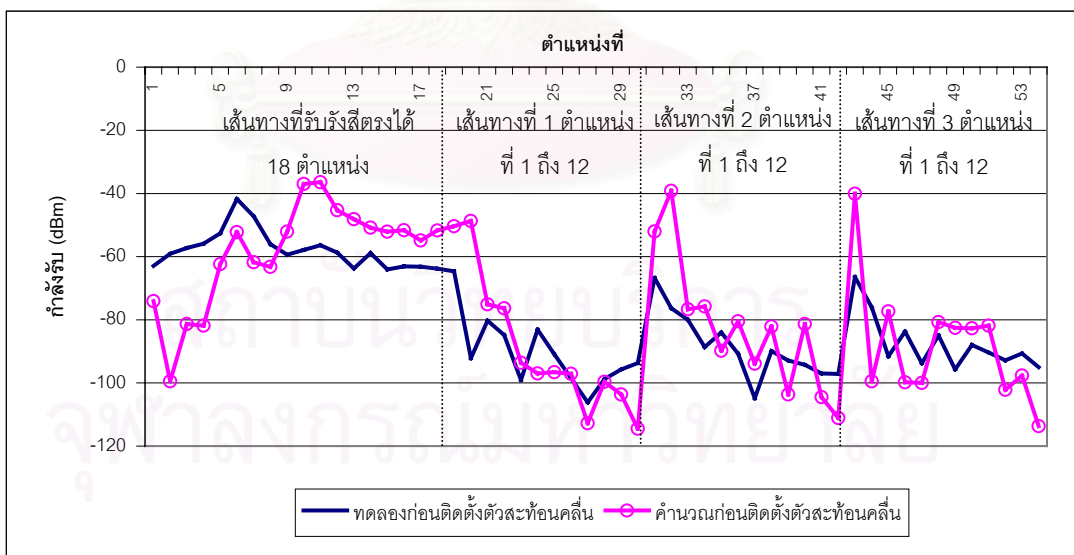
ตารางที่ 3.4 ค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นในกรณีที่ 2

เส้นทาง	ค่าเฉลี่ยกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้น (dBm)	
	$\gamma_{rot} = -25^\circ$	$\gamma_{rot} = -45^\circ$
1	4.19	3.56
2	4.41	2.61
3	7.44	5.37

### 3.4.1.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นบริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์

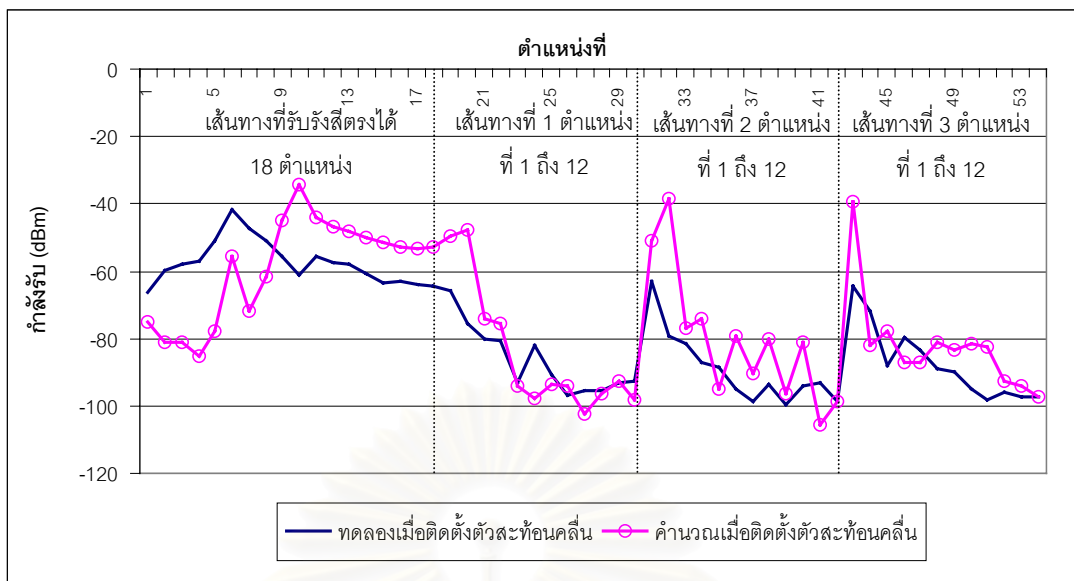
ผลการคำนวณและผลการทดลองที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันแบบจุดต่อจุดตามเส้นทางศึกษาดังรูปที่ 3.19 มี 18 ตำแหน่ง และรูปที่ 3.20 มี 3 เส้นทางทั้งหมด 36 ตำแหน่ง รวมเป็น 54 ตำแหน่งศึกษา สร้างกราฟเปรียบเทียบจุดต่อจุดเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองได้ดังนี้

กรณีที่ 1 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น

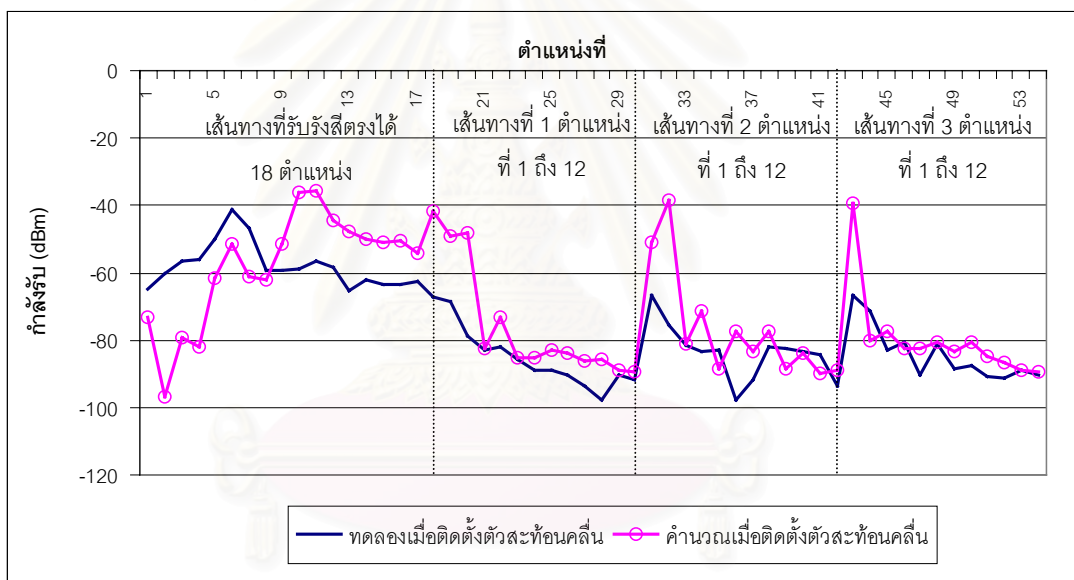


(ก) ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น

รูปที่ 3.33 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองกรณีที่ 1



(ข) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$



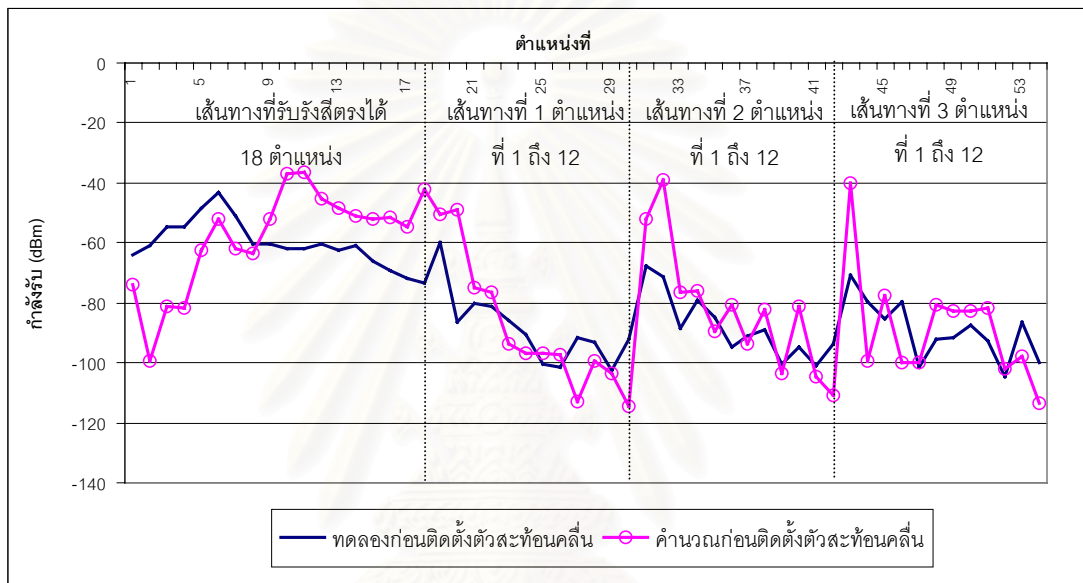
(ค) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -45^\circ$

รูปที่ 3.33 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองกรณีที่ 1 (ต่อ)

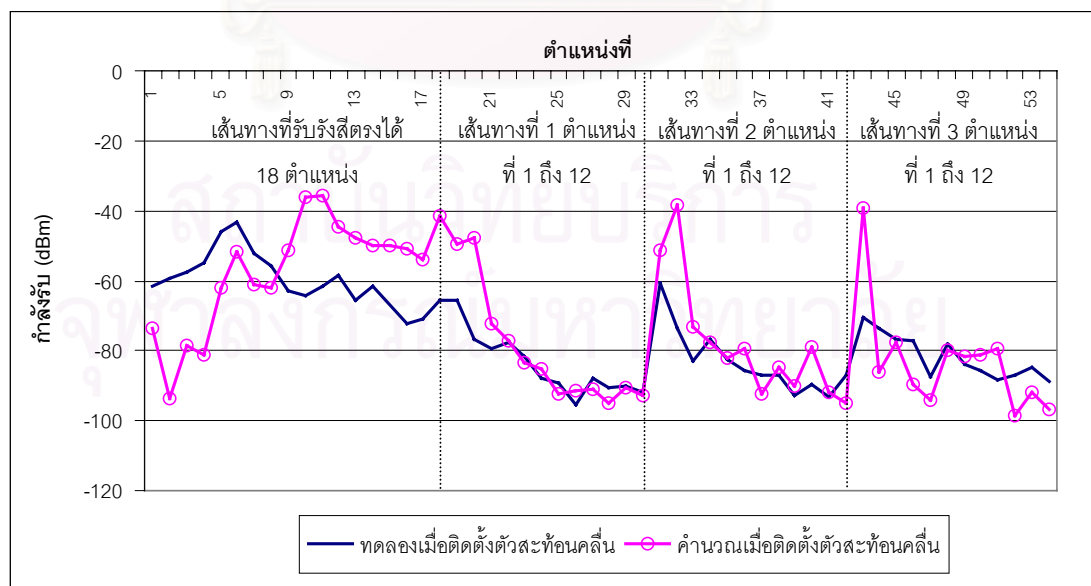
ผลการคำนวณและผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันทั้งก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น และหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ดังรูปที่ 3.33 แม้จะมีความแตกต่างของกำลังคลื่นอยู่ประมาณ 10 dB ถึง 20 dB ก็ตาม แต่หากสังเกตบริเวณจุดยอดซึ่งเป็นหัวใจของงานวิทยานิพนธ์นี้ พบว่าก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีบริเวณจุดยอดของการคำนวณและการทดลองบริเวณใกล้เคียงกันและบางตำแหน่งเป็นตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าผลการคำนวณในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพ สำหรับการกำจัดจุดยอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นจัตุรัสขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น ปรับมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  พบว่าบริเวณที่รับรังสีตรงได้มีค่ากำลังคลื่นไม่ต่างจากก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น (ตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 18) คือมีกำลังคลื่นแตกต่างกันประมาณ 10 dB ถึง 20 dB แต่บริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้ (ตำแหน่งที่ 19

ถึงตำแหน่งที่ 54) ซึ่งเป็นบริเวณจุดบอด พบว่าผลการคำนวณและผลการทดลองไปในทางเดียวกันและมีการใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับเมื่อปรับมุมตัวสะท้อนคลื่น  $\gamma_{rot} = -45^\circ$  ดังในรูปที่ 3.33(ค) และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ซึ่งได้จากผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลอง มีค่าเป็น 0.7237 ในกรณีก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นดังรูปที่ 3.33(ก) และมีค่าเป็น 0.7169 และ 0.6727 สำหรับเมื่อมีการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่นดังรูปที่ 3.33(ข) และ 3.33(ค) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลการทดลองและผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน

กรณีที่ 2 ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่น

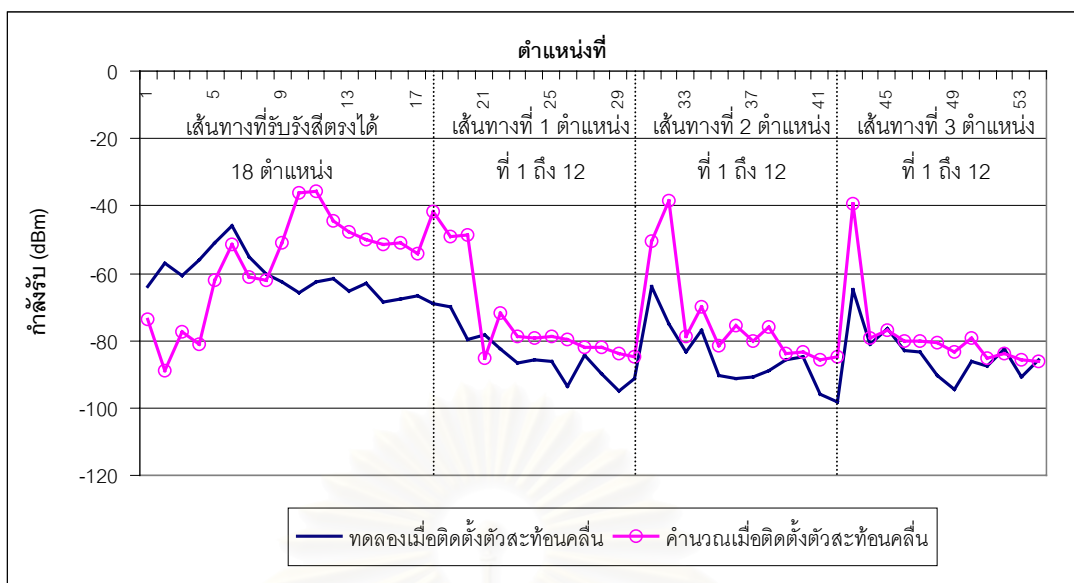


(ก) ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น



(ข) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$

รูปที่ 3.34 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองกรณีที่ 2



(ค) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ปรับมุม  $\theta_{rot} = 90^\circ$  และมุม  $\gamma_{rot} = -45^\circ$

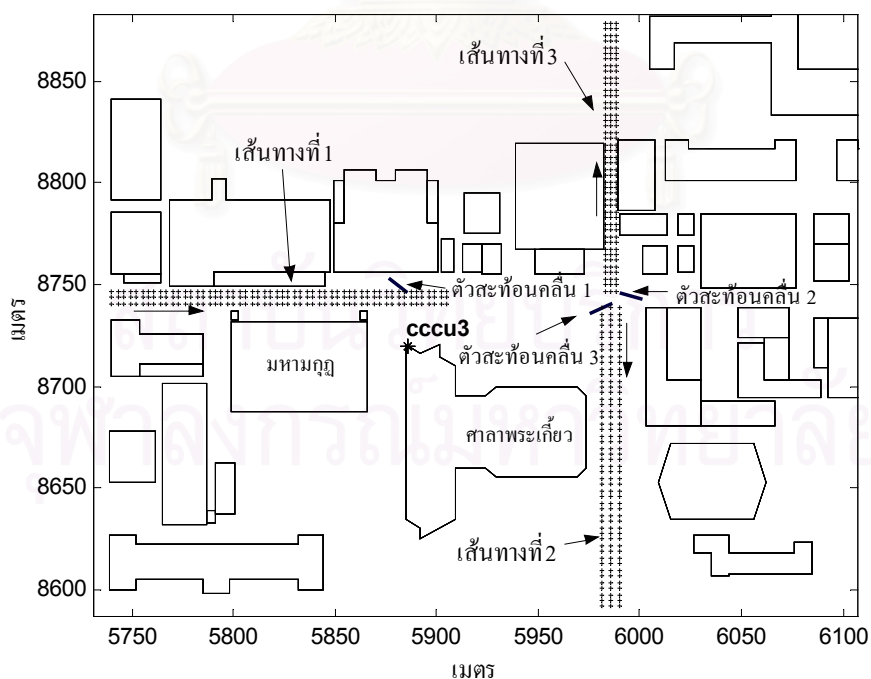
รูปที่ 3.34 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองกรณีที่ 2 (ต่อ)

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองดังรูปที่ 3.34 พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน พบจุดยอดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันและบางตำแหน่งเป็นตำแหน่งเดียวกัน ก่อนที่จะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น แต่กำลังรับที่บริเวณที่รับรังสีตรงได้ยังมีความแตกต่างกัน และเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนที่ปรับมุม  $\gamma_{rot} = -25^\circ$  พบว่าบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้หรือบริเวณที่พิจารณาการกำจัดจุดยอดมีกำลังรับที่ได้จากการคำนวณและการทดลองใกล้เคียงกัน แต่ยังคงมีความแตกต่างกันตรงบริเวณที่รับรังสีตรงได้ สำหรับตัวสะท้อนที่ปรับมุม  $\gamma_{rot} = -45^\circ$  บริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้พบว่ากำลังคลื่นที่ได้จากการคำนวณและการทดลองมีความแตกต่างกันประมาณ 10 dB ถึง 15 dB แต่ก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีค่าเป็น 0.7092 สำหรับรูปที่ 3.34(ก) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นขนาด 3 เท่าความยาวคลื่น ดังรูปที่ 3.34(ข) และรูปที่ 3.34(ค) มีค่า 0.6717 และ 0.6457 ตามลำดับ

ความแตกต่างของผลการคำนวณและผลการทดลองของทั้ง 2 กรณี น่าจะเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของภูมิลักษณะหรือบริเวณศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ เนื่องจากผลของยานพาหนะที่จอดอยู่และสัญจรไปมาในบริเวณศึกษา ซึ่งยากต่อการควบคุม ในการคำนวณภูมิลักษณะที่สนใจมีเพียงอาคารเท่านั้น

### 3.4.2 ผลการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเกี้ยวใช้สถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM 900 เรียกว่า CCCU3 ซึ่งติดตั้งอยู่บนอาคารจุลจักรพงษ์มีความสูง 22 เมตร ความถี่ปฏิบัติงานเป็น 912.8 MHz กำลังส่ง 31 dBm สถานีเคลื่อนที่สูง 1.46 เมตร เคลื่อนที่ไปในบริเวณที่พิจารณาตามรูปที่ 3.35 สำหรับตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้เป็นตัวสะท้อนคลื่นดีเยี่ยมจตุรัสขนาด 5 เท่าของความยาวคลื่น ความสูงของตัวสะท้อนคลื่นวัดจากพื้นถึงกึ่งกลางตัวสะท้อนคลื่นเป็น 1.9 เมตร การศึกษาได้พิจารณาเป็น 3 เส้นทางที่อยู่รอบบริเวณศาลาพระเกี้ยว โดยเส้นทางแต่ละเส้นทางได้มีการวางตัวสะท้อนคลื่นที่มุมบิดที่ต่างกัน และเงื่อนไขเบื้องต้นเป็นเช่นเดียวกับภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ คือ ตัวสะท้อนคลื่นต้องสามารถรับรังสีตรงได้ไม่มีการบดบังจากอาคาร เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าตกกระทบพื้นผิวของการสะท้อนที่มากพอ เนื่องจากตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้มีขนาดไม่ใหญ่นัก รูปที่ 3.35 แสดงเส้นทางที่ศึกษาและตำแหน่งการวางตัวสะท้อนคลื่น เส้นทางแต่ละเส้นทางมีการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งและการปรับมุมที่แตกต่างกัน ตัวสะท้อนคลื่น 1 ในรูปที่ 3.35 หมายถึงตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้กับเส้นทางที่ 1 เช่นเดียวกันกับ ตัวสะท้อนคลื่น 2 และตัวสะท้อนคลื่น 3 เป็นตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้กับเส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 ตามลำดับ การปรับมุมตัวสะท้อนเป็นดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.35 เส้นทางที่ศึกษาและตำแหน่งการวางตัวสะท้อนคลื่น



ตารางที่ 3.5 การปรับมุมตัวสะท้อนคลื่น

เส้นทางที่	การปรับมุม (องศา)	
	$\theta_{rot}$	$\gamma_{rot}$
1	90	-40
2	90	-25
3	90	-120

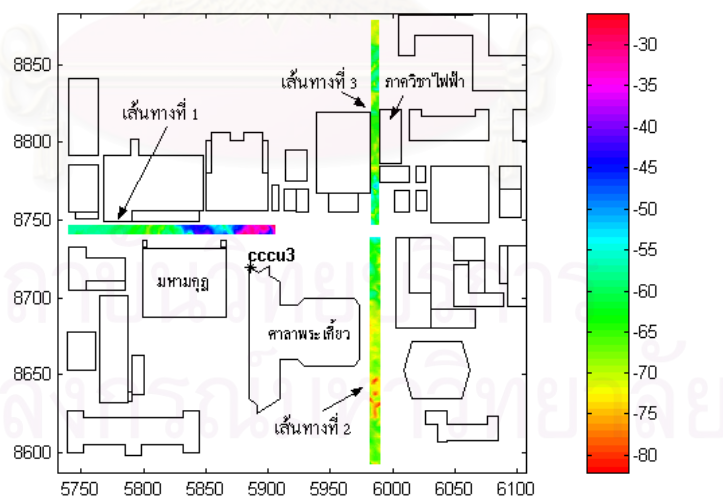
หมายเหตุการปรับมุมอ้างอิงกับรูปที่ 3.7 และ 3.8

### 3.4.2.1 ผลการคำนวณการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น

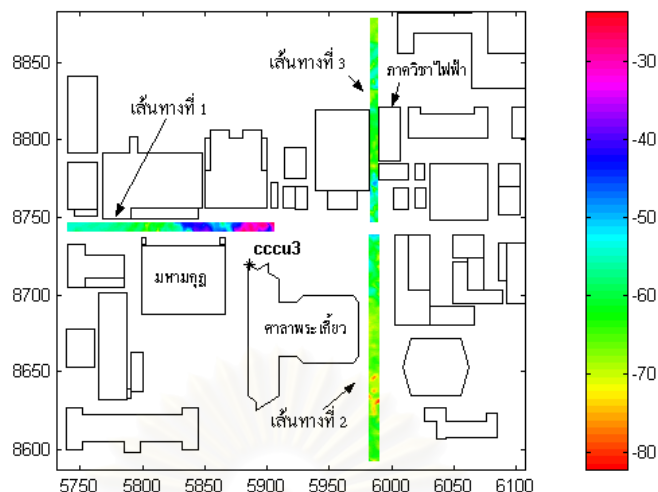
การคำนวณได้คำนวณกำลังคลื่นทั้งก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเพื่อเปรียบเทียบระดับกำลังคลื่นด้วยการพิจารณาแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมและกราฟเปรียบเทียบจุดต่อจุดดังต่อไปนี้

การพิจารณาผลการคำนวณการกำจัดจุดบอดจากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุม

แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจะแสดงให้เห็นภาพโดยรวมของการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น สำหรับการแสดงด้วยแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมจะพิจารณาทั้ง 3 เส้นทางในแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมเดียวกัน ดังรูปที่ 3.36 และรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.36 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเกี้ยว



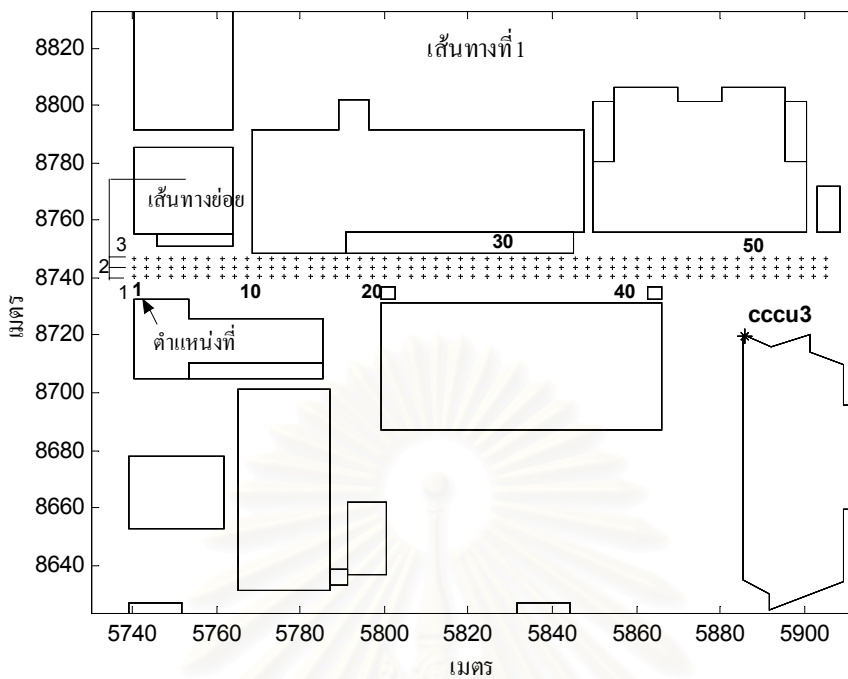
รูปที่ 3.37 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเกี้ยว

ผลการคำนวณก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นไม่พบบริเวณจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานในทั้ง 3 เส้นทางที่พิจารณาเนื่องจากกำลังส่งของสถานีฐานมีค่าถึง 31 dBm ซึ่งทำให้ครอบคลุมบริเวณโดยรอบสถานีฐาน แต่พบบริเวณที่มีกำลังรับต่ำสุดประมาณ  $-82$  dBm และเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นสามารถเพิ่มระดับกำลังรับได้ประมาณ 2 dBm ถึง 3 dBm และไม่พบบริเวณจุดบอดเช่นกัน สังเกตได้จากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมรูปที่ 3.36 และรูปที่ 3.37

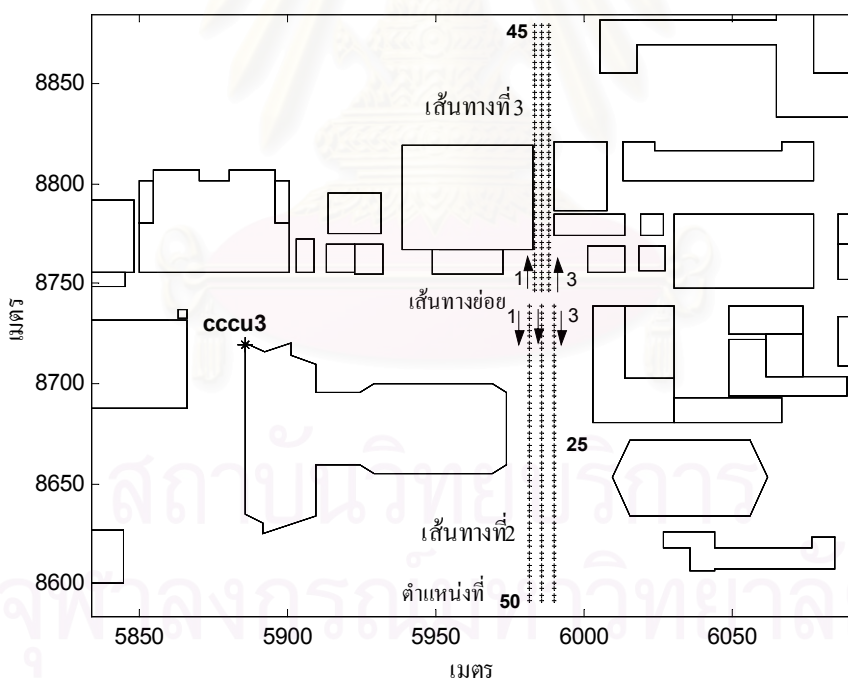
#### การพิจารณาผลการคำนวณการกำจัดจุดบอดจากกราฟการเปรียบเทียบจุดต่อจุด

การเปรียบเทียบจุดต่อจุดของเส้นทางทั้ง 3 เส้นทาง แบ่งออกเป็นเส้นทางย่อยได้เส้นทางละ 3 เส้นทางย่อย ดังรูปที่ 3.35 ตำแหน่งศึกษาทั้ง 3 เส้นทางเป็นดังรูปที่ 3.38 และผลการคำนวณเปรียบเทียบจุดต่อจุดของทั้งสามเส้นทางเป็นดังรูปที่ 3.39

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) เส้นทางที่ 1

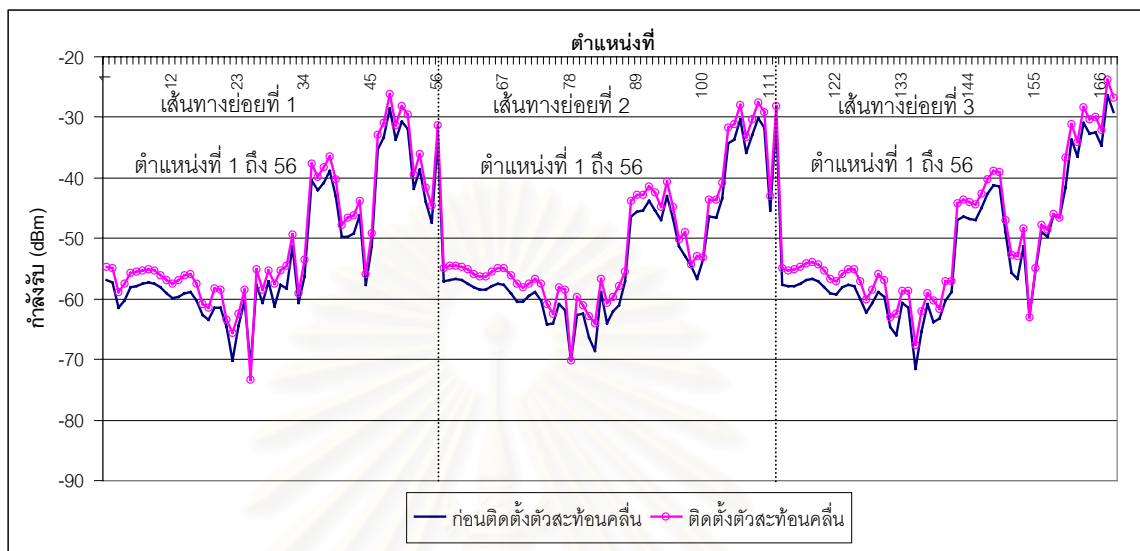


(ข) เส้นทางที่ 2 และ เส้นทางที่ 3

รูปที่ 3.38 เส้นทางที่ศึกษา เส้นทางย่อยและตำแหน่งสถานีเคลิออนที่

### เส้นทางที่ 1

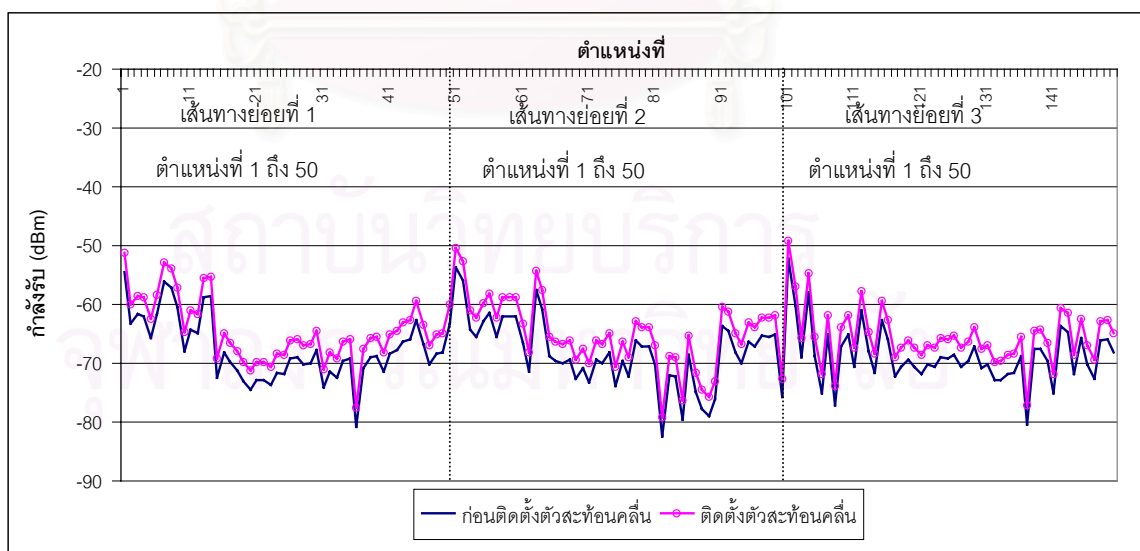
เส้นทางที่ 1 มี 3 เส้นทางย่อย เส้นทางย่อยละ 56 ตำแหน่ง รวมเป็น 168 ตำแหน่งรับ (รูปที่ 3.38(ก)) ผลการคำนวณเปรียบเทียบจุดต่อจุดเป็นดังนี้



รูปที่ 3.39 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 1

### เส้นทางที่ 2

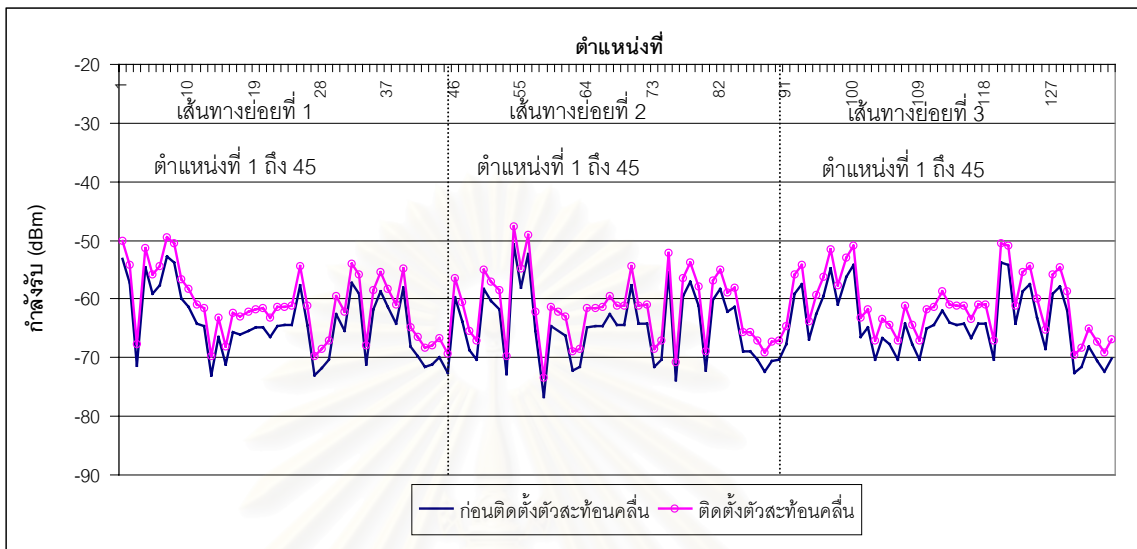
เส้นทางที่ 2 ดังรูปที่ 3.38(ข) มี 3 เส้นทางย่อย เส้นทางย่อยละ 50 ตำแหน่ง ผลการคำนวณเป็นดังนี้



รูปที่ 3.40 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 2

### เส้นทางที่ 3

เส้นทางที่ 3 ดังรูปที่ 3.38(ข) มี 3 เส้นทางย่อย เส้นทางย่อยละ 45 ตำแหน่ง ผลการคำนวณเป็นดังนี้



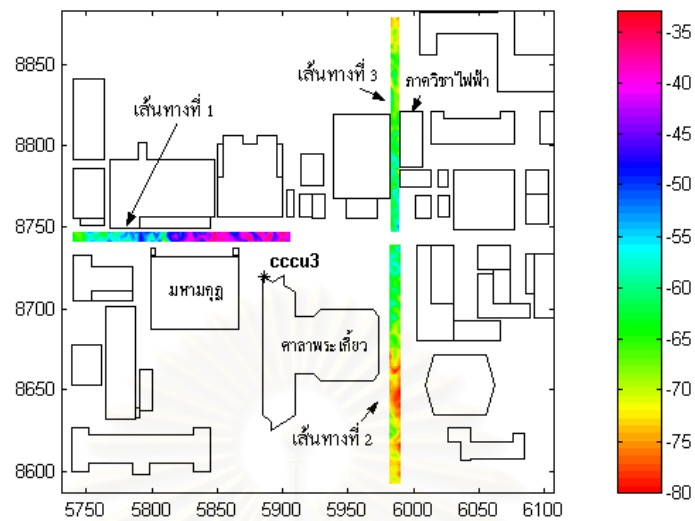
รูปที่ 3.41 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 3

พิจารณากำลังคลื่นที่รับได้ทั้ง 3 เส้นทาง เส้นทางที่ 1 เป็นเส้นทางที่อยู่บริเวณแนวโค้งของสถานีฐานจึงมีระดับกำลังคลื่นสูงบริเวณตำแหน่งที่ 45 ถึงตำแหน่งที่ 56 และตำแหน่งที่ 35 ถึงตำแหน่งที่ 43 ของเส้นทางย่อยทุกเส้นทาง และเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น กำลังคลื่นที่รับได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 dB สำหรับเส้นทางที่ 2 เป็นบริเวณที่สถานีฐานมีการบดบังด้วยศาลาพระเกี้ยว แต่ศาลาพระเกี้ยวสูงกว่าอาคารจุลจักรพงษ์ กำลังที่ตำแหน่งทดสอบจึงยังคงมีกำลังรับสูงประมาณ  $-50$  dBm ถึง  $-80$  dBm และไม่เกิดบริเวณจุดบอด เมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นกำลังรับที่ตำแหน่งทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB เส้นทางที่ 3 เช่นเดียวกันกับเส้นทางที่ 2 คือไม่ได้อยู่ในแนวโค้งของสถานีฐาน กำลังรับที่ตำแหน่งทดสอบประมาณ  $-50$  dBm ถึง  $-80$  dBm และเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นกำลังรับที่ตำแหน่งทดสอบเพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB แม้จะมีการบดบังด้วยสระว่ายนํ้า แต่เนื่องจากสระว่ายนํ้าต่ำกว่าสถานีฐานมากทำให้มีกำลังรับที่สูงและไม่เกิดเป็นจุดบอด

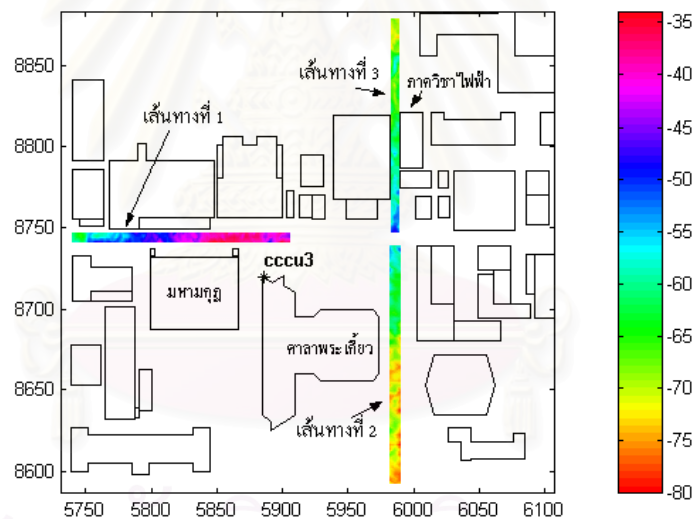
#### 3.4.2.2 ผลการทดลองกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น

การทดลองบริเวณศาลาพระเกี้ยวพิจารณาเส้นทางเดียวกับการคำนวณ ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกำลังคลื่นก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น และหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเป็นดังนี้

การพิจารณาผลการทดลองกำจัดจุดบอดจากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุม



รูปที่ 3.42 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเดี่ยว

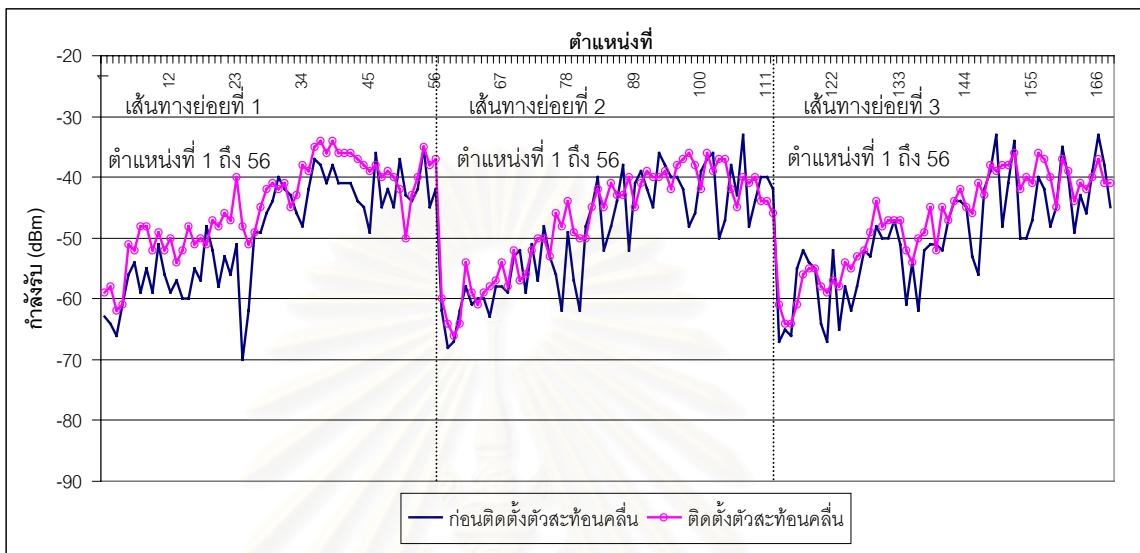


รูปที่ 3.43 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเดี่ยว

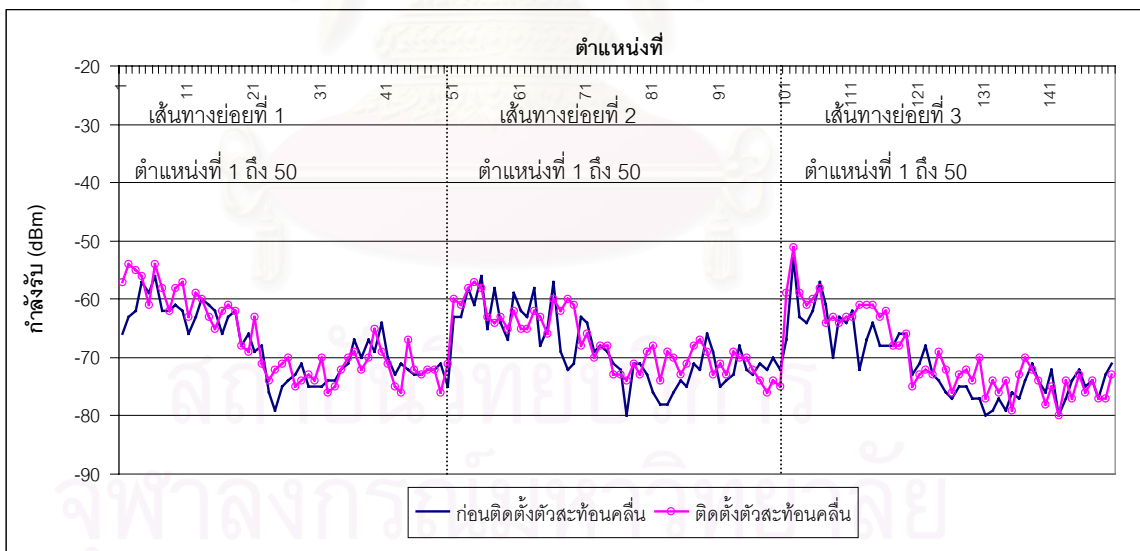
พื้นที่ครอบคลุมที่ได้จากการทดลองบริเวณศาลาพระเดี่ยวก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นไม่พบบริเวณจุดบอดเช่นเดียวกับการทดลอง และเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นพบว่าทั้ง 3 เส้นทางมีระดับกำลังรับเพิ่มขึ้นเป็นส่วนใหญ่ สังเกตได้จากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมในรูปที่ 3.42 และรูปที่ 3.43

การพิจารณาผลการทดลองกำจัดจุดบอดจากกราฟการเปรียบเทียบจุดต่อจุด

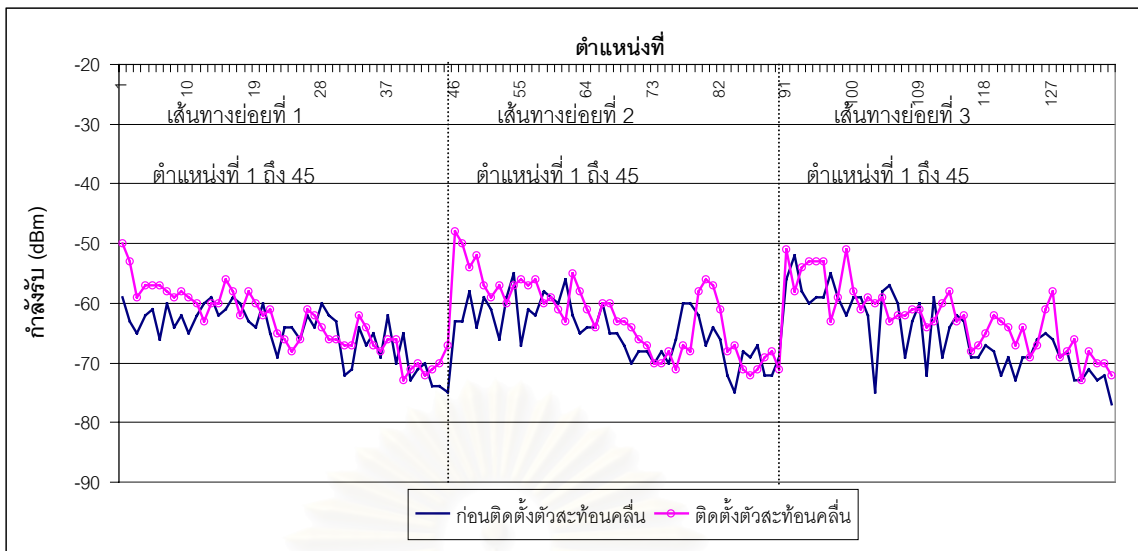
เส้นทางที่ทดลองมี 3 เส้นทางเช่นเดียวกับการคำนวณ คือเป็นดังรูปที่ 3.38 เพื่อให้สังเกตกำลังรับที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจนสามารถสังเกตได้จากกราฟเปรียบเทียบจุดต่อจุดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.44 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 1



รูปที่ 3.45 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 2



รูปที่ 3.46 เปรียบเทียบกำลังคลื่น ก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของเส้นทางที่ 3

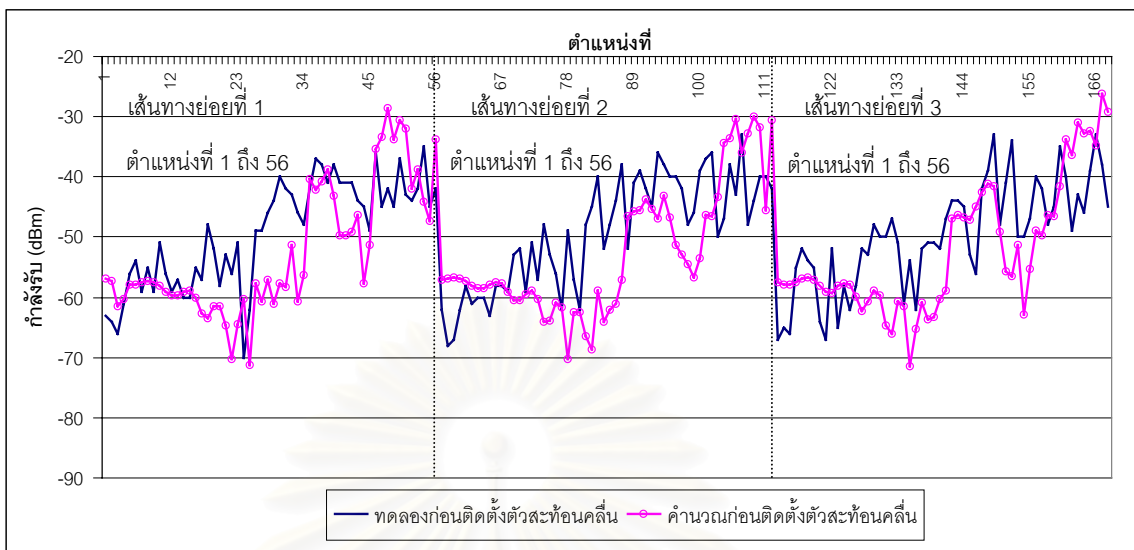
ผลการทดลองพบว่ากำลังคลื่นที่รับได้ทั้ง 3 เส้นทางมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับผลการคำนวณ คือเส้นทางที่ 1 มีกำลังคลื่นสูงบริเวณตำแหน่งที่ 34 ถึงตำแหน่งที่ 56 ของเส้นทางย่อยทุกเส้นทาง และเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น กำลังรับมีค่าสูงขึ้นเป็นส่วนใหญ่ แม้ว่าจะมีบางตำแหน่งที่ไม่มากขึ้นก็ตาม สำหรับเส้นทางที่ 2 ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีกำลังอยู่ในช่วงระหว่าง  $-55$  dBm ถึง  $-80$  dBm และเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ผลการทดลองพบว่าเส้นทางย่อยที่ 1 กำลังคลื่นค่อนข้างใกล้เคียงกับก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น สำหรับเส้นทางย่อยที่ 2 และเส้นทางย่อยที่ 3 เมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นกำลังรับที่ตำแหน่งทดสอบส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้น และเส้นทางที่ 3 ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นกำลังรับอยู่ในช่วงระหว่าง  $-50$  dBm ถึง  $-75$  dBm และเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นพบว่ากำลังคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง 1 ถึง 10 ของเส้นทางย่อยแต่ละเส้นทาง

3.4.2.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นบริเวณศาลาพระเกี้ยว

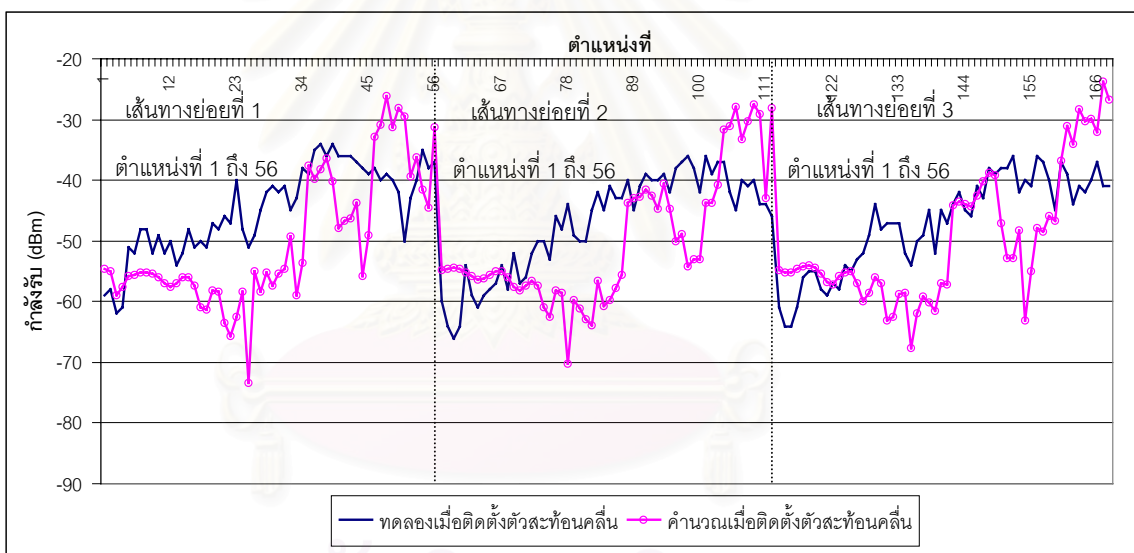
การเปรียบเทียบแสดงด้วยกราฟจุดต่อจุดเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองทั้งก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น เป็นดังนี้



เส้นทางที่ 1



(ก) ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น

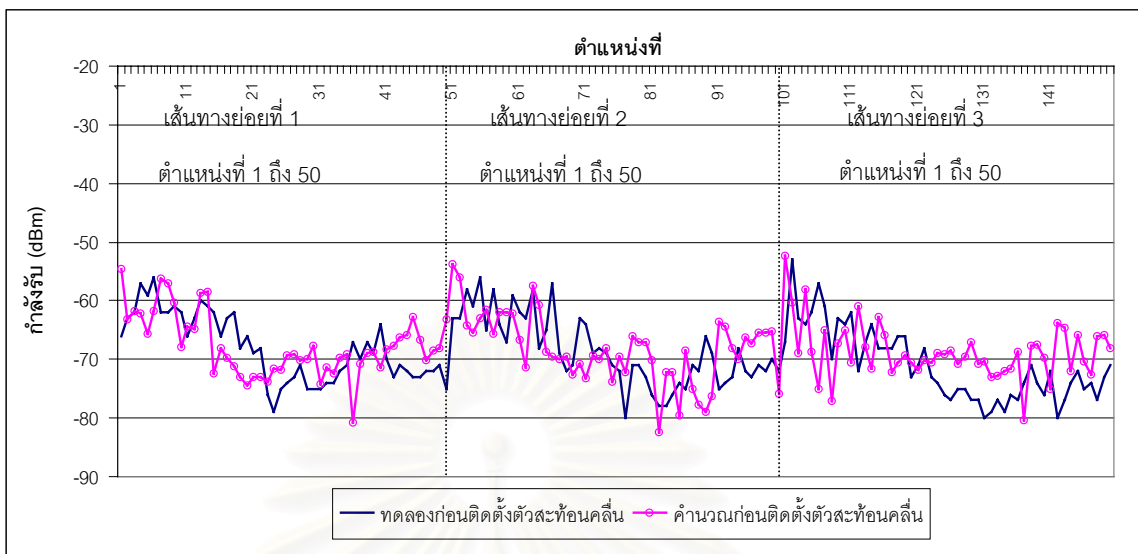


(ข) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น

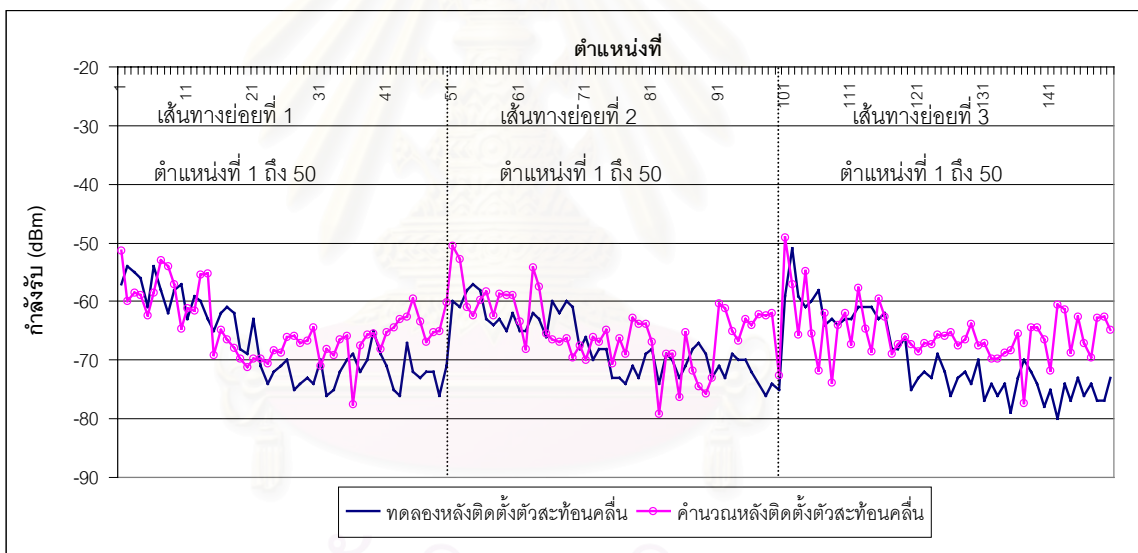
รูปที่ 3.47 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองเส้นทางที่ 1

สถาบันวิจัยการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เส้นทางที่ 2



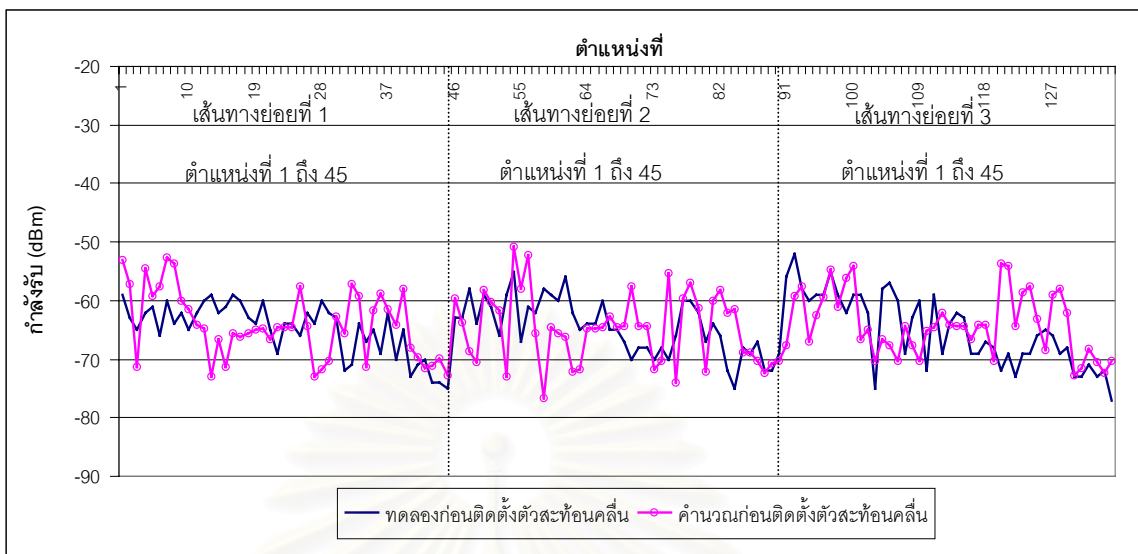
(ก) ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น



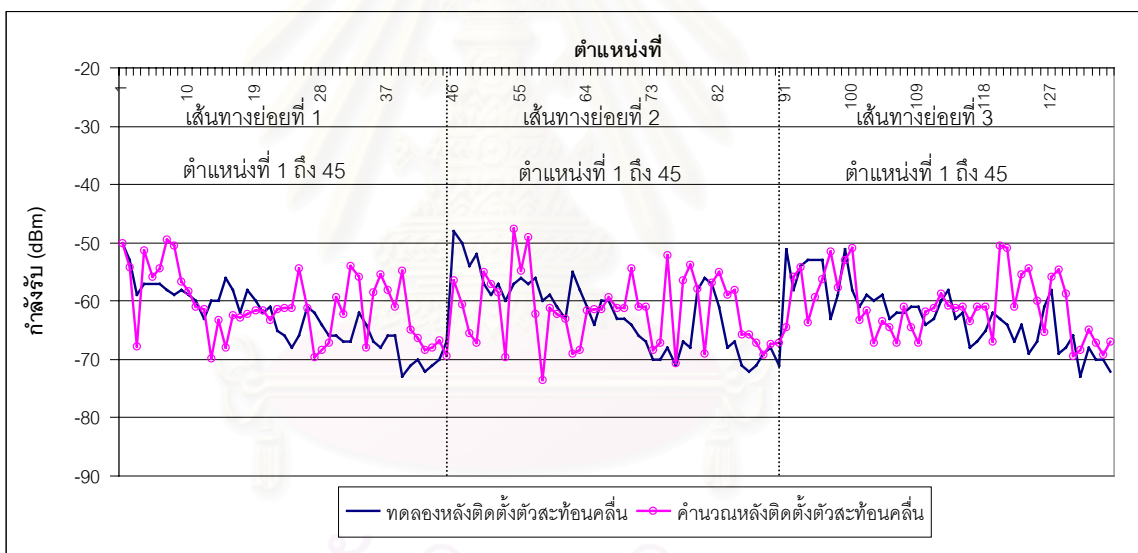
(ข) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น

รูปที่ 3.48 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองเส้นทางที่ 2

เส้นทางที่ 3



(ก) ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น



(ข) หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น

รูปที่ 3.49 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองเส้นทางที่ 3

กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นพบว่าเส้นทางที่ 1 ผลการคำนวณและผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันแม้จะมีตำแหน่งที่มีค่าความแตกต่างของกำลังรับก็ตาม เส้นทางที่ 2 และเส้นทางที่ 3 ระดับกำลังรับเมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจากการคำนวณมีระดับกำลังรับที่แตกต่างกันไม่มากเท่ากับเส้นทางที่ 1 และมีแนวโน้มที่เป็นไปในทางเดียวกันทั้งก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของทั้งสามเส้นทางก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีค่าเท่ากับ 0.4093 และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของทั้งสามเส้นทางหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีค่าเท่ากับ 0.4298

ค่าความแตกต่างของผลการคำนวณและผลการทดลองน่าจะเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของภูมิภาคอิสระหรือบริเวณศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับกรคำนวณ อาคารส่วนใหญ่มีพื้นผิวที่ไม่เป็นผิวเรียบ เช่นอาคารมหาภูมิ และลักษณะอาคารบริเวณโดยรอบสถานีฐานมีลักษณะที่ซับซ้อน เช่นศาลาพระแก้ว จึงทำให้การคำนวณมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นได้

### 3.4.3 เปรียบเทียบความสามารถครอบคลุม

ความสามารถครอบคลุม (coverability :  $C$ ) ในวิทยานิพนธ์นี้ คืออัตราส่วนของจุดทดสอบที่รับกำลังได้มากกว่าค่าที่กำหนดต่อจำนวนจุดทดสอบทั้งหมดเมื่อมีการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น

$$C = \frac{N_c}{N_{total}}$$

เมื่อ  $N_c$  คือจำนวนจุดทดสอบที่มีกำลังรับสูงกว่าค่าที่กำหนด

$N_{total}$  คือจำนวนจุดทดสอบทั้งหมดที่พิจารณา

ค่าความสามารถครอบคลุมของผลการคำนวณและผลการทดลองกรณีต่าง ๆ เป็นดังนี้

#### 3.4.3.1 ค่าความสามารถครอบคลุมบริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การพิจารณาแบ่งเป็น ค่าความสามารถครอบคลุมที่ได้จากการคำนวณกำลังคลื่นดังแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมในรูปที่ 3.16 ถึงรูปที่ 3.18 และจากการทดลองวัดกำลังคลื่นจริงในบริเวณศึกษาดังแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมในรูปที่ 3.25 ถึงรูปที่ 3.28 โดยจุดทดสอบที่ใช้พิจารณา 54 ตำแหน่งทดสอบ และค่ากำลังรับที่กำหนดว่าเป็นจุดบอด คือ  $-100$  dBm ค่าความสามารถครอบคลุมเป็น ดังนี้

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบความสามารถครอบคลุมภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์

กรณี	ขนาดตัวสะท้อนคลื่น ( $\lambda$ )	การปรับมุม $\gamma_{rot}$ เมื่อ $\theta_{rot} = 90^\circ$ (องศา)	ค่าความสามารถครอบคลุม	
			ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น	หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น
การคำนวณ	2	-25	0.85	0.96
		-45		1.00
	3	-25	0.85	1.00
		-45		1.00
การทดลอง	2	-25	0.96	1.00
		-45		1.00
	3	-25	0.87	1.00
		-45		1.00

ค่าความสามารถครอบคลุมที่คำนวณได้แสดงให้เห็นว่าการนำตัวสะท้อนคลื่นมาใช้สามารถกำจัดจุดบอดได้ ทำให้ความสามารถครอบคลุมมีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับผลการคำนวณที่ตัวสะท้อนคลื่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2 เท่าความยาวคลื่น และไม่พบจุดบอดเลยสำหรับกรณีอื่น ๆ ค่าความสามารถครอบคลุมที่ได้จึงมีค่าเท่ากับ 1

#### 3.4.3.2 ค่าความสามารถครอบคลุมบริเวณศาลาพระเกียรติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสามารถครอบคลุมบริเวณศาลาพระเกียรติทั้ง 3 เส้นทางในรูปที่ 3.35 แสดงเป็นแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมผลการคำนวณก่อนและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นดังรูปที่ 3.36 และรูปที่ 3.37 พบว่าความสามารถครอบคลุมมีค่าเท่ากับ 1 ทั้ง 3 เส้นทาง เนื่องจากบริเวณศึกษานี้อยู่ในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานที่ใช้งานจริง ซึ่งมีการออกแบบเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ได้อย่างทั่วถึง และยังมีกำลังส่งที่ค่อนข้างสูง จึงไม่เกิดจุดบอดตามเส้นทางที่พิจารณา สำหรับผลการทดลองก็เป็นเช่นเดียวกันคือไม่พบจุดบอดตามเส้นทางศึกษาทั้ง 3 เส้นทางทำให้พื้นที่ครอบคลุมโดยสถานีฐานก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีค่าเท่ากับ 1 สังเกตกำลังรับของเส้นทางทั้ง 3 เส้นทางได้จากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมในรูปที่ 3.42 และรูปที่ 3.43

แม้ว่าบริเวณศึกษาที่เป็นบริเวณครอบคลุมโดยสถานีฐานที่ใช้งานจริงจะไม่พบจุดบอดเกิดขึ้น แต่เมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นก็ยังสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับที่สถานีเคลื่อนที่สามารถรับได้ ดังนั้นหากลดกำลังส่งของสถานีเคลื่อนที่และใช้ตัวสะท้อนคลื่นไปช่วยเพิ่มกำลังคลื่นตรงบริเวณที่มีระดับกำลังรับที่ต่ำก็น่าจะเป็นไปได้

### สรุป

การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้แผ่นโลหะรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบแบนราบ และวิเคราะห์การสะท้อนคลื่นโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ผลการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ตามกรณีศึกษาที่ได้กล่าวมาพบว่าการใช้ตัวสะท้อนคลื่นสามารถช่วยกำจัดจุดบอดที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ศึกษาได้ เมื่อมีการติดตั้งและปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นได้อย่างเหมาะสม เงื่อนไขเบื้องต้นที่ใช้ในการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นคือตัวสะท้อนคลื่นต้องสามารถรับรังสีตรงจากสถานีฐานได้โดยไม่มีการบดบังจากอาคาร และไม่มีการบดบังคลื่นที่เดินทางจากตัวสะท้อนคลื่นไปบริเวณจุดบอดด้วย เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันเป็นอย่างดี โดยมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีค่าเท่ากับ 0.7165 และหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.6768 เมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ทั้ง 2 กรณี จำนวนตำแหน่งทดสอบทั้งหมด 216 ตำแหน่ง ผลการคำนวณพบตำแหน่งที่มีระดับกำลังคลื่นเพิ่ม

ขึ้น 180 ตำแหน่ง คิดเป็นกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 6.67 dB ตำแหน่งที่มีกำลังคลื่นลดลงแต่ไม่เป็นจุดยอดจำนวน 36 ตำแหน่ง คิดเป็นกำลังคลื่นที่ลดลงเฉลี่ย 2.72 dB ผลการทดลองภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์มีกำลังคลื่นเพิ่มขึ้น 143 ตำแหน่ง คิดเป็นกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 4.94 dB และตำแหน่งที่มีกำลังคลื่นลดลง 73 ตำแหน่ง คิดเป็นกำลังคลื่นที่ลดลงเฉลี่ย 2.78 dB สำหรับบริเวณศาลาพระเกี้ยวเนื่องจากไม่พบบริเวณจุดยอดในเส้นทางที่ศึกษาแต่การใช้ตัวสะท้อนคลื่นก็ยังสามารถช่วยเพิ่มระดับกำลังรับได้ จากตำแหน่งทดสอบทั้งหมด 453 ตำแหน่ง (รวมกันทั้ง 3 เส้นทาง) ผลการคำนวณพบว่า มีตำแหน่งที่มีระดับกำลังคลื่นเพิ่มขึ้น 449 ตำแหน่ง คิดเป็นกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.97 dB ตำแหน่งที่มีกำลังคลื่นลดลงแต่ไม่เป็นจุดยอดจำนวน 4 ตำแหน่ง คิดเป็นกำลังคลื่นที่ลดลงเฉลี่ย 0.61 dB สำหรับผลการทดลองบริเวณศาลาพระเกี้ยวมีตำแหน่งที่มีกำลังคลื่นเพิ่มขึ้น 283 ตำแหน่ง คิดเป็นกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 5.05 dB ตำแหน่งที่มีกำลังคลื่นลดลงจำนวน 129 ตำแหน่ง คิดเป็นกำลังคลื่นที่ลดลงเฉลี่ย 2.96 dB ผลการทดลองและผลการคำนวณก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แม้จะไม่ดีเท่ากับภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยมีค่าโดยมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีค่าเท่ากับ 0.4093 และและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.4298 ค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นของทั้งสองบริเวณศึกษาน่าจะเกิดขึ้นจากความไม่เป็นอุดมคติของภูมิลักษณะ รวมถึงผลของยานพาหนะที่จอดอยู่และสัญจรไปมา จากกรณีศึกษาทั้งหมดกล่าวได้ว่าสามารถที่จะประยุกต์ใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อการกำจัดจุดยอดได้

การวิเคราะห์การกำจัดจุดยอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นตามระเบียบวิธีที่ได้กล่าวมา และได้เปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองซึ่งก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ทำให้ได้ชุดสมการเพื่อช่วยในการหาแนวทางในการกำจัดจุดยอด แนวทางในการกำจัดจุดยอดที่จะนำเสนอต่อไปเกี่ยวข้องกับการกำหนดตำแหน่งสถานีฐานให้เหมาะสมที่จะใช้ตัวสะท้อนเพื่อกำจัดจุดยอดและแนวทางในการปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นเบื้องต้น บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์เป็นบริเวณศึกษาเพื่อหาแนวทางการกำจัดจุดยอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น รายละเอียดจะกล่าวในบทต่อไป

## บทที่ 4

### แนวทางในการเลือกค่าปัจจัยที่ช่วยลดจำนวนจุดบอด

#### ความนำ

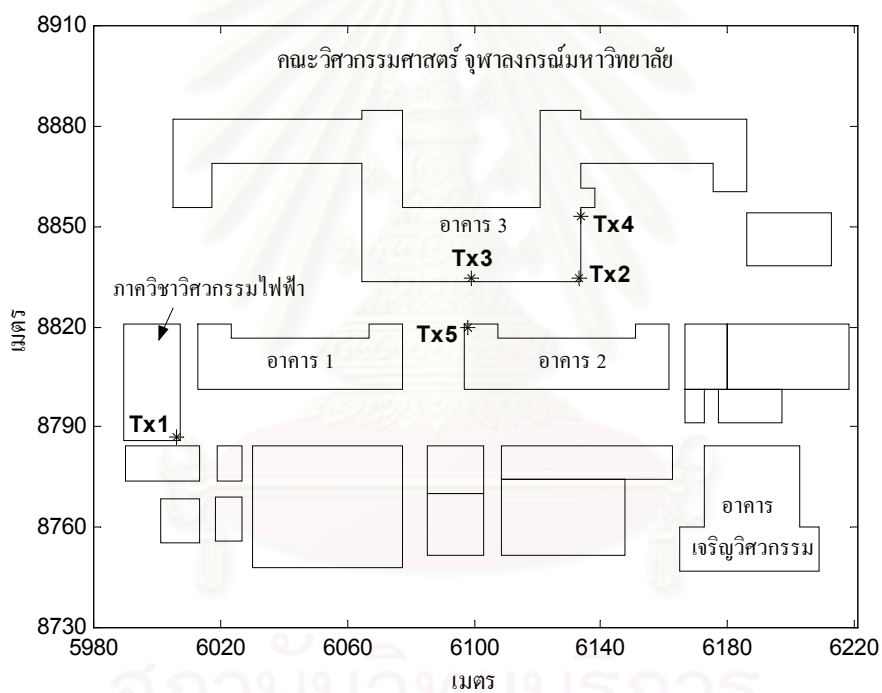
วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดและเสนอการกำจัดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น ดังนั้นการเลือกค่าปัจจัยที่ช่วยกำจัดจุดบอดที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารเคลื่อนที่จะกล่าวถึงตำแหน่งสถานีฐานและค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนแบบแบนราบตามระเบียบวิธีที่ได้นำเสนอในบทที่ผ่านมา แนวทางที่จะนำเสนอเป็นแนวทางเบื้องต้นเพื่อลดจำนวนจุดบอดในบริเวณพื้นที่ครอบคลุม และสำหรับการตัดสินใจเลือกใช้ตัวสะท้อนเพื่อกำจัดจุดบอด ค่าปัจจัยที่จะกล่าวถึงได้แก่ ตำแหน่งสถานีฐาน ตำแหน่งการวางตัวสะท้อน ลักษณะการปรับมุมตัวสะท้อน บริเวณที่เหมาะสมที่จะใช้ตัวสะท้อนเพื่อการจัดจุดบอด รายละเอียดของการเลือกค่าปัจจัยที่ช่วยลดจำนวนจุดบอดภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์เป็นดังนี้

#### 4.1 ตำแหน่งสถานีฐาน

การศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดเมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งสถานีฐานในบทที่ 2 พบว่าเมื่อมีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีฐานและเปลี่ยนแปลงความสูงของสถานีฐาน ส่งผลให้บริเวณจุดบอดมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและขนาดของจุดบอด ดังนั้นแนวทางหนึ่งที่จะนำเสนอเพื่อลดจำนวนจุดบอดคือ การเลือกติดตั้งสถานีฐาน ณ ตำแหน่งที่เหมาะสม การหาตำแหน่งสถานีฐานที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถครอบคลุมพื้นที่บริการได้ทั่วถึงทำได้โดยการติดตั้งสถานีฐานให้สูงกว่าสิ่งกีดขวางหรืออาคารสำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่เป็นบริเวณกว้าง และสำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่เป็นบริเวณแคบ ความสูงของสถานีฐานอาจไม่จำเป็นต้องอยู่สูงกว่สิ่งกีดขวางก็ได้ นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับการปรับมุมก้มของสายอากาศส่งของสถานีฐานที่เหมาะสมเพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมตามต้องการ การติดตั้งสถานีฐานที่เหมาะสมไม่เพียงแต่จะได้พื้นที่ครอบคลุมทั่วถึงเท่านั้นแต่ยังสามารถเคลื่อนย้ายจุดบอดไปยังบริเวณที่สามารถกำจัดจุดบอดได้ด้วย การทดสอบแนวคิดนี้ทำได้โดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ [4,15] บริเวณที่พิจารณาคือบริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การคำนวณจะพิจารณาที่ตำแหน่งและความสูงต่าง ๆ กันทั้งหมด 7 กรณี เป็นกรณีตัวอย่างพอสังเขป การตรวจสอบแนวคิดนี้มีเงื่อนไขว่ากำลังส่งของสถานีฐานมีค่าเท่ากันคือ 10 dBm ในทุกกรณี รายละเอียดของสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่เป็นดังตารางที่ 4.1 ตำแหน่งสถานีฐานดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่

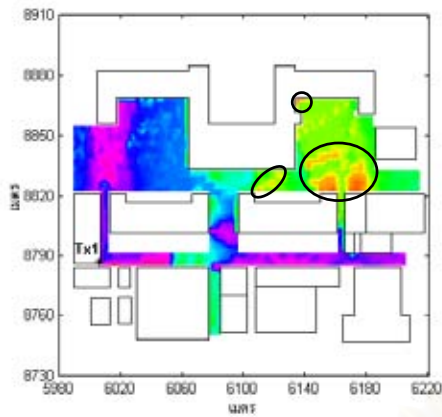
กรณี	สถานีฐาน	ความถี่ (GHz)	ความสูงสถานีฐาน(เมตร)	มุมก้ม (องศา)	ความสูงสถานีเคลื่อนที่ (เมตร)	ชนิดสายอากาศรับ-ส่ง
1	Tx1	1	26	0	1.46	ขั้วคู่
2	Tx1	1	26	8	1.46	ขั้วคู่
3	Tx1	1	15	0	1.46	ขั้วคู่
4	Tx2	1	25	0	1.46	ขั้วคู่
5	Tx3	1	25	8	1.46	ขั้วคู่
6	Tx4	1	10	0	1.46	ขั้วคู่
7	Tx5	1	25	0	1.46	ขั้วคู่



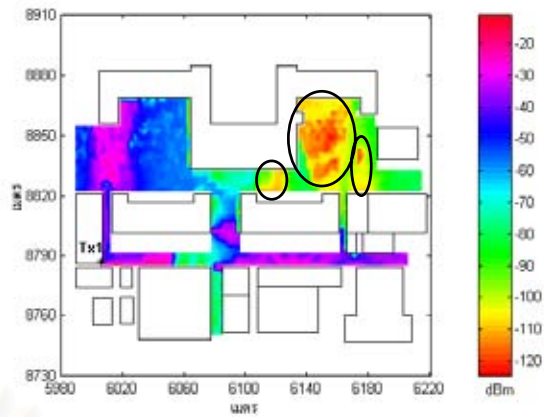
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งสถานีฐาน

ผลการคำนวณเพื่อแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตำแหน่งสถานีฐานที่เหมาะสมจะช่วยลดบริเวณจุดบอดได้ดังนี้

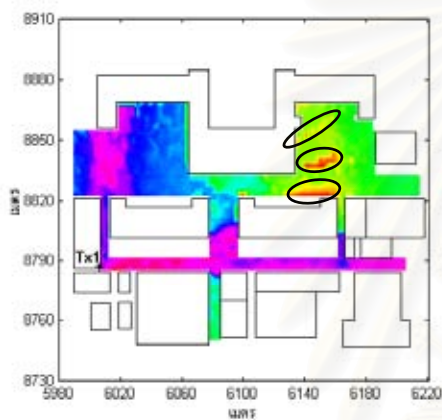




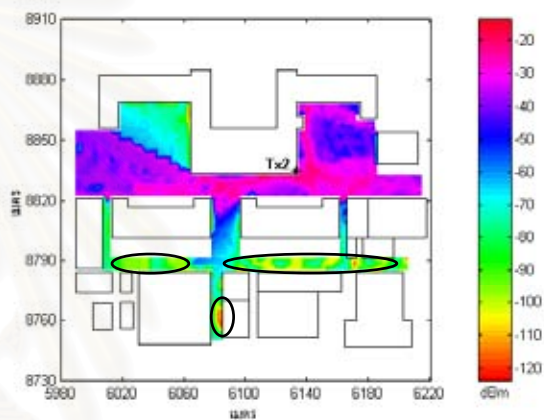
(ก) กรณีที่ 1



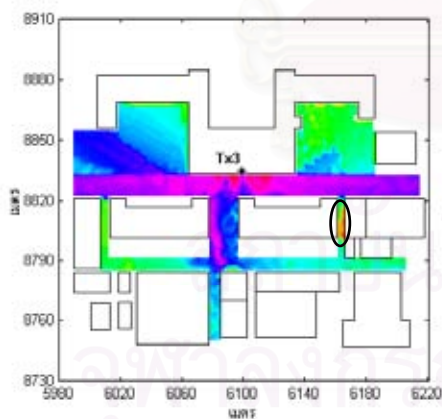
(ข) กรณีที่ 2



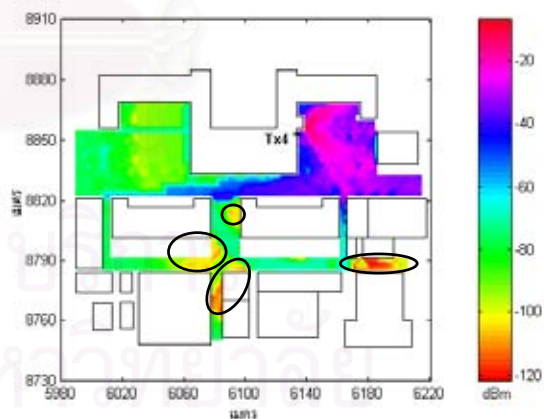
(ค) กรณีที่ 3



(ง) กรณีที่ 4

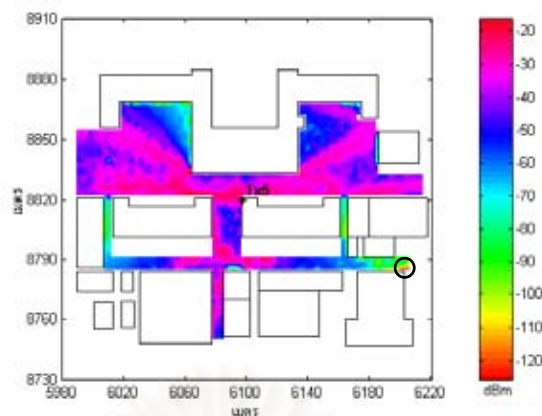


(จ) กรณีที่ 5



(ฉ) กรณีที่ 6

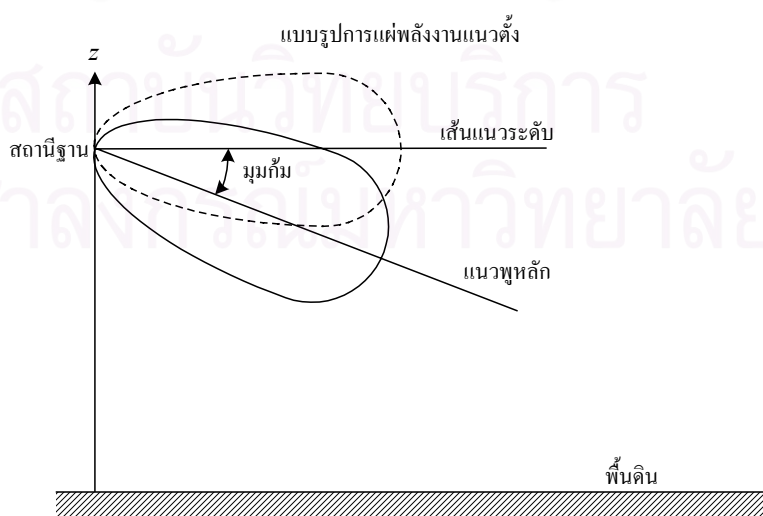
รูปที่ 4.2 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ



(ข) กรณีที่ 7

รูปที่ 4.2 แผนภาพพื้นที่ครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ (ต่อ)

ผลการคำนวณเมื่อติดตั้งสถานีฐานที่ตำแหน่ง ความสูง และมุมก้มของสายอากาศ ต่าง ๆ กัน พบว่าบริเวณพื้นที่ครอบคลุมก็จะแตกต่างกันไป กรณีที่ 1 สถานีฐานอยู่บนอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (Tx1) สถานีฐานสูง 26 เมตร เช่นเดียวกับกรณีที่ 2 แต่ในกรณีที่ 2 มีการปรับมุมก้มของสายอากาศเป็น 8 องศา จากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมในรูปที่ 4.2 พบว่ากรณีที่ 1 เกิดจุดบอดที่บริเวณลานเกียร์เป็นบริเวณค่อนข้างกว้าง และระดับกำลังคลื่นในบริเวณลานเกียร์ก็ไม่มากประมาณต่ำกว่า  $-80$  dBm กรณีที่ 2 มีการปรับมุมก้ม 8 องศาพบว่า การปรับมุมก้มจะทำให้ได้พื้นที่ครอบคลุมที่แคบลง เกิดบริเวณจุดบอดที่บริเวณลานเกียร์เป็นบริเวณกว้างขึ้นเพราะว่าการปรับมุมก้มจะทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศถูกกดมุมให้ก้มลงดังรูปที่ 4.3 คลื่นเดินทางเป็นบริเวณที่แคบลง ส่งผลให้กำลังคลื่นที่อยู่ไกลจากสถานีฐานมีระดับกำลังต่ำและอาจมีการบดบังจากอาคารได้



รูปที่ 4.3 มุมก้มของสายอากาศ

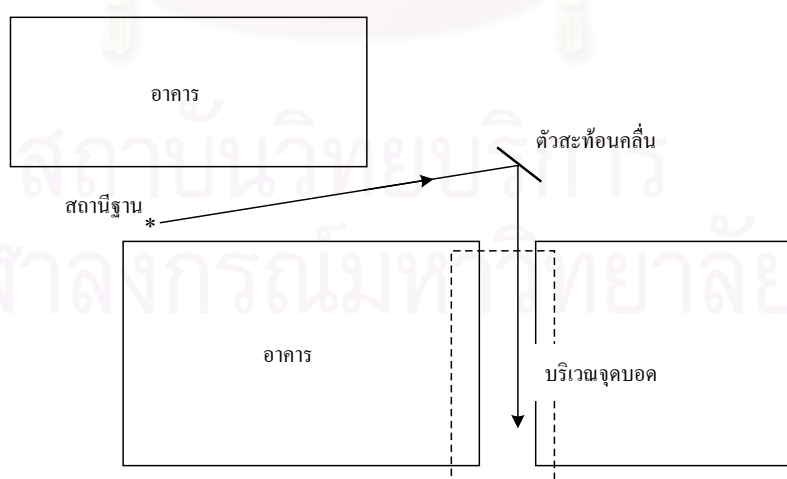
กรณีนี้ 3 ตำแหน่งสถานีฐานอยู่ตำแหน่งเดียวกันกับกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 แต่สถานีฐานมีความสูง 15 เมตร ซึ่งเป็นความสูงที่ต่ำกว่าอาคารที่อยู่ในบริเวณศึกษา ผลการคำนวณพบจุดบอดในบริเวณลานเกียร์มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 คือจุดบอดมีขนาดค่อนข้างกว้าง และบริเวณลานเกียร์โดยรวมก็มีระดับกำลังคลื่นน้อยกว่า  $-80$  dBm แต่บริเวณด้านหลังอาคาร 1 และอาคาร 2 มีกำลังคลื่นแรงกว่าในกรณีที่ 1 เนื่องจากเป็นบริเวณที่รับรังสีตรงได้และมีระยะทางที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ 1 การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นของทั้ง 3 กรณีค่อนข้างทำได้ยากเนื่องจากเกิดจุดบอดเป็นบริเวณกว้างและอยู่ห่างจากสถานีฐาน และถ้าต้องการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น ตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเพื่อให้มีระดับกำลังที่สูงพอที่จะสะท้อนกำลังคลื่นไปที่บริเวณจุดบอดได้ก็มีระยะห่างจากบริเวณจุดบอด ซึ่งทำให้กำลังคลื่นที่สะท้อนไปมีความเข้มไม่พอที่จะช่วยกำจัดจุดบอดได้ ต่อมาเป็นกรณีที่ 4 เปลี่ยนตำแหน่งสถานีฐานเป็น Tx2 สถานีฐานอยู่บนอาคาร 3 ดังรูปที่ 4.1 พบว่าเกิดจุดบอดเป็นบริเวณเล็ก ๆ แต่กระจายอยู่ทั่วไปตลอดบริเวณถนนที่อยู่ด้านหลังอาคาร 1 และอาคาร 2 ซึ่งเป็นบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้เนื่องจากมีการบดบังจากอาคาร กรณีนี้หากต้องการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นก็ทำได้ยากเช่นกัน เนื่องจากบริเวณจุดบอดอยู่กระจัดกระจายทั่วไปบนถนนหลังอาคาร 1 และอาคาร 2 ตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นก็กำหนดได้ยากเนื่องจากบริเวณที่มีกำลังคลื่นสูงนั้นอยู่บริเวณด้านหน้าอาคาร 1 และอาคาร 2 หากต้องการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเพื่อให้สะท้อนกำลังคลื่นจากด้านหน้ามาด้านหลังอาคาร 1 และอาคาร 2 ก็อาจถูกบดบังด้วยตัวอาคารอีก และจำนวนตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้ อาจต้องใช้มากกว่า 1 ตัว กรณีที่ 5 สถานีฐานคือ Tx3 อยู่บริเวณตรงกลางด้านหน้าอาคาร 3 พบว่ามีบริเวณจุดบอดเกิดขึ้นบริเวณในซอยด้านข้างอาคาร 2 และบริเวณที่กำลังคลื่นต่ำแต่ไม่เป็นจุดบอดที่บริเวณลานเกียร์ การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นในกรณีนี้สามารถทำได้เนื่องจากตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเพื่อสะท้อนกำลังคลื่นไปยังจุดบอดไม่มีการบดบังจากตัวอาคาร และบริเวณจุดบอดอยู่ที่บริเวณไม่ไกลจากบริเวณที่รับรังสีตรงมากนัก สำหรับกรณีที่ 6 สถานีฐานตั้งอยู่ที่อาคาร 3 ด้านที่หันไปบริเวณลานเกียร์ (Tx4) สถานีฐานสูง 10 เมตร สังเกตได้ว่าบริเวณครอบคลุมโดยสถานีฐานอยู่ที่บริเวณลานเกียร์เนื่องจากความสูงของสถานีฐานต่ำกว่าอาคารโดยรอบ ดังนั้นคลื่นจึงถูกกักด้วยผนังของอาคารทำให้มีพื้นที่ครอบคลุมแคบ เมื่อพิจารณากรณีที่ 6 กับกรณีที่ 2 ถ้ามีการติดตั้งสถานีฐาน 2 สถานีฐานนี้ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์จะให้พื้นที่ครอบคลุมทั่วถึง แต่ต้องมีการจัดสรรความถี่ใหม่ สุดท้ายเป็นกรณีที่ 7 (Tx5) กรณีนี้พบว่าเป็นตำแหน่งของสถานีฐานที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ทั่วบริเวณที่พิจารณา แม้จะพบจุดบอดเป็นบริเวณเล็ก ๆ ที่บริเวณอาคารเจริญวิศวกรรมก็ตาม เนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้งสถานีฐานเป็นตำแหน่งที่ไม่มีสิ่งกีดขวางทางเดินของคลื่นจากอาคารจึงทำให้บริเวณโดยรอบสถานีฐานรับรังสีตรงได้ ส่งผลให้มีกำลังคลื่นสูง

ตำแหน่งสถานีฐานที่ช่วยลดจำนวนจุดบอดภายในคณะวิศวกรรมก็คือตำแหน่งสถานีฐาน Tx5 ดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากมีพื้นที่ครอบคลุมทั่วถึง สำหรับตำแหน่งสถานีฐานที่เกิดบริเวณ จุดบอด และสามารถใส่ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อกำจัดจุดบอดได้คือตำแหน่งสถานีฐาน Tx3 เนื่องจากสามารถหาตำแหน่งติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่เหมาะสมได้ จากทั้ง 7 กรณีพบว่า การติดตั้งสถานีฐานให้สูงกว่าสิ่งกีดขวางหรืออาคารจะได้พื้นที่ครอบคลุมที่เป็นบริเวณกว้าง (Tx1, Tx5) และสำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่เป็นบริเวณแคบความสูงของสถานีฐานอาจไม่จำเป็นต้องอยู่สูงกว่าสิ่งกีดขวางก็ได้ (Tx4)

#### 4.2 การติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น

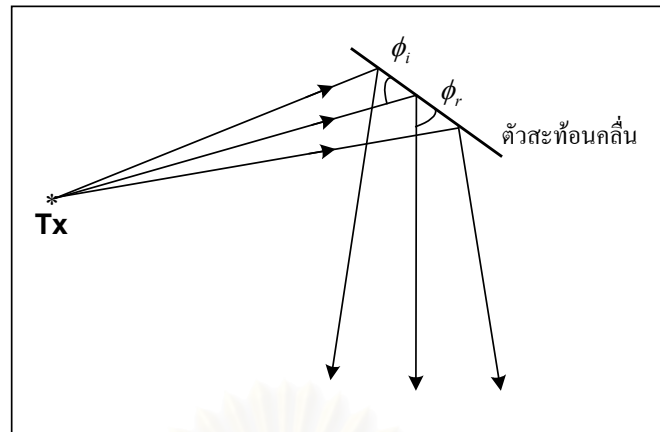
การคำนวณและการทดลองกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นในบัพที่ผ่านมาได้ติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นโดยมีเงื่อนไขเบื้องต้นคือตัวสะท้อนคลื่นต้องสามารถรับรังสีตรงจากสถานีฐานได้ โดยไม่มีการบดบังจากอาคาร และตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ในบริเวณจุดบอดจะต้องรับรังสีตรงจากตัวสะท้อนคลื่นได้ ซึ่งหมายถึงสถานีฐานต้องมองเห็นตัวสะท้อนคลื่นและตัวสะท้อนคลื่นต้องมองเห็นสถานีเคลื่อนที่ในบริเวณจุดบอด ลักษณะการวางตัวสะท้อนคลื่นดังรูปที่ 4.4(ก) การวางตัวสะท้อนคลื่นในลักษณะดังกล่าวก็เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าตกกระทบพื้นผิวสะท้อนมากพอ

นอกจากกำลังคลื่นสะท้อนมาจากตัวสะท้อนจะมีระดับสูงแล้ว ตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นจะต้องสามารถสะท้อนกำลังคลื่นไปยังบริเวณจุดบอดโดยวิถีภาคของสนามไฟฟ้าที่ไปยังจุดบอดต้องทำให้กำลังไฟฟ้าที่รับได้มีค่าสูงขึ้นด้วย พิจารณาในลักษณะของรังสีที่เดินทางจากสถานีฐานมาตกกระทบ แล้วสะท้อนไปยังจุดบอดตามกฎการสะท้อนดังรูปที่ 4.4(ข)



(ก) ลักษณะการวางตัวสะท้อนคลื่น

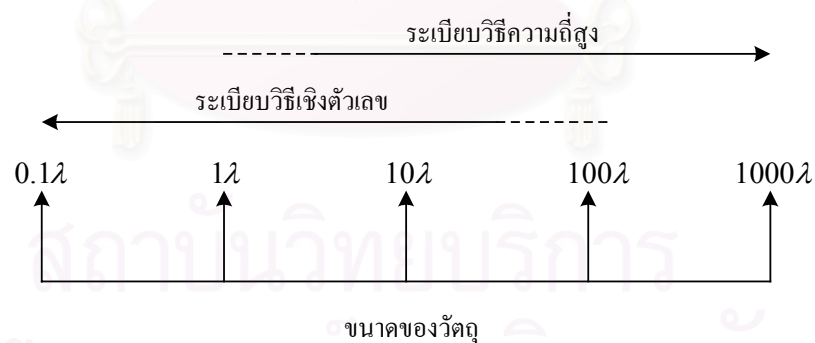
รูปที่ 4.4 ลักษณะการวางตัวสะท้อนคลื่น



- (ข) รังสีของคลื่นที่เดินทางมาจากสถานีฐานมีการตกกระทบและสะท้อนไปยังบริเวณจุดยอด  
(เมื่อ  $\phi_i$  และ  $\phi_r$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อน ตามลำดับ)

#### รูปที่ 4.4 ลักษณะการวางตัวสะท้อนคลื่น (ต่อ)

การกำหนดตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นดังรูปที่ 4.4 เป็นการกำหนดตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นที่ง่ายที่สุดแม้ว่าจะไม่แม่นยำนักเมื่อตัวสะท้อนคลื่นมีขนาดไม่ใหญ่มากพอเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น เนื่องจากหากตัวสะท้อนคลื่นมีขนาดเล็ก การวิเคราะห์จะต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น ระเบียบวิธีโมเมนต์ ดังเช่นในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่แม่นยำมากขึ้น การแบ่งประเภทระเบียบวิธีที่ใช้เพื่อคำนวณแบ่งตามขนาดของวัตถุเทียบกับความยาวคลื่นแบ่งได้พอสังเขป เป็นดังนี้ [16]



#### รูปที่ 4.5 การแบ่งประเภทระเบียบวิธีวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์นี้ใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ โดยสถานการณ์ก็คือ สถานีฐานตั้งอยู่ไกลจากตัวสะท้อนคลื่นในย่านสนามไกล คลื่นที่เดินทางไปตกกระทบตัวสะท้อนคลื่นเป็นคลื่นระนาบ เมื่อสนามไฟฟ้าตกกระทบตัวสะท้อนคลื่นจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสบนแผ่นสะท้อนคลื่น และเกิดการกระเจิงไปยังจุดสังเกตใด ๆ ที่พิจารณา ซึ่งตามสถานการณ์ดังกล่าวนี้ตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นที่เหมาะสมที่จะช่วยกำจัดจุดบอดต้องเป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้ากระเจิงจากตัวสะท้อน

คลื่นไปยังจุดยอดด้วยระดับกำลังคลื่นสูงพอสมควรและภูมิภาคต้องเสริมกับสนามไฟฟ้าที่พิจารณาตามกลไกการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น การหาตำแหน่ง การปรับมุม ความสูง ของตัวสะท้อนคลื่นต้องใช้ในการประมาณตามแนวคิดที่แสดงในรูปที่ 4.4 และ ต้องใช้การคำนวณเข้ามาประกอบกัน สำหรับการคำนวณได้ปรับมุมและเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ตัวสะท้อนคลื่นจนกว่าจะได้ตำแหน่ง การปรับมุม และความสูง ที่ทำให้จุดยอดมีกำลังเพิ่มขึ้น และมีพื้นที่ครอบคลุมตามต้องการและยอมรับได้ ขนาดตัวสะท้อนคลื่นที่แตกต่างกันก็ให้สนามไฟฟ้าที่ กระเจิงไปยังจุดยอดต่างกัน ดังนั้นแนวทางในการเลือกขนาดตัวสะท้อนคลื่นที่จะใช้นั้นพิจารณา จากพื้นที่ครอบคลุมที่ต้องการ พิจารณาอย่างง่ายคือตัวสะท้อนคลื่นขนาดใหญ่จะสะท้อนคลื่น ไปยังบริเวณจุดยอดได้ดีกว่าตัวสะท้อนคลื่นขนาดเล็ก แต่การพิจารณาเท่านั้นไม่เพียงพอต้อง พิจารณาภูมิภาคของคลื่นที่สะท้อนจากตัวสะท้อนคลื่นด้วยว่ามีภูมิภาคเสริมกับคลื่นอื่น ๆ ที่เดินทางมายังจุดยอดหรือไม่ นอกจากนี้ยังต้องมีขนาดไม่ใหญ่เกินไป เพราะจะเกิดการบดบังคลื่นที่จะ เดินทางไปบริเวณอื่น ๆ ได้ ผลการคำนวณเพื่อแสดงให้เห็นแนวทางในการเลือกค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้อง การลดจำนวนจุดยอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นพิจารณาภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย มีดังนี้

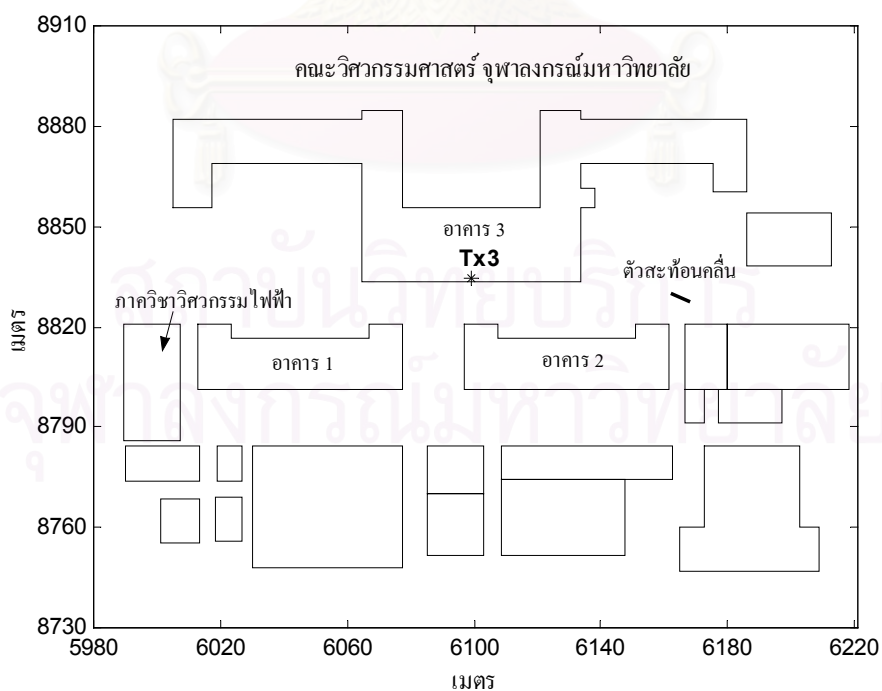
การกำจัดจุดยอดภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จะพิจารณาตำแหน่งของสถานีฐานใน หัวข้อที่ผ่านมาที่เป็นไปตามแนวคิดที่กล่าวไว้ว่า ตำแหน่ง การปรับมุม และความสูงของตัวสะท้อน คลื่นต้องเป็นตำแหน่งที่สถานีฐานมองเห็นตัวสะท้อนคลื่น และตัวสะท้อนคลื่นต้องมองเห็นจุดยอด ตำแหน่งสถานีฐานที่พิจารณาคือ สถานีฐาน Tx3 กรณีที่ 5 ของตารางที่ 4.2 มีพื้นที่ครอบคลุม ดังรูปที่ 4.2(จ) จากพื้นที่ครอบคลุมพบว่าบริเวณจุดยอดและตำแหน่งสถานีฐานอยู่ตรงบริเวณที่มีความเหมาะสมที่จะใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อลดจำนวนจุดยอด เนื่องจากสามารถติดตั้งตัวสะท้อน คลื่นตรงบริเวณที่สถานีฐานมองเห็นตัวสะท้อนคลื่นและตัวสะท้อนคลื่นสามารถมองเห็นจุดยอดได้ ซึ่งจะทำให้มีกำลังคลื่นที่เดินทางไปยังจุดยอดที่สูงเพียงพอ ค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวสะท้อนคลื่นเป็น ดังตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของสถานีฐาน และตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นเป็นดังรูปที่ 4.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ค่าปัจจัยต่าง ๆ ของตัวสะท้อนคลื่นเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx3

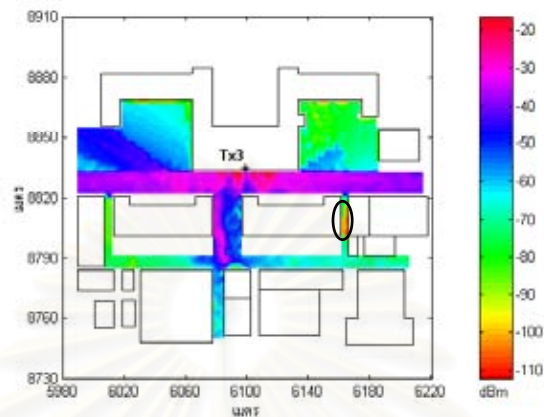
กรณี	สถานีฐาน	ความถี่ (GHz)	การปรับมุม (องศา)		ขนาดตัว สะท้อนคลื่น ( $\lambda$ )	ความสูง ตัวสะท้อนคลื่น (เมตร)
			$\theta_{rot}$	$\gamma_{rot}$		
1	Tx3	1	90	-45	3	1.9
2	Tx3	1	100	-45	3	1.9
3	Tx3	1	120	-45	3	1.9
4	Tx3	1	100	-40	3	1.9
5	Tx3	1	100	-50	3	1.9
6	Tx3	1	100	-60	3	1.9
7	Tx3	1	100	-45	2	1.9
8	Tx3	1	100	-45	4	1.9
9	Tx3	1	100	-45	5	1.9
10	Tx3	1	100	-45	3	2.5
11	Tx3	1	100	-45	3	3.5
12	Tx3	1	100	-45	3	4.5

หมายเหตุ การปรับมุม  $\theta_{rot}$  และ  $\gamma_{rot}$  อ้างอิงมุมตามรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8

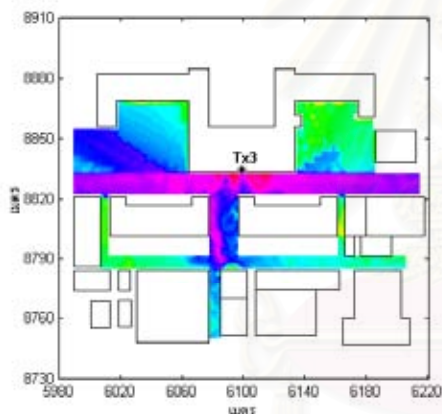


รูปที่ 4.6 ตำแหน่งสถานีฐาน Tx3 และตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่น

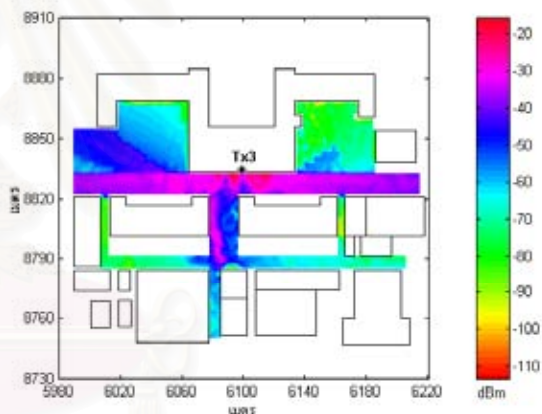
ผลการคำนวณเพื่อแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวสะท้อนอย่างเหมาะสมเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดจำนวนจุดบอด ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8



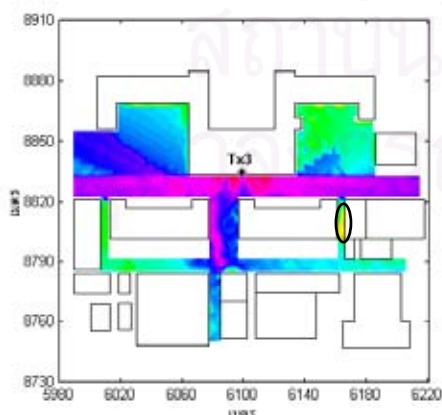
รูปที่ 4.7 พื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของสถานีฐาน Tx3



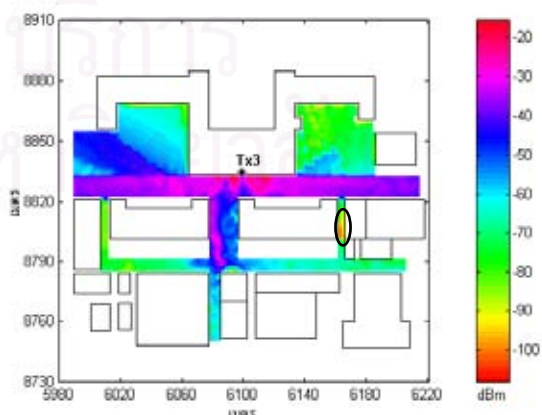
(ก) กรณีที่ 1



(ข) กรณีที่ 2



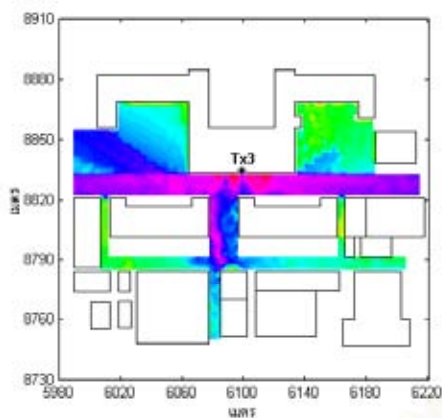
(ค) กรณีที่ 3



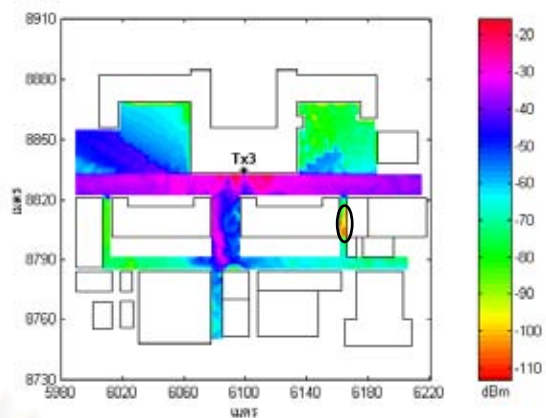
(ง) กรณีที่ 4

รูปที่ 4.8 พื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของสถานีฐาน Tx3

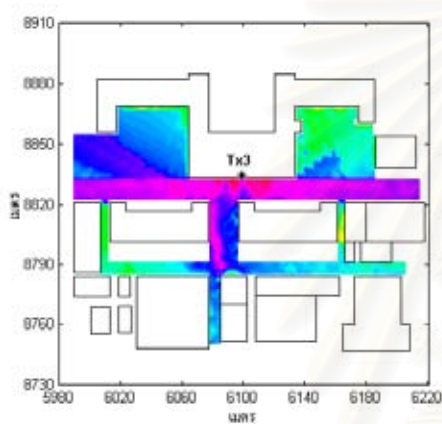




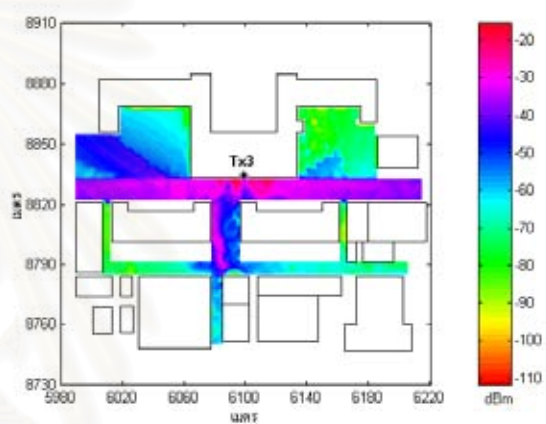
(จ) กรณีที่ 5



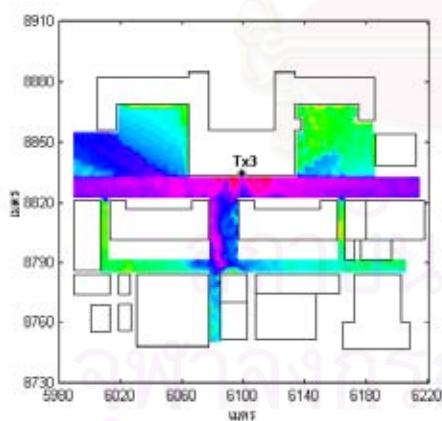
(ข) กรณีที่ 6



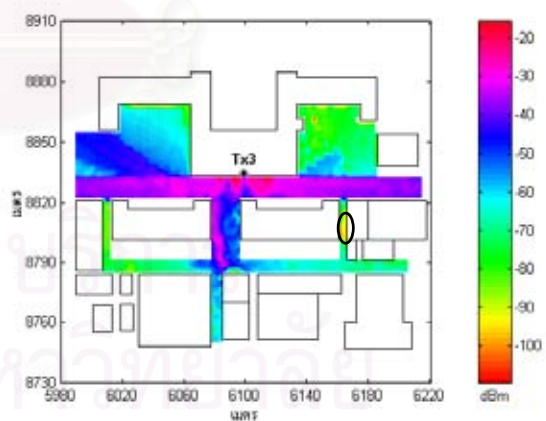
(ค) กรณีที่ 7



(ง) กรณีที่ 8

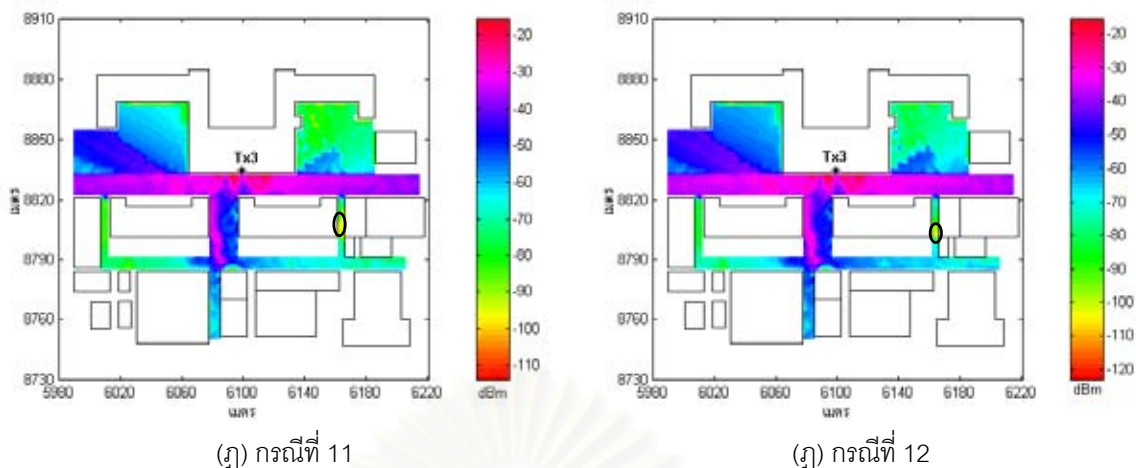


(ฉ) กรณีที่ 9



(ช) กรณีที่ 10

รูปที่ 4.8 พื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของสถานีฐาน Tx3 (ต่อ)



รูปที่ 4.8 พื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของสถานีฐาน Tx3 (ต่อ)

บริเวณจุดบอดที่ต้องการกำจัดในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน Tx3 นี้คือบริเวณจุดบอดที่อยู่ในซอยข้างอาคาร 2 การติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งดังรูปที่ 4.6 เป็นตำแหน่งที่สามารถรับรังสีตรงจากสถานีฐานได้ และได้ปรับมุม เปลี่ยนขนาดตัวสะท้อนคลื่นและเปลี่ยนความสูงตัวสะท้อนคลื่น จากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อปรับมุมตัวสะท้อนคลื่น  $\theta_{rot}$  (มุมก้ม-เงย) เป็น 90 องศาและ 100 องศา ในกรณีที่ 1 และ 2 ตามลำดับ พื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน Tx3 นี้มีระดับกำลังที่บริเวณจุดบอด (ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นในรูปที่ 4.5) สูงขึ้นและไม่พบจุดบอดในซอยข้างอาคาร 2 แต่สำหรับกรณีที่ 3  $\theta_{rot}$  เป็น 120 องศา ยังคงพบจุดบอดอยู่เนื่องจากเมื่อสถานีฐานอยู่สูงกว่าตัวสะท้อนคลื่นมาก ๆ หากมีมุมก้ม ( $\theta_{rot}$  มากกว่า 90 องศา) มากเกินไปทำให้ตัวสะท้อนคลื่นมีพื้นผิวสะท้อนที่จะสะท้อนคลื่นไปบริเวณที่ต้องการได้น้อยลง การปรับมุมตัวสะท้อนคลื่น  $\gamma_{rot}$  (ซ้าย-ขวา) เป็น -50 องศา (กรณีที่ 5) ไม่พบจุดบอดแต่เมื่อมุม  $\gamma_{rot}$  เป็น -40 องศา และ -60 องศา กรณีที่ 4 และกรณีที่ 6 พบจุดบอดปรากฏที่ซอยข้างอาคาร 2 เนื่องจากมุน้อยเกินไปและมากเกินไปจะทำให้คลื่นที่ตกกระทบและสะท้อนไปในทิศทางอื่นที่ไม่ใช่บริเวณจุดบอด และเมื่อเปลี่ยนขนาดตัวสะท้อนคลื่นเป็น 2, 3, 4 และ 5 เท่าของความยาวคลื่น (ความยาวคลื่นเท่ากับ 30 เซนติเมตร) มุม  $\theta_{rot}$  เท่ากับ 100 องศา มุม  $\gamma_{rot}$  เท่ากับ -45 องศา และตัวสะท้อนคลื่นจากกึ่งกลางแผ่นถึงพื้นเป็น 1.9 เมตร ตามกรณีที่ 7, 2, 8 และ 9 ตามลำดับ พบว่าจุดบอดที่ต้องการกำจัดหายไป นั่นหมายความว่าที่ตำแหน่ง การปรับมุม ความสูงของตัวสะท้อนในกรณีดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะใช้กำจัดจุดบอดที่เกิดขึ้น และสุดท้ายการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวสะท้อนคลื่นเป็น 2.5 เมตร 3.5 เมตร และ 4.5 เมตร ในกรณีที่ 10 กรณีที่ 11 และกรณีที่ 12 ตามลำดับ พบว่าตัวสะท้อนคลื่นสูงกว่า 1.9 เมตร จุดบอดยังคงปรากฏอยู่เนื่องจากเมื่อตัวสะท้อนคลื่นสูงขึ้น มุม  $\theta_{rot}$  ที่เหมาะสมอาจไม่ใช่ 100 องศา และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถครอบคลุมของทั้ง 12 กรณี ดังตารางที่ 4.3 พบว่าหากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นให้สามารถรับ

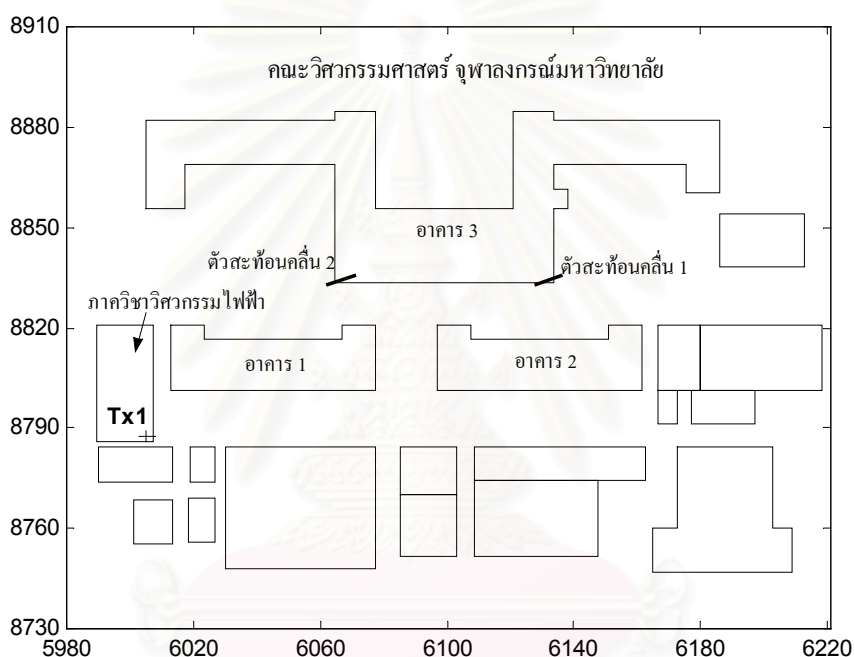
รังสีตรงจากสถานีฐานได้ ตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นอยู่ตรงตำแหน่งที่มีกำลังคลื่นสูงพอ และตัวสะท้อนคลื่นอยู่ไม่ห่างจากบริเวณจุดบอดมากนัก การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นก็มีความเป็นไปได้ ค่าความสามารถครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีค่าผลต่างมากที่สุดเป็น 0.98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างน้อยเนื่องจากตำแหน่งสถานีฐานที่พิจารณาเป็นตำแหน่งที่มีค่าความสามารถครอบคลุมสูงถึง 0.978629 (ค่ามากที่สุดเป็น 1) ดังนั้นจุดบอดที่กำจัดได้จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับจุดทดสอบทั้งหมดทำให้ค่าความสามารถครอบคลุมมีเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นผลต่างมีค่าไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อพิจารณาจุดบอดที่ต้องการกำจัดที่บริเวณซอยข้างอาคาร 2 ทั้งหมด 11 ตำแหน่ง พบว่าทุกกรณีสามารถกำจัดจุดบอดได้เกินครึ่ง ยกเว้นกรณีที่ 3 ซึ่งมีมุมก้มมากเกินไป และเมื่อตัวสะท้อนคลื่นสูง 1.9 เมตร มีการปรับมุม  $\theta_{rot}$  เป็น 100 องศา และ  $\gamma_{rot}$  เป็น -45 องศา พบว่าสามารถกำจัดจุดบอดบริเวณที่ต้องการได้ทั้งหมด

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบความสามารถครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx3

กรณี	จำนวนจุดทดสอบ	ค่าความสามารถครอบคลุม		ผลต่าง (เปอร์เซ็นต์)	จุดทดสอบที่ต้องการกำจัดจุดบอด 11 ตำแหน่ง	
		ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น	หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น		กำจัดได้ (ตำแหน่ง)	คิดเป็น (เปอร์เซ็นต์)
1	1123	0.978629	0.988424	0.98	11	100.00
2			0.988424	0.98	11	100.00
3			0.980410	0.18	2	18.18
4			0.986643	0.80	9	81.82
5			0.988424	0.98	11	100.00
6			0.984862	0.62	7	63.64
7			0.988424	0.98	11	100.00
8			0.988424	0.98	11	100.00
9			0.988424	0.98	11	100.00
10			0.987533	0.89	10	90.91
11			0.986643	0.80	9	81.82
12			0.984862	0.62	7	63.64

การกำจัดจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน Tx1 ในกรณีที่ 1 ของตารางที่ 4.2 ซึ่งมีพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นดังรูปที่ 4.10 จากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 การติดตั้งตำแหน่งสถานีฐานที่ตำแหน่ง Tx1 เป็นตำแหน่งที่ไม่ค่อยเหมาะสม

ที่จะใช้ตัวสะท้อนคลื่นกำจัดจุดบอดเนื่องจากเกิดจุดบอดเป็นบริเวณกว้างและอยู่ห่างจากสถานีฐาน ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเพื่อให้สามารถรับรังสีตรงจากสถานีฐานแล้วมีกำลังคลื่นที่แรงพอไปยังจุดบอดและอยู่ไม่ห่างจากบริเวณจุดบอดเป็นไปได้อย่าง ในที่นี้จะกำหนดตำแหน่งติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น 2 ตำแหน่ง เพื่อแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งสถานีฐาน Tx1 มีพื้นที่ครอบคลุมที่ไม่ค่อยเหมาะสมที่จะใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อกำจัดจุดบอด หากต้องการใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อกำจัดจุดบอดจะต้องติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งที่รับรังสีตรงได้ อยู่ไม่ไกลจากสถานีฐานและไม่ห่างจากบริเวณจุดบอด ตำแหน่งสถานีฐาน และตำแหน่งติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นทั้ง 2 ตำแหน่งเป็นดังรูปที่ 4.9

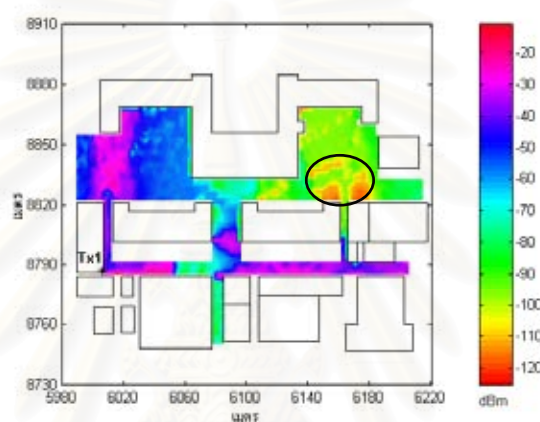


รูปที่ 4.9 ตำแหน่งสถานีฐาน Tx1 และตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นทั้ง 2 ตำแหน่ง

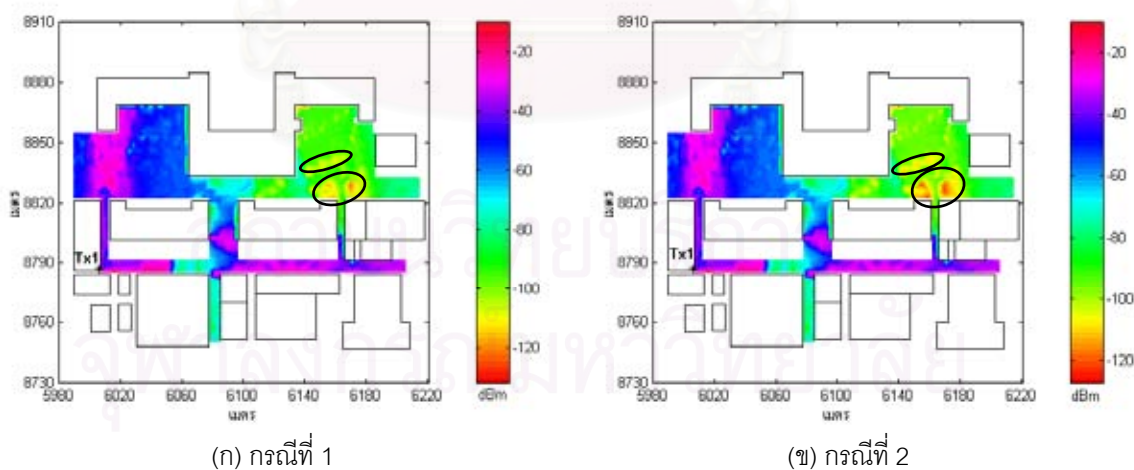
พิจารณาการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นที่ 1 ก่อน โดยพิจารณาที่ค่าปัจจัยของตัวสะท้อนคลื่นที่ 1 ดังตาราง 4.4 และแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเป็นดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.4 ค่าปัจจัยต่าง ๆ ของตัวสะท้อนคลื่น 1 เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx1

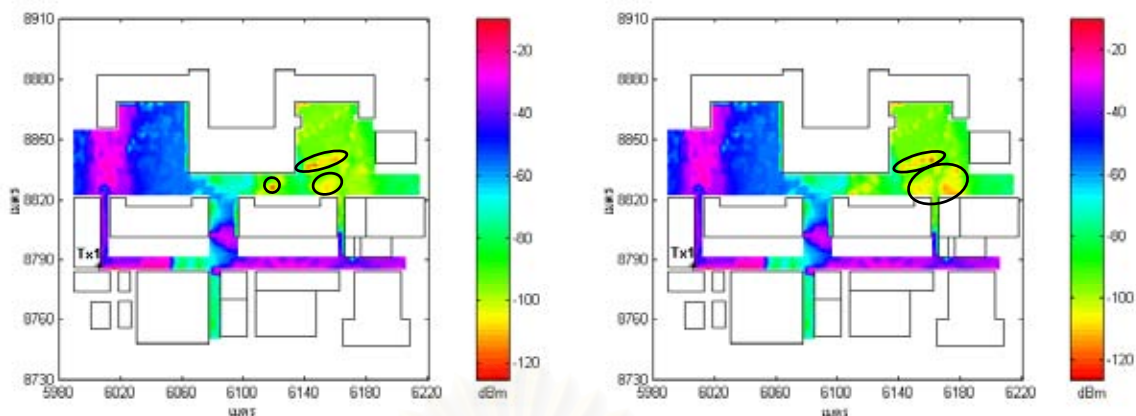
กรณี	สถานีฐาน	ความถี่ (GHz)	การปรับมุม (องศา)		ขนาดตัวสะท้อนคลื่น ( $\lambda$ )	ความสูงตัวสะท้อนคลื่น (เมตร)
			$\theta_{rot}$	$\gamma_{rot}$		
1	Tx1	1	110	10	3	25
2	Tx1	1	110	15	3	25
3	Tx1	1	130	5	3	25
4	Tx1	1	140	15	3	25



รูปที่ 4.10 พื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นของสถานีฐาน Tx1



รูปที่ 4.11 พื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งที่ 1 ของสถานีฐาน Tx1



(ค) กรณีที่ 3

(ง) กรณีที่ 4

รูปที่ 4.11 พื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งที่ 1 ของสถานีฐาน Tx1 (ต่อ)

พิจารณาแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นและหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นพบว่า การติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นตำแหน่งที่ 1 และปรับมุมทั้ง 4 กรณี ยังคงพบจุดบอดอยู่ในทั้ง 4 กรณีเนื่องจากตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นอยู่ห่างจากสถานีฐานมากถึง 135 เมตร ทำให้ความแรงของคลื่นที่สะท้อนจากตัวสะท้อนคลื่นไม่เพียงพอที่จะกำจัดจุดบอด เมื่อพิจารณาค่าความสามารถครอบคลุมตามตารางที่ 4.5 พบว่าการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งดังกล่าวสามารถเพิ่มค่าผลต่างความสามารถครอบคลุมได้มากที่สุดเป็น 1.24 เเปอร์เซ็นต์ สำหรับกรณีที่ 3 และเมื่อพิจารณาตำแหน่งจุดบอดที่อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการกำจัด 60 ตำแหน่ง (ตำแหน่งที่อยู่ในวงรีรูปที่ 4.10) พบว่าการใช้ตัวสะท้อนคลื่นตำแหน่งที่ 1 นี้สามารถกำจัดจุดบอดได้มากที่สุดเพียง 21.66 เเปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

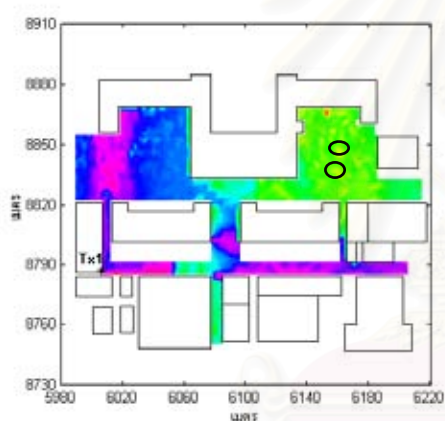
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบความสามารถครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx1 ตัวสะท้อนคลื่นอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1

กรณี	จำนวนจุดทดสอบ	ค่าความสามารถครอบคลุม		ผลต่าง (เปอร์เซ็นต์)	จุดทดสอบที่ต้องการกำจัดจุดบอด 60 ตำแหน่ง	
		ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น	หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น		กำจัดได้ (ตำแหน่ง)	คิดเป็น (เปอร์เซ็นต์)
1	1123	0.921638	0.925200	0.36	2	3.33
2			0.926091	0.45	3	5.00
3			0.934105	1.24	13	21.66
4			0.925200	0.36	2	3.33

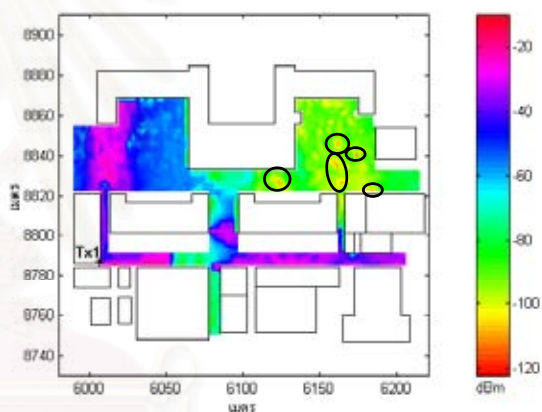
พิจารณาการติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นที่ 2 ในรูปที่ 4.9 ซึ่งค่าปัจจัยของตัวสะท้อนคลื่นที่ 2 เป็นดังตารางที่ 4.6 และแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเป็นดังรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.6 ค่าปัจจัยต่าง ๆ ของตัวสะท้อนคลื่น 2 เมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx1

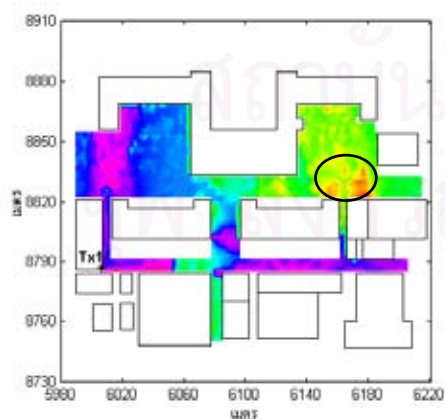
กรณี	สถานีฐาน	ความถี่ (GHz)	การปรับมุม (องศา)		ขนาดตัวสะท้อนคลื่น ( $\lambda$ )	ความสูงตัวสะท้อนคลื่น (เมตร)
			$\theta_{rot}$	$\gamma_{rot}$		
1	Tx1	1	110	15	3	26
2	Tx1	1	120	20	3	26
3	Tx1	1	130	10	3	26
4	Tx1	1	130	15	3	26



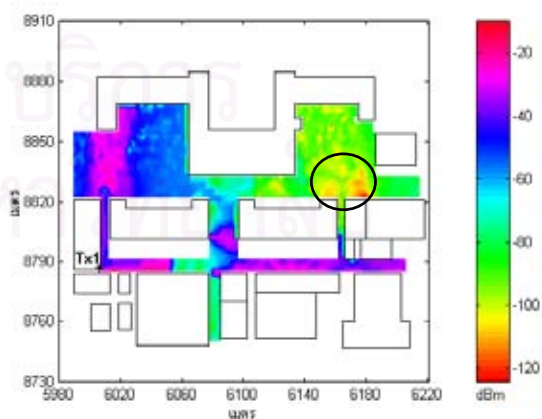
(ก) กรณีที่ 1



(ข) กรณีที่ 2



(ค) กรณีที่ 3



(ง) กรณีที่ 4

รูปที่ 4.12 พื้นที่ครอบคลุมหลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่ตำแหน่งที่ 2 ของสถานีฐาน Tx1

ตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นตำแหน่งที่ 2 ย้ายตำแหน่งมาให้ใกล้สถานีฐานมากขึ้น ระยะห่างจากสถานีฐานมายังตัวสะท้อนคลื่นเป็น 74.16 เมตร และตัวสะท้อนคลื่นสูง 26 เมตร จากแผนภาพพื้นที่ครอบคลุมพบว่าตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นที่ 2 และมีการปรับมุมตามกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 สามารถลดจำนวนจุดบอดได้มีค่าผลต่างความสามารถครอบคลุมประมาณ 3 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาตำแหน่งจุดบอดที่ต้องการกำจัด 62 ตำแหน่งก็สามารถลดจำนวนจุดบอดได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับกรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 ก็สามารถลดจำนวนจุดบอดได้เช่นกัน แต่ไม่มากเท่ากับกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานมากกว่าและอยู่ไม่ไกลจากบริเวณจุดบอดมีความเป็นไปได้ที่จะลดจำนวนจุดบอดได้มากกว่า แต่ต้องมีการปรับมุมที่เหมาะสมด้วย (เปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นที่ 1 กับตัวสะท้อนคลื่นที่ 2)

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบความสามารถครอบคลุมเมื่อสถานีฐานอยู่ที่ตำแหน่ง Tx1 ตัวสะท้อนคลื่นอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2

กรณี	จำนวนจุดทดสอบ	ค่าความสามารถครอบคลุม		ผลต่าง (เปอร์เซ็นต์)	จุดทดสอบที่ต้องการกำจัดจุดบอด 62 ตำแหน่ง	
		ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น	หลังติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น		กำจัดได้ (ตำแหน่ง)	คิดเป็น (เปอร์เซ็นต์)
1	1123	0.921638	0.971505	4.99	51	82.26
2			0.956367	3.47	39	62.90
3			0.933215	1.58	17	27.42
4			0.932324	1.07	18	29.03

บริเวณจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน Tx1 นี้เป็นบริเวณที่ใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อกำจัดจุดบอดทำได้ยากกว่าบริเวณจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน Tx3 เนื่องจากบริเวณจุดบอดเกิดเป็นบริเวณกว้างและอยู่ไกลจากสถานีฐานทำให้การหาตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่น การปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นเพื่อลดจำนวนจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมทำได้ยากกว่า

## สรุป

การกำหนดตำแหน่งสถานีฐานที่เหมาะสมเป็นแนวทางหนึ่งของการลดจำนวนจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมและยังสามารถเคลื่อนย้ายจุดบอดไปยังบริเวณที่ต้องการเพื่อสามารถกำจัดจุดบอดได้ อีกแนวทางหนึ่งของการลดจำนวนจุดบอดคือการใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อกำจัดจุดบอด โดยมีแนวทางในการเลือกค่าปัจจัยที่ช่วยลดจำนวนจุดบอดเบื้องต้นคือ พิจารณาพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานว่าเกิดจุดบอดบริเวณใด บริเวณที่เหมาะสมที่จะใช้ตัวสะท้อนคลื่นในการกำจัดจุดบอด



ต้องมีบริเวณไม่กว้างนักเนื่องจากได้ใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพียงตัวเดียว ทำให้มีทิศทางที่จะสะท้อนคลื่นไปยังจุดบอดเป็นบริเวณไม่กว้างมากนอกจากจะใช้ตัวสะท้อนคลื่นที่มีขนาดใหญ่ และตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นควรเป็นตำแหน่งที่สามารถรับรังสีตรงจากสถานีฐานได้เพื่อให้มีกำลังคลื่นที่แรงพอไปยังบริเวณจุดบอด บริเวณจุดบอดต้องรับคลื่นที่สะท้อนมาจากตัวสะท้อนคลื่นโดยไม่มีการบดบัง และระยะทางระหว่างตัวสะท้อนคลื่นกับบริเวณจุดบอดไม่ควรไกลกันมากนัก เพื่อให้กำลังคลื่นมีความแรงมากพอ สำหรับการปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นก็เพื่อให้มีกำลังคลื่นที่แรงและวิถีภาคที่เหมาะสมที่จะช่วยลดจำนวนจุดบอดและเพื่อปรับทิศทางของคลื่นให้ไปยังบริเวณจุดบอด

ผลการกำจัดจุดบอดภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าสามารถเคลื่อนย้ายสถานีฐานไปยังตำแหน่งที่เหมาะสมและเกือบจะไม่มีบริเวณจุดบอดเลย นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งสถานีฐานเพื่อให้สามารถลดจำนวนจุดบอดและกำจัดจุดบอดได้ การกำจัดจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน Tx3 ทำได้โดยติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นที่บริเวณที่รับรังสีตรงจากสถานีฐานได้ ตัวสะท้อนคลื่นต้องสะท้อนคลื่นไปยังจุดบอดโดยไม่มีการบดบัง และตำแหน่งตัวสะท้อนคลื่นอยู่ไม่ไกลจากจุดบอด การปรับมุมตัวสะท้อนคลื่น และความสูงที่เหมาะสมก็สามารถกำจัดจุดบอดที่ไม่ต้องการได้ การปรับมุมและการเลือกความสูงพิจารณาจากคลื่นที่มาตกกระทบตัวสะท้อนคลื่นและมีทิศทางไปยังจุดบอดได้ จากกรณีที่ยกตัวอย่างมานั้นมีเพียงกรณีเดียวที่มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดจุดบอดได้ต่ำกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับจุดบอดในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน Tx1 จุดบอดเกิดเป็นบริเวณกว้างและตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเพื่อให้มีกำลังคลื่นที่แรงพอก็ทำได้ยากกว่ากรณีของ Tx3 แต่การใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพื่อลดจำนวนจุดบอดก็มีความเป็นไปได้เช่นกัน การประยุกต์ใช้ตัวสะท้อนคลื่นในพื้นที่บริการจริงก็มีความเป็นไปได้โดยพิจารณาบริเวณที่ต้องการกำจัดจุดบอด หากว่าเป็นบริเวณที่มีลักษณะเป็นชอย ตำแหน่งของตัวสะท้อนคลื่นอาจติดตั้งต่ำกว่าอาคารโดยรอบได้แต่ต้องมีกำลังคลื่นที่แรงพอที่จะสะท้อนไปยังบริเวณจุดบอดได้และมีวิถีภาคที่เหมาะสมด้วย และหากบริเวณจุดบอดเป็นบริเวณกว้างตัวสะท้อนคลื่นควรอยู่สูงกว่าอาคารโดยรอบและมีกำลังคลื่นที่แรงพอที่จะสะท้อนไปยังบริเวณจุดบอด สำหรับการปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นและขนาดก็ขึ้นอยู่กับลักษณะบริเวณจุดบอดที่ต้องการกำจัด ซึ่งต้องพิจารณาเป็นกรณี ๆ ไป

## สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเคลื่อนย้ายจุดยอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและความสูงของสถานีฐานเพื่อประโยชน์ในการออกแบบระบบสื่อสารให้สามารถกำหนดตำแหน่งสถานีฐานให้มีพื้นที่ครอบคลุมทั่วถึง และเกิดจุดยอดตรงบริเวณที่มีผู้ใช้บริการจำนวนน้อย หรือบริเวณที่สามารถกำจัดจุดยอดได้ การเคลื่อนย้ายของจุดยอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและความสูงของสถานีฐานพบว่าในกรณีที่สถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคารโดยรอบมาก ๆ การแพร่กระจายคลื่นจะถูกจำกัดด้วยผนังอาคารทำให้บริเวณจุดยอดมักเป็นบริเวณที่รับรังสีตรงไม่ได้ ดังนั้นเงื่อนไขที่ทำให้เกิดจุดยอดที่สำคัญเงื่อนไขหนึ่งคือจุดยอดมักเป็นตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่ไม่สามารถรับรังสีตรงที่มาจากสถานีฐานได้ จากการศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดยอดยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสถานีฐานเมื่อสถานีฐานอยู่ต่ำกว่าอาคารสามารถเห็นการเคลื่อนย้ายของจุดยอดได้ชัดเจนกว่าการเปลี่ยนแปลงความสูงของสถานีฐาน สำหรับการทำนายการเกิดจุดยอดสามารถทำได้โดยพิจารณารังสีที่มีนัยสำคัญสูงสองรังสีที่สามารถเดินทางไปยังสถานีเคลื่อนที่ในบริเวณจุดยอด หากรังสีที่มีนัยสำคัญสูงสองรังสีที่สามารถเดินทางไปยังตำแหน่งทดสอบมีค่าความต่างวิถีภาคเป็น  $180 \pm 45$  องศา ตำแหน่งนั้นก็มีความเป็นไปได้ของการเป็น จุดยอดสูง นอกจากนี้สามารถตรวจสอบตำแหน่งที่คาดว่าจะเกิดจุดยอดโดยการเคลื่อนย้ายตำแหน่งสถานีเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ตำแหน่งทดสอบทั้ง 4 ด้าน ระยะห่างจากตำแหน่งที่พิจารณาประมาณหนึ่งความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ตำแหน่ง และถ้ารังสีที่มีนัยสำคัญสูงที่ไปยังตำแหน่งดังกล่าวมีค่าความต่างวิถีภาคเป็น  $180 \pm 45$  องศา ก็ถือได้ว่าตำแหน่งที่พิจารณามีความเป็นไปได้ของการเกิดจุดยอดสูง เนื่องจากที่จริงแล้วจุดยอดไม่ได้มีลักษณะเป็นจุดแต่เป็นบริเวณเล็ก ๆ ที่มีกำลังรับต่ำ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดจุดยอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่น 2 บริเวณคือ บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การวิเคราะห์การสะท้อนคลื่นได้ใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้สำหรับปัญหาความถี่ต่ำ เนื่องจากขนาดของตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้มีขนาดสองถึงห้าเท่าของความยาวคลื่น ตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้เป็นแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบแบนราบ สนามไฟฟ้าที่ไปยังบริเวณจุดยอดเมื่อใช้ตัวสะท้อนคลื่นจะเป็นผลรวมของสนามไฟฟ้าที่คำนวณจากกลไกการแพร่กระจายคลื่นเมื่อคลื่นเดินทางไปในภูมิภาคลักษณะต่าง ๆ และสนามไฟฟ้าที่กระเจิงหรือสะท้อนมาจากตัวสะท้อนคลื่น หากสนามไฟฟ้าที่สะท้อนมาจากตัวสะท้อนคลื่นมีกำลังที่แรงพอ และมีวิถีภาคเสริมกับคลื่นอื่น ๆ

จุดบอดก็จะถูกกำจัดไป ผลการคำนวณการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ เมื่อใช้ตัวสะท้อนคลื่นขนาด 2 และ 3 เท่าของความยาวคลื่น มีการปรับมุมต่าง ๆ กัน และมีเงื่อนไขว่าตัวสะท้อนคลื่นต้องสามารถรับรังสีตรงจากสถานีฐานได้ และสะท้อนกำลังคลื่นไปยังบริเวณจุดบอดโดยไม่มี การบดบังจากสิ่งกีดขวาง พบว่าการใช้ตัวสะท้อนคลื่นสามารถเพิ่มกำลังรับที่บริเวณจุดบอดให้มีกำลังสูงขึ้น และไม่เป็นจุดบอด ผลการทดลองก็เป็นไปในทางเดียวกัน คือตัวสะท้อนสามารถเพิ่มกำลังรับในบริเวณจุดบอดและสามารถกำจัดจุดบอดในบริเวณที่ศึกษาได้ สังเกตจากค่าความสามารถครอบคลุมในบริเวณศึกษาเมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นแล้ว สามารถเพิ่มความสามารถครอบคลุมได้ ภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์มีระดับกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB ถึง 5 dB และผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเท่ากับ 0.7164 และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเท่ากับ 0.6768 สำหรับบริเวณศาลาพระเกี้ยวเป็นบริเวณที่ครอบคลุมโดยสถานีฐานที่ใช้งานจริง ได้ทำการศึกษา 3 เส้นทาง ก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นปรากฏว่าไม่พบจุดบอดทั้ง 3 เส้นทางเนื่องจากสถานีฐานมีกำลังส่งสูงทำให้ครอบคลุมได้อย่างทั่วถึง เมื่อติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นในเส้นทางทั้ง 3 เส้นทางก็สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับให้สูงขึ้น โดยมีระดับกำลังคลื่นที่เพิ่มขึ้นประมาณ 2 dB ถึง 3 dB ซึ่งผลการคำนวณและการทดลองก็มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน บริเวณศาลาพระเกี้ยวเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยก่อนติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเท่ากับ 0.4093 และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยหลังจากติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นเท่ากับ 0.4298

แนวทางในการลดจำนวนจุดบอด ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาตำแหน่งสถานีฐาน ตำแหน่งการวางตัวสะท้อนคลื่น ลักษณะการปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นที่เหมาะสม การหาตำแหน่งสถานีฐานที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถครอบคลุมพื้นที่บริการได้ทั่วถึงทำได้โดยการติดตั้งสถานีฐานให้สูงกว่าสิ่งกีดขวางหรืออาคารสำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่เป็นบริเวณกว้าง และสำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่เป็นบริเวณแคบ ความสูงของสถานีฐานอาจไม่จำเป็นต้องอยู่สูงกว่าสิ่งกีดขวางก็ได้ ตำแหน่งสถานีฐานที่เหมาะสมไม่เพียงแต่จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ทั่วถึงแต่อาจยังสามารถเคลื่อนย้ายจุดบอดไปยังบริเวณที่สามารถกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นได้ บริเวณที่เหมาะสมที่จะใช้ตัวสะท้อนคลื่นในการกำจัดจุดบอดต้องมีบริเวณไม่กว้างนักเนื่องจากได้ใช้ตัวสะท้อนคลื่นเพียงตัวเดียว และตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นควรเป็นตำแหน่งที่สามารถรับรังสีตรงจากสถานีฐานได้เพื่อให้มีกำลังคลื่นที่แรงพอไปยังบริเวณจุดบอด บริเวณจุดบอดต้องรับคลื่นที่สะท้อนมาจากตัวสะท้อนคลื่นโดยไม่มี การบดบัง และระยะทางระหว่างตัวสะท้อนคลื่นกับบริเวณจุดบอดไม่ควรไกลกันมากนัก เพื่อให้กำลังคลื่นมีความแรงมากพอ สำหรับการปรับมุมตัวสะท้อนคลื่นก็เพื่อจะให้กำลังคลื่น

ที่แรงและวิฤภาคที่เหมาะสมที่จะช่วยลดจำนวนจุดบอดและเพื่อปรับทิศทางของคลื่นให้ไปยังบริเวณจุดบอด

### ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองเพื่อศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดและการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นมีอุปสรรคเกี่ยวกับยานพาหนะที่จอดอยู่และสัญจรไปมา ซึ่งเป็นการยากที่จะควบคุม ดังนั้นอาจต้องมีการหาค่าชดเชยของยานพาหนะ หรือศึกษาผลกระทบของยานพาหนะที่มีต่อคลื่นที่รับได้ให้เป็นที่ชัดเจนเพื่อให้มีความถูกต้องในการทดลองมากขึ้น
2. งานวิจัยนี้ยังพิจารณาเพียงสิ่งกีดขวางที่เป็นอาคารที่เป็นผิวเรียบ ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างผลการคำนวณและผลการทดลองได้
3. การวิเคราะห์การสะท้อนคลื่นโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันฐานที่ประมาณนิพจน์ของกระแสเป็นฟังก์ชันคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งการคำนวณเพื่อให้ได้ความแม่นยำมากขึ้นอาจต้องมีการเปลี่ยนฟังก์ชันฐานที่ใช้ โดยอาจใช้ฟังก์ชัน สามเหลี่ยมแทนได้
4. การกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นในงานวิจัยนี้ไม่ได้คำนวณเกี่ยวกับผลกระทบของตัวสะท้อนคลื่นที่จะบดบังทางเดินคลื่นที่จะเดินทางไปยังบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ตัวสะท้อนคลื่นที่มีขนาดไม่ใหญ่นัก หากตัวสะท้อนคลื่นที่มีขนาดใหญ่ต้องมีการคำนึงถึงผลกระทบดังกล่าวด้วย
5. การติดตั้งตัวสะท้อนคลื่นอาจทำให้เสียทัศนวิสัย สร้างความไม่สวยงาม ดังนั้นการประยุกต์ใช้ตัวสะท้อนคลื่นอาจต้องมีการดัดแปลงตัวสะท้อนคลื่นให้มีลักษณะสวยงาม หรืออาจประยุกต์ใช้ร่วมกับป้ายโฆษณาที่มีอยู่

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] A. Kajiwara. Circular polarization diversity with reflector in indoor radio channel. IEEE International Conference on Communications. ICC'97 Montreal. Towards the Knowledge Millennium. vol. 2 (June 1997): pp. 624-628.
- [2] A. Kajiwara. Circular polarization diversity with passive reflector in indoor radio channel. IEEE Transaction on Vehicular Technology. vol. 49, no. 3 (May 2000): pp. 778-782.
- [3] V. Ereeg, A. J. Rustako, Jr. and R. S. Raman. Diffraction around corners and its effects on the microcell coverage area in urban and suburban environments at 900 MHz, 2 GHz and 6 GHz. IEEE Transaction on Vehicular Technology. vol. 43, no. 3 (August 1994): pp. 762-766.
- [4] วันชัย อัมพูนีวรธรณ. การจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับการสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมือง. วิทยานิพนธ์ ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [5] Roger F.Harrington. Field Computation by Moment Method. Malabar, Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, 1968.
- [6] F. Manuel, P. Rafael, Basterrechea and E. Gago. The CG-FFT method application of signal processing techniques to electromagnetics. Boston: Artech House Publishers, 1994.
- [7] Randy Bancroff. Understanding electromagnetic scattering using the moment method. Boston: Artech House Publishers, 1996.
- [8] A. W. Glisson and D.R. Wilton. Simple and efficient numerical methods for problems of electromagnetic radiation and scattering from surfaces. IEEE Transaction on Antennas and Propagation. vol. 28, no. 5 (September 1980): pp. 593-603.
- [9] K. Mahadevan, H. A. Auda and A. w. Glisson. Scattering from a Thin Perfectly Conducting Square Plate. IEEE Antennas and Propagation Magazine. vol. 34, no. 1 (February 1992): pp. 26-32.

- [10] Y. R. Samii and R. Mittra. Integral Equation Solution and RCS Computation of a Thin Rectangular Plate. IEEE Transaction on Antennas and Propagation. vol. 22, no. 4 (July 1974): pp. 608-610.
- [11] R. A. Ross. Radar Cross Section of Rectangular Flat Plates as a Function of Aspect Angle. IEEE Transaction on Antennas and Propagation. vol. 14, no. 3 (July 1966): pp. 329-335.
- [12] S. M. Rao and D. R. Wilton. Electromagnetic Scattering by Surfaces of Arbitrary Shape. IEEE Transaction on Antennas and Propagation. vol. 30, no. 3 (May 1982): pp. 409-418.
- [13] D. L. Knepp and J. Goldhirsh. Numerical Analysis of Electromagnetic Radiation Properties of Smooth Conducting Bodies of Arbitrary Shape. IEEE Transaction on Antennas and Propagation. vol. 20, no. 3 (May 1972): pp. 383-388.
- [14] C. A. Balanis. Advanced engineering electromagnetics. New York: John Wiley & Sons. 1989.
- [15] สุรเชษฐ กอสิริขจร. การจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับการวางแผนระบบสื่อสารเคลื่อนที่ในเขตเมือง. วิทยานิพนธ์ ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.
- [16] Warren L. Stutzman and Gary A. Thiele. Antenna theory and design (second edition). John Wiley & Sons. 1998.



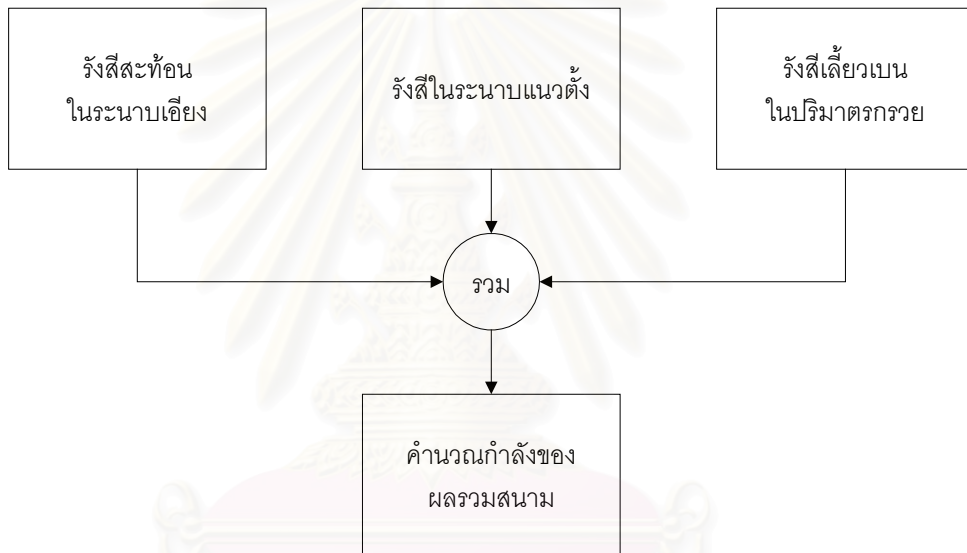
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### กลไกการแพร่กระจายคลื่นที่พิจารณาในแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบจำลองเชิงรังสีที่ใช้ระเบียบวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปมาวิเคราะห์กลไกต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าที่สายอากาศรับพิจารณาจากผลรวมของสนามไฟฟ้าของรังสีทุก ๆ รังสีที่สามารถเดินทางจากสถานีฐานถึงสถานีเคลื่อนที่ได้ในระนาบแนวตั้ง ระนาบเอียง และรังสีเลี้ยวเบนที่มุมอาคาร การพิจารณาแนวรังสีและสนามไฟฟ้าของแต่ละรังสีจะแยกพิจารณาที่ระนาบดังสรุปในรูปที่ ก.1



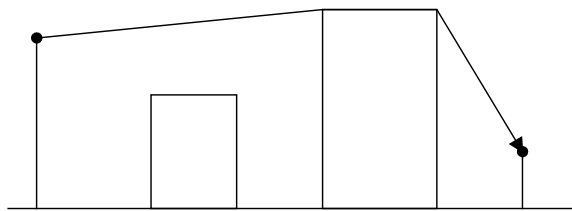
รูปที่ ก.1 ขั้นตอนการคำนวณสนามไฟฟ้าแบบกึ่งสามมิติ [4]

รังสีที่พิจารณาในระนาบแต่ละระนาบเป็นดังนี้

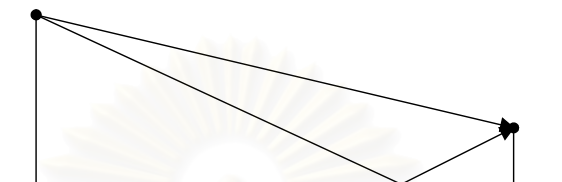
#### ระนาบตั้งฉาก

ในระนาบตั้งฉาก ทางเดินรังสีที่เป็นไปได้มี 3 รูปแบบคือทางเดินรังสีเป็นเส้นตรงจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับโดยไม่ผ่านสิ่งกีดขวาง ทางเดินรังสีที่เกิดการสะท้อนที่พื้นดินก่อนถึงสายอากาศรับ และทางเดินรังสีที่เกิดจากการเลี้ยวเบนหลายครั้งที่ขอบของยอดอาคาร (รูปที่ ก.2)





(1) แนวนรังสีเลี้ยวเบน

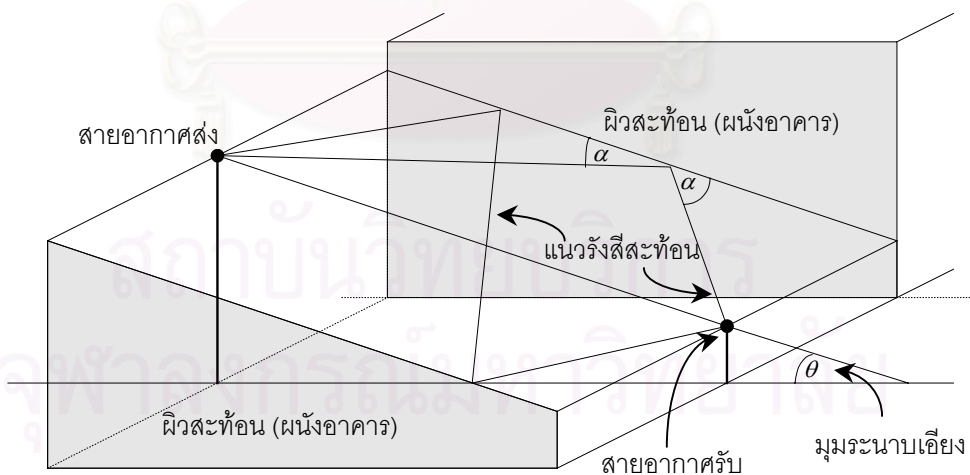


(2) แนวนรังสีตรงและรังสีสะท้อน

รูปที่ ก.2 แนวนรังสีในระนาบตั้งฉาก

ระนาบเอียง

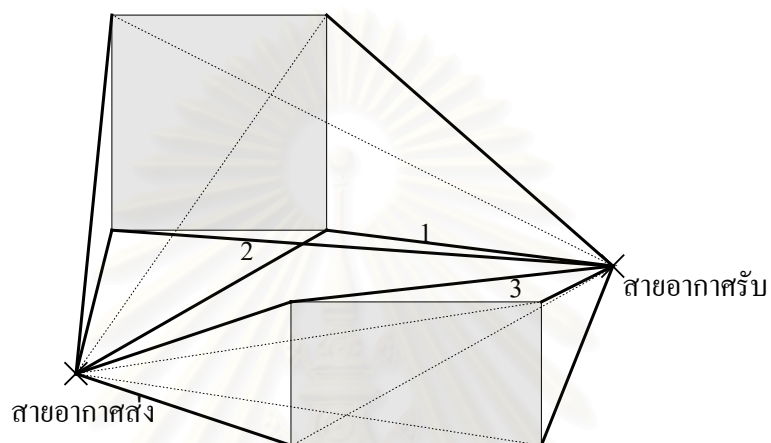
แนวนรังสีหลักที่เกิดในระนาบเอียงคือแนวนรังสีที่เกิดจากการสะท้อนหลายครั้ง โดยจุดสะท้อนจะอยู่บนแนวตัดกันระหว่างระนาบเอียงและผิวอาคารซึ่งตั้งฉากกับพื้นโลกดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 ระนาบเอียงและแนวตัดกับพื้นผิวสะท้อน

### ระนาบรังสีเดี่ยวเบน

แบบจำลองนี้ได้พิจารณารังสีเดี่ยวเบนเฉพาะกรณีที่เกิดการเลี้ยวเบนหนึ่งครั้งเท่านั้น ซึ่ง จะพิจารณาจุดขอบในระนาบระดับสองมิติก่อนแล้วจึงขยายผลเป็นจุดเดี่ยวเบนในพิกัดสามมิติ โดยการคำนวณความสูงจากระนาบระดับของจุด จากนั้นจึงเลือกจุดเดี่ยวเบนที่มีอยู่จริงบนขอบ ด้านข้างของอาคาร ลักษณะรังสีเดี่ยวเบนที่พิจารณาเป็นดังนี้



รูปที่ ก.4 เส้นทางเชื่อมระหว่างสายอากาศส่งมายังจุดขอบ และจากจุดขอบไปยังสายอากาศรับ

สำหรับรายละเอียดการคำนวณอย่างละเอียดสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง [4]

## ภาคผนวก ข

### รายละเอียดการทดลอง

#### บริเวณทดสอบ

การทดลองวัดการแพร่กระจายคลื่นได้ทดลอง 2 บริเวณคือ บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบริเวณศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทดลองเพื่อศึกษาการเคลื่อนย้ายของจุดบอดได้ทดลองภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์เท่านั้น แต่สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาการกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นได้ทำการทดลองทั้งภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบริเวณศาลาพระเกี้ยว สภาพแวดล้อมที่ทดลองโดยทั่วไปเป็นดังรูปที่ ข.1



บริเวณลานเกียร์



บริเวณที่รั้วบังสี่ตรงไม่ได้

(1) บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข.1 บริเวณทดสอบ



บริเวณที่รปรังสีตรงได้

(1) บริเวณภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ต่อ)



เส้นทางที่ 1 บริเวณด้านหน้าอาคารมหามกุฏ



เส้นทางที่ 2 บริเวณด้านหน้าสถาบันภาษาและศาลาพระเกี้ยว

(2) บริเวณศาลาพระเกี้ยว

รูปที่ ๑.1 บริเวณทดสอบ (ต่อ)



เส้นทางที่ 3 บริเวณด้านข้างอาคารภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

(2) บริเวณศาลาพระเกี้ยว (ต่อ)

รูปที่ ข.1 บริเวณทดสอบ (ต่อ)

#### การทดลองภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์

การทดลองได้ตั้งสถานีฐานขึ้นเองซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณ และสายอากาศชั่วคราว ความถี่ปฏิบัติการเป็น 1 GHz สถานีเคลื่อนที่ใช้สายอากาศชั่วคราว ตั้งอยู่บนรถเข็นขนาดเล็ก สำหรับเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งต่าง ๆ ต่อกับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ สถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่เป็นดังนี้ดังรูปที่ ข.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศชั่วคราวที่ใช้ เป็นดังรูป ข.3 และการทดลองได้กำหนดตำแหน่งทดสอบหรือตำแหน่งรับในบริเวณทดสอบดังรูปที่ ข.4 จำนวนตำแหน่งทดสอบทั้งบริเวณมี 330 ตำแหน่งทดสอบ

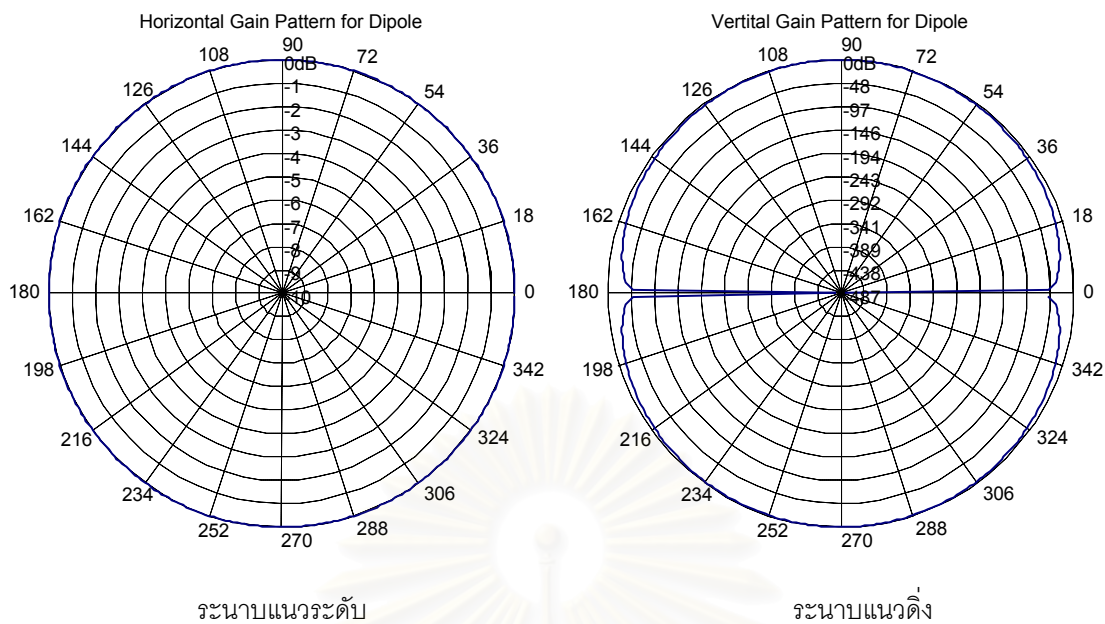


(1) สถานีฐาน

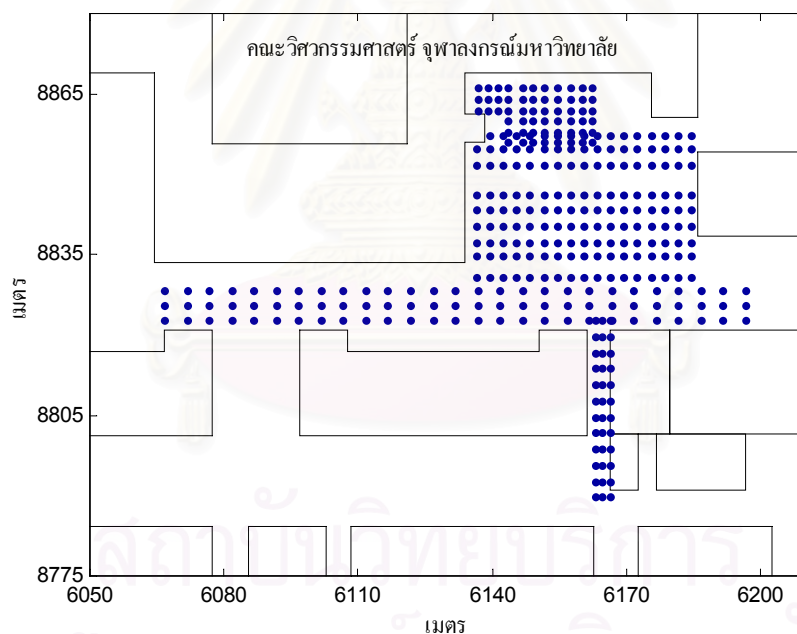


(2) สถานีเคลื่อนที่

รูปที่ ข.2 สถานีฐาน และสถานีเคลื่อนที่ที่ใช้ทดลองภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์



ข.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศขั้วคู่



รูปที่ ข.4 ตำแหน่งรับของสถานีเคลื่อนที่

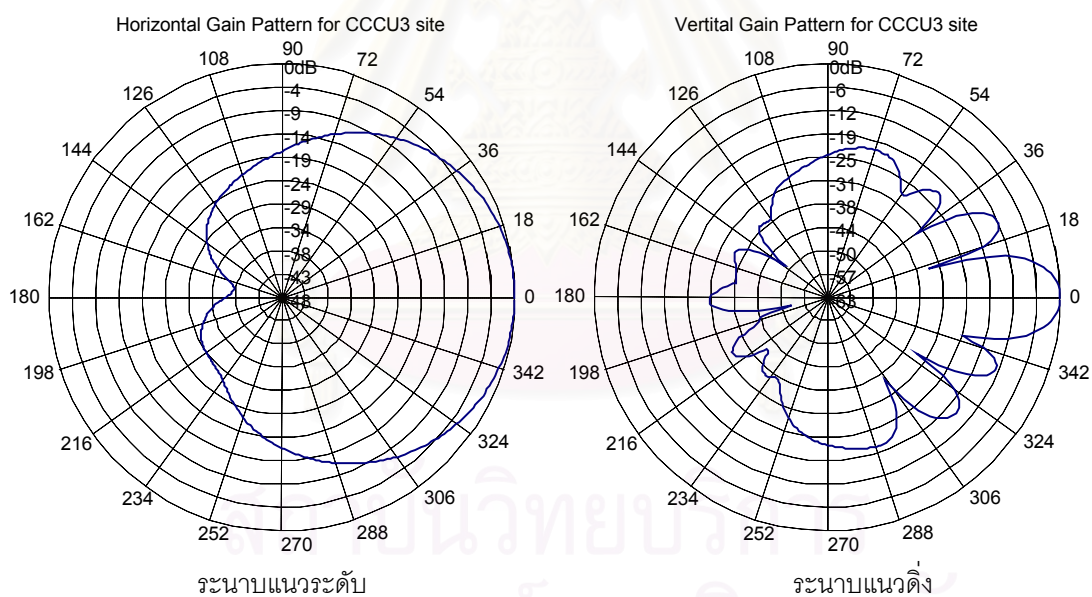
การทดลองบริเวณศาลาพระเกี้ยว

บริเวณศาลาพระเกี้ยวใช้สถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM 900 และสายอากาศรับใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งได้ลงโปรแกรม Net monitor ซึ่งสามารถอ่านกำลังคลื่นในเซกเตอร์ที่ต้องการได้ การทดลองวัดดำเนินการโดยใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เดินไปตามถนนและบันทึกกำลังคลื่นสถานีฐานของการทดลองบริเวณศาลาพระเกี้ยวเป็นดังรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 สถานีฐานของการทดลองบริเวณศาลาพระแก้ว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่เป็นสถานีฐานของการทดลองบริเวณศาลาพระแก้ว เป็นรูปที่ ข.6



ข.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่เป็นสถานีฐานของการทดลองบริเวณศาลาพระแก้ว

ลักษณะตัวสะท้อนคลื่น

การทดลองกำจัดจุดบอดโดยใช้ตัวสะท้อนคลื่นใช้ตัวสะท้อนคลื่นแบบแบนราบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดขนาด 2 เท่าของความยาวคลื่น และ 3 เท่าของความยาวคลื่น สำหรับการทดลองภายในคณะวิศวกรรมศาสตร์ การทดลองบริเวณศาลาพระแก้วใช้ตัวสะท้อนคลื่นขนาดประมาณ 5 เท่าของความยาวคลื่น รูปที่ ข.7 แสดงตัวอย่างของตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้เป็นดังนี้



(1) ตัวสะท้อนคลื่นขนาด 2 เท่าความยาวคลื่น



(2) ตัวสะท้อนคลื่นขนาด 3 เท่าความยาวคลื่น

รูปที่ ข.7 ลักษณะตัวสะท้อนคลื่น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ค

### การคำนวณสนามไฟฟ้าที่เกิดจากรังสีเลี้ยวเบนที่สันขอบแนวตั้งของอาคาร

การพิจารณารังสีเลี้ยวเบนที่สันขอบแนวตั้งของอาคาร โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปที่จุดเลี้ยวเบน  $Q_D=(x,y,z)$  เมื่อ  $x$  และ  $y$  เป็นพิกัดของมุมอาคารในระนาบระดับ และพิกัดตำแหน่งของสายอากาศส่งและพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่เป็น  $Tx=(x_t,y_t,z_t)$  และ  $Rx=(x_r,y_r,z_r)$  ตามลำดับ การเกิดรังสีเลี้ยวเบนจะเป็นไปตามกฎการเลี้ยวเบนของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป [14] ดังสมการ

$$\hat{s}_i \cdot \hat{e} = \hat{s}_d \cdot \hat{e} \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ  $\hat{s}_i$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรังสีตกกระทบกำหนดโดย  $\hat{s}_i = \frac{(Q_D - Tx)}{|Q_D - Tx|}$

$\hat{s}_d$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรังสีเลี้ยวเบนกำหนดโดย  $\hat{s}_d = \frac{(Rx - Q_D)}{|Rx - Q_D|}$

$\hat{e}$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยสัมผัสแนวแกนขอบเลี้ยวเบนจากรูปที่ 3.12

จากรูปที่ ค.1 เมื่อให้  $\hat{e} = \hat{a}_z$  จะสามารถหาจุดเลี้ยวเบนจากสมการ (ค.1) ได้ดังนี้

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

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

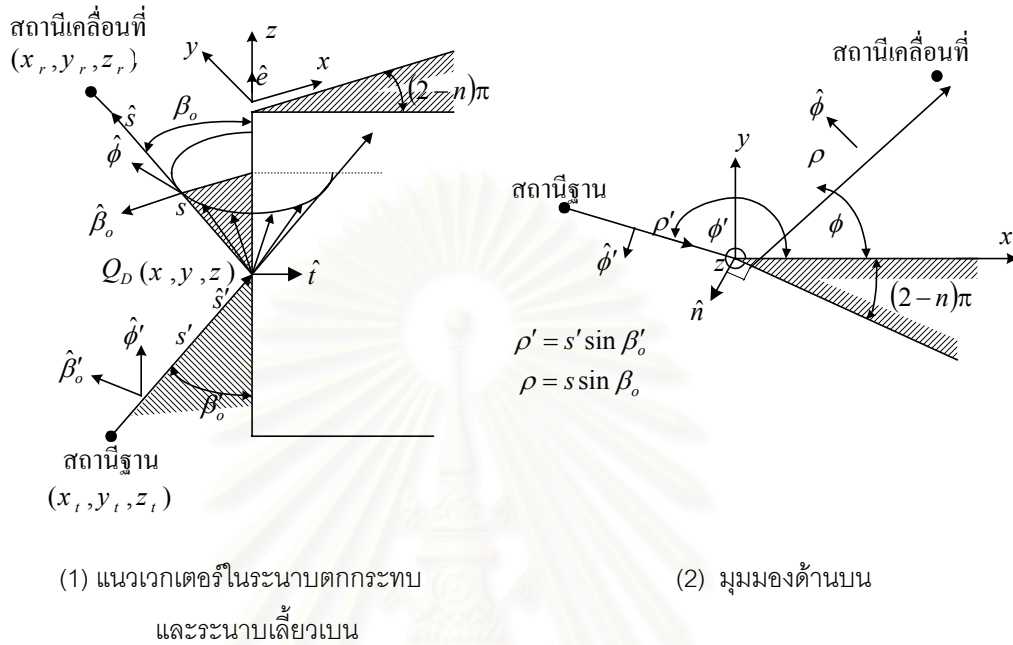
$$(z-z_t)^2 \cdot [(x_r-x)^2 + (y_r-y)^2 + (z_r-z)^2] = (z_r-z)^2 \cdot [(x-x_t)^2 + (y-y_t)^2 + (z-z_t)^2]$$

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

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

$$z = \frac{\sqrt{a} \cdot z_t + \sqrt{b} \cdot z_r}{\sqrt{a} + \sqrt{b}} \quad \text{หรือ} \quad z = \frac{\sqrt{a} \cdot z_t - \sqrt{b} \cdot z_r}{\sqrt{a} - \sqrt{b}} \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ  $z$  คือความสูงของจุดเลี้ยวเบน,  $z_i$  และ  $z_r$  คือความสูงของสายอากาศส่งและรับตามลำดับ  $\sqrt{a}$  คือระยะทางจากจุดเลี้ยวเบนไปถึงจุดรับในระนาบระดับ และ  $\sqrt{b}$  คือระยะทางจากสายอากาศส่งถึงจุดเลี้ยวเบนในระนาบระดับ



รูปที่ ค.1 ลักษณะเวกเตอร์ที่ขอบเลี้ยวเบน

เมื่อกำหนดให้เวกเตอร์หนึ่งหน่วย  $\hat{t}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์  $\hat{e}$  อยู่บนด้านประกอบของรูปสี่เหลี่ยมเวกเตอร์และมุมในระบบพิกัดของจุดเลี้ยวเบนในรูปที่ ค.1 หาได้จาก

$$\hat{n} = \hat{t} \times \hat{e} \tag{ค.3.1}$$

$$\hat{\phi}' = \frac{\hat{e} \times \hat{s}'}{\|\hat{e} \times \hat{s}'\|} \tag{ค.3.2}$$

$$\hat{\beta}'_o = \hat{s}' \times \hat{\phi}' \tag{ค.3.3}$$

$$\hat{\phi} = \frac{\hat{s} \times \hat{e}}{\|\hat{s} \times \hat{e}\|} \tag{ค.3.4}$$

$$\hat{\beta}_o = \hat{s} \times \hat{\phi} \tag{ค.3.5}$$

$$\beta = \beta_o = \beta'_o = \sin^{-1}(\sqrt{1 - (\hat{s}' \cdot \hat{e})^2}) \tag{ค.3.6}$$

$$\phi' = \begin{cases} \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}'); \hat{t} \cdot \hat{\phi}' \leq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}'); \hat{t} \cdot \hat{\phi}' > 0 \end{cases} \quad (\text{ค.3.7})$$

$$\phi = \begin{cases} \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}); \hat{t} \cdot \hat{\phi} \leq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}); \hat{t} \cdot \hat{\phi} > 0 \end{cases} \quad (\text{ค.3.8})$$

สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่ขอบหาได้จาก

$$D_s = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_o} \left\{ \begin{aligned} & \cot \left[ \frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi - \phi')] \\ & + \cot \left[ \frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi - \phi')] \\ & + R_s^n \cot \left[ \frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi + \phi')] \\ & + R_s^o \cot \left[ \frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi + \phi')] \end{aligned} \right\} \quad (\text{ค.4.1})$$

$$D_h = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_o} \left\{ \begin{aligned} & \cot \left[ \frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi - \phi')] \\ & + \cot \left[ \frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi - \phi')] \\ & + R_h^n \cot \left[ \frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n} \right] F[kLa^+(\phi + \phi')] \\ & + R_h^o \cot \left[ \frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] F[kLa^-(\phi + \phi')] \end{aligned} \right\} \quad (\text{ค.4.2})$$

ค่าปัจจัยอื่นๆ ในสมการที่ (ค.4) กำหนดโดยลักษณะทางเรขาคณิตของแนวรังสีตกกระทบและแนวรังสีเลี้ยวเบนที่เทียบกับขอบ โดย  $R_{s,h}^o$  เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวด้านรังสีตกกระทบด้วยมุมตกกระทบเท่ากับ  $\phi'$  สำหรับโพลาริเซชันแบบอ่อนและแบบแข็งตามลำดับ และ  $R_{s,h}^n$  เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวด้านรังสีเลี้ยวเบนออกจากขอบด้วยมุมสะท้อนเท่ากับ  $n\pi - \phi$  สำหรับโพลาริเซชันแบบอ่อนและแบบแข็งตามลำดับ

$F(x) = 2j\sqrt{x}e^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-j\tau^2} d\tau$  เป็นฟังก์ชันทรานซิชัน (transition function) ที่ชัดเจน

ความไม่ต่อเนื่องบริเวณขอบเขตเงา,  $L$  เป็นปัจจัยระยะทางกำหนดโดย  $L = \frac{ss' \sin^2 \beta_o}{s + s'}$  และ

ฟังก์ชัน  $a^\pm(x) = 2 \cos^2 \left[ \frac{2n\pi N^\pm - x}{2} \right]$  เมื่อ  $N^\pm$  คือเลขจำนวนเต็มที่ทำให้ฟังก์ชันต่อไปนี้มีความ

ใกล้เคียงมากที่สุด

$$2\pi nN^+ - x = \pi$$

$$2\pi nN^- - x = \pi$$

และสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้ารังสีเลี้ยวเบนและสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนได้ดังนี้

$$E^d(s) = D E^i(Q_D) \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} e^{-jks} \quad (\text{ค.5})$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าเลี้ยวเบนที่เข้าสู่สถานีเคลื่อนที่หาได้จาก

$$E^{dv} = E^{ds} + E^{dh} \quad (\text{ค.6.1})$$

$$E^{ds} = E^i(Q_D) \cdot D_s \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} \cdot e^{-j\beta s} \quad (\text{ค.6.2})$$

$$E^{dh} = E^i(Q_D) \cdot D_h \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} \cdot e^{-j\beta s} \quad (\text{ค.6.3})$$

เมื่อ  $E^i(Q_D)$  คือสนามตกกระทบที่จุดเลี้ยวเบน  $Q_D$  เป็นหน้าคลื่นทรงกลมโดยมีระยะทางจากแหล่งกำเนิดเป็น  $s'$

$D$  คือสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่ขอบ

$s'$  คือระยะทางที่รังสีเดินทางจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดเลี้ยวเบน

$s$  คือระยะทางที่รังสีเดินทางจากจุดเลี้ยวเบนไปยังสถานีเคลื่อนที่

$\beta$  คือเลขคลื่นมีค่าเป็น  $\frac{2\pi}{\lambda}$  เมื่อ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอัชราภรณ์ เนตรนิล เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน พ.ศ. 2522 ที่อำเภอตะพานหิน จังหวัดพิจิตร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย