

การศึกษาแนวทางการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อทดสอบความสามารถ
ปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น



นายคทา สุวรรณวัฒน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

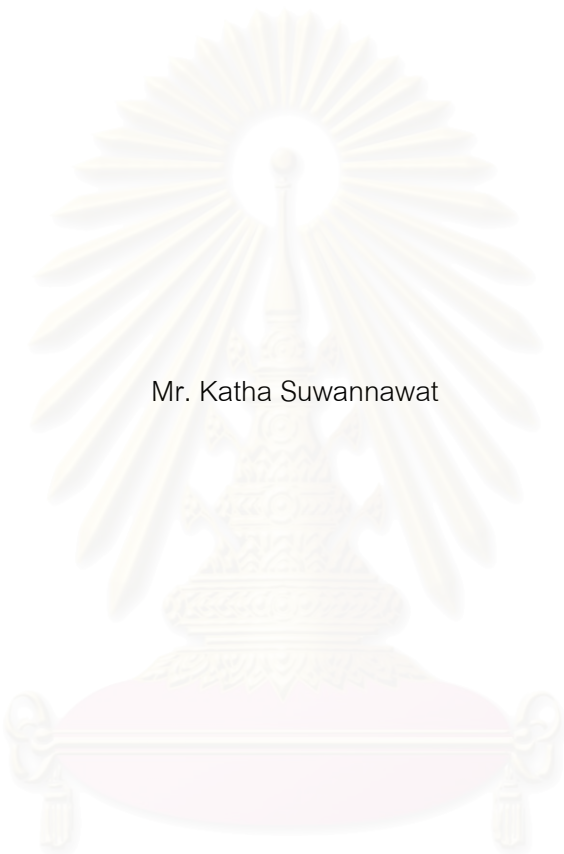
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1646-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF APPROACHES FOR SETTING UP AN OPEN AREA TEST SITE
FOR PRE-COMPLIANCE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TEST



Mr. Katha Suwannawat

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 2004

ISBN 974-53-1646-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาแนวทางการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบความ
สามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น
โดย นายคทา สุวรรณวัฒน์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยापัทฒนกร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยापัทฒนกร)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสิวิจิตรประภา)

สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คทา สุวรรณวัฒน์ : การศึกษาแนวทางการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น (A STUDY OF APPROACHES FOR SETTING UP AN OPEN AREA TEST SITE FOR PRE-COMPLIANCE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TEST) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ฉัตรชัย ไวยภาพฒนกร, 143 หน้า, ISBN 974-53-1646-6.

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาแนวทางการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้นโดยทดลองจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบเบื้องต้น สถานทดสอบแบบกลางแจ้งที่จัดตั้งจะอยู่ในบริเวณที่ไม่สามารถควบคุมให้มีระดับสัญญาณรบกวนได้ตามมาตรฐานทุกความถี่ ขนาดของระนาบดินจะเล็กกว่าขนาดที่มาตรฐานกำหนดและมีสิ่งกีดขวางที่อยู่ใกล้เคียงบริเวณที่จะจัดตั้งสถานทดสอบ ผลดังกล่าวจะทำให้เกิดคลื่นหลายวิถีขึ้นทำให้ผลการตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริเวณทางไฟฟ้าผิดพลาด การกำจัดผลของคลื่นหลายวิถีที่มาจากสิ่งกีดขวางทำโดยวิธีประจวบเวลาวิธีนี้ต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถวิเคราะห์ในอาณาจักรเวลาได้เพื่อกรองคลื่นที่มาจากหลายวิถีออกไปซึ่งทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริเวณทางไฟฟ้า การวิเคราะห์ค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วบนระนาบดินขนาดจำกัดทำด้วยระเบียบวิธีผสมผสานโดยใช้ระเบียบโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปพบว่าระนาบดินสามารถลดขนาดพื้นที่ลงได้ 52.92% 85.57% และ 95.19% เมื่อเทียบกับมาตรฐาน CISPR 16-1 กรณีระยะทดสอบเท่ากับ 3 เมตร 10 เมตร และ 30 เมตร ตามลำดับ โดยกรณีระยะทดสอบ 10 เมตร พบว่าผลการคำนวณและผลการตรวจวัดค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วนั้นมีความสอดคล้องกัน การพิจารณาผลกระทบค่าระดับสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสุดขีดหรือเป็นค่าระดับสัญญาณรบกวนเสี่ยงนั้นใช้ทฤษฎีค่าสุดขีดมาบ่งชี้ค่าระดับสัญญาณรบกวนในบริเวณสถานทดสอบและการใช้กรรมวิธีการกรองทางเวลาจะทำให้ค่าสมรรถนะของสถานทดสอบดีขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2547

4470236821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: OATS, NSA, Emission Testing, Hybrid Methods, Time Domain Gating, Finite Ground Plane, Extreme Value Theory

KATHA SUWANAWAT: A STUDY OF APPROACHES FOR SETTING UP AN OPEN AREA TEST SITE FOR PRE-COMPLIANCE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TEST. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHATCHAI WAIYAPATTANAKORN, Ph.D., 143 pp. ISBN 974-53-1646 -6.

This thesis investigates approaches for setting up an open area test site (OATS) for pre-compliance electromagnetic compatibility test. The test site is set up in an area where noise levels at all frequencies do not comply with standard. The size of the ground plane is smaller than the standard size and obstruction exists in the surrounding area for test site setting. This leads to multipath that affects emission test measurement. The approach limits the propagation multipath effects by using the time domain gating. A hybrid Method of Moments (MoM) / Uniform geometrical Theory of Diffraction (UTD) is used to calculate the Normalized Site Attenuation (NSA) of the finite ground plane OATS. Results from simulations show that the ground plane size can be reduced by 52.92 %, 85.57 % and 95.19 % when compared to CISPR 16-1 for the 3 m, 10 m and 30 m test distance respectively. The experimental results agree well with calculation results for the 10 m test distance case. The consideration of extreme noise level (or risk noise level) is by extreme value theory (EVT). It is also found that time domain gating helps improve the OATS performance.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical Engineering Student's signature

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature

Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.ศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข ดร.ธีรศักดิ์ อนันตกุล และคุณสุรเชษฐ์ กอสิริขจร ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้และขอขอบคุณ คุณสุวิชาญ กาวาฮารา คุณณัฐพงศ์ คุณวัฒนา คุณอัชราภรณ์ เนตรนิล คุณรชฎู ถาวรศิริ คุณกุลธวัช ภูมิวงศ์พิทักษ์ และประเสริฐ จันวดี ที่ให้คำปรึกษาและสละเวลาให้ความช่วยเหลือในการทดลองงานวิจัยสำเร็จด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณมารดาที่ช่วยสนับสนุนด้านการเรียนและเป็นกำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
หลักการและทฤษฎี.....	2
หลักการ.....	2
การพิจารณาปัญหาการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งใดๆ.....	3
วัตถุประสงค์.....	4
ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ผลกระทบของขนาดระนาบดินต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง.....	7
ความนำ.....	7
2.1 ค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วตามวิธีในมาตรฐาน ANSI C63.4 และ CISPR 16-1.....	8
2.1.1 ความเข้มสนามไฟฟ้าโพลาริเซชันแนวอนบนระนาบดิน ขนาดอนันต์.....	13
2.1.2 ความเข้มสนามไฟฟ้าโพลาริเซชันแนวตั้งบนระนาบดิน ขนาดอนันต์.....	15
2.1.3 ค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (NSA).....	17
2.2 ขนาดและรูปร่างระนาบดินของการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง.....	19
2.2.1 ขนาดและรูปร่างของระนาบดินเมื่อบริภัณฑ์ทางไฟฟ้า วางอยู่บนโต๊ะหมุน.....	20

2.2.2 ขนาดและรูปร่างของระนาบดินเมื่อบริษัททางไฟฟ้า ไม่ได้วางอยู่บนโต๊ะหมุน.....	24
2.3 การพิจารณาผลกระทบคลื่นเลี้ยวเบนของระนาบดินต่อ การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง.....	25
2.3.1 การพิจารณาพจน์เมตริกซ์อิมพีแดนซ์โดยเปรียบเทียบ วิธีผสมผสาน	26
2.3.1.1 การคำนวณเมตริกซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์.....	27
2.3.1.2 การคำนวณเมตริกซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป.....	36
2.3.2 ผลกระทบของคลื่นเลี้ยวเบนจากระนาบดินขนาดจำกัดต่อ สมรรถนะของสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง.....	48
บทที่ 3 ผลกระทบของระดับสัญญาณรบกวนต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง	52
ความนำ.....	52
3.1 การวัดมูลค่าความเสี่ยง.....	52
3.2 ทฤษฎีค่าสุดขีด (EVT).....	54
3.2.1 การแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไป (Generalized Extreme Value, GEV).....	55
3.2.2 การแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป (Generalized Pareto Distribution, GPD).....	62
3.3 การคำนวณค่าปัจจัยของการแจกแจงทฤษฎีค่าสุดขีด.....	66
3.3.1 การประมาณค่าปัจจัยด้วยกรรมวิธี ค่าความควรจะเป็นสูงสุด (MLE).....	67
3.3.2 การประมาณค่าปัจจัยด้วยกรรมวิธี กระดาศความน่าจะเป็น.....	69
3.4 ตัวเลขสัญญาณรบกวน.....	71
บทที่ 4 ผลกระทบของสิ่งกีดขวางต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง.....	74
ความนำ.....	74

4.1 การลดผลกระทบคลื่นหลายวิถีด้วยกรรมวิธีการกรองทางเวลา.....	74
4.2 การลดผลกระทบคลื่นหลายวิถีด้วยรั้วสะท้อนคลื่น.....	77
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์และแนวทางการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง.....	79
ความนำ.....	79
5.1 การตรวจสอบ ระเบียบวิธีที่ใช้วิเคราะห์.....	79
5.2 ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวที่ขอบและที่มุมของระนาบดินต่อ	
ค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว.....	80
5.2.1 ผลการคำนวณ.....	80
5.2.2 การทดสอบการสะท้อนจากระนาบดินแบบต่างๆ.....	106
5.2.3 การตรวจวัดค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว.....	115
5.3 ผลการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนและการบ่งชี้ระดับ	
สัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสูงสุด.....	121
5.4 ผลการตรวจวัดค่า NSA ด้วยกรรมวิธีการกรองทางเวลา.....	127
บทที่ 6 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	128
สรุปงานวิจัย	128
ข้อเสนอแนะ.....	129
รายการอ้างอิง.....	130
ภาคผนวก.....	133
ภาคผนวก ก.....	134
ภาคผนวก ข.....	137
ภาคผนวก ค.....	139
ภาคผนวก ง.....	141
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	143

สารบัญญัตราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการคำนวณมิติของวงรีเฟรสเนลอันดับแรกบนระนาบดิน (ระนาบ xy) เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ กรณีสายอากาศรับวางตัวในโพลาริเซชันแนวนอน	22
2.2 ผลการคำนวณมิติของวงรีเฟรสเนลอันดับแรกบนระนาบดิน (ระนาบ xy) เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ กรณีสายอากาศรับวางตัวในโพลาริเซชันแนวตั้ง.....	22
2.3 ผลการคำนวณขนาดของระนาบดินกรณีใช้โต๊ะหมุนวางบริษัททางไฟฟ้ากับสายอากาศรับด้วยความสูงเท่ากัน.....	23
2.4 ผลการคำนวณมิติของวงรีเฟรสเนลอันดับแรกบนระนาบดิน (ระนาบ xy) เมื่อบริษัททดสอบอยู่ประจำที่.....	25
5.1 ค่าขนาดความแตกต่างสูงสุดของค่า NSA กรณี CISPR 16-1 กับกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ และพื้นที่ (%) ณ ระยะทดสอบ 3 เมตร.....	89
5.2 ค่าขนาดความแตกต่างสูงสุดของค่า NSA กรณี CISPR 16-1 กับกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ และพื้นที่ (%) ณ ระยะทดสอบ 10 เมตร.....	97
5.3 ค่าขนาดความแตกต่างสูงสุดของค่า NSA กรณี CISPR 16-1 กับกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ และพื้นที่ (%) ณ ระยะทดสอบ 30 เมตร.....	106
5.4 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบฉากในอากาศ, โพลาริเซชันแบบตั้งฉาก.....	109
5.5 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบเอียงในอากาศ, โพลาริเซชันแบบตั้งฉาก.....	109
5.6 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบฉากบนดิน, โพลาริเซชันแบบตั้งฉาก.....	110
5.7 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบเอียงบนดิน, โพลาริเซชันแบบตั้งฉาก.....	110
5.8 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบฉากบนดิน เปียกน้ำ, โพลาริเซชันแบบตั้งฉาก.....	111
5.9 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบเอียงบนดิน เปียกน้ำ, โพลาริเซชันแบบตั้งฉาก.....	111

ตารางที่	
5.10 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบฉาก ในอากาศ, โพลาริเซชันแนวราบ.....	112
5.11 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบเอียง ในอากาศ, โพลาริเซชันแนวราบ.....	112
5.12 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบฉากบนดิน, โพลาริเซชันแนวราบ.....	113
5.13 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบเอียงบนดิน, โพลาริเซชันแนวราบ.....	113
5.14 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบฉากบนดิน เปียกน้ำ, โพลาริเซชันแนวราบ.....	114
5.15 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่สานแบบเอียงบนดิน เปียกน้ำ, โพลาริเซชันแนวราบ.....	114
5.16 ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายคลื่นของบริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ.....	118
5.17 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาดตาราง 0.30×0.30 ตารางเมตร ระนาบดินสานแบบฉาก สายอากาศวางตัวโพลาริเซชัน แนวตั้ง.....	118
5.18 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาด ตาราง 0.30×0.30 ตารางเมตร ระนาบดินสานแบบฉาก สายอากาศวางตัว โพลาริเซชันแนวราบ.....	118
5.19 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาด ตาราง 0.60×0.60 ตารางเมตร ระนาบดินสานแบบฉาก สายอากาศวางตัว โพลาริเซชันแนวตั้ง.....	119
5.20 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาด ตาราง 0.60×0.60 ตารางเมตร ระนาบดินสานแบบฉาก สายอากาศวางตัว โพลาริเซชันแนวราบ.....	119
5.21 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของสถานทดสอบที่เลือกเมื่อระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาดตาราง 0.30×0.30 ตารางเมตร ระนาบดินสานแบบฉาก สายอากาศวางตัวโพลาริเซชันแนวตั้ง.....	120

ตารางที่	
5.22	ผลการตรวจวัดค่า NSA ของสถานทดสอบที่เลือกเมื่อระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาดตาราง 0.30×0.30 ตารางเมตร ระนาบดินसानแบบฉาก สายอากาศวางตัวโพลาริเซชันแนวราบ.....121
5.23	ผลการตรวจวัดและผลการคำนวณค่าปัจจัยทฤษฎีค่าสุดขีดทั่วไป.....123
5.24	ผลการตรวจวัดและผลการคำนวณค่าปัจจัยของการแจกแจงความถี่ สะสมพาเรโตทั่วไป (GPD).....125
5.25	เปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่า NSA เมื่อไม่ใช้กรรมวิธีการกรองทางเวลาและเมื่อใช้ กรรมวิธีการกรองทางเวลา.....127



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การตรวจวัดคลื่นที่แพร่กระจายออกมาจากบริษัททางไฟฟ้าด้วยวิธีการทดสอบแบบกลางแจ้งในกรณีอุดมคติ.....	2
2.1 การหาค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วในกรณีอุดมคติ.....	8
2.2 วงจรสมมูลของระบบสายอากาศภาคส่ง.....	9
2.3 วงจรสมมูลของระบบสายอากาศภาครับ.....	9
2.4 สนามไฟฟ้าวิถีตรงกับวิถีสะท้อนจากระนาบดินในโพลาริเซชันแนวอน.....	13
2.5 สนามไฟฟ้าวิถีตรงกับหลายวิถีจากระนาบดินในโพลาริเซชันแนวตั้ง.....	16
2.6 ลักษณะของระนาบดินและการวางตำแหน่งบริษัททางไฟฟ้า กับสายอากาศภาครับเมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ.....	21
2.7 ลักษณะและขนาดของระนาบดินในบริเวณที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (obstruction free area) กรณีใช้โต๊ะหมุนวางบริษัททางไฟฟ้ากับสายอากาศรับด้วยความสูงเท่ากัน.....	23
2.8 ลักษณะของระนาบดินและการวางตำแหน่งบริษัททางไฟฟ้าสายอากาศรับเมื่อบริษัททดสอบอยู่ประจำที่.....	24
2.9 สายอากาศไดโพลบนระนาบดินขนาดจำกัด.....	27
2.10 สายอากาศไดโพล..... ความหนาแน่นกระแสเชิงผิว $J(z')$ และรัศมีสายอากาศ a การแทนสายอากาศด้วยเส้นกระแส $I_z(z') = 2\pi a J(z')$	28
2.11 สายอากาศไดโพลบนระนาบดินขนาดอนันต์.....	36
2.12 สายอากาศไดโพลบนระนาบดินขนาดขนาดจำกัด.....	36
2.13 ลักษณะเวกเตอร์ที่ขอบเดี่ยวเบน..... ก) เวกเตอร์ในระนาบตกกระทบ ข) มุมมองด้านบนและระนาบเดี่ยวเบน	38
2.14 ลักษณะเรขาคณิตของสนามเดี่ยวเบนที่มุม.....	42
2.15 ลักษณะเรขาคณิตของสนามเดี่ยวเบนที่มุม กรณีที่มีสองสนามเดี่ยวเบนที่มุมและหนึ่งสนามเดี่ยวเบนที่ขอบ.....	43
2.16 ลักษณะเรขาคณิตของสนามเดี่ยวเบนที่มุม กรณีที่มีเพียงสองสนามเดี่ยวเบนที่มุม.....	44

2.17 ลักษณะเรขาคณิตของสนามเลี้ยวเบนที่มุม กรณีที่มีสองสนามเลี้ยวเบนที่มุม และสองสนามเลี้ยวเบนที่ขอบ.....	45
3.1 ค่าสุดขีดในแต่ละช่วงเวลา.....	54
3.2 ค่าสุดขีดเมื่อกำหนดค่าระดับอ้างอิง.....	55
3.3 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น กรณี <i>FRECHET</i>	60
3.4 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น กรณี <i>WEIBULL</i>	60
3.5 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น กรณี <i>GUMBEL</i>	61
3.6 การแจกแจงความถี่สะสมของข้อมูลที่มีค่ามากกว่าระดับอ้างอิง.....	62
3.7 การแจกแจงความถี่สะสมของผลต่างของข้อมูลกับค่าระดับอ้างอิงที่ประมาณ ด้วยการแจกแจงความถี่สะสมพาราโตนทั่วไป.....	63
3.8 การแจกแจงความถี่สะสมพาราโตนทั่วไป เมื่อ $\xi = -0.5$	65
3.9 การแจกแจงความถี่สะสมพาราโตนทั่วไป เมื่อ $\xi = 0.5$	65
3.10 การแจกแจงความถี่สะสมพาราโตนทั่วไป เมื่อ $\xi = 0$	65
4.1 การวางตำแหน่งของบริภัณฑ์ทดสอบกับสายอากาศรับ, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลายวิถี ที่มายังสายอากาศรับ และตัวอย่างการวางตำแหน่งของตัวสะท้อนคลื่น.....	75
4.2 สัญญาณ ณ สายอากาศรับในอาณาจักรเวลา.....	75
4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์กรรมวิธีประตุเวลา.....	76
5.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าความต้านทานด้านเข้าของสายอากาศโมโนโพล เมื่อวางอยู่บนระนาบดินขนาดต่างๆ	80
5.2 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดอนันต์และขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้งเมื่อใช้โตะหมุนในการทดสอบ.....	81
5.3 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โตะหมุนในการทดสอบ.....	82
5.4 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดอนันต์และขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ.....	82
5.5 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ.....	83

รูปที่

5.34 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่.....	104
5.35 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่.....	104
5.36 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่.....	105
5.37 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่.....	105
5.38 การสารตารางแบบต่าง ๆ.....	107
(ก) การสารตารางแบบฉาก (ข) การสารตารางแบบเอียง	
5.39 เรขาคณิตการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน.....	108
5.40 การตรวจวัดตัวประกอบสายอากาศ.....	116
5.41 ตำแหน่งสายอากาศของการตรวจวัดค่า NSA ของสถานทดสอบที่เลือกได้.....	120
5.42 แผนภูมิอุปกรณ์ของการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวน.....	122
5.43 เปรียบเทียบค่ารากเฉลี่ยกำลังของตัวเลขสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสูงสุดขีดจากทฤษฎี ค่าสูงสุดขีดทั่วไป (GEV) กับค่าขีดจำกัดตามมาตรฐาน มอก. 1956-2542 [34].....	124
5.44 เปรียบเทียบค่าสูงสุดขีดที่ได้จากการแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป (GPD) กับค่าขีดจำกัดค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของตัวเลขสัญญาณรบกวน [34].....	126
ง. 1 สัมพันธ์คู่ลำดับระหว่างค่าลำดับที่ k กับค่าฟังก์ชันผกผันของค่าทาง สถิติของ Hill ณ ลำดับที่ k	142

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นที่สนใจอย่างมากเนื่องจากมีข้อกำหนดต่างๆ ที่ระบุว่าบริษัททางไฟฟ้าควรมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกมาในระดับที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าต่อบริษัททางไฟฟ้าอื่นๆ บริเวณที่ใช้เพื่อการตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากบริษัททางไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อความแม่นยำของการตรวจวัด ในการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง (Open Area Test Site, OATS) เพื่อตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริษัททางไฟฟ้าแบบเต็มรูปแบบตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2] ต้องการสถานทดสอบที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำ ระบายดินขนาดใหญ่ และปราศจากสิ่งกีดขวาง เพื่อให้สามารถตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริษัททางไฟฟ้าได้อย่างมีความถูกต้องมากที่สุด การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเต็มรูปแบบตามข้อกำหนดของมาตรฐาน [1,2] นั้นมีค่าใช้จ่ายในการจัดตั้งสถานทดสอบสูงมากทำให้ต้นทุนของบริษัททางไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนของการจัดตั้งสถานทดสอบและของบริษัททางไฟฟ้า การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบเบื้องต้นจึงเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อให้ทราบว่าบริษัททางไฟฟ้ามีโอกาสจะผ่านการทดสอบเต็มรูปแบบตามที่มาตรฐานกำหนดได้หรือไม่ การทดสอบเบื้องต้นนี้ยังให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงบริษัททางไฟฟ้าเพื่อให้ผ่านการทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่มาตรฐานกำหนดอีกด้วย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาแนวทางการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น โดยทดลองจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบเบื้องต้น สถานทดสอบแบบกลางแจ้งที่จัดตั้งจะอยู่ในบริเวณที่ไม่สามารถควบคุมให้มีระดับสัญญาณรบกวนได้ตามมาตรฐานทุกความถี่ ขนาดของระบายดินจะเล็กกว่าขนาดที่มาตรฐานกำหนดและมีสิ่งกีดขวางที่อยู่ในบริเวณที่จะจัดตั้งสถานทดสอบ ผลดังกล่าวจะทำให้เกิดคลื่นหลายวิถีขึ้นทำให้ผลการตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริษัททางไฟฟ้าผิดพลาด การกำจัดผลของคลื่นหลายวิถีที่มาจากสิ่งกีดขวางที่อยู่ในบริเวณที่จัดตั้งสถานทดสอบมี 2 วิธี วิธีแรกคือ การกรองทางเวลาโดยวิธีนี้ต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถวิเคราะห์ในอาณาจักรเวลาได้เพื่อกรองคลื่นที่มาจากหลายวิถีออกไป และวิธีที่สองคือ การใช้รั้วสะท้อนคลื่น

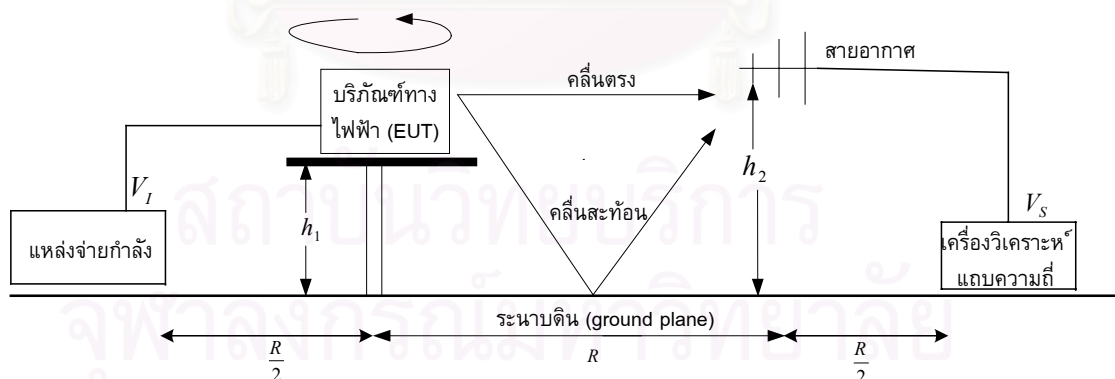
แม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเปลี่ยนทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิถี ซึ่งทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริเวณที่ทางไฟฟ้า กล่าวโดยรวมแล้ว วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแนวการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง เพื่อการทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้นในสถานที่กลางแจ้งใดๆ

หลักการและทฤษฎี

การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งนั้นหมายถึง การจัดสถานที่เพื่อตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริเวณที่ทางไฟฟ้าที่จัดวางอยู่บนระนาบดินผิวเรียบที่มีขนาดใหญ่เป็นอนันต์ ดังนั้นในการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งจึงมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงสองวิถีเท่านั้นคือ คลื่นวิถีตรง และคลื่นหลายวิถีที่สะท้อนมาจากระนาบดิน โดยการตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริเวณที่ทางไฟฟ้านั้นจะตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าผลรวมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองวิถีที่มีค่ามากที่สุด

หลักการ

การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งในอุดมคตินั้น จะทดสอบในสถานที่ที่มีระนาบดินเป็นตัวนำสมบูรณ์แบบ (perfectly conducting ground plane, $\epsilon_r = 1$ $\sigma = \infty$) หรือ ระนาบดินโลก (earth ground plane, $\epsilon_r = 15$ $\sigma = 0.01$) ที่มีขนาดอนันต์ ปราศจากสิ่งกีดขวาง และไม่มีสัญญาณรบกวนดังแสดงในรูป 1



รูป 1 การตรวจวัดคลื่นที่แพร่กระจายออกมาจากบริเวณที่ทางไฟฟ้า

ด้วยวิธีการทดสอบแบบกลางแจ้งในกรณีอุดมคติ

คลื่นที่แพร่กระจายออกจากบริเวณที่ทดสอบประกอบไปด้วย คลื่นตรง และคลื่นสะท้อนจากระนาบดินเท่านั้นที่แพร่กระจายไปถึงสายอากาศรับ การทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีสถานทดสอบแบบกลางแจ้งจะทดสอบในย่านความถี่ 30-1000 MHz

ทั้งโพลาไรเซชันแนวนอน (horizontal polarization) และโพลาไรเซชันแนวตั้ง (vertical polarization) การตรวจวัดคลื่นที่แพร่กระจายออกมาจากบริเวณทางไฟฟ้าจะทดสอบรอบบริเวณทางไฟฟ้า (หมุนบริเวณ 360 องศา)

การจัดสถานทดสอบแบบกลางแจ้งในสถานที่ใด ๆ นั้น หากสถานที่นั้นมีสิ่งกีดขวางอยู่ใกล้บริเวณทดสอบและขนาดของระนาบดินมีขนาดจำกัด จะก่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลายวิธีขึ้น นอกเหนือจากคลื่นวิธีตรงกับคลื่นหลายวิธีที่สะท้อนมาจากระนาบดิน กล่าวคือ คลื่นหลายวิธีที่สะท้อนมาจากสิ่งกีดขวาง และคลื่นหลายวิธีที่เลี้ยวเบนมาจากขอบของระนาบดิน ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมดังกล่าวนี้พิจารณาได้จากผลต่างของค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (Normalized Site Attenuation, NSA) ทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด ถ้าหากผลการเปรียบเทียบอยู่ในขอบเขตของมาตรฐานสากล (International Special Committee on Radio: CISPR) [2] สถานทดสอบนั้นจะสามารถใช้เป็นสถานทดสอบแบบกลางแจ้งได้ ค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วทางทฤษฎี จะคำนวณจากสถานการณ์ที่สายอากาศรับและสายอากาศส่งอยู่บนระนาบดินอนันต์ [1,2,3,6,7]

การพิจารณาปัญหาการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งใด ๆ

ในความเป็นจริงแล้วไม่สามารถจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าในภาวะอุดมคติได้เนื่องจากสาเหตุ 3 ประการดังนี้

1. ระดับของสัญญาณรบกวน

เนื่องจากบริเวณที่ใช้ในการทดสอบแบบกลางแจ้งนั้นอาจมีสัญญาณรบกวนที่มาจากสัญญาณจากสถานีวิทยุ สถานีวิทยุโทรทัศน์ และระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น ระดับของสัญญาณรบกวนนี้จะบ่งชี้ว่าสามารถทดสอบบริเวณทางไฟฟ้าโดยวิธีสถานทดสอบแบบกลางแจ้งได้หรือไม่ ระดับของสัญญาณรบกวนในสถานทดสอบต้องมีค่าต่ำกว่าระดับสัญญาณที่มาจากบริเวณทางทดสอบ

2. ขนาดของระนาบดิน

เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถหาสถานทดสอบที่มีระนาบดินขนาดอนันต์ได้ ดังนั้นจึงใช้ระนาบดินขนาดจำกัดแทน การใช้ระนาบดินที่มีขนาดจำกัดทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบ ปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบนี้กระทบต่อสมรรถนะของสถานทดสอบแบบกลางแจ้งกรรมวิธีที่ใช้ศึกษาผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบจะแยกพิจารณาที่ย่านความถี่ต่ำกับย่านความถี่สูงโดยการพิจารณานั้นจะคำนึงถึงขนาดของวัตถุเทียบกับความยาวคลื่น (λ) ซึ่ง

ขนาดของวัตถุที่จะพิจารณาคือ ขนาดของระนาบดิน (x_1) ระเบียบวิธีย่านความถี่ต่ำคือ ระเบียบวิธีโมเมนต์ (Moment Methods, MoM) จะพิจารณาที่เงื่อนไข $0 \leq k x_1 \leq 14$ [8] และระเบียบวิธีย่านความถี่สูง (high frequency methods) จะพิจารณาที่เงื่อนไข $6.5 \leq k x_1 < \infty$ [8] แต่เนื่องจากระเบียบวิธีโมเมนต์นั้นสามารถพิจารณาวัตถุที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนักเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นโดยจะให้ผลการคำนวณแม่นยำสูง เมื่อพิจารณาวัตถุที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นจะใช้ระยะเวลาในการคำนวณค่อนข้างยาวนาน ระเบียบวิธีย่านความถี่สูงเป็นระเบียบวิธีที่ให้ผลการคำนวณที่มีความแม่นยำโดยใช้เวลาในการคำนวณไม่นานมากนักเมื่อพิจารณาวัตถุที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น เมื่อนำข้อดีของแต่ละระเบียบวิธีมารวมกันจะเกิดเป็นระเบียบวิธีที่เรียกว่าระเบียบวิธีผสมผสาน (hybrid methods) [8 -11] ระเบียบวิธีนี้เป็นการใช้ระเบียบวิธีย่านความถี่ต่ำร่วมกับระเบียบวิธีย่านความถี่สูง ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป (Uniform Theory of Diffraction, UTD)

3. สิ่งกีดขวางที่อยู่ในสถานทดสอบ

ถ้าหากจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งในบริเวณที่มีสิ่งกีดขวาง ผลดังกล่าวจะทำให้เกิดคลื่นหลายวิถีขึ้นทำให้ผลการตรวจวัดคลื่นที่แพร่กระจายออกจากบริเวณที่ทางไฟฟ้าผิดพลาดได้ในสถานทดสอบแต่ละสถานทดสอบนั้นจะมีค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับลักษณะและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางในสถานทดสอบแต่ละสถานทดสอบ การกำจัดผลของคลื่นหลายวิถีที่มาจากสิ่งกีดขวางที่อยู่ในบริเวณที่จัดตั้งสถานทดสอบมี 2 วิธี [6,33] วิธีแรกคือ การกรองทางเวลาโดยวิธีนี้ต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถวิเคราะห์ในอาณาจักรเวลาได้เพื่อกรองคลื่นที่มาจากหลายวิถีออกไป และวิธีที่สองคือ การใช้รั้วสะท้อน (diffraction fence) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเปลี่ยนทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิถี ทำให้คลื่นหลายวิถีนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริเวณที่ทางไฟฟ้า

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลกระทบของระดับสัญญาณรบกวนที่มีต่อการทดสอบแบบกลางแจ้ง
2. ศึกษาการกรองทางเวลาและการทำรั้วสะท้อนคลื่นเพื่อกำจัดผลของคลื่นหลายวิถี
3. ศึกษาผลกระทบของขนาดระนาบดินต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง
4. เสนอแนวทางการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้นในสถานที่กลางแจ้งใดๆ

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและวิเคราะห์การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งตามมาตรฐาน CISPR16 –1 (1993-8) และ ANSI C63.4 -2001
2. วิเคราะห์ผลกระทบของระดับสัญญาณรบกวนที่มีต่อการทดสอบแบบกลางแจ้ง
3. วิเคราะห์และกำจัดผลของคลื่นหลายวิถี โดยวิธีการกรองทางเวลา และรั้วสะท้อนคลื่น
4. วิเคราะห์และคำนวณผลกระทบเนื่องจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบของระนาบดินขนาดจำกัดต่อค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วด้วยระเบียบวิธีผสมผสาน โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป
5. ตรวจสอบค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วในสถานทดสอบใดๆ
6. จัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้นในสถานที่ยกกลางแจ้งใดๆ

ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและข้อกำหนดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งตามมาตรฐาน CISPR16 –1 (1993-8) และ ANSI C63.4 -2001
2. ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของระดับสัญญาณรบกวนที่มีต่อการทดสอบแบบกลางแจ้ง
3. ศึกษาแนวทางและวิธีวิเคราะห์และลดปัญหาคลื่นหลายวิถีเนื่องจากสิ่งกีดขวาง โดยวิธีการกรองทางเวลา และรั้วสะท้อนคลื่น
4. วิเคราะห์และคำนวณผลกระทบเนื่องจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบของระนาบดินขนาดจำกัด
5. ตรวจสอบค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วในพื้นที่กลางแจ้งใดๆ และเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี
6. ตรวจสอบค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วด้วยวิธีการกรองทางเวลา และใช้รั้วสะท้อนคลื่นเพื่อลดปัญหาคลื่นหลายวิถีเนื่องจากสิ่งกีดขวางและเปรียบเทียบกับค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าทางทฤษฎี
7. สรุปงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบเนื่องจากระดับสัญญาณรบกวน คลื่นหลายวิถี และปรากฏการณ์เดี่ยวบนที่ขอบของระนาบดินขนาดจำกัด ที่มีผลต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง
2. แนวทางการออกแบบและพัฒนาพื้นที่กลางแจ้งใดๆ ให้เป็นสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ผลกระทบของขนาดระนาบดินต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง

การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งในอุดมคติเพื่อตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริษัททางไฟฟ้านั้น จะทดสอบบนระนาบดินที่เป็นตัวนำสมบูรณ์แบบหรือระนาบดินโลกที่กว้างเป็นอนันต์ บริเวณทดสอบที่มีระนาบดินทั้งสองลักษณะนี้ต้องปราศจากสิ่งกีดขวาง ในทางปฏิบัติจะจัดตั้งสถานทดสอบบนระนาบดินที่มีขนาดจำกัดตามที่กำหนดในมาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2] ขนาดพื้นที่ดังกล่าวอาจจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการทดสอบมีมูลค่าสูงเป็นสาเหตุให้ต้นทุนของบริษัททางไฟฟ้ามีมูลค่าสูงขึ้นไปด้วยซึ่งเป็นที่ผู้ผลิตบริษัททางไฟฟ้าไม่ต้องการ วิธีหนึ่งที่สามารถลดต้นทุนของบริษัททางไฟฟ้าลงได้คือ การลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบการจัดตั้งสถานกลางแจ้งแบบเต็มรูปแบบคือ การลดขนาดของระนาบดินให้มีขนาดเล็กกว่าตามที่มาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2] กำหนด เพื่อเป็นการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเบื้องต้น การจัดตั้งสถานทดสอบด้วยระนาบดินที่มีขนาดจำกัดดังกล่าวจะทำให้ให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบ (edge diffraction) และปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่มุม (corner diffraction) ซึ่งปรากฏการณ์เลี้ยวเบนนี้จะส่งผลกระทบต่อค่าปัจจัยที่แสดงสมรรถนะของสถานทดสอบ ค่าปัจจัยนี้พิจารณาได้จากผลต่างของค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (Normalized Site Attenuation, NSA) ทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด ผลการเปรียบเทียบต้องอยู่ในขอบเขตของมาตรฐานสากล (International Special Committee on Radio: CISPR) [2] จึงจะสามารถใช้เป็นสถานทดสอบแบบกลางแจ้งได้

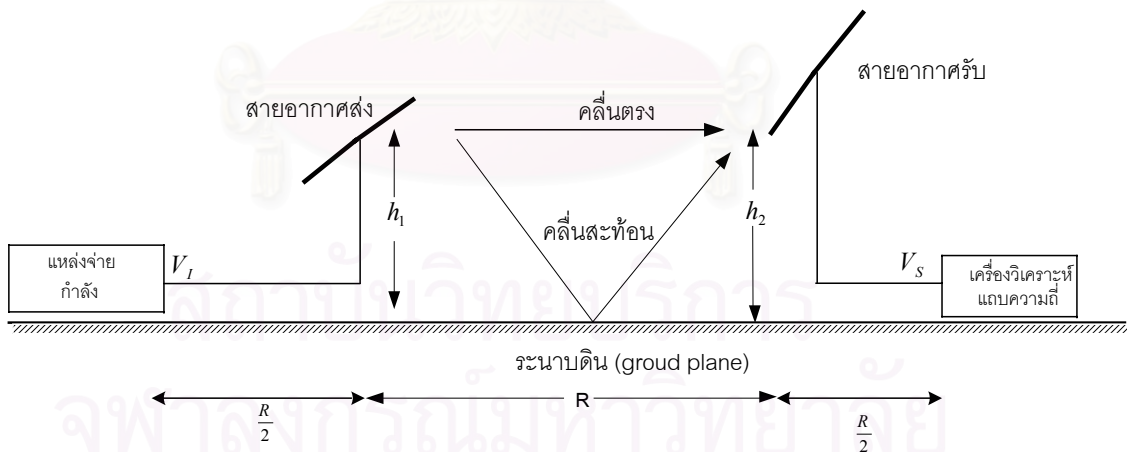
หัวข้อแรกจะกล่าวถึงค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วตามวิธีในมาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2] โดยเนื้อหาที่จะกล่าวถึงได้แก่ การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง (free space), สนามไฟฟ้าโพลาริเซชันแนวนอนบนระนาบดินขนาดอนันต์, สนามไฟฟ้าโพลาริเซชันแนวตั้งบนระนาบดินขนาดอนันต์ และค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (NSA) หัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึงขนาดและรูปร่างระนาบดินของการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งที่กำหนดในมาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2] หัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงการพิจารณาผลกระทบต่อค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (NSA) จากปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบ (edge diffraction) และปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่มุม (corner diffraction) ของระนาบดินที่มีขนาดจำกัด ทั้งกรณีที่กำหนดในมาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ

CISPR 16-1 [2] และกรณีทีระนาบดินมีขนาดเล็กกว่าระนาบดินที่กำหนดในมาตรฐานดังกล่าว รายละเอียดในแต่ละเรื่องซึ่งแยกเป็นหัวข้อตามที่แสดงไว้ข้างต้นมีดังนี้

2.1 ค่าลดทอนสถานการณ์ทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วตามวิธีในมาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2]

การพิจารณาค่าสมรรถนะของสถานการณ์ทดสอบในอุดมคติตามแบบวิธีในมาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2] จะพิจารณาจากค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับดังรูป 2.1 คลื่นที่นำมาพิจารณามีเพียงคลื่นวิถีตรงกับคลื่นสะท้อนจากระนาบดินเท่านั้น สายอากาศรับนั้นจะเปลี่ยนแปลงความสูงเพื่อหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีการแทรกสอดแบบเสริมกันมากที่สุดของคลื่นวิถีตรงกับคลื่นสะท้อนจากระนาบดิน ในช่วงความสูงตามที่มาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2] กำหนดซึ่งค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (root-mean-square) ของความเข้มสนามไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการพอยน์ติงเวกเตอร์สำหรับอวกาศว่าง (free space) ดังสมการ (2.1)

$$S = \frac{(E_0^{rms})^2}{\eta} = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (2.1)$$



รูป 2.1 การหาค่าลดทอนสถานการณ์ทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วในกรณีอุดมคติ

ดังนั้นค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้าคือ

$$E_0^{rms} = \frac{\sqrt{30 P_t G_t}}{d} \quad (2.2)$$

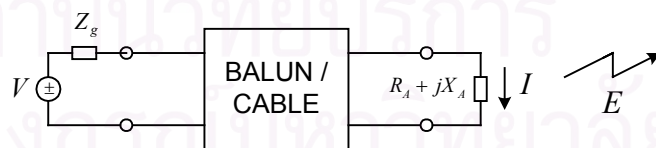
- โดย E_0^{rms} คือ ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้า
 P_t คือ กำลังออกจากสายอากาศส่ง
 G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง
 η คือ อิมพีแดนซ์คลื่นของอวกาศว่าง (120π)
 d คือ ระยะทางจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับ

เมื่อเขียนเป็นเฟสเซอร์จะได้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศส่งไปยังสายอากาศรับเป็น

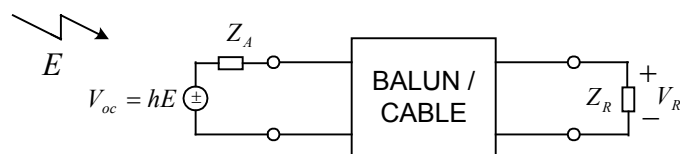
$$\vec{E} = \frac{\sqrt{30 P_t G_t}}{d} e^{-j\beta d} \quad (2.3)$$

- โดย β คือ ค่าคงที่วัฏภาค, $\frac{2\pi}{\lambda}$
 λ คือ ความยาวคลื่น

เมื่อพิจารณารูป 2.1 สามารถเขียนวงจรสมมูลของสายอากาศส่งและสายอากาศรับได้ดังรูป 2.2 และรูป 2.3 ตามลำดับ ในวงจรสมมูลของสายอากาศส่งซึ่งเป็นโครงข่ายสองทางเข้าออก (2-port network) ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกำลัง (signal generator) มีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ V และมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_g , สายอากาศส่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ $R_A + jX_A$, กระแสเท่ากับ I , บาลัน (balun) และสายส่ง ส่วนวงจรสมมูลของสายอากาศภาครับประกอบด้วย ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ V_{oc} ซึ่งเกิดจากค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E)



รูป 2.2 วงจรสมมูลของระบบสายอากาศภาคส่ง



รูป 2.3 วงจรสมมูลของระบบสายอากาศภาครับ

ที่กำเนิดมาจากสายอากาศส่งคู่กับความยาวประสิทธิผลของสายอากาศรับ (h), สายอากาศรับ มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_A , บาลัน (balun), สายส่ง และเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (spectrum analyzer) ซึ่งมีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่รับได้เท่ากับ V_R และมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_R โดย V_R มีนิยาม ดังสมการ (2.4) [3]

$$V_R = \frac{E}{AF} \quad (2.4)$$

โดย AF คือ ตัวประกอบสายอากาศ (antenna factor), $\frac{1}{m}$

สามารถคำนวณกำลังคลื่นแผ่ออก (radiated power output) จากสายอากาศส่งตามรูป 2.2 ได้ดังนี้

$$P_t = I^2 R_A \quad (2.5)$$

เมื่อสายอากาศมีสมบัติตามทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับ (reciprocity theorem) จะได้ $V_{oc} = V$ และกระแสที่ไหลผ่าน Z_R คือ $I_R = I$ ในวงจรสมมูลของสายอากาศส่งและสายอากาศรับดังรูป 2.2 และรูป 2.3 ตามลำดับ กระแส I สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวประกอบสายอากาศส่ง (transmitting antenna factor, AF_T) โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้
พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง V_{oc} และ E

$$V_{oc} = V = hE \quad (2.6)$$

ดังนั้น

$$E = \frac{V}{h} \quad (2.7)$$

แทน E จากสมการ (2.7) ลงในสมการ (2.4) จะได้

$$V_R = \frac{V}{h AF} \quad (2.8)$$

อาศัยรูป 2.3 สามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่าน Z_R โดยกำหนดให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50Ω

$$I = \frac{V_R}{Z_R} = \frac{V_R}{50} \quad (2.9)$$

แทน V_R จากสมการ (2.8) ลงในสมการ (2.9) จะได้

$$I = \frac{V}{50 h A F} \quad (2.10)$$

การพิจารณาค่าความยาวประสิทธิผล (h) มีขั้นตอนดังนี้ กำลังคลื่นที่มาถึงสายอากาศภาครับได้จากสูตรการส่งผ่านของฟรีส (Friis' transmission formula) ดังสมการ (2.11)

$$\begin{aligned} P_R &= S \times A_m \\ &= \frac{E^2}{120\pi} \times \frac{\lambda^2 G}{4\pi} \end{aligned} \quad (2.11)$$

เมื่อ A_m เป็นขนาดของช่องเปิดประสิทธิผลของสายอากาศภาครับ หากพิจารณารูป 2.3 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ที่มีอิมพีแดนซ์ $Z_R = R_R$ คำนวณได้จากสมการ (2.12)

$$V_R = \sqrt{P_R R_R} \quad (2.12)$$

แต่เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่มีค่าเท่ากัน

$$R_R = R_A \quad (2.13)$$

แทนค่า R_R จากสมการ (2.13) ลงในสมการ (2.12)

$$V_R = \sqrt{P_R R_A} \quad (2.14)$$

แทนค่า P_R จากสมการ (2.11) ลงในสมการ (2.14)

$$V_R = \frac{E\lambda}{2\pi} \left(\frac{G R_A}{120} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) มีค่าเป็นสองเท่าของแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องรับ (V_R) เนื่องจากค่าความต้านทานที่เครื่องรับ (R_R) มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของสายอากาศ (R_A)

$$\begin{aligned} V_{oc} &= 2V_R \\ &= \frac{E\lambda}{\pi} \left(\frac{GR_A}{120} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.16)$$

อาศัยผลตามสมการ (2.6) และสมการ (2.16) จะได้ค่าความยาวประสิทธิผลคือ

$$h = \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{GR_A}{120} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

แทนค่าความยาวประสิทธิผลจากสมการ (2.17) ในสมการ (2.10)

$$I = \frac{V}{50AF} \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{120}{GR_A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

เมื่อพิจารณากระแสของสายอากาศที่อยู่ในภาคส่งจะทำให้ได้กระแสคือ

$$I = \frac{V}{50AF_T} \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{120}{GR_A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

เมื่อพิจารณาค่ากระแส (I) ในสมการ (2.5) และ (2.19) แล้วแทนค่าลงในสมการ (2.3) จะได้

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \frac{V\pi(120 \times 30)^{\frac{1}{2}} e^{-j\beta d}}{50AF_T \lambda d} \\ &= \frac{Vf_M}{79.58AF_T} \frac{e^{-j\beta d}}{d} \end{aligned} \quad (2.20)$$

โดย V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแหล่งจ่ายกำลัง

AF_T คือ ตัวประกอบสายอากาศภาคส่ง

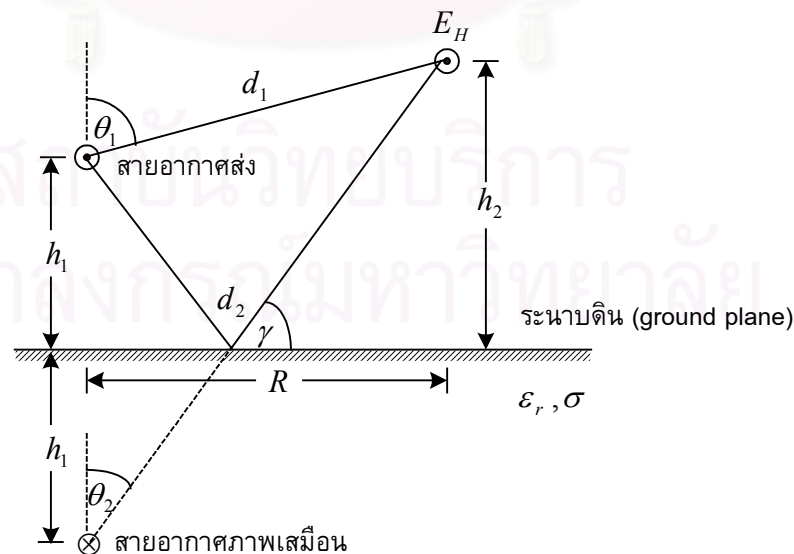
f_M คือ ความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1000 MHz

ค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (Normalized Site Attenuation, NSA) ที่แสดงถึงสมรรถนะของสถานทดสอบจะพิจารณาทั้งโพลาไรเซชันแนวนอน (horizontal polarization) และโพลาไรเซชันแนวตั้ง (vertical polarization) จะเปลี่ยนแปลงความสูงสายอากาศรับเพื่อหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ณ ความถี่แต่ละความถี่ สาเหตุที่ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่แต่ละความถี่มีค่าไม่เท่ากันนั้นเป็นผลมาจากคลื่นที่สะท้อนมาจากระนาบดิน การวิเคราะห์จะใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน (image theorem) ดังรายละเอียดการคำนวณที่จะกล่าวต่อไป

2.1.1 ความเข้มสนามไฟฟ้าโพลาไรเซชันแนวนอนบนระนาบดินขนาดอนันต์

การพิจารณาค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วนั้นจะคำนวณจากผลรวมของค่าสนามไฟฟ้าที่แทรกสอดแบบเสริมกันมากที่สุดของคลื่นวิถีตรงกับคลื่นที่สะท้อนมาจากระนาบดิน ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามที่มาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2] กำหนด

การคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าโพลาไรเซชันแนวนอนนั้นพิจารณาได้ดังรูป 2.4 กำหนดให้สายอากาศส่งสูง h_1 กำหนดให้จุดสังเกตอยู่ห่างจากสายอากาศส่งในแนวระดับเป็นระยะ R และสายอากาศรับสูง h_2 จากระนาบดิน เมื่อพิจารณาผลกระทบของระนาบดินโดยใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนทำให้พิจารณาได้ว่ามีสายอากาศส่งเกิดขึ้นอีกหนึ่งตัวเรียกว่า สายอากาศภาพเสมือน (image antenna) ดังรูป 2.4



รูป 2.4 สนามไฟฟ้าวิถีตรงกับวิถีสะท้อนจากระนาบดินในโพลาไรเซชันแนวนอน

สนามไฟฟ้าที่มาจากการสะท้อนระนาบดินนั้นจะคูณด้วยค่าปัจจัยที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนในโพลาริเซชันแนวอนที่มีค่าเท่ากับ $\rho_h = |\rho_h| e^{j\phi_h}$ ดังนั้นผลรวมของความเข้มสนามไฟฟ้าที่มาจากวิธีตรงกับวิธีสะท้อนนั้นพิจารณาได้จากสมการ (2.20) กับรูป 2.4 ทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้ารวมดังสมการ (2.21)

$$\bar{E}_H = \frac{Vf_M}{79.58 AF_T} \left[\frac{e^{-j\beta d_1}}{d_1} + \frac{|\rho_h| e^{j\phi_h} e^{-j\beta d_2}}{d_2} \right] \quad (2.21)$$

โดย $d_1 = [R^2 + (h_1 - h_2)^2]^{\frac{1}{2}}$

$$d_2 = [R^2 + (h_1 + h_2)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\rho_h = \frac{\sin \gamma - (\epsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma)^{\frac{1}{2}}}{\sin \gamma + (\epsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma)^{\frac{1}{2}}} \quad [3]$$

ϵ_r คือ ค่าคงตัวสภาพยอมสัมพัทธ์, farad / meter

σ คือ สภาพนำไฟฟ้า, siemens / meter

ค่าผลรวมความเข้มสนามไฟฟ้าในสมการ (2.21) มีขนาดความเข้มสนามคือ

$$E_H = \frac{Vf_M}{79.58 AF_T} \frac{[d_2^2 + d_1^2 |\rho_h|^2 + 2d_1 d_2 |\rho_h| \cos(\phi_h - \beta[d_2 - d_1])]^{\frac{1}{2}}}{d_1 d_2} \quad (2.22)$$

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของ \bar{E} ในสมการ (2.3) และสมการ (2.20) จะได้ว่า

$$\sqrt{30 P_t G_t} = \frac{Vf_M}{79.58 AF_T}$$

ดังนั้นขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้าสามารถจัดให้อยู่ในรูปของกำลังส่งของแหล่งจ่ายกับอัตราขยายของสายอากาศส่งได้ดังนี้

$$E_H = \frac{\sqrt{30 P_t G_t} [d_2^2 + d_1^2 |\rho_h|^2 + 2d_1 d_2 |\rho_h| \cos(\phi_h - \beta[d_2 - d_1])]^{\frac{1}{2}}}{d_1 d_2} \quad (2.23)$$

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้สายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (half-wavelength dipole antenna) เนื่องจากสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นมีขนาดที่ไม่ยาวมากนักในช่วงของความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ (30 MHz – 1000 MHz) จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการปฏิบัติการทดลอง

การพิจารณาค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วจะคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นวิถีตรงและวิถีที่สะท้อนจากระนาบดินในช่วงความสูง $h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}$ โดยเปลี่ยนแปลงความสูงสายอากาศรับเพื่อตรวจวัดค่าขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุดในช่วงความสูงดังกล่าวแล้วนำค่าขนาดความเข้มสนามไฟฟ้างกล่าวมาคำนวณหาค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว อาศัยสมการ (2.23) โดยแทนค่าขนาดความเข้มสนามไฟฟ้ามากที่สุดจากสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (E_{DH}^{\max}) และปรับบรรทัดฐานด้วยค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้างกล่าวมา (2.24)

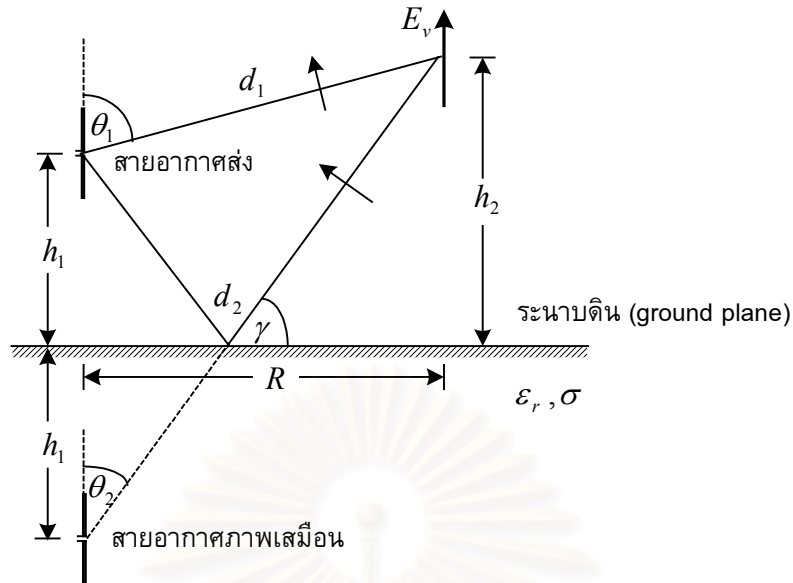
$$\frac{E_{DH}^{\max}}{\sqrt{30P_t G_t}} = \frac{[d_2^2 + d_1^2 |\rho_h|^2 + 2d_1 d_2 |\rho_h| \cos(\phi_h - \beta[d_2 - d_1])]}{d_1 d_2}^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (2.22) ร่วมกับสมการ (2.24) จะได้ค่าขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดในโพลาริเซชันแนวอนดั่งสมการ (2.25)

$$E_H^{\max} = \frac{V f_M E_{DH}^{\max}}{79.58 \sqrt{30P_t G_t} A F_T} \quad (2.25)$$

2.1.2 ความเข้มสนามไฟฟ้าโพลาริเซชันแนวตั้งบนระนาบดินขนาดอนันต์

การคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าในโพลาริเซชันแนวตั้งด้วยทฤษฎีบทภาพเสมือนนั้นพิจารณาได้ดังรูป 2.5 ผลรวมของความเข้มสนามไฟฟ้าต้องคำนึงถึงแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern, $F(\theta)$) ของสายอากาศส่งและโพลาริเซชันของสายอากาศรับ คลื่นสนามไฟฟ้าวิถีที่มาจากกระสะท้อนระนาบดินจะคูณด้วยค่าปัจจัยที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนโพลาริเซชันแนวตั้งซึ่งมีค่าเท่ากับ $\rho_v = |\rho_v| e^{j\phi_v}$ ดังนั้นผลรวมของสนามไฟฟ้าที่มาจากวิถีตรงกับวิถีสะท้อนแสดงดังสมการ (2.26)



รูป 2.5 สนามไฟฟ้าวิถีตรงกับวิถีสะท้อนจากระนาบดินในโพลาริเซชันแนวตั้ง

$$\vec{E}_v = \frac{Vf_M}{79.58 AF_T} \left[\frac{e^{-j\beta d_1}}{d_1} F(\theta_1) \sin(\theta_1) + \frac{|\rho_v| e^{j\phi_v} e^{-j\beta d_2}}{d_2} F(\theta_2) \sin(\theta_2) \right] \quad (2.26)$$

$$\text{โดย [3]} \quad \rho_v = \frac{(\epsilon_r - j60\lambda\sigma) \sin \gamma - (\epsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma)^{\frac{1}{2}}}{(\epsilon_r - j60\lambda\sigma) \sin \gamma + (\epsilon_r - j60\lambda\sigma - \cos^2 \gamma)^{\frac{1}{2}}}$$

กำหนดให้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นประมาณด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลสั้น (short dipole) ซึ่งมีค่าดังนี้

$$F(\theta_1) = \sin \theta_1 = \frac{R}{d_1}$$

และแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศภาพเสมือนมีค่าดังนี้

$$F(\theta_2) = \sin \theta_2 = \frac{R}{d_2}$$

เมื่อแทนแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศส่งและสายอากาศส่งภาพเสมือนลงในสมการ (2.26) จะได้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าดังนี้

$$\bar{E}_V = \frac{Vf_M}{79.58 AF_T} \left[\frac{R^2 e^{-j\beta d_1}}{d_1^3} + \frac{R^2 |\rho_v| e^{j\phi_v} e^{-j\beta d_2}}{d_2^3} \right] \quad (2.27)$$

ค่าผลรวมสนามไฟฟ้าในสมการ (2.27) มีค่าขนาดสนามไฟฟ้าคือ

$$E_V = \frac{Vf_M}{79.58 AF_T} \frac{R^2 [d_2^6 + d_1^6 |\rho_v|^2 + 2d_1^3 d_2^3 |\rho_v| \cos(\phi_v - \beta[d_2 - d_1])]^{\frac{1}{2}}}{d_1^3 d_2^3} \quad (2.28)$$

ถ้าจัดรูปขนาดของความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่สายอากาศรับตรวจวัดได้ในช่วงความสูง $h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}$ ให้อยู่ในรูปของกำลังส่งของแหล่งจ่ายกับอัตราขยายสายอากาศส่ง ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ปรับบรรทัดฐานแล้วด้วยค่ารากที่สองของกำลังส่งเฉลี่ยของความเข้มสนามไฟฟ้าแสดงได้ดัง สมการ (2.29)

$$\frac{E_{DV}^{\max}}{\sqrt{30 P_t G_t}} = \frac{R^2 [d_2^6 + d_1^6 |\rho_v|^2 + 2d_1^3 d_2^3 |\rho_v| \cos(\phi_v - \beta[d_2 - d_1])]^{\frac{1}{2}}}{d_1^3 d_2^3} \quad (2.29)$$

ดังนั้นค่าขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดในโพลาริเซชันแนวตั้ง แสดงดังสมการ (2.30)

$$E_V^{\max} = \frac{Vf_M E_{DV}^{\max}}{79.58 \sqrt{30 P_t G_t} AF_T} \quad (2.30)$$

สังเกตได้ว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดในโพลาริเซชันแนวนอนกับค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดในโพลาริเซชันแนวตั้ง แสดงดังสมการ (2.25), (2.30) ตามลำดับ จะเห็นว่ามีความคล้ายคลึงกัน

2.1.3 ค่าลดทอนสถานที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (NSA)

ค่าลดทอนสถานที่ทดสอบ (site attenuation, SA) [3,4] เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สายอากาศส่งกับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สายอากาศรับ แสดงดังสมการ (2.31)

$$SA = \frac{V_I}{V_R} \quad (2.31)$$

โดย V_I คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของสายอากาศส่ง

V_R คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของสายอากาศรับ

ถ้าแมตซ์อิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายกำลังกับสายอากาศส่งทำให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สายอากาศส่ง (V_I) มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลัง (V) ที่แสดงในรูป 2.2 ดังนั้นค่าลดทอนสถานการณ์ทดสอบจึงมีค่าดังสมการ (2.32)

$$SA = \frac{V}{2V_R} \quad (2.32)$$

เมื่อแทนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของสายอากาศรับจากสมการ (2.4) จะได้ค่าลดทอนสถานการณ์ทดสอบดังนี้

$$SA = \frac{VAF_R}{2E} \quad (2.33)$$

โดย AF_R คือ ตัวประกอบสายอากาศรับ

เมื่อแทนค่าขนาดของสนามไฟฟ้าสูงสุดจากสมการ (2.25) และ (2.30) ในสมการ (2.33) ทำให้ได้ค่าลดทอนสถานการณ์ทดสอบดังสมการ (2.34)

$$SA_{DH,DV} = \frac{79.58\sqrt{30P_t G_t} AF_T^{DH,DV} AF_R^{DH,DV}}{2 f_M E_{DH,DV}^{\max}} \quad (2.34)$$

ถ้าหากจัดรูปค่าลดทอนสถานการณ์ทดสอบโดยหารด้วยตัวประกอบสายอากาศของภาคส่งและภาครับ ทำให้ค่าลดทอนสถานการณ์ทดสอบเปลี่ยนแปลงไปซึ่งเรียกว่า ค่าลดทอนสถานการณ์ทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (Normalized Site Attenuation, NSA) [4] แสดงดังสมการ (2.35)

$$NSA_{DH,DV} = \frac{SA_{DH,DV}}{AF_T^{DH,DV} AF_R^{DH,DV}} = \frac{79.58\sqrt{30P_t G_t}}{2 f_M E_{DH,DV}^{\max}} \quad (2.35)$$

เมื่อเขียนค่าลดทอนสถานการณ์ทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว ดังสมการ (2.35) ให้อยู่ในหน่วย dB จะได้ว่า

$$NSA_{DH,DV} (dB) = 20 \log \left(\frac{79.58\sqrt{30P_t G_t}}{2} \right) - 20 \log(f_M) - 20 \log(E_{DH,DV}^{\max}) \quad (2.36)$$

โดย P_t คือ กำลัง ณ สายอากาศส่ง

G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

f_M คือ ความถี่ปฏิบัติการ, MHz

$E_{DH,DV}^{\max}$ คือ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่สายอากาศไดโพล ณ ภาครับรับได้ในช่วงความสูง

$h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}$ ในโพลาริเซชันแนวราบ (DH) แสดงในสมการ

(2.25) และโพลาริเซชันแนวตั้ง (DV) แสดงในสมการ (2.30) ตามลำดับ

ค่าสมรรถนะของสถานทดสอบตามสมการ (2.35) จะมีความหมายอีกนัยหนึ่งคือ เป็นการคำนวณค่าสูญเสียของการส่งผ่าน (transmission loss) ที่มีค่าน้อยที่สุดของค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของสายอากาศส่งกับสายอากาศรับที่จัดวางอยู่ ณ ตำแหน่งใดๆ บนระนาบดินขนาดอนันต์ ทั้งการจัดวางตัวของสายอากาศรับและภาคส่งในโพลาริเซชันแนวนอนและแนวตั้ง

เมื่อพิจารณาค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วทั้งในโพลาริเซชันแนวราบและแนวตั้งนั้นจะคำนวณในกรณีที่มีขนาดของระนาบดินเป็นอนันต์ แต่เนื่องจากทางปฏิบัติไม่สามารถจัดตั้งสถานทดสอบบนระนาบดินที่มีขนาดเป็นอนันต์ได้ ดังนั้นมาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2] จึงกำหนดขนาดและลักษณะรูปร่างของระนาบดินขึ้นดังที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.2 ขนาดและรูปร่างระนาบดินของการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง

ถ้าหากจัดตั้งบริษัททดสอบบนระนาบดินขนาดจำกัดทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่เพียงประสงค์ขึ้นนอกเหนือจากสนามไฟฟ้าที่มาจากวิถีตรงและหลายวิถีที่สะท้อนจากระนาบดิน ดังนั้นในมาตรฐาน [1,2,5] จึงมีข้อกำหนดเกี่ยวกับความเข้มสนามไฟฟ้าที่มาจากวิถีอื่นว่าควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความเข้มสนามไฟฟ้าที่มาจากวิถีตรงอยู่ 6 dB [1,4,5] ดังสมการ (2.37)

$$E_s \leq E_d - 6\text{ dB} \quad (2.37)$$

โดย E_s คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าไม่พึงประสงค์

E_d คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าวิถีตรง

เงื่อนไขในสมการ (2.37) ทำให้กำหนดลักษณะรูปร่างของระนาบดินได้ 2 ลักษณะคือกรณีแรกบริษัททดสอบวางอยู่บนโต๊ะหมุน และกรณีที่สองบริษัททดสอบไม่ได้วางอยู่บนโต๊ะ

หมุนเนื่องจากปริมาตรทดสอบมีขนาดใหญ่จึงไม่สะดวกที่จะจัดวางบนโต๊ะหมุน ซึ่งรายละเอียดมีดังในหัวข้อต่อไป

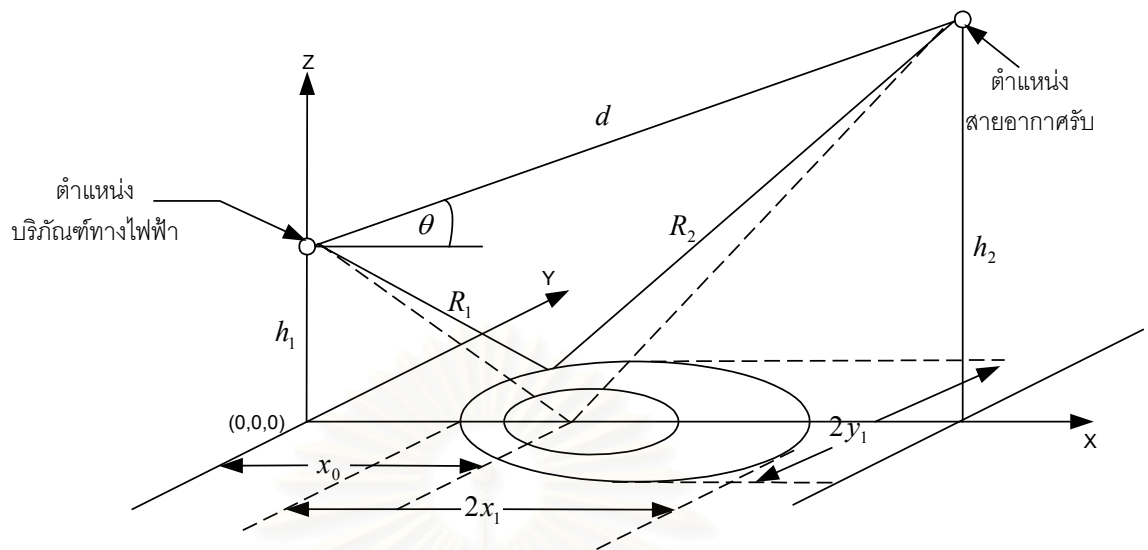
2.2.1 ขนาดและรูปร่างของระนาบดินเมื่อปริมาตรทางไฟฟ้าวางอยู่บนโต๊ะหมุน

การทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีสถานทดสอบแบบกลางแจ้งจะทดสอบในย่านความถี่ 30-1000 MHz ทั้งโพลาไรเซชันแนวนอน (horizontal polarization) และโพลาไรเซชันแนวตั้ง (vertical polarization) การตรวจวัดคลื่นที่แพร่กระจายออกมาจากปริมาตรทางไฟฟ้าจะทดสอบรอบปริมาตรทางไฟฟ้า (360 องศา)

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขในสมการ (2.37) ร่วมกับสมการ (2.1) ทำให้กล่าวได้ว่าระยะทางของความเข้มสนามไฟฟ้าไม่พึ่งประสงค์ (E_s) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของระยะทางของความเข้มสนามไฟฟ้าวิถีตรง (E_d) ดังนั้นจึงสามารถกำหนดรูปร่างของระนาบดินได้เป็นวงรีเนื่องจากระยะทางที่เขียนลากจากจุดโฟกัสจุดหนึ่งไปยังเส้นขอบของวงรีแล้วเขียนลากไปยังจุดโฟกัสอีกจุดหนึ่งมีระยะทางเป็นสองเท่าของระยะทางที่เขียนลากจากจุดโฟกัสไปยังจุดโฟกัสโดยตรง การตรวจวัดค่าสมรรถนะของสถานทดสอบจะกระทำได้โดยการจัดวางสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ณ ตำแหน่งโฟกัสของวงรีในบริเวณที่ปราศจากสิ่งกีดขวางดังรูป 2.6 สายอากาศภาคส่งและสายอากาศรับอยู่สูงจากระนาบดิน h_1 และ h_2 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นจากรูป 2.6 ว่าจุดโฟกัสสองจุดใด ๆ นั้นจะทำให้เกิดภาพฉายลงบนระนาบดินขนาดอนันต์ (ระนาบ XY) ที่มีลักษณะเป็นรูปวงรีขนาดต่างๆ ที่เรียกว่า วงรีเฟรสเนลที่อันดับต่างๆ ภาพฉายวงรีขนาดต่างๆ ที่แสดงดังรูป 2.6 ทำให้สามารถคำนวณจุดศูนย์กลางของวงรี (x_0), แกนรอง (y_1) และแกนหลัก (x_1) ได้ดังสมการที่ (2.38), (2.39) และ (2.40) ตามลำดับ [5] ขนาดและรูปร่างของระนาบดินนั้นกำหนดจากวงรีที่มีขนาดต่ำที่สุดซึ่งก็คือ วงรีเฟรสเนลอันดับแรก (first fresnal ellipse) แต่ขนาดของวงรีเฟรสเนลอันดับแรกนั้นต้องมีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อพิจารณาย่านความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ

[5]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 2.6 ลักษณะของระนาบดินและการวางตำแหน่งบริเวณที่ทางไฟฟ้า กับสายอากาศรับ
เมื่อใช้โตะหมุนในการทดสอบ

$$x_0 = \frac{R}{2} \left[1 - \frac{\tan^2 \theta}{\left(\frac{\delta_n}{R} + \sec \theta \right)^2 - 1} \right] \quad (2.38)$$

$$y_1 = \frac{R}{2} \left\{ \left[\left(\frac{\delta_n}{R} \right)^2 + \frac{2\delta_n}{R} \sec \theta \right] \left[1 - \frac{\tan^2 \theta}{\left(\frac{\delta_n}{R} + \sec \theta \right)^2 - 1} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.39)$$

$$x_1 = y_1 \left[1 + \frac{1}{\left(\frac{\delta_n}{R} + \sec \theta \right)^2 - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

โดย R คือ ระยะห่างระหว่าง EUT กับสายอากาศรับ

$$\delta_n = R_1 + R_2 - d + \frac{n\lambda}{2}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

การพิจารณาขนาดของระนาบดินขึ้นอยู่กับการจัดต่างๆ ได้แก่ ระยะห่างระหว่าง EUT กับ สายอากาศรับ ความถี่ และตำแหน่งของบริภัณฑ์ทดสอบกับสายอากาศรับ เป็นต้น โดยการพิจารณานั้นจะพิจารณาทั้งสองแนวการวางตัวของสายอากาศรับ คือ แนวการวางตัวแรกโพลาริเซชันแนวนอนกำหนดให้ที่ $R = 3,10$ เมตร $h_1 = 2$ เมตร $1 \leq h_2 \leq 4$ เมตร และกรณี $R = 30$ เมตร $h_1 = 2$ เมตร $2 \leq h_2 \leq 6$ เมตร แนวการวางตัวที่สองโพลาริเซชันแนวตั้งกำหนดให้ $R = 3,10$ เมตร $h_1 = 2.75$ เมตร และ $1 \leq h_2 \leq 4$ เมตร และกรณี $R = 30$ เมตร $h_1 = 2.75$ เมตร และ $2 \leq h_2 \leq 6$ เมตร ผลการคำนวณแสดงดังตาราง 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตาราง 2.1 ผลการคำนวณมิติของวงรีเฟรสเนลอันดับแรกบนระนาบดิน (ระนาบ xy) เมื่อใช้ โต้ะหมุนในการทดสอบ กรณีสายอากาศรับวางตัวในโพลาริเซชันแนวนอน

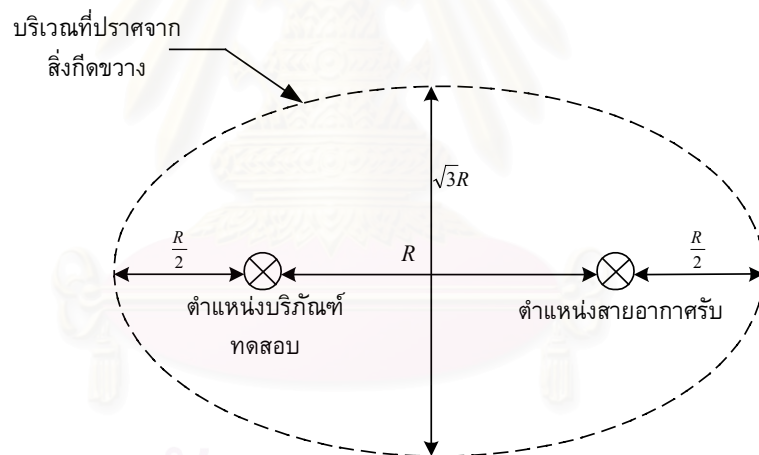
ระยะทดสอบ R (m)	ความถี่ (MHz)	ความสูง (m)		แกนวงรี (m)		จุดศูนย์กลาง วงรี x_0 (m)
		h_1	h_2	$2x_1$	$2y_1$	
3	30	2	4	11.34	10.96	1.45
	1000			6.14	5.52	1.34
10	30	2	4	16.29	13.03	4.89
	1000			10.62	5.65	4.49
30	30	2	6	34.60	19.19	14.40
	1000			24.39	6.70	11.73

ตาราง 2.2 ผลการคำนวณมิติของวงรีเฟรสเนลอันดับแรกบนระนาบดิน (ระนาบ xy) เมื่อใช้ โต้ะหมุนในการทดสอบ กรณีสายอากาศรับวางตัวในโพลาริเซชันแนวตั้ง

ระยะทดสอบ R (m)	ความถี่ (MHz)	ความสูง (m)		แกนวงรี (m)		จุดศูนย์กลาง วงรี x_0 (m)
		h_1	h_2	$2x_1$	$2y_1$	
3	30	2.75	4	12.25	11.89	1.48
	1000			7.29	6.69	1.49
10	30	2.75	4	16.92	13.71	4.96
	1000			11.83	6.79	4.80
30	30	2.75	6	35.33	19.83	14.62
	1000			27.54	8.13	13.16

จะสังเกตเห็นจากตาราง 2.1 และ 2.2 ว่าผลการคำนวณมิติของวงรีเฟรสนัลอันดับแรกบนระนาบดิน (ระนาบ xy) โดยกำหนดให้ $n = 1$ ในสมการ (2.38) ถึง (2.40) จะได้ว่าที่ความถี่ต่ำสุดของการทดสอบ (30 MHz) กรณีสายอากาศรับวางตัวในโพลาริเซชันแนวตั้ง (ตาราง 2.2) มีมิติของระนาบดินใหญ่กว่ากรณีสายอากาศรับวางตัวในโพลาริเซชันแนวราบ (ตาราง 2.1) ที่ทุกๆ ระยะทดสอบ ดังนั้นในการจัดตั้งสถานทดสอบจะใช้ขนาดของระนาบดิน ณ ความถี่ต่ำสุด ของกรณีสายอากาศรับวางตัวในโพลาริเซชันแนวตั้ง ในทางปฏิบัติแล้วเพื่อความสะดวกในการสร้างสถานทดสอบแบบกลางแจ้งจะสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ใช้แกนหลัก (x_1) และแกนรอง (y_1) เป็นความกว้างและความยาวของมิติระนาบดินแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การกำหนดขนาดของระนาบดินตามขนาดของวงรีเฟรสนัลอันดับแรกตามที่ได้กล่าวมาแล้วอ้างอิงตามมาตรฐาน ANSI [5] แต่ถ้ากำหนดให้ความสูงของโต๊ะหมุนที่วางบริภัณฑ์ทดสอบกับสายอากาศรับมีค่าเท่ากันแล้วขนาดของระนาบดินนี้จะจะเป็นไปตามมาตรฐาน CISPR [2] สามารถกำหนดรูปร่างและคำนวณขนาดของระนาบดินได้ดังรูป 2.7 และตาราง 2.3



รูป 2.7 ลักษณะและขนาดของระนาบดินในบริเวณที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (obstruction free area) กรณีใช้โต๊ะหมุนวางบริภัณฑ์ทางไฟฟ้ากับสายอากาศภาครับด้วยความสูงเท่ากัน

ตาราง 2.3 ผลการคำนวณขนาดของระนาบดินกรณีใช้โต๊ะหมุนวางบริภัณฑ์ทางไฟฟ้าเมื่อสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีความสูงเท่ากัน

ระยะทดสอบ $R(m)$	แกนหลัก (ความยาว, m)	แกนรอง (ความกว้าง, m)
3	6	5.20
10	20	17.32
30	60	51.96

จะสังเกตเห็นจากตาราง 2.1, 2.2 และ 2.3 ว่าขนาดระนาบดินในมาตรฐาน ANSI [1,5] ที่ระยะทดสอบ $R = 3$ เมตร มีขนาดใหญ่กว่าขนาดระนาบดินในมาตรฐาน CISPR [2] แต่ที่ระยะทดสอบ $R = 10$ และ 30 เมตร จะมีขนาดระนาบดินเล็กกว่า เนื่องมาจากการคำนวณขนาดของระนาบดินในมาตรฐาน CISPR [2] นั้นจะคำนวณกรณีที่มีความสูงของโต๊ะหมุนกับความสูงของสายอากาศรับเท่ากันแต่การคำนวณขนาดของระนาบดินในมาตรฐาน ANSI [1,5] นั้นจะคำนวณในกรณีที่ความสูงของสายอากาศภาครับสูงที่สุดตามที่กำหนดในแต่ละระยะทดสอบ

2.2.2 ขนาดและรูปร่างของระนาบดินเมื่อบริเวณที่ทางไฟฟ้าไม่ได้วางอยู่บนโต๊ะหมุน [5]

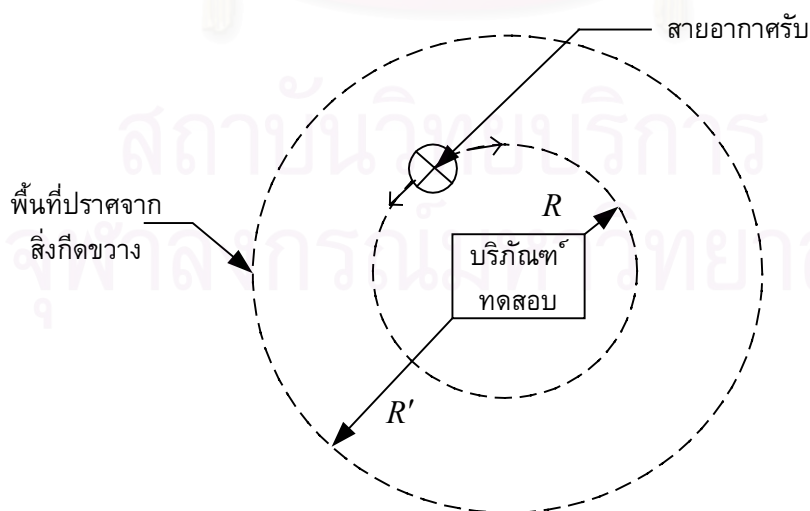
ถ้าบริเวณที่ทางไฟฟ้านั้นมีขนาดใหญ่ไม่สะดวกที่จะหมุนเพื่อการทดสอบ ในการทดสอบจะเคลื่อนสายอากาศรับรอบบริเวณที่ทดสอบ (360 องศา) ทำให้ระนาบดินเป็นรูปวงกลมดังรูป 2.8 รัศมีของระนาบดินแบบวงกลม (R') นี้ได้มาจากการพิจารณาวงรีเฟรสเนลอันดับแรก และคำนวณได้จากสมการ (2.41)

$$R' = x_0 + x_1 \quad (2.41)$$

โดย x_0 คือ จุดศูนย์กลางวงรีที่ได้จากการคำนวณในสมการ (2.38)

x_1 คือ ค่าครึ่งความยาวแกนเอกที่ได้จากการคำนวณในสมการ (2.40)

ในทางปฏิบัติแล้วเพื่อความสะดวกในการสร้าง จะสร้างระนาบดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้รัศมีของระนาบดิน (R') เป็นตัวแปรในการกำหนดมิติของระนาบดินแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส มิติของระนาบดินแสดงดังตารางที่ 2.4



รูป 2.8 ลักษณะของระนาบดินและการวางตำแหน่งบริเวณที่ทางไฟฟ้าสายอากาศรับเมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่

ระยะทดสอบที่ใช้ในการตรวจวัดสำหรับการทดสอบกลางแจ้งต้องเป็นระยะสนามไกลเรย์ไค (rayleigh distance) [6] ตามข้อกำหนด ANSI [1,2] ระยะห่างของบริภัณฑ์ทดสอบกับสายอากาศภาครับ R คือ 3, 10 และ 30 เมตร ถ้ากำหนดให้บริภัณฑ์ทางไฟฟ้ามีขนาด (D) ดังนั้นที่ระยะห่างแต่ละระยะขนาดบริภัณฑ์ทางไฟฟ้าใหญ่สุดที่ทดสอบได้เป็นดังสมการ (2.42)

$$D_{\max}^2 \leq \frac{R \times \lambda_{\min}}{2} \quad (2.42)$$

ขนาดของบริภัณฑ์ทางไฟฟ้าสูงสุด (D_{\max}) ที่ระยะ 3, 10 และ 30 เมตร คือ 0.45, 1.22 และ 2.12 เมตร ตามลำดับ

ตาราง 2.4 ผลการคำนวณมิติของวงรีเฟรสเนลอันดับแรกบนระนาบดิน (ระนาบ xy) เมื่อบริภัณฑ์ทดสอบอยู่ประจำที่

ระยะทดสอบ R (m)	ความถี่ (MHz)	ความสูง (m)		จุดศูนย์กลาง วงรี x_0 (m)	รัศมีของระนาบ ดิน R' (m)
		h_1	h_2		
3	30	2.75	4	1.48	7.61
	1000			1.49	5.14
10	30	2.75	4	4.96	13.42
	1000			4.80	10.72
30	30	2.75	6	14.62	32.29
	1000			13.16	26.93

การกำหนดขนาดระนาบดินจากมาตรฐาน ANSI [1,2] ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นขนาดของระนาบดินมีขนาดที่จำกัด ทำให้ปรากฏการณ์คลื่นเดี่ยวเบนที่ขอบส่งผลกระทบต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบมากขึ้นดังที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.3 การพิจารณาผลกระทบคลื่นเดี่ยวเบนของระนาบดินต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง

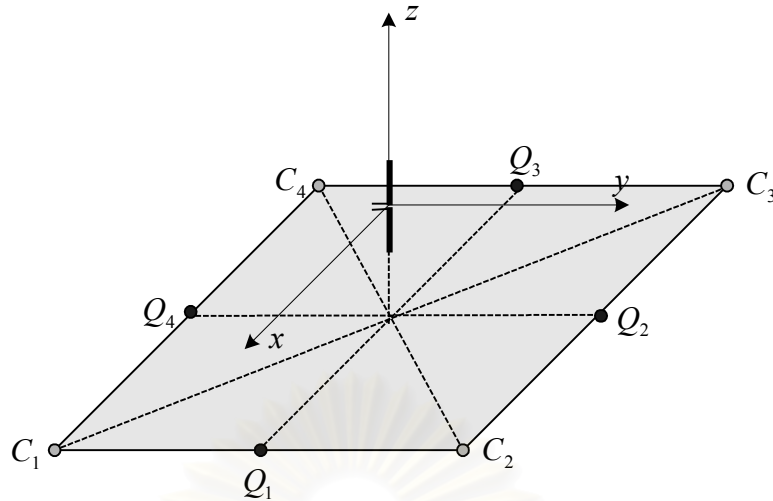
การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งในอุดมคตินั้นจะทดสอบบนระนาบดินที่กว้างและปราศจากสิ่งกีดขวางตามที่ได้แสดงดังตาราง 2.1 ถึงตาราง 2.4 ขนาดพื้นที่ดังกล่าวอาจจะทำให้

ค่าใช้จ่ายในการสร้างสถานทดสอบมีราคาสูง วิธีหนึ่งที่สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้คือการลดขนาดของระนาบดิน แต่การลดขนาดของระนาบดินนั้นจะทำให้ปรากฏการณ์คลื่นเดี่ยวเบนที่ขอบส่งผลกระทบต่อค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วมากขึ้นจึงมีความจำเป็นต้องทราบผลกระทบดังกล่าว กรรมวิธีที่ใช้ศึกษาผลกระทบจากปรากฏการณ์เดี่ยวเบนที่ขอบคือ ระเบียบวิธีผสมผสาน (hybrid methods) ระเบียบวิธีนี้เป็นการใช้ระเบียบวิธีย่านความถี่ต่ำร่วมกับระเบียบวิธีย่านความถี่สูง โดยระเบียบวิธีย่านความถี่ต่ำนั้นจะใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ (Moment Methods, MoM) โดยจะใช้วิเคราะห์ที่ตัวสายอากาศ ส่วนระเบียบวิธีย่านความถี่สูงนั้นจะใช้วิเคราะห์โครงสร้างที่สายอากาศติดตั้งอยู่ซึ่งจะให้ทฤษฎีการเดี่ยวเบนเชิงเอกรูป (Uniform Theory of Diffraction, UTD)

2.3.1 การพิจารณาพจน์เมตริกซ์อิมพีแดนซ์โดยระเบียบวิธีผสมผสาน

เนื่องจากระเบียบวิธีโมเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่ใช้แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่จัดอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์และสมการปริพันธ์ หรือมีทั้งสองรูปแบบดังกล่าวผสมกันในสมการปัญหา ระเบียบวิธีโมเมนต์นี้นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาความถี่ต่ำหรือขนาดของโครงสร้างที่สายอากาศติดตั้งอยู่มีขนาดไม่ใหญ่มากเมื่อเทียบกับค่าความยาวคลื่น แต่ถ้าโครงสร้างที่จะนำมาวิเคราะห์มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับค่าความยาวคลื่นจะทำให้เกิดข้อจำกัดด้านการคำนวณทั้งทรัพยากรเวลาที่ใช้เวลาในการคำนวณนาน และทรัพยากรหน่วยความจำของเครื่องคำนวณที่มีจำกัด ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวลงจึงทำให้เกิดระเบียบวิธีผสมผสานขึ้นกล่าวคือ การวิเคราะห์โครงสร้างที่สายอากาศติดตั้งอยู่นั้นจะใช้ระเบียบวิธีย่านความถี่สูง ส่วนระเบียบวิธีโมเมนต์จะใช้วิเคราะห์ที่ตัวสายอากาศเท่านั้น การผสมผสานระหว่างระเบียบวิธีโมเมนต์กับทฤษฎีการเดี่ยวเบนเชิงเอกรูปจะกระทำได้โดยปรับปรุงเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีโมเมนต์โดยการบวกพจน์เมตริกซ์อิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้จากทฤษฎีการเดี่ยวเบนเชิงเอกรูป [8,9,10] ซึ่งเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ดังกล่าวนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างที่สายอากาศวางตัวอยู่ซึ่งโครงสร้างในวิทยานิพนธ์นี้คือ ระนาบดินรูปสี่เหลี่ยมแสดงดังรูป 2.9 จะพบว่าโครงสร้างดังกล่าวมีจุดเดี่ยวเบนที่สันขอบของระนาบดิน 4 จุด คือ Q_1, Q_2, Q_3 และ Q_4 และยังมีจุดเดี่ยวเบนที่มุมอีก 4 จุด คือ C_1, C_2, C_3 และ C_4 การพิจารณาเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลบนระนาบดินขนาดจำกัดมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1. คำนวณเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลกรณีระนาบดินขนาดอนันต์โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์มาคำนวณเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศเอง และนำทฤษฎีภาพเสมือน



รูป 2.9 สายอากาศไดโพลบนระนาบดินขนาดจำกัด

มาคำนวณอิมพีแดนซ์ร่วม (mutual impedance) ซึ่งคำนวณได้จากสายอากาศไดโพลภาพเสมือน

2. คำนวณเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลกรณีระนาบดินขนาดจำกัดโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปมาพิจารณาผลกระทบเนื่องจากปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่สันขอบ (จุด Q_1 ถึง Q_4) และคลื่นเลี้ยวเบนที่มุม (จุด C_1 ถึง C_4)
3. รวมเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ที่ได้จากระเบียบวิธีโมเมนต์ในข้อ 1. และเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ที่ได้จากทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปในข้อ 2. ทำให้ได้เมตริกซ์อิมพีแดนซ์ที่รวมผลกระทบจากปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่จุดต่างๆ

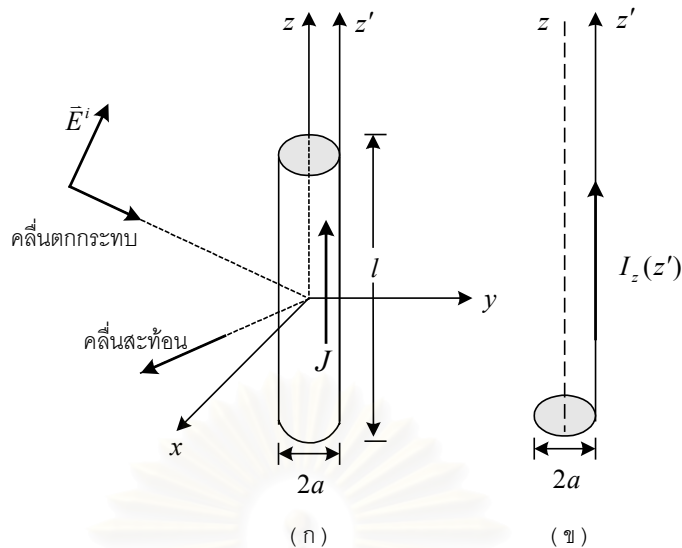
ต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดการคำนวณเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ตามลำดับดังต่อไปนี้

2.3.1.1 การคำนวณเมตริกซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์

เมื่อพิจารณาสายอากาศไดโพลวางอยู่ในแนวแกน z แสดงดังรูป 2.10(ก) กำหนดให้สายอากาศมีรัศมี a , ความยาว l , สนามไฟฟ้าตกกระทบ \vec{E}^i ทำหน้าที่ป้อนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้แก่สายอากาศ และสภาพนำไฟฟ้าของดินที่นั่นกระแสจึงมีแต่ที่ผิวเท่านั้น กระแสที่ผิว ณ ตำแหน่งแนวแกน z' แสดงดังรูป 2.10(ข) และสามารถคำนวณกระแสได้ดังนี้

$$I_z(z') = 2\pi a J(z') \quad (2.43)$$

โดย $J(z')$ คือ ความหนาแน่นกระแสเชิงผิว ณ จุด z' ใดๆ $\left(\frac{A}{m}\right)$



รูป 2.10 สายอากาศไดโพล (ก) ความหนาแน่นกระแสเชิงผิว $J(z')$ และรัศมีสายอากาศ a (ข)
การแทนสายอากาศด้วยเส้นกระแส $I_z(z') = 2\pi a J(z')$

จากรูป 2.10(ก) เนื่องจากสายอากาศไดโพลมีค่าสภาพนำไฟฟ้าอนันต์เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าผิวสัมผัสรวม (E_z^t) มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$E_z^t = E_z^i + E_z^s = 0 \quad (2.44)$$

ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้ากระเจิง (E_z^s) ดังสมการ (2.45)

$$E_z^s = -E_z^i \quad (2.45)$$

ค่าสนามไฟฟ้าสะท้อน ณ จุดสังเกตใดๆ จะเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ผิวของสายอากาศที่อยู่ในแนวแกน z' ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ [12]

$$E_z^s = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\beta^2 A_z + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \right) \quad (2.46)$$

สำหรับกระแสในแต่ละชิ้นส่วนย่อย dz สามารถคำนวณ A_z ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} A_z &= \frac{\mu}{4\pi} \iint_s J_z \frac{e^{-j\beta R}}{R} ds' \\ &= \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l/2}^{+l/2} \int_0^{2\pi} J_z \frac{e^{-j\beta R}}{R} a d\phi dz' \end{aligned} \quad (2.47)$$

โดย $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} = \sqrt{a^2 + (z-z')^2}$
 a คือ ค่ารัศมีของสายอากาศไดโพล

แทน J_z จากสมการ (2.43) ในสมการ (2.47) จะได้

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{1}{2\pi a} \int_0^{2\pi} I_z(z') \frac{e^{-j\beta R}}{R} a d\phi dz' \quad (2.48)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (2.48) ร่วมกับ R ที่กำหนดโดยสมการ (2.47) ทำให้ได้ A_z ดังสมการต่อไปนี้

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') \frac{e^{-j\beta R}}{R} dz'$$

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') G(z, z') dz' \quad (2.49)$$

โดย $G(z, z') = \frac{e^{-j\beta R}}{R}$ คือ ฟังก์ชันกรีน

หากพิจารณาค่า A_z จากสมการ (2.49) ร่วมกับค่าสนามไฟฟ้าสะท้อน E_z^s จากสมการ (2.45) แล้วนำไปแทนค่า (2.46) ทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากเส้นกระแสไฟฟ้า $I_z(z')$ ดังสมการต่อไปนี้

$$-j \frac{1}{4\pi\omega\epsilon} \int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') \left(\beta^2 + \frac{d^2}{dz'^2} \right) G(z, z') dz' = -E_z^i \quad (2.50)$$

เมื่อจัดรูปสมการ (2.50) ให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นจะได้ผลดังสมการ (2.51)

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') \left(\beta^2 + \frac{d^2}{dz'^2} \right) G(z, z') dz' = -j4\pi\omega\epsilon E_z^i \quad (2.51)$$

สมการ (2.51) มีชื่อเรียกว่า “สมการของพ็อกลิงตัน (Pocklington's equation)”

สมการ (2.51) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายโดยเริ่มพิจารณาหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของฟังก์ชันกรีนแสดงผลดังสมการ (2.52) และ (2.53) ตามลำดับ

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial z} G(z, z') &= \frac{\partial}{\partial z} \frac{e^{-j\beta R}}{R} \\ &= \frac{(z-z')e^{-j\beta R}}{R^2} \left[-j\beta - \frac{1}{R} \right]\end{aligned}\quad (2.52)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial z^2} G(z, z') &= \frac{e^{-j\beta R}}{R^2} \left[-j\beta - \frac{1}{R} \right] - \frac{j\beta(z-z')^2 e^{-j\beta R}}{R^3} \left[-j\beta - \frac{1}{R} \right] \\ &\quad - \frac{2(z-z')^2 e^{-j\beta R}}{R^4} \left[-j\beta - \frac{1}{R} \right] + \frac{(z-z')^2 e^{-j\beta R}}{R^5}\end{aligned}\quad (2.53)$$

นำพจน์ $\beta^2 G(z, z') = \beta^2 \frac{e^{-j\beta R}}{R}$ เข้าไปบวกกับผลการหาอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันกรีนในสมการ (2.53) ได้ดังสมการ (2.54)

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial z^2} G(z, z') + \beta^2 G(z, z') &= \frac{e^{-j\beta R}}{R^2} \left[-j\beta - \frac{1}{R} \right] - \frac{j\beta(z-z')^2 e^{-j\beta R}}{R^3} \left[-j\beta - \frac{1}{R} \right] \\ &\quad - \frac{2(z-z')^2 e^{-j\beta R}}{R^4} \left[-j\beta - \frac{1}{R} \right] + \frac{(z-z')^2 e^{-j\beta R}}{R^5} + \beta^2 \frac{e^{-j\beta R}}{R}\end{aligned}\quad (2.54)$$

เขียนสมการ (2.54) ใหม่โดยดึงพจน์ร่วม $\frac{e^{-j\beta R}}{R^5}$ ออก

$$\begin{aligned}&\frac{\partial^2}{\partial z^2} G(z, z') + \beta^2 G(z, z') \\ &= \frac{e^{-j\beta R}}{R^5} \left[R^3 \left(-j\beta - \frac{1}{R} \right) - j\beta R^2 (z-z')^2 \left(-j\beta - \frac{1}{R} \right) - 2R(z-z')^2 \left(-j\beta - \frac{1}{R} \right) \right. \\ &\quad \left. + (z-z')^2 + \beta^2 R^4 \right]\end{aligned}\quad (2.55)$$

แทนค่า $(z-z')^2 = R^2 - a^2$ ลงในสมการ (2.55) และจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial z^2} G(z, z') + \beta^2 G(z, z') &= \frac{e^{-j\beta R}}{R^5} \left[2R^2 + (\beta R a)^2 - j(3\beta R a^2) + j(2\beta R^3) - 3a^2 \right] \\ &= \frac{e^{-j\beta R}}{R^5} \left[2R^2 - 3a^2 + j\beta R(2R^2 - 3a^2) + (\beta R a)^2 \right] \\ &= \frac{e^{-j\beta R}}{R^5} \left[(2R^2 - 3a^2)(1 + j\beta R) + (\beta R a)^2 \right]\end{aligned}\quad (2.56)$$

นำสมการ (2.56) ไปแทนค่าในสมการ (2.51) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') \frac{e^{-j\beta R}}{R^5} [(2R^2 - 3a^2)(1 + j\beta R) + (\beta R a)^2] dz' = -j4\pi\omega \varepsilon E_z^i \quad (2.57)$$

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') K(z, z') dz' = -j4\pi\omega \varepsilon E_z^i \quad (2.58)$$

$$\text{โดย } K(z, z') = \frac{e^{-j\beta R}}{R^5} [(2R^2 - 3a^2)(1 + j\beta R) + (\beta R a)^2]$$

เมื่อเขียนสมการ (2.51) ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายที่แสดงดังสมการ (2.58) ซึ่งเป็นสมการปริพันธ์ของพ็อกลิงตัน (Pocklington's integral equation) หากพิจารณาพจน์ $K(z, z')$ ในสมการ (2.58) จะพบว่ามีความซับซ้อนเกิดภาวะเอกฐาน (singularity) ในกรณีที่ $z = z'$ และเมื่อค่ารัศมี (a) ของสายอากาศไดโพลมีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับค่าความยาวสายอากาศ (l) ทั้งนี้เนื่องมาจากในพจน์ $K(z, z')$ นั้นมีพจน์ที่หารด้วยพจน์ที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งก็คือ พจน์ $\frac{1}{R^3}$ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดผลของภาวะเอกฐานจึงแยกพจน์ที่ก่อให้เกิดกรณีที่หารศูนย์ทำให้สามารถเขียนพจน์ $K(z, z')$ ได้ดังสมการ (2.59) [13]

$$K(z, z') = [K(z, z') - K_s(z, z')] + K_s(z, z') \quad (2.59)$$

หากขยายพจน์ย่อย $\frac{e^{-j\beta R}}{R^5}$ ของสมการ (2.58) ด้วยอนุกรม Maclaurin [13] แล้วจัดรูป $K(z, z')$ ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายจากนั้นให้พิจารณาพจน์ที่หารด้วย R โดยกำหนดให้เป็นพจน์ $K_s(z, z')$ (Singularity) แล้วนำมาลบออกจากพจน์ $K(z, z')$ แสดงดังสมการ (2.60) รายละเอียดการวิเคราะห์จะอยู่ในภาคผนวก ก.

$$K(z, z') - K_s(z, z') = \left\{ \frac{[e^{-j\beta R} + j\beta R - 1][(2R^2 - 3a^2)(1 + j\beta R) + (\beta R a)^2]}{R^5} + \frac{[R^2/2][(2 + (\beta a/2)^2)(\beta R)^2 - (3 + j2\beta R)(\beta a)^2]}{R^5} \right\} \quad (2.60)$$

และพจน์ $K_s(z, z')$ แสดงดังสมการ (2.61)

$$K_s(z, z') = \frac{\beta^2}{R} \left[1 - \frac{1}{8} (\beta a)^2 \right] + \frac{2}{R^3} \left[1 - \frac{1}{4} (\beta a)^2 \right] - \frac{3a^2}{R^5} \quad (2.61)$$

สมการ (2.58) เป็นสมการปัญหาที่ใช้วิเคราะห์สายอากาศเส้นลวดที่มีขั้วบ่อนกำลังอยู่ที่จุดกำเนิด คือ $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ และรัศมีของเส้นลวดเท่ากับ a เมตร ซึ่งค่ารัศมีของสายอากาศเส้นลวดนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความยาวของเส้นลวด ในการแก้สมการปัญหาดังกล่าวนั้นจะใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์หรือระเบียบวิธีถ่วงน้ำหนัก [6, 12, 19, 20] ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่ประมาณคำตอบของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าด้วยการขยายอนุกรมของฟังก์ชันฐาน โดยการขยายอนุกรมนี้จะแบ่งย่อยออกเป็นสองประเภทดังนี้ ประเภทแรกเรียกว่า entire domain เป็นการขยายอนุกรมของฟังก์ชันฐานโดยครอบคลุมทั้งอาณาจักรของสมการปัญหา และประเภทที่สองเรียกว่า subdomain เป็นการขยายอนุกรมของฟังก์ชันฐานในแต่ละส่วนย่อยในอาณาจักรของสมการปัญหา ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ประเภท subdomain ในการแก้สมการปัญหา

หากสังเกตสมการ (2.58) เป็นสมการที่มีตัวดำเนินการ (L) คือ ปริพันธ์ของฟังก์ชัน $K(z, z')$ โดยมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (f) คือ $I_z(z')$ และมีฟังก์ชันกระตุ้นหรือแหล่งกำเนิดกำลัง (g) คือ E_z^i เมื่อจัดรูปสมการ (2.58) ให้อยู่ในรูปแบบของตัวดำเนินการจะแสดงดังสมการ (2.59)

$$Lf = g \quad (2.62)$$

โดย L คือ $\int_{-l/2}^{+l/2} K(z, z') dz'$
 f คือ $I_z(z')$
 g คือ E_z^i

ประมาณตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในที่นี้ คือ ค่ากระแสที่ตำแหน่งต่างๆ บนแกน z' จากรูป 2.10 ด้วยอนุกรมแสดงดังสมการ (2.63)

$$f = \sum_{n=1}^N I_n f_n(z') \quad (2.63)$$

โดย I_n คือ สัมประสิทธิ์ของ $f_n(z')$
 $f_n(z')$ คือ ฟังก์ชันฐาน

เมื่อประมาณคำตอบของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าด้วยฟังก์ชันฐานแล้วแสดงดังสมการ (2.64) ต่อไปให้ประมาณคำตอบด้วยการหาผลคูณภายใน (inner product) ด้วยฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักหรือที่เรียกว่าฟังก์ชันทดสอบ (W_m) แสดงดังสมการ (2.65)

$$\sum_{n=1}^N I_n Lf_n(z') = g \quad (2.64)$$

$$\sum_{n=1}^N I_n \langle W_m, Lf_n(z') \rangle = \langle W_m, g \rangle \quad (2.65)$$

$$\text{โดย } \langle W_m, Lf_n(z') \rangle = \int W_m Lf_n(z') dz'$$

$$\langle W_m, g \rangle = \int W_m g dz'$$

แทนค่าผลคูณภายในของตัวดำเนินการฟังก์ชันฐานกับฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก $\langle W_m, Lf_n(z') \rangle$ ด้วยเมตริกซ์ $[Z_{mn}]$ เรียกว่าเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ และแทนค่าผลคูณภายในของฟังก์ชันกระตุ้นกับฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก $\langle W_m, g \rangle$ ด้วยเมตริกซ์ $[V_m]$ แสดงดังสมการ (2.66)

$$[Z_{mn}][I_n] = [V_m] \quad (2.66)$$

โดย $[Z_{mn}]$ คือ เมตริกซ์อิมพีแดนซ์

$[I_n]$ คือ เมตริกซ์กระแสที่ต้องการทราบค่า

$[V_m]$ คือ เมตริกซ์ป้อนค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ถ้า $[Z_{mn}]$ เป็นเมตริกซ์ไม่เอกฐานก็จะสามารถหาเมตริกซ์ผกผันได้ทำให้สามารถหาค่ากระแสที่ไม่ทราบค่าในแต่ละส่วนย่อยได้ดังสมการ (2.67)

$$[I_n] = [Z_{mn}]^{-1} [V_m] \quad (2.67)$$

เมื่อวิเคราะห์สมการ (2.58) ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์โดยใช้วิธีการจับคู่จุด (point matching) กล่าวคือใช้เดลต้าฟังก์ชันเป็นฟังก์ชันทดสอบและฟังก์ชันคลื่นสี่เหลี่ยมเป็นฟังก์ชันฐาน

แล้วแบ่งสายอากาศไดโพลออกเป็น N ส่วน และความยาวในแต่ละส่วนย่อยเกิดจากความยาวสายอากาศไดโพล (l) หารด้วยจำนวนส่วนย่อย (N) มีค่าเป็น Δ ดังนั้นเมื่อหาผลคูณภายในของ สมการ (2.58) แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\int_{z_m-\Delta/2}^{z_m+\Delta/2} \int_{z_n-\Delta/2}^{z_n+\Delta/2} \sum_{n=1}^N I_n f_n(z') K(z, z') \delta(z - z_m) dz' dz = -j4\pi\omega\epsilon \int_{z_m-\Delta/2}^{z_m+\Delta/2} E_z^i \delta(z - z_m) dz \quad (2.68)$$

โดย $f_n(z')$ เป็นฟังก์ชันคลื่นสี่เหลี่ยม
 $\delta(z - z_m)$ เป็นเดลต้าฟังก์ชัน

ค่าปริพันธ์ตามสมการ (2.68) แสดงดังสมการ (2.69)

$$\sum_{n=1}^N I_n \int_{z_n-\Delta/2}^{z_n+\Delta/2} K(z_m, z') dz' = -j4\pi\omega\epsilon E_z^i(z_m) \quad (2.69)$$

กำหนดให้ $z' = z'_n + z_n$ ดังนั้นสมการ (2.67) เปลี่ยนเป็นแสดงดังสมการ (2.70)

$$\sum_{n=1}^N I_n \int_{-\Delta/2}^{+\Delta/2} K(z_m, z'_n) dz'_n = -j4\pi\omega\epsilon E_z^i(z_m) \quad (2.70)$$

เมื่อพิจารณาจุดสังเกตบนผิวของสายอากาศไดโพลจะเปลี่ยนเป็นดังสมการ (2.71)

$$R = \sqrt{a^2 + (z_m - z')^2} \quad (2.71)$$

และเมื่อแทน $z' = z'_n + z_n$ ลงในสมการ (2.72) จะได้สมการจุดสังเกตดังนี้

$$R_{mn} = \sqrt{a^2 + ((z_m - z_n) - z'_n)^2} \quad (2.72)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (2.72) ร่วมกับสมการ (2.70) ทำให้สมการ (2.70) เปลี่ยนเป็น

$$\sum_{n=1}^N I_n \int_{-\Delta/2}^{+\Delta/2} K(z_m - z_n, z'_n) dz'_n = -j4\pi\omega\epsilon E_z^i(z_m) \quad (2.73)$$

$$\text{โดย } R_{mn} = \sqrt{a^2 + ((z_m - z_n) - z'_n)^2}$$

เมื่อเปลี่ยนค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในสมการ (2.73) ให้อยู่ในรูปแรงเคลื่อนไฟฟ้า และเขียนสมการ (2.73) ใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{j\Delta}{4\pi\omega\epsilon} \int_{-\Delta/2}^{+\Delta/2} K(z_m - z_n, z'_n) dz'_n \sum_{n=1}^N I_n = v_m \quad (2.74)$$

เมื่อเขียนสมการ (2.74) ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์แสดงได้ดังสมการ (2.75)

$$[Z_{mn}][I_n] = [V_m] \quad (2.75)$$

ดังนั้นเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลในอากาศว่างแสดงได้ดังสมการ (2.76)

$$[Z_{mn}] = \frac{j\Delta}{4\pi\omega\epsilon} \int_{-\Delta/2}^{+\Delta/2} K(z_m - z_n, z'_n) dz'_n \quad (2.76)$$

โดย z_m คือ จุดสังเกต

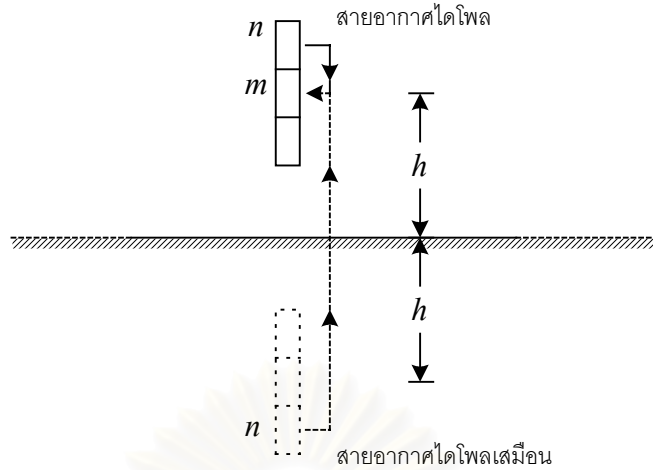
z_n คือ จุดแหล่งกำเนิด

พิจารณาสายอากาศไดโพลที่ติดตั้งอยู่บนระนาบดินรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดอนันต์แสดงดังรูป 2.11 โดยสายอากาศวางอยู่สูงเหนือระนาบดิน h เมื่อใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือนทำให้พิจารณาได้ว่าสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากระนาบดินสามารถแทนด้วยสายอากาศไดโพลเสมือนโดยสายอากาศเสมือนนี้วางอยู่ต่ำกว่าระนาบดิน h ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบมายังสายอากาศไดโพล ดังนั้นจึงสามารถคำนวณเมตริกซ์อิมพีแดนซ์สายอากาศไดโพลเสมือนแสดงได้ดังสมการ (2.77)

$$[Z'_{mn}] = \frac{j\Delta}{4\pi\omega\epsilon} \int_{-\Delta/2}^{+\Delta/2} K(z_m - z'_n, z'_n) dz'_n \quad (2.77)$$

โดย z_m คือ จุดสังเกตบนสายอากาศไดโพล

z'_n คือ จุดแหล่งกำเนิดบนสายอากาศไดโพลเสมือน

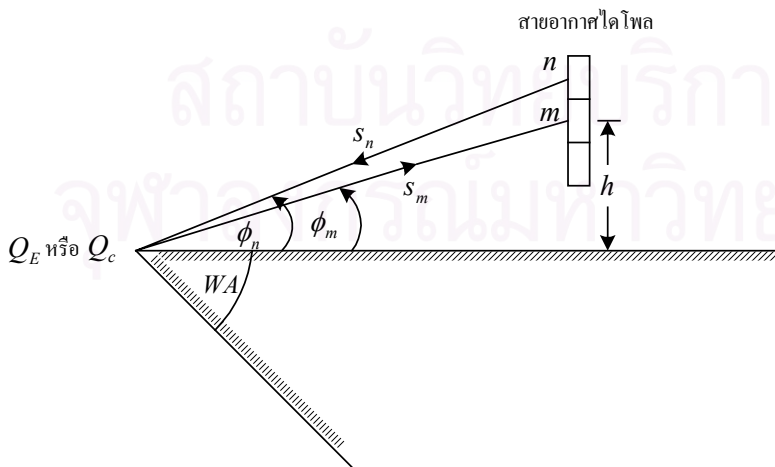


รูป 2.11 สายอากาศไดโพลบนระนาบดินขนาดอนันต์

เมื่อพิจารณาผลของปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบอันเนื่องมาจากขนาดของระนาบดินมีขนาดจำกัดต่อสายอากาศไดโพลนั้นจะวิเคราะห์โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป ซึ่งผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบดังกล่าวนี้จะส่งผลกระทบต่อเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลในอากาศว่างที่คำนวณได้จากสมการ (2.76) รายละเอียดการวิเคราะห์จะอยู่ในหัวข้อถัดไป

2.3.1.2 การคำนวณเมตริกซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูป

การพิจารณาเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ที่ได้จากทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปนั้นจะเริ่มจากการพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจากส่วนย่อยของสายอากาศ ไดโพลซึ่งแบ่งออกเป็น N ส่วนย่อย (จากระเบียบวิธีโมเมนต์) โดยความเข้มสนามไฟฟ้า ตกกระทบบนขอบของระนาบดินแล้วเลี้ยวเบนกลับมายังส่วนย่อยของสายอากาศไดโพลแสดงดังรูป 2.12



รูป 2.12 สายอากาศไดโพลบนระนาบดินขนาดจำกัด

โดยมุมรูปสามเหลี่ยม (WA) ของระนาบดินมีค่าเท่ากับ $(2-n)\pi$ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดค่า $n = 2$ การวิเคราะห์ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนนั้นจะพิจารณาผลการเลี้ยวเบนที่ขอบสันตรงและผลการเลี้ยวเบนที่มุมทั้งสี่โดยจุดที่เลี้ยวเบนจากขอบสันตรงจะแทนด้วย Q_E และจุดเลี้ยวเบนมีมาจากมุมแทนด้วย Q_C รายละเอียดการพิจารณาจะกล่าวเป็นลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

การคำนวณหาสนามเลี้ยวเบนที่ขอบของระนาบดินขนาดจำกัดสามารถคำนวณได้โดยคำนวณผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนกับสนามที่ตกกระทบ ณ ตำแหน่งจุดเลี้ยวเบนที่ขอบสันตรงโดยความสัมพันธ์ระหว่างสนามตกกระทบกับสนามสะท้อนแสดงดังสมการ (2.78) [12,17 -19]

$$E^d = \begin{bmatrix} E_s^d \\ E_h^d \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_s^d & 0 \\ 0 & D_h^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s' \\ E_h' \end{bmatrix} \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} \cdot e^{-jks} \quad (2.78)$$

โดย E_s^d คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าเลี้ยวเบนในองค์ประกอบ $\hat{\beta}$

E_h^d คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าเลี้ยวเบนในองค์ประกอบ $\hat{\phi}$

E_s' คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าเลี้ยวเบนในองค์ประกอบ $\hat{\beta}'$

E_h' คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าเลี้ยวเบนในองค์ประกอบ $\hat{\phi}'$

s' คือ ระยะทางจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดเลี้ยวเบน

s คือ ระยะทางจากจุดเลี้ยวเบนไปยังจุดสังเกต

D_s^d คือ สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนสำหรับโพลาไรเซชันแบบอ่อน, $\hat{\beta}'$

D_h^d คือ สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนสำหรับโพลาไรเซชันแบบแข็ง, $\hat{\phi}'$

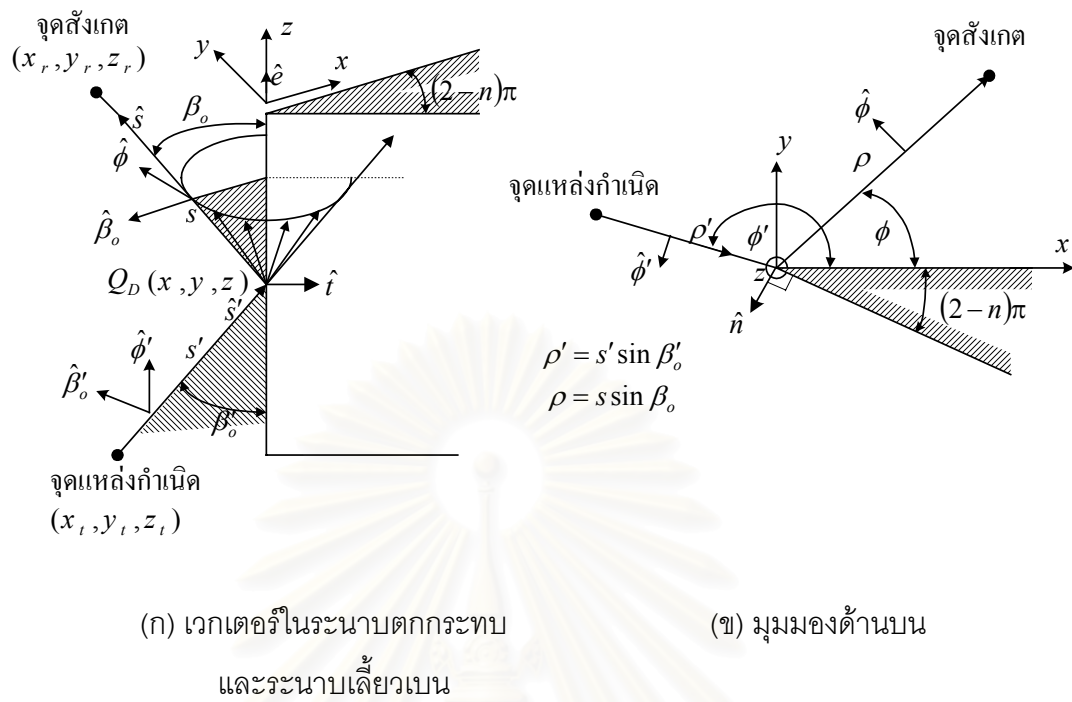
ถ้าจุด Q_E เป็นจุดเลี้ยวเบนที่ขอบสันตรงของระนาบดินขนาดจำกัดแล้ว การเกิดจุดเลี้ยวเบนจะเป็นไปตามกฎการเลี้ยวเบนของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปแสดงดังสมการ (2.79)

$$\hat{s}_i \cdot \hat{e} = \hat{s}_d \cdot \hat{e} \quad (2.79)$$

โดย \hat{s}_i คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของความเข้มสนามไฟฟ้าตกกระทบ

\hat{s}_d คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของความเข้มสนามไฟฟ้าเลี้ยวเบน

\hat{e} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยสัมผัสแนวแกนขอบเลี้ยวเบนดังรูป 2.13



รูป 2.13 ลักษณะเวกเตอร์ที่ขอบเลี้ยวเบน

เมื่อกำหนดให้เวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{t} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับ เวกเตอร์ \hat{e} อยู่บนด้านประกอบของรูปสี่เหลี่ยม เวกเตอร์และมุมในระบบพิกัดของจุดเลี้ยวเบนในรูปที่ 2.13 หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\hat{n} = \hat{t} \times \hat{e} \quad (2.80)$$

$$\hat{\phi}' = \frac{\hat{e} \times \hat{s}'}{\|\hat{e} \times \hat{s}'\|} \quad (2.81)$$

$$\hat{\beta}'_0 = \hat{s}' \times \hat{\phi}' \quad (2.82)$$

$$\hat{\phi} = \frac{\hat{s} \times \hat{e}}{\|\hat{s} \times \hat{e}\|} \quad (2.83)$$

$$\hat{\beta}_0 = \hat{s} \times \hat{\phi} \quad (2.84)$$

$$\beta = \beta_0 = \beta'_0 = \sin^{-1}(\sqrt{1 - (\hat{s}' \cdot \hat{e})^2}) \quad (2.85)$$

$$\phi' = \begin{cases} \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}'); \hat{t} \cdot \hat{\phi}' \leq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}'); \hat{t} \cdot \hat{\phi}' > 0 \end{cases} \quad (2.86)$$

$$\phi = \begin{cases} \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}); \hat{t} \cdot \hat{\phi} \leq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}); \hat{t} \cdot \hat{\phi} > 0 \end{cases} \quad (2.87)$$

สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่ขอหาได้จาก

$$D_s^d = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_o} \left\{ \begin{array}{l} \cot \left[\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right] \cdot F[kLa^+(\phi - \phi')] \\ + \cot \left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] \cdot F[kLa^-(\phi - \phi')] \\ + R_s^n \cot \left[\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n} \right] \cdot F[kLa^+(\phi + \phi')] \\ + R_s^0 \cot \left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] \cdot F[kLa^-(\phi + \phi')] \end{array} \right\} \quad (2.88)$$

$$D_h^d = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin \beta_o} \left\{ \begin{array}{l} \cot \left[\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n} \right] \cdot F[kLa^+(\phi - \phi')] \\ + \cot \left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] \cdot F[kLa^-(\phi - \phi')] \\ + R_h^n \cot \left[\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n} \right] \cdot F[kLa^+(\phi + \phi')] \\ + R_h^0 \cot \left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n} \right] \cdot F[kLa^-(\phi + \phi')] \end{array} \right\} \quad (2.89)$$

เมื่อ $R_{s,h}^0$ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวด้านความเข้มสนามไฟฟ้าตกกระทบด้วยมุมตกกระทบเท่ากับ ϕ' สำหรับโพลาไรเซชันแบบอ่อนและแบบแข็งตามลำดับและ $R_{s,h}^n$ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวด้านความเข้มสนามไฟฟ้าเลี้ยวเบนออกจากขอบด้วยมุมสะท้อนเท่ากับ $n\pi - \phi$ สำหรับโพลาไรเซชันแบบอ่อนและแบบแข็งตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบไดแอดติกสามารถคำนวณได้จากสมการที่แสดงดังต่อไปนี้

$$R_{s,\perp} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i}} \quad (2.90)$$

เมื่อสนามไฟฟ้ามีโพลาไรเซชันในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ (soft polarization) หรือ

$$R_{h,\parallel} = \frac{\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i} - \epsilon \cos \theta_i}{\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_i} + \epsilon \cos \theta_i} \quad (2.91)$$

เมื่อสนามไฟฟ้ามีโพลาไรเซชันในทิศที่ขนานกับระนาบตกกระทบ (hard polarization)

โดย $\epsilon = \epsilon_r - j 60 \sigma \lambda$

$R_{s,\perp}, R_{h,\parallel}$ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบอ่อนและแบบแข็งตามลำดับ

θ_i คือ มุมตกกระทบของรังสีสนามไฟฟ้าบนขอบสันตรงของระนาบดิน

σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (ตัวนำสมบูรณ์, $\sigma = \infty$)

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

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

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

ที่สุดที่สอดคล้องกับสมการ (2.92) และสมการ (2.93) ดังแสดงต่อไปนี้

$$2\pi n N^+ - x = \pi \quad (2.92)$$

$$2\pi n N^- - x = -\pi \quad (2.93)$$

ความเข้มสนามไฟฟ้าของรังสีเดี่ยวเบนที่มาถึงจุดสังเกตจะเกิดจากผลรวมของความเข้มสนามไฟฟ้าเดี่ยวเบนที่มีโพลาไรเซชันแบบอ่อนและโพลาไรเซชันแบบแข็ง ถ้าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบกับสันขอบเดี่ยวเบนมีโพลาไรเซชันอยู่ในแนวโพลาไรเซชันของความเข้มสนามไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด (\hat{e}_x) องค์ประกอบความเข้มสนามไฟฟ้าเดี่ยวเบนในแนวโพลาไรเซชันแบบอ่อน (\hat{e}_s) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.94)

$$\hat{e}_s = -(\hat{e}_x \cdot \hat{\beta}') \cdot \hat{\beta} \quad (2.94)$$

และองค์ประกอบความเข้มสนามไฟฟ้าเดี่ยวเบนในแนวโพลาริเซชันแบบแข็ง (\hat{e}_h) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.95)

$$\hat{e}_h = -(\hat{e}_{rx} \cdot \hat{\phi}') \cdot \hat{\phi} \quad (2.95)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าเดี่ยวเบนที่จุด Q_E มายังจุดสังเกตสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.96)

$$E^d(Q_E) = E_s^d(Q_E) + E_h^d(Q_E) \quad (2.96)$$

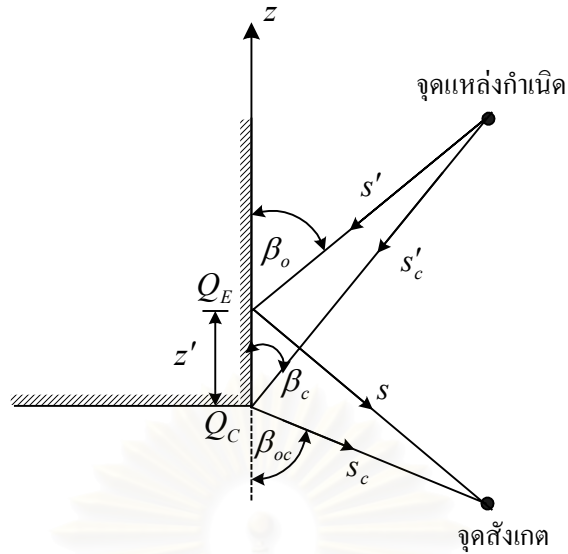
ความเข้มสนามไฟฟ้าของรังสีเดี่ยวเบนในโพลาริเซชันแบบอ่อนและแบบแข็งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.97) และสมการ (2.98)

$$E_s^d(Q_E) = E_s'(Q_E) \cdot D_s \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} e^{-jks} \hat{e}_s \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.97)$$

$$E_h^d(Q_E) = E_h'(Q_E) \cdot D_h \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} e^{-jks} \hat{e}_h \cdot \hat{e}_{rx} \quad (2.98)$$

โดย \hat{e}_{rx} คือ โพลาริเซชันของสายอากาศรับที่จุดสังเกต

ในการวิเคราะห์นี้นอกจากจะพิจารณาผลกระทบจากปรากฏการณ์เดี่ยวเบนที่ขอบแล้วยังพิจารณาผลกระทบจากปรากฏการณ์เดี่ยวเบนที่มุมทั้งสี่อีกด้วย ความเข้มสนามเดี่ยวเบนที่มุมของระนาบดินขนาดจำกัดสามารถคำนวณได้โดยคำนวณผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การเดี่ยวเบนที่มุมกับสนามที่ตกกระทบ ณ ตำแหน่งจุดเดี่ยวเบนที่มุม ซึ่งสัมประสิทธิ์การเดี่ยวเบนที่มุมนั้นคำนวณได้จากระเบียบวิธีกระแสสมมูล (equivalent current) [14] โดยค่าสัมประสิทธิ์การเดี่ยวเบนที่มุมนั้นจะมีความสัมพันธ์กับจุดที่คลื่นเดี่ยวเบนจากขอบสันตรง (Q_E) และจุดที่เป็นมุม (Q_C) รูป 2.14 แสดงปรากฏการณ์เดี่ยวเบนที่มุม สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสนามตกกระทบกับสนามเดี่ยวเบนที่มุมได้แสดงดังสมการ (2.99) [14 -18]



รูป 2.14 ลักษณะเรขาคณิตของสนามเลี้ยวเบนที่มุม

$$\begin{aligned}
 E^c &= \begin{bmatrix} E_s^c \\ E_h^c \end{bmatrix} \\
 &= - \begin{bmatrix} D_s^c & 0 \\ 0 & D_h^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_s(Q_C) \\ E'_h(Q_C) \end{bmatrix} \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} \cdot \sqrt{\frac{s_c(s'+s_c)}{s'_c}} \cdot \frac{e^{-jk s_c}}{s_c} \cdot [\hat{e}_s \cdot \hat{e}_{rx} + \hat{e}_h \cdot \hat{e}_{rx}]
 \end{aligned} \tag{2.99}$$

สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่มุมหาได้จาก

$$D_s^c = C_s(Q_E) \cdot \frac{\sqrt{\sin \beta_c \sin \beta_{oc}}}{(\cos \beta_{oc} - \cos \beta_c)} \cdot F[kL_c a(\pi + \beta_{oc} - \beta_c)] \cdot \frac{e^{-j\pi/4}}{\sqrt{2\pi k}} \tag{2.100}$$

$$D_h^c = C_h(Q_E) \cdot \frac{\sqrt{\sin \beta_c \sin \beta_{oc}}}{(\cos \beta_{oc} - \cos \beta_c)} \cdot F[kL_c a(\pi + \beta_{oc} - \beta_c)] \cdot \frac{e^{-j\pi/4}}{\sqrt{2\pi k}} \tag{2.101}$$

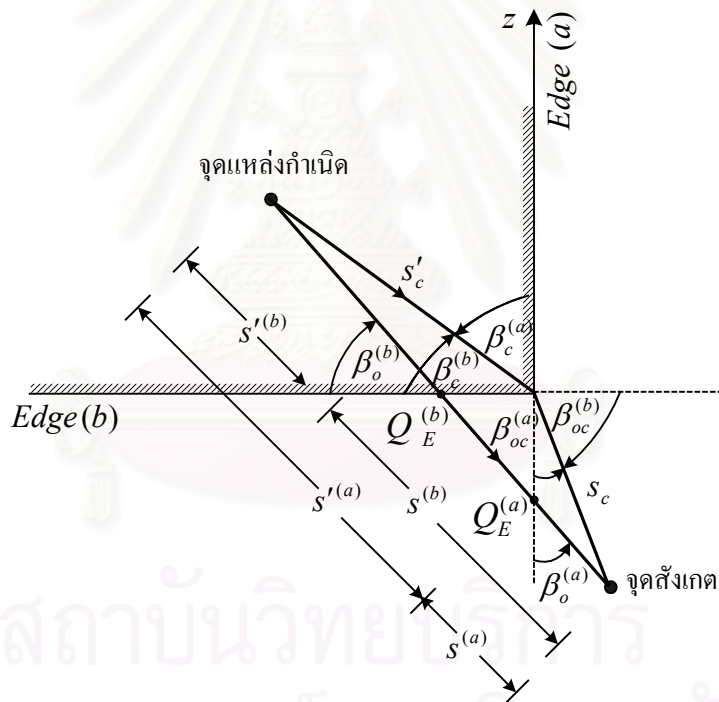
และ

$$C_{s,h}(Q_E) = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2\sqrt{2\pi k} \sin \beta_o} \begin{bmatrix} \frac{F[kL a(\phi - \phi')]}{\cos(\frac{\phi - \phi'}{2})} \cdot \left| F\left[\frac{L a(\phi - \phi')/\lambda}{kL_c a(\pi + \beta_{oc} - \beta_c)}\right] \right| \\ \pm \frac{F[kL a(\phi + \phi')]}{\cos(\frac{\phi + \phi'}{2})} \cdot \left| F\left[\frac{L a(\phi + \phi')/\lambda}{kL_c a(\pi + \beta_{oc} - \beta_c)}\right] \right| \end{bmatrix} \tag{2.102}$$

เมื่อ L_c เป็นปัจจัยระยะทางกำหนดโดย $L_c = \frac{s'_c s_c}{s'_c + s_c}$, ฟังก์ชัน $a(x) = 2 \cos^2\left(\frac{x}{2}\right)$

β_c เป็นมุมที่วัดจากขอบ ณ ตำแหน่งมุมกับสนามตกกระทบ และ β_{oc} เป็นมุมที่วัดจากขอบที่ขยายออก ณ ตำแหน่งมุมกับสนามเลี้ยวเบนที่ไปยังจุดสังเกต

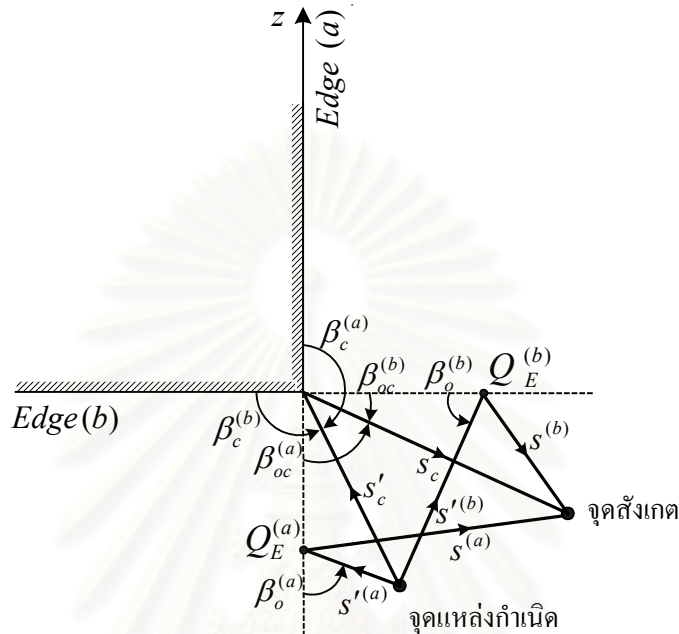
การคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนจากมุมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.99) จะสังเกตเห็นว่าสนามตกกระทบ (E^i) นั้นจะคำนวณไปยังจุดที่เป็นมุม แต่สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่มุมนั้นจะคำนวณที่จุดเลี้ยวเบนที่ขอบ ซึ่งจุดนี้ต้องสอดคล้องกับสมการ (2.79) สังเกตจากรูป 2.14 เห็นว่าจุดที่เป็นมุมนั้นเกิดจากการชนกันของขอบสันตรงสองขอบ ดังนั้นในการคำนวณสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่มุมนั้นต้องพิจารณาบนจุดที่เกิดการเลี้ยวเบนที่ขอบทั้งสองด้วย ถ้าหากสันขอบใดๆ ที่เป็นส่วนประกอบของมุมนั้นๆ ไม่มีสนามเลี้ยวเบนไปยังจุดสังเกตกล่าวคือ ไม่สอดคล้องกับสมการ (2.79) จำเป็นต้องขยายสันขอบออก [14] เพื่อหาจุดเลี้ยวเบนบนขอบที่ขยายโดยจุดดังกล่าวนี้ต้องสอดคล้องกับสมการ (2.79)



รูป 2.15 ลักษณะเรขาคณิตของสนามเลี้ยวเบนที่มุม กรณีที่มีสองสนามเลี้ยวเบนที่มุมและหนึ่งสนามเลี้ยวเบนที่ขอบ

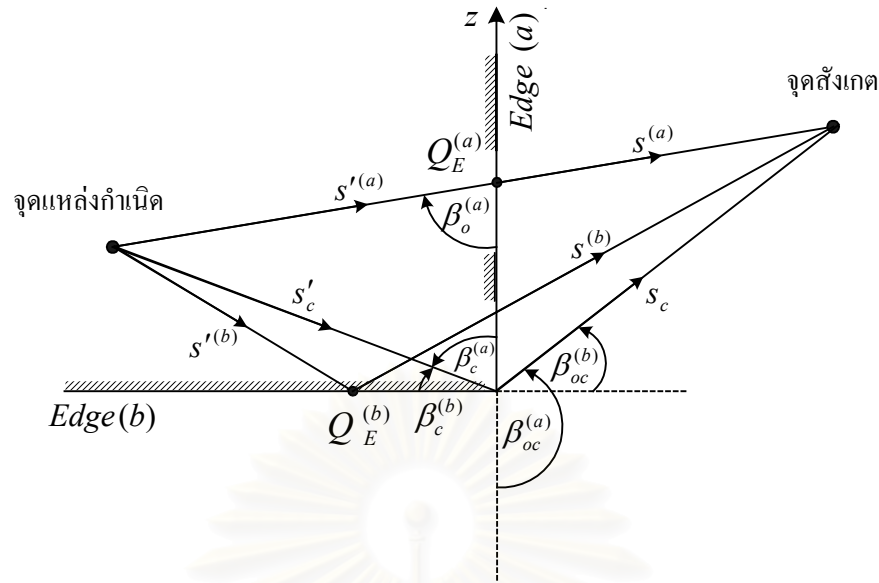
การพิจารณาสนามเลี้ยวเบนที่ขอบร่วมกับสนามเลี้ยวเบนที่มุมนั้นสามารถแบ่งพิจารณาได้ตามกรณีต่างๆ แสดงดังรูป 2.15 ถึง รูป 2.17 [14,17-18] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ กรณีที่แสดงดังรูป 2.15 สองสนามเลี้ยวเบนที่มุมไปยังจุดสังเกตจะเกิดจากสนามเลี้ยวเบนที่ขอบ a (edge(a)) และสนามเลี้ยวเบนที่ขอบ b (edge(b)) ตามลำดับ สังเกตจากรูป 2.15 จะเห็นว่าที่ขอบ a นั้นสนามเลี้ยวเบนไม่สามารถเลี้ยวเบนไปยังจุดสังเกตได้ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณา

สนามเลี้ยวเบนบนขอบ a ที่ขยายออกและพิจารณาสนามเลี้ยวเบนที่มุมที่เกิดจากขอบขยาย a นี้ ไปยังจุดสังเกต สรุปว่ากรณีในรูป 2.15 เกิดปรากฏการณ์สนามเลี้ยวเบนที่ขอบจำนวนหนึ่งสนาม และสนามเลี้ยวเบนที่มุมจำนวนสองสนาม



รูป 2.16 ลักษณะเรขาคณิตของสนามเลี้ยวเบนที่มุม กรณีที่มีเพียงสองสนามเลี้ยวเบนที่มุม

กรณีที่แสดงดังรูป 2.16 เป็นกรณีที่มีเพียงสนามเลี้ยวเบนจากที่มุมเท่านั้นที่ไปยังจุดสังเกต ส่วนสนามเลี้ยวเบนจากขอบ a และขอบ b นั้นไม่สามารถเลี้ยวเบนไปยังที่จุดสังเกตได้ การพิจารณาสนามเลี้ยวเบนจากที่มุมนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาสนามเลี้ยวเบนบนขอบ a และขอบ b ที่ขยายออกเพื่อให้เกิดสนามเลี้ยวเบนทดแทนที่เกิดจากขอบทั้งสองโดยตรง สรุปว่ากรณีในรูป 2.16 เกิดปรากฏการณ์สนามเลี้ยวเบนที่มุมจำนวนเพียงสองสนามเท่านั้น และกรณีที่แสดงดังรูป 2.17 เป็นกรณีที่มีสนามเลี้ยวเบนจากที่มุมและสนามเลี้ยวเบนจากทั้งขอบ a และขอบ b ดังนั้น การพิจารณาสนามเลี้ยวเบนจากที่มุมจึงพิจารณาบนขอบ a เดิมและขอบ b เดิม สรุปว่ากรณีในรูป 2.17 เกิดปรากฏการณ์สนามเลี้ยวเบนที่มุมจำนวนสองสนามและสนามเลี้ยวเบนที่ขอบจำนวนสองสนาม ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาผลกระทบของปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนต่างๆ เช่น ปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนจากขอบ และปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนจากมุมที่มีผลต่อสายอากาศที่ติดตั้งอยู่บนระนาบดินขนาดจำกัด แสดงได้ดังรูป 2.9 จะสังเกตเห็นว่าเป็นกรณีที่คล้ายคลึงกับกรณีในรูป 2.17 กล่าวคือ สนามเลี้ยวเบนที่มุมมีจำนวนสองสนามและสนามเลี้ยวเบนที่ขอบจำนวนสองสนามที่สามารถเลี้ยวเบนมายังสายอากาศรับได้ในที่นี้สายอากาศส่งและสายอากาศรับอยู่ตำแหน่งเดียวกัน



รูป 2.17 ลักษณะเรขาคณิตของสนามเลี้ยวเบนที่มุ่ม กรณีที่มีสองสนามเลี้ยวเบนที่มุ่มและสองสนามเลี้ยวเบนที่ขอบ

การพิจารณาเมตริกซ์ฮิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลที่รวมผลจากสนามเลี้ยวเบนนั้นจะเริ่มต้นจากการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต กล่าวคือ สนามตกกระทบ (E^i) จะเท่ากับสนามกระเจิง (E^s) ซึ่งสนามกระเจิงนี้ประกอบไปด้วยสนามในกรณีอากาศว่างเขียนแทนด้วย E^o , สนามสะท้อนจากระนาบดิน (ขนาดอนันต์) เขียนแทนด้วย E^r , สนามเลี้ยวเบนจากขอบเขียนแทนด้วย E^d และสนามเลี้ยวเบนจากมุมเขียนแทนด้วย E^c ถ้าหากเขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าผิวสัมผัสรวม (E_z^t) มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงได้ดังสมการ (2.103)

$$E_z^t = E^i + E^s$$

$$E_z^t = E^i + E^o + E^r + E^d + E^c$$

$$0 = E^i + E^o + E^r + E^d + E^c \quad (2.103)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้าตกกระทบจึงมีค่าที่แสดงได้ดังสมการ (2.104)

$$E^i = -(E^o + E^r + E^d + E^c) \quad (2.104)$$

เมื่อพิจารณาผลคูณภายในของสมการ (2.104) กับฟังก์ชันทดสอบ (W_m) และพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติของผลคูณภายในที่แสดงดังสมการ (2.105) [11]

$$\langle W_m, a\bar{E}_1 + b\bar{E}_2 \rangle = \langle W_m, a\bar{E}_1 \rangle + \langle W_m, b\bar{E}_2 \rangle \quad (2.105)$$

โดย a, b เป็นค่าคงที่เชิงซ้อน

อาศัยสมการ (2.105) ทำให้สมการ (2.104) เปลี่ยนเป็น

$$\langle W_m, E^i \rangle = \langle W_m, -E^o \rangle + \langle W_m, -E^r \rangle + \langle W_m, -E_{s,h}^d \rangle + \langle W_m, -E_{s,h}^c \rangle \quad (2.106)$$

เมื่อแทนค่ากระแสด้วยสมการ (2.63) และใช้ฟังก์ชันทดสอบเป็นฟังก์ชันเดลต้าโดยสามารถแสดงรายละเอียดการหาผลคูณภายในส่วนย่อยของแต่ละสนามย่อยได้ดังต่อไปนี้

วิเคราะห์ค่าผลคูณภายในของฟังก์ชันทดสอบกับสนามเลี้ยวเบนที่ขอบ (E^d) จากสมการ (2.78) แสดงได้ดังสมการ (2.107)

$$\langle W_m, -E_{s,h}^d \rangle = - \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} E' \cdot D_{s,h}^d \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} \cdot e^{-jks} \cdot \delta(z - z_m) dz \quad (2.107)$$

แทนค่าสนามไฟฟ้าตกกระทบ (E') ณ ตำแหน่งขอบของระนาบดินด้วยสมการ (2.108) [20]

$$E'_{s,h} = - \frac{j\omega\mu\Delta}{4\pi} \sum_{n=1}^N I'_n \cdot \frac{e^{-iks_n}}{s_n} \cdot (\hat{e}_{s,h} \cdot \hat{e}_{tx}) \quad (2.108)$$

แทนสมการ (2.108) ลงในสมการ (2.107) และพิจารณาผลการหาปริพันธ์ของสมการ (2.107) ได้ผลแสดงได้ดังสมการ (2.109)

$$\langle W_m, E_{s,h}^d \rangle = \frac{j\omega\mu\Delta}{4\pi} \cdot D_{s,h}^d \cdot \sqrt{\frac{1}{s_n s_m (s_m + s_n)}} \cdot e^{-jk(s_m + s_n)} \cdot [I'_n] \cdot (\hat{e}_{s,h} \cdot \hat{e}_{tx}) \cdot (\hat{e}_{s,h} \cdot \hat{e}_{rx}) \quad (2.109)$$

โดย s_m คือ ระยะทางจากส่วนย่อยแหล่งกำเนิดตำแหน่ง m ไปยังจุดเลี้ยวเบนที่ขอบ

s_n คือ ระยะทางจากจุดเลี้ยวเบนที่ขอบไปยังส่วนย่อยที่เป็นจุดสังเกตตำแหน่ง n

วิเคราะห์ค่าผลคูณภายในของฟังก์ชันทดสอบกับสนามเลี้ยวเบนที่มุม (E^c) จากสมการ (2.99) แสดงได้ดังสมการ (2.110)

$$\langle W_m, -E_{s,h}^c \rangle = - \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} E' \cdot D_{s,h}^c \cdot \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} \cdot \sqrt{\frac{s_c(s'_c+s_c)}{s'_c}} \cdot \frac{e^{-jk s_c}}{s_c} \cdot \delta(z-z_m) dz \quad (2.110)$$

แทนสมการ (2.108) ลงในสมการ (2.110) และพิจารณาผลการหาปริพันธ์ของสมการ (2.110) ได้ผลดัง สมการ (2.111)

$$\langle W_m, -E_{s,h}^c \rangle = \frac{j\omega\mu\Delta}{4\pi} \cdot D_{s,h}^c \cdot \sqrt{\frac{s_n}{s_m(s_m+s_n)}} \cdot \sqrt{\frac{s_m^c+s_n^c}{s_m^c s_n^c}} \cdot e^{-jk(s_m^c+s_n^c)} \cdot [I'_n] \cdot (\hat{e}_{s,h} \cdot \hat{e}_{tx}) \cdot (\hat{e}_{s,h} \cdot \hat{e}_{rx}) \quad (2.111)$$

โดย s_m^c คือ ระยะทางจากส่วนย่อยแหล่งกำเนิดตำแหน่ง m ไปยังจุดเลี้ยวเบนที่มุม s_n^c คือ ระยะทางจากจุดเลี้ยวเบนที่มุมไปยังส่วนย่อยที่เป็นจุดสังเกตตำแหน่ง n

เมื่อแทนค่าผลคูณภายในจากสมการ (2.73) สมการ (2.109) และสมการ (2.111) ลงในสมการ (1.106) โดยจัดให้อยู่ในรูปเมตริกซ์อิมพีแดนซ์แสดงได้ดังสมการ (2.112)

$$[v_m] = [Z_{mn}^o + Z_{mn}^r + Z_{s,h;mn}^d + Z_{s,h;mn}^c][I'_n] \quad (2.112)$$

เมื่อ $[Z_{mn}^o + Z_{mn}^r]$ คือผลบวกของเมตริกซ์อิมพีแดนซ์จากกรณีอากาศว่าง (E^o) และกรณีสนามสะท้อนจากระนาบดิน (ขนาดอนันต์) (E^r) แสดงได้ดังสมการ (2.76) และสมการ (2.77) ตามลำดับสามารถหาผลบวกของเมตริกซ์แสดงได้ดังสมการ (2.111)

$$[Z_{mn}^o + Z_{mn}^r] = \frac{j\Delta}{4\pi\omega\epsilon} \int_{-\Delta/2}^{+\Delta/2} [K(z_m - z_n, z'_n) + K(z_m - z'_n, z_n)] dz'_n \quad (2.113)$$

อาศัยผลจากสมการ (2.112) สามารถแสดงเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ที่เกิดจากปรากฏการณ์สนามเลี้ยวเบนที่ขอบ ($E_{s,h}^d$) ได้ดังสมการ (2.114)

$$[Z_{s,h;mn}^d] = \frac{j\omega\mu\Delta^2}{4\pi} \cdot D_{s,h}^d(\phi_m, \phi_n, \beta_{o,m}) \cdot \sqrt{\frac{1}{s_n s_m (s_m + s_n)}} \cdot e^{-jk(s_m + s_n)} \cdot (\hat{e}_{s,h} \cdot \hat{e}_{tx}) \cdot (\hat{e}_{s,h} \cdot \hat{e}_{rx}) \quad (2.114)$$

และเมื่ออาศัยผลจากสมการ (2.112) สามารถแสดงเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ที่เกิดจากปรากฏการณ์สนามเลี้ยวเบนที่มุม ($E_{s,h}^c$) ได้ดังสมการ (2.115)

$$[Z_{s,h;mn}^c] = \frac{j\omega\mu\Delta^2}{4\pi} \cdot D_{s,h}^c(\phi_m, \phi_n, \beta_{o,m}, \beta_{c,m}, \beta_{oc;n}, L_{mn}, L_{c,mn}) \quad (2.115)$$

$$\times \sqrt{\frac{s_n}{s_m(s_m + s_n)}} \cdot \sqrt{\frac{s_m^c + s_n^c}{s_m^c s_n^c}} \cdot e^{-jk(s_m^c + s_n^c)} \cdot (\hat{e}_{s,h} \cdot \hat{e}_{tx}) \cdot (\hat{e}_{s,h} \cdot \hat{e}_{rx})$$

เมื่อติดตั้งสายอากาศบนระนาบดินขนาดจำกัดจะสังเกตเห็นจากสมการ (2.113) ว่าเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศกรณีวางตัวในอากาศว่างนั้นจะได้รับผลกระทบจากเมตริกซ์อิมพีแดนซ์จากสนามสะท้อนจากระนาบดิน, สนามเลี้ยวเบนที่ขอบ และสนามเลี้ยวเบนที่มุม เมื่อพิจารณาค่ากระแส (I'_n) ในกรณีสายอากาศวางตัวบนระนาบดินขนาดจำกัดสามารถคำนวณกระแสบนสายอากาศได้แสดงดังสมการ (2.116)

$$[v_m] = [Z'_{mn}] [I'_n] \quad (2.116)$$

เมื่อ $Z'_{mn} = Z_{mn}^o + Z_{mn}^r + Z_{s,h;mn}^d + Z_{s,h;mn}^c$

ดังนั้นเมตริกซ์กระแสที่ได้รับผลกระทบจากระนาบขนาดจำกัดสามารถคำนวณได้แสดงดังสมการ (2.117)

$$[I'_n] = [Z'_{mn}]^{-1} [v_m] \quad (2.117)$$

2.3.2 ผลกระทบของคลื่นเลี้ยวเบนจากระนาบดินขนาดจำกัดต่อสมรรถนะของสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง

การพิจารณาค่าสมรรถนะของสถานทดสอบ (NSA) ในกรณีอุดมคตินั้นจะพิจารณาเฉพาะสนามตรงและสนามสะท้อนจากระนาบดินเท่านั้นที่ไปยังจุดสังเกต แต่ในกรณีที่ขนาดระนาบดินมีขนาดจำกัดจะทำให้เกิดปรากฏการณ์สนามเลี้ยวเบนจากขอบและสนามเลี้ยวเบนจากมุมซึ่งสนามทั้งสองดังกล่าวนี้จะส่งผลกระทบต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบ โดยการพิจารณาจะเริ่มต้นจากการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแสดงดังสมการ (2.118) [20]

$$E_{Hybrid} = -\frac{j\omega\mu\Delta I}{4\pi} \sum_{n=1}^N I'_n \cdot \frac{e^{-ikr_n}}{r_n} \quad (2.118)$$

โดย E_{Hybrid} คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่รวมผลกระทบบจากสนามเดี่ยวเบน
 I คือ ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของกระแส
 I'_n คือ กระแสที่รวมผลกระทบบของสนามเดี่ยวเบน
 r_n คือ ระยะทางจากแหล่งกำเนิด n ไปยังจุดสังเกต

สามารถหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสได้ดังสมการ (2.119)

$$I = \sqrt{\frac{P_t}{R_A}} \quad (2.119)$$

แทนค่ากระแสจากสมการ (2.119) ในสมการ (2.118) จะได้ค่าความเข้มสนามแสดงดังสมการ (2.120)

$$E_{Hybrid} = -\frac{j\omega\mu\Delta}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{R_A}} \sum_{n=1}^N I'_n \cdot \frac{e^{-ikr_n}}{r_n} \quad (2.120)$$

แล้วเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามไฟฟ้าด้วยค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสและพิจารณาว่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดแสดงได้ดังสมการ (2.121)

$$\frac{E_{Hybrid}^{max}}{\sqrt{P_t/R_A}} = -\frac{j\omega\mu\Delta}{4\pi} \sum_{n=1}^N I'_n \cdot \frac{e^{-ikr_n}}{r_n} \quad (2.121)$$

แทนค่ากระแสในพจน์แรงเคลื่อนไฟฟ้ากับตัวประกอบสายอากาศภาคส่งจากสมการ (2.19) ลงในสมการ (2.118) แสดงได้ดังสมการ (2.122)

$$E_{Hybrid} = -\frac{V}{50AF_T} \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{120}{GR_A} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{j\omega\mu\Delta}{4\pi} \sum_{n=1}^N I'_n \cdot \frac{e^{-ikr_n}}{r_n} \quad (2.122)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (2.121) กับ (2.122) แสดงได้ดังสมการ (2.123)

$$\begin{aligned}
 E_{Hybrid} &= \frac{V}{50AF_T} \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{120}{GR_A} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{E_{Hybrid}^{\max}}{\sqrt{P_t/R_A}} \\
 &= \frac{V}{50AF_T} \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{120}{P_t G} \right)^{\frac{1}{2}} E_{Hybrid}^{\max}
 \end{aligned} \tag{2.123}$$

พิจารณาค่าลดทอนสถานที่โดยการแทนค่าความเข้มสนามไฟฟ้าลงในสมการ (2.33) แสดงได้ดังสมการ (2.124)

$$\begin{aligned}
 SA &= \frac{VAF_R}{2} \frac{50AF_T \lambda}{V\pi} \left(\frac{P_t G}{120} \right)^{\frac{1}{2}} E_{Hybrid}^{\max} \\
 \frac{SA}{AF_T AF_R} &= \frac{79.58 \sqrt{30P_t G}}{2f_M E_{Hybrid}^{\max}}
 \end{aligned} \tag{2.124}$$

จากนิยามค่าลดทอนสถานที่ที่ปรับบรรทัดฐานแล้วตามสมการ (2.35) ทำให้เขียนสมการ (2.124) ได้ใหม่ดังสมการ (2.125)

$$NSA^{Hybrid} = \frac{79.58 \sqrt{30P_t G}}{2f_M E_{Hybrid}^{\max}} \tag{2.125}$$

หากพิจารณาค่าลดทอนสถานที่ที่ปรับบรรทัดฐานแล้วในหน่วย dB จะได้ว่า

$$NSA_{DH, DV}^{Hybrid} (dB) = 20 \log \left(\frac{79.58 \sqrt{30P_t G_t}}{2} \right) - 20 \log(f_M) - 20 \log(E_{Hybrid, DH, DV}^{\max}) \tag{2.126}$$

โดย $NSA_{DH, DV}^{Hybrid}$ คือ ค่าลดทอนสถานที่ที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว กรณีระนาบดินขนาดจำกัดทั้งในโพลาริเซชันแนวราบ (DH) และโพลาริเซชันแนวตั้ง (DV) ตามลำดับ

$E_{Hybrid, DH, DV}^{\max}$ คือ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่สายอากาศไดโพล กรณีระนาบดินขนาดจำกัด ณ ภาครับได้ในช่วงความสูง $h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}$ ในโพลาริเซชันแนวราบ (DH) และโพลาริเซชันแนวตั้ง (DV) ตามลำดับ

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการพิจารณาผลกระทบจากปรากฏการณ์เดียวกันจากที่ขอบ
และปรากฏการณ์เดียวกันที่มีผลกระทบต่อค่าลดทอนสถานที่ปรับบรรทัดฐานแล้วซึ่งเป็นตัว
กำหนดค่าสมรรถนะของสถานทดสอบ การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งนั้นนอกจากจะมีผล
กระทบจากปรากฏการณ์คลื่นเดียวกันอันเนื่องมาจากกระนาบดินมีขนาดจำกัดแล้วยังมีค่าระดับ
สัญญาณรบกวนเป็นปัจจัยสำคัญที่จะบ่งชี้ว่าสถานทดสอบนั้นจะสามารถใช้เป็นสถานทดสอบ
แบบกลางแจ้งได้ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 3



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ผลกระทบของระดับสัญญาณรบกวนต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง

ความนำ

การทดสอบการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของบริภัณฑ์ทางไฟฟ้าในบริเวณใดๆ นั้นสิ่งที่จะต้องพิจารณาคือ ระดับของสัญญาณรบกวนนั้นต้องมีระดับไม่สูงกว่าระดับสัญญาณที่แพร่กระจายออกจากบริภัณฑ์ทางไฟฟ้า ถ้าระดับของสัญญาณรบกวนในบริเวณที่จะจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งต่ำกว่าที่มาตรฐาน CISPR 16-1 [2] กำหนด 6 dB บริเวณนั้นก็มีความเหมาะสมที่จะจัดตั้งเป็นสถานทดสอบแบบกลางแจ้งได้ การระบุค่าระดับสัญญาณรบกวนที่แต่ละความถี่ของสถานทดสอบใดๆ นั้นจะระบุจากค่าเฉลี่ยของระดับสัญญาณรบกวนที่มีการแจกแจงแบบปกติ [21] ซึ่งบางครั้งอาจจะทำให้การทดสอบบริภัณฑ์ทางไฟฟ้านั้นเกิดข้อผิดพลาดได้เนื่องจากระดับสัญญาณรบกวนนั้นอาจเกิดค่าสุดขีด (extreme value) ขึ้นซึ่งหมายถึงทั้งค่าสุดขีดที่เป็นแบบสูงสุดโดยค่าสุดขีดนี้จะเกิดขึ้นในบริเวณหาง (tail) ด้านขวาของเส้นโค้งการแจกแจง ค่าสุดขีดที่อยู่ในบริเวณหางด้านซ้ายของเส้นโค้งการแจกแจงจะเป็นแบบต่ำสุด ถ้าหากบริเวณที่ใช้ในการทดสอบปรากฏว่าระดับสัญญาณรบกวนสุดขีดแบบสูงสุดขึ้นและค่าสุดขีดนี้มีค่ามากกว่าค่าระดับสัญญาณรบกวนตามที่มาตรฐาน CISPR 16-1 [2] กำหนดก็อาจจะทำให้การทดสอบนั้น ๆ ผิดพลาดได้ดังนั้นจึงถือได้ว่าค่าสุดขีดแบบสูงสุดนี้เป็นมูลค่าความเสี่ยง (Value at Risk, VaR) ของระดับสัญญาณรบกวนในสถานทดสอบนั้น การพรรณนาค่าระดับสัญญาณรบกวนบริเวณปลายเส้นโค้งสามารถพรรณนาได้ด้วยทฤษฎีค่าสุดขีด (Extreme Value Theory, EVT) [22,23]

การนิยามมูลค่าความเสี่ยงจะกล่าวในหัวข้อ 3.1 เมื่อนิยามมูลค่าความเสี่ยงแล้วก็จะใช้นิยามนี้เป็นตัวกำหนดมูลค่าความเสี่ยงจากการแทนค่าระดับสัญญาณรบกวนด้วยการแจกแจงของค่าสุดขีดซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.2 ส่วนหัวข้อ 3.3 จะกล่าวถึงการคำนวณค่าปัจจัยของการแจกแจงด้วยทฤษฎีค่าสุดขีด และหัวข้อ 3.4 จะกล่าวถึงตัวเลขสัญญาณรบกวน (noise figure) ซึ่งมีรายละเอียดตามลำดับดังต่อไปนี้

3.1 การวัดมูลค่าความเสี่ยง

ในการระบุพฤติกรรมความเสี่ยงของระดับสัญญาณรบกวนในสถานทดสอบโดยใช้มูลค่าความเสี่ยงเป็นตัวกำหนดนั้นจะเริ่มจากการใช้ข้อมูลในอดีตไปกำหนดพารามิเตอร์ของการแจกแจง

แล้วใช้ระดับสัญญาณรบกวนในตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ที่ใกล้เคียงความผิดพลาดที่ α ของการแจกแจงไป
ระบุมูลค่าความเสี่ยงดังสมการ (3.1) [23]

$$VaR_\alpha = F^{-1}(1 - \alpha) \quad (3.1)$$

โดย F^{-1} เรียกว่า ฟังก์ชันควอนไทล์ ซึ่งนิยามจาก ฟังก์ชันผกผันของฟังก์ชัน
การแจกแจง F

ถ้าหากพิจารณาค่าสูงสุดโดยการพิจารณาข้อมูลเป็นช่วงเวลาที่ยาวที่คงที่และนำข้อมูลที่มีค่า
สูงที่สุดแต่ละช่วงเวลาออกมาโดยแทนข้อมูลที่สูงที่สุดนั้นด้วยฟังก์ชัน H ซึ่งมูลค่าความเสี่ยงจะ
เรียกว่า ระดับคืนกลับ Return Level (R_n^k) ดังสมการ (3.2) [23]

$$R_n^k = H^{-1}(1 - p) \quad (3.2)$$

โดย k คือ เวลาในลำดับที่ k
 n คือ ช่วงเวลาที่แบ่งทั้งหมด
 p คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดค่าสูงสุดในช่วงเวลาลำดับที่ k

เมื่อพิจารณาช่วงเวลาลำดับที่ k จะสังเกตเห็นว่าในช่วงเวลานี้จะมีค่าสูงสุดได้เพียงค่าเดียวเท่า
นั้น ดังนั้นค่า p จึงมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{k}$ เมื่อแทนลงในสมการสมการ (3.2) จะทำให้ค่า ระดับคืนกลับ
เปลี่ยนเป็นได้ดังสมการ (3.3) [23]

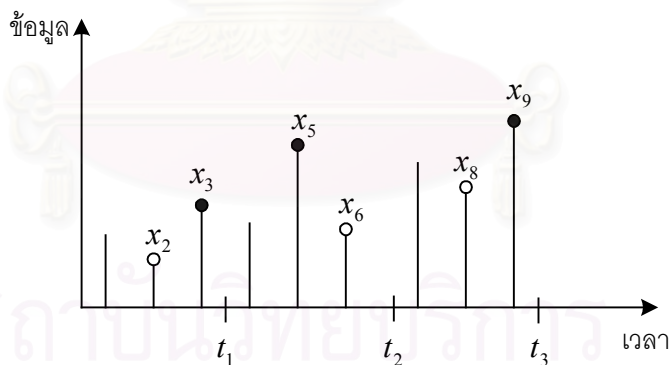
$$R_n^k = H^{-1}\left(1 - \frac{1}{k}\right) \quad (3.3)$$

การเลือกฟังก์ชันการแจกแจงตัวมาพรรณนาข้อมูลที่เป็นค่าสูงสุดขีดด้วยฟังก์ชันควอนไทล์
หรือฟังก์ชัน H นั้นขึ้นอยู่กับวิธีการนำข้อมูลที่เป็นค่าสูงสุดขีดออกมาจากข้อมูลดิบซึ่งรายละเอียดจะ
กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2 ทฤษฎีค่าสุดขีด (EVT)

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยทั่วไปจะมีข้อสมมติว่าข้อมูลนั้นมีการแจกแจงแบบปกติแล้วใช้การแจกแจงแบบปกตินี้ไปประมาณค่าความเสี่ยง หากสังเกตจะเห็นว่าการระบุมูลค่าความเสี่ยงนั้นจะระบุจากข้อมูลที่อยู่บริเวณส่วนปลายของการแจกแจง การพรรณนาข้อมูลนี้ด้วยสมมติฐานที่ว่า เป็นการแจกแจงแบบปกติจะทำให้การระบุมูลค่าความเสี่ยงนั้นเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากข้อมูลที่อยู่ในบริเวณส่วนปลายนั้นเป็นข้อมูลที่มีโอกาสเกิดขึ้นไม่บ่อยมากนัก หรือมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับข้อมูลอื่นๆ ในการแจกแจงความน่าจะเป็นของข้อมูลดิบ จากการศึกษารายการอ้างอิง [22] และ [23] พบว่าการการพรรณนาข้อมูลที่อยู่บริเวณส่วนปลาย หรือข้อมูลที่มีลักษณะเป็นค่าสุดขีดนี้สามารถพรรณนาได้ดีโดยใช้ ทฤษฎีค่าสุดขีด (Extreme Value Theory, EVT)

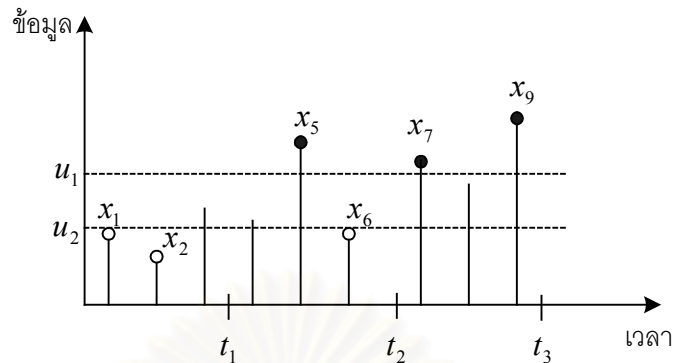
การนิยามข้อมูลที่เป็นค่าสุดขีดนั้นสามารถนิยามได้สองวิธี [23] กล่าวคือ วิธีที่หนึ่ง เป็นการนำข้อมูลที่มีค่าสูงสุด (หรือ ค่าต่ำสุด) ในช่วงเวลาที่กำหนด เช่น ชั่วโมง, วัน, เดือน หรือ ปี เป็นต้น เรียกว่า Block-Maxima (Minima) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะเป็นค่าสุดขีดในช่วงเวลาดังกล่าว แสดงดังรูป 3.1



รูป 3.1 ค่าสุดขีดในแต่ละช่วงเวลา

จะสังเกตเห็นจากรูป 3.1 ว่าเมื่อแบ่งข้อมูลดิบออกตามช่วงเวลาโดยให้มีช่วงเวลาที่เท่ากัน ในช่วงเวลาดังกล่าวจะแบ่งจำนวนข้อมูลดิบออกเป็นจำนวนที่เท่ากันในที่นี้แบ่งข้อมูลออกเป็นสามจำนวน ข้อมูลทั้งสามจำนวนนี้จะประกอบไปด้วยข้อมูลที่เป็นค่าสุดขีดทั้งในกรณีสูงสุดและต่ำสุดโดย x_3 , x_5 และ x_9 เป็นค่าสุดขีดสูงสุด และ x_2 , x_6 และ x_8 เป็นค่าสุดขีดต่ำสุด

วิธีที่สอง เป็นการกำหนดระดับอ้างอิง (threshold) ของข้อมูล เพื่อเป็นการจำแนกข้อมูลที่เป็นค่าสุดขีดออกจากข้อมูลดิบ แสดงดังรูป 3.2



รูป 3.2 ค่าสุดขีดเมื่อกำหนดค่าระดับอ้างอิง

จะสังเกตเห็นจากรูป 3.2 ว่าข้อมูลที่อยู่เหนือระดับอ้างอิง u_1 นั้นจะเป็นค่าสุดขีดสูงสุดซึ่งมีจำนวนสามจำนวนคือ x_5, x_7 และ x_9 ถ้าข้อมูลอยู่ต่ำกว่าระดับอ้างอิง u_2 ข้อมูลนั้นจะเป็นค่าสุดขีดต่ำสุดซึ่งมีจำนวนสามจำนวนคือ x_1, x_2 และ x_6

การได้ข้อมูลที่เป็นค่าสุดขีดมาจากวิธี Block-Maxima (Minima) ข้อมูลนั้นสามารถพรรณนาได้ดีด้วยการแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไป (Generalized Extreme Value, GEV) และค่าสุดขีดที่ได้มาจากวิธีกำหนดระดับอ้างอิงข้อมูลนั้นสามารถพรรณนาได้ดีด้วยการแจกแจงความถี่สะสมพาราโตทั่วไป (Generalized Pareto Distribution, GPD) ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2.1 การแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไป (Generalized Extreme Value, GEV)

การสุ่มตัวอย่าง (sampling) จากกลุ่มประชากรจำนวน N ทำให้ได้กลุ่มตัวอย่างที่เรียกว่า ตัวแปรสุ่ม X_1, X_2, \dots, X_n ซึ่งข้อสมมติที่ในการสุ่มตัวอย่างคือตัวแปรสุ่มนั้นเป็นอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน (Independent and Identically Distributed, IID) ถ้าหากนำตัวแปรสุ่มดังกล่าวมาเขียนจัดเรียงจากค่าน้อยไปยังค่ามากสามารถเขียนแสดงได้ดังสมการ (3.4)

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n \quad (3.4)$$

หรือสามารถเขียนแทนด้วยเครื่องหมายลำดับแสดงได้ดังสมการ (3.5)

$$X_{1:n} \leq X_{2:n} \leq \dots \leq X_{n:n} \quad (3.5)$$

หากสังเกตพจน์ในสมการ (3.5) จะเห็นว่าค่าสุดขีดที่เป็นค่าต่ำสุดคือ $X_{1:n}$ สามารถพิจารณาได้จากสมการ (3.6)

$$X_{1:n} = \text{Min}(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.6)$$

และค่าสุดขีดที่เป็นค่าสูงสุดคือ $X_{n:n}$ สามารถพิจารณาได้จากสมการ (3.7)

$$X_{n:n} = \text{Max}(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.7)$$

สมการ (3.6) และสมการ (3.7) เป็นการหาค่าสุดขีดของตัวแปรสุ่มที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง เมื่อพิจารณาข้อมูลกลุ่มตัวอย่างในช่วงเวลาแต่ละช่วงเวลาจะทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นค่าสุดขีดของช่วงเวลาแต่ละช่วงเวลา วิธีนี้เรียกว่า Block-Maxima (Minima) ดังกล่าวมาแล้ว ถ้าหากพิจารณาผลลัพธ์ที่จะเกิดของค่าสุดขีดในแต่ละช่วงเวลาจะมีผลลัพธ์เพียงสองชนิดคือ เกิดค่าสุดขีดและไม่เกิดค่าสุดขีด การเกิดผลลัพธ์เพียงสองชนิดสามารถแทนฟังก์ชันการแจกแจงการสะสม (Cumulative Distribution Function, CDF) ได้ด้วยการแจกแจงสะสมทวินาม [22,24] แสดงได้ดังสมการ (3.8)

$$\begin{aligned} F_{X_{r:n}}(x) &= P[X_{r:n} \leq x] \\ &= \sum_{k=r}^n \binom{n}{k} F^k(x) [1 - F(x)]^{n-k} \end{aligned} \quad (3.8)$$

โดย $X_{r:n}$ คือ ตัวแปรสุ่มอันดับที่ r จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน n

$F_{X_{r:n}}(x)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของ $X_{r:n}$

$F(x)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของกลุ่มตัวอย่าง

เมื่อหาอนุพันธ์อันดับแรกของฟังก์ชัน $F_{X_{r:n}}(x)$ ในสมการ (3.8) ทำให้ได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function, pdf) แสดงได้ดังสมการ (3.9) [22]

$$f_{X_{r:n}}(x) = r \binom{n}{k} F^{r-1}(x) [1 - F(x)]^{n-r} f(x) \quad (3.9)$$

โดย $f_{X_{r:n}}(x)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น $X_{r:n}$

$f(x)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของกลุ่มตัวอย่าง

เมื่อกระจายฟังก์ชันการแจกแจงสะสมและแทนค่า $r = 1$ ในสมการ (3.8) แสดงได้ดังสมการ (3.10)

$$[1 - F(x)]^n + F_{X_{1:n}}(x) = 1 \quad (3.10)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.10) จึงได้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าสุดขีดที่เป็นค่าต่ำสุดแสดงได้ดังสมการ (3.11)

$$F_{X_{1:n}}(x) = 1 - [1 - F(x)]^n \quad (3.11)$$

ถ้าหากหาอนุพันธ์อันดับแรกของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าสุดขีดที่เป็นค่าต่ำสุดจากสมการ (3.11) จะทำให้ได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแสดงได้ดังสมการ (3.12)

$$f_{X_{1:n}}(x) = n[1 - F(x)]^{n-1} f(x) \quad (3.12)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อแทน $r = n$ ในสมการ (3.8) ทำให้ได้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าสุดขีดที่เป็นค่าสูงสุดแสดงได้ดังสมการ (3.13)

$$F_{X_{n:n}}(x) = F^n(x) \quad (3.13)$$

ถ้าหากหาอนุพันธ์อันดับแรกของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าสุดขีดที่เป็นค่าสูงสุดจากสมการ (3.13) จะทำให้ได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแสดงได้ดังสมการ (3.14)

$$f_{X_{n:n}}(x) = nF^{n-1}(x) f(x) \quad (3.14)$$

ในการพิจารณาฟังก์ชันการแจกแจงสะสมและฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าสุดขีดแสดงได้ดังสมการ (3.11) - สมการ (3.14) ดังกล่าวมาแล้วนั้นจำเป็นต้องทราบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมและฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของกลุ่มตัวอย่าง ถ้าหาก

พิจารณาว่ากลุ่มตัวอย่างที่มีจำนวนตัวอย่าง (n) เข้าใกล้อนันต์ดังนั้นก็จึงสามารถใช้กรรมวิธีเส้นกำกับได้และจะทำให้ได้การแจกแจงเส้นกำกับ (asymptotic distribution) ร่วมกับการแปลงเชิงเส้น (linear transformation) ทั้งกรณีค่าสุดขีดที่เป็นค่าสูงสุดและกรณีค่าสุดขีดที่เป็นค่าต่ำสุด แสดงได้ดังสมการ (3.15) และสมการ (3.16) ตามลำดับ [22]

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F^n(a_n + b_n x) = H(x) \quad (3.15)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} 1 - [1 - F(c_n + d_n x)]^n = L(x) \quad (3.16)$$

โดย a_n, b_n, c_n และ d_n คือ ค่าคงที่

$H(x)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าสุดขีดที่เป็นค่าสูงสุด

$L(x)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าสุดขีดที่เป็นค่าต่ำสุด

อาศัยผลจากสมการ (3.15) จะได้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าสุดขีดที่เป็นค่าสูงสุด ซึ่งแบ่งเป็น 3 กรณี ที่เรียกว่า *FRECHET*, *WEIBULL* และ *GUMBEL* แสดงได้ดังสมการ (3.17) – สมการ (3.19) ตามลำดับ

$$FRECHET : H_{1,\gamma}(x) = \begin{cases} e^{-x^{-\gamma}} & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$WEIBULL : H_{2,\gamma}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ e^{-(x)^{\gamma}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$GUMBEL : H_{3,\gamma}(x) = e^{-e^{-x}} \quad -\infty < x < \infty \quad (3.19)$$

โดย γ คือ ค่าคงที่

และเมื่ออาศัยผลจากสมการ (3.16) จะได้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าสุดขีดที่เป็นค่าต่ำสุดซึ่งแบ่งเป็น 3 กรณี ที่เรียกว่า *FRECHET*, *WEIBULL* และ *GUMBEL* แสดงได้ดังสมการ (3.20) – สมการ (3.22) ตามลำดับ

$$FRECHET : L_{1,\gamma}(x) = \begin{cases} 1 - e^{-(x)^{-\gamma}} & \text{if } x < 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.20)$$

$$WEIBULL : L_{2,\gamma}(x) = \begin{cases} 1 - e^{-x^\gamma} & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.21)$$

$$GUMBEL : L_{3,\gamma}(x) = 1 - e^{-e^x} \quad -\infty < x < \infty \quad (3.22)$$

สมการ (3.17) – สมการ (3.19) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปการแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไป (GEV) ที่เป็นค่าสูงสุดแสดงได้ดังสมการ (3.23) [22,25,26]

$$H_\xi(x; \bar{x}, s) = \begin{cases} e^{-\left[1 + \xi \left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)\right]^{-1/\xi}} & \text{if } 1 + \xi \left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right) > 0 \\ e^{-e^{-x}} & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

โดย ξ คือ ค่าปัจจัยรูปร่าง (shape parameter) หรือ ค่าดัชนีหาง (tail index)

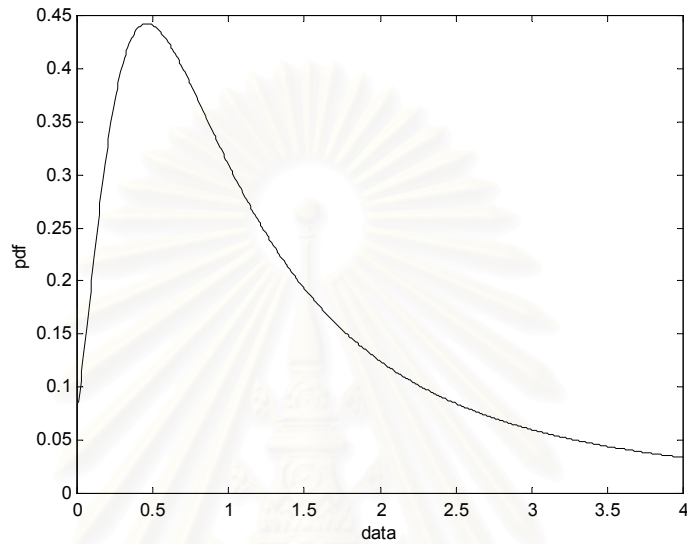
\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ย

s คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

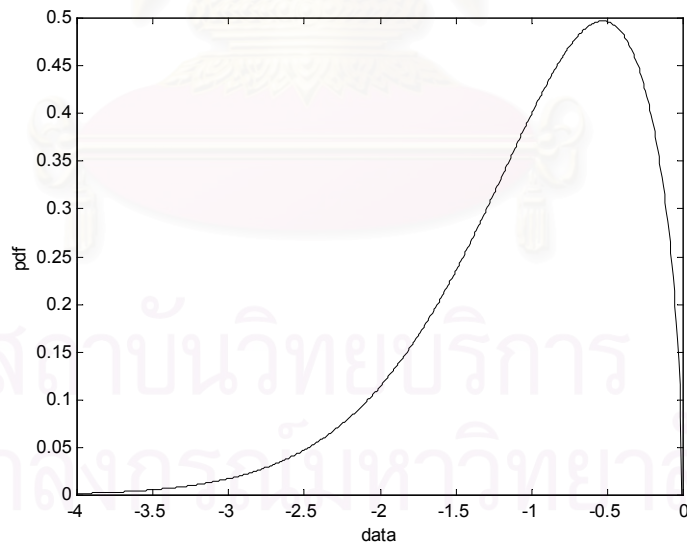
กำหนดค่า $\xi > 0$, $\xi < 0$ และ $\xi = 0$ จะเป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของค่าสุดขีดที่เป็นค่าสูงสุดของ *FRECHET*, *WEIBULL* และ *GUMBEL* ตามลำดับ เมื่อหาอนุพันธ์อันดับแรกของฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไปที่เป็นค่าสูงสุดในสมการ (3.23) จะได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแสดงได้ดังสมการ (3.24)

$$h_\xi(x; \bar{x}, s) = \begin{cases} \frac{1}{s} \left[1 + \xi \left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)\right]^{-\left(\frac{1}{\xi}-1\right)} e^{-\left(1 + \xi \left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)\right)^{-1/\xi}} & \text{if } 1 + \xi \left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right) > 0 \\ \frac{1}{s} e^{-\left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)} e^{-\left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)} & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

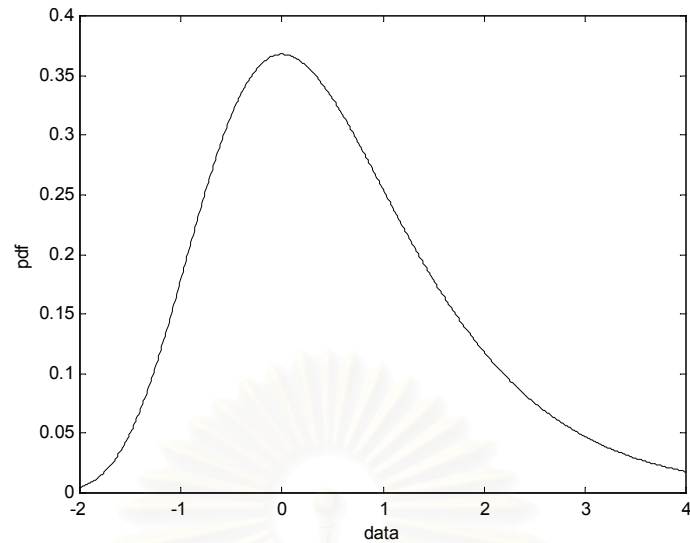
เมื่อแทนค่า $\xi = \frac{1}{1.5}, -\frac{1}{1.5}, 0$ ลงในสมการ (3.24) โดยกำหนดให้ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับหนึ่ง จะได้รูปตัวอย่างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแสดงดังรูป 3.3 รูป 3.4 และรูป 3.5 ตามลำดับ



รูป 3.3 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น กรณี *FRECHET*



รูป 3.4 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น กรณี *WEIBULL*



รูป 3.5 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็น กรณี *GUMBEL*

เมื่อพิจารณา รูป 3.3, รูป 3.4 และรูป 3.5 จะสังเกตเห็นว่ารูปฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นนั้นมีลักษณะเบ้ขวา, เบ้ซ้าย และค่อนข้างสมมาตร ตามลำดับ โดยลักษณะของรูปฟังก์ชันขึ้นอยู่กับอาณาจักรของฟังก์ชันและค่าปัจจัยรูปร่าง (ξ)

เมื่อเขียนสมการ (3.20) – สมการ (3.22) ให้อยู่ในรูปการแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไป (GEV) ที่เป็นค่าต่ำสุดแสดงได้ดังสมการ (3.25) [22,25,26]

$$L_\xi(x; \lambda, \delta) = \begin{cases} 1 - e^{-\left[1 + \xi \left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)\right]^{-1/\xi}} & \text{if } 1 + \xi \left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right) > 0 \\ 1 - e^{-e^{-\frac{-(x-\lambda)}{\delta}}} & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

เมื่อหาอนุพันธ์อันดับแรกของฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไปที่เป็นค่าต่ำสุดในสมการ (3.25) จะได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแสดงได้ดังสมการ (3.26)

$$l_\xi(x; \bar{x}, s) = \begin{cases} -\frac{1}{s} \left[1 + \xi \left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)\right]^{-\left(\frac{1}{\xi} - 1\right)} e^{-\left[1 + \xi \left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)\right]^{-1/\xi}} & \text{if } 1 + \xi \left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right) > 0 \\ -\frac{1}{s} e^{-\left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)} e^{\left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right)} & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.26)$$

การระบุค่าที่เป็นค่าสุดขีดหรือที่เรียกว่า ค่าระดับคืนกลับ (R^k) ของกลุ่มประชากรนั้น สามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันผกผันของฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไป (GEV) แสดงได้ดังสมการ (3.3) ดังกล่าวมาแล้ว ดังเมื่อพิจารณาสมการ (3.3) กับ สมการ (3.23) ทำให้ได้ ค่าระดับคืนกลับ ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ข แสดงได้ดังสมการ (3.27)

$$R^k = \begin{cases} \bar{x} - \frac{s}{\xi} \left(1 - (-\ln(1-1/k))^{-\xi}\right) & \text{if } \xi \neq 0 \\ \bar{x} - s \ln(-\ln(1-1/k)) & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

ค่าปัจจัย \bar{x} , s และ ξ เป็นค่าคงที่ที่ได้จากกรรมวิธีการประมาณค่าความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation, MLE) [27] รายละเอียดการวิเคราะห์จะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.3

3.2.2 การแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป (Generalized Pareto Distribution, GPD)

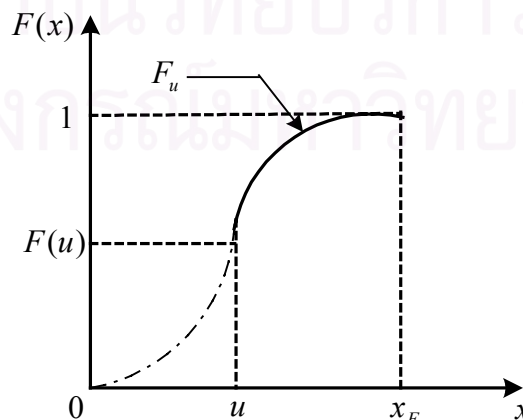
การกำหนดค่าสุดขีดด้วยการกำหนดค่าอ้างอิง (u) เรียกวิธีการนี้ว่า *peak over threshold (POT)* ดังนั้นค่าส่วนต่างระหว่างข้อมูลกับค่าระดับอ้างอิงสามารถพิจารณาได้จากสมการ (3.28)

$$y = x - u \quad (3.28)$$

โดย x คือ ข้อมูล หรือ ประชากร

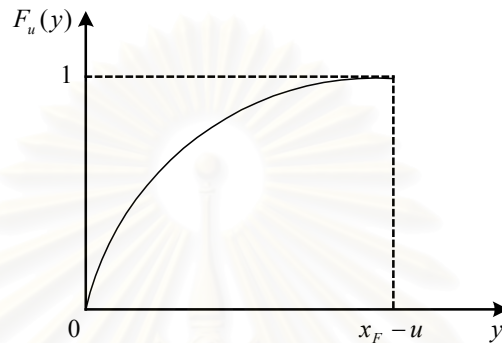
u คือ ระดับอ้างอิง

y คือ ค่าส่วนเกินข้อมูลกับค่าระดับอ้างอิง u



รูป 3.6 การแจกแจงความถี่สะสมของข้อมูลที่มีค่ามากกว่าระดับอ้างอิง

ถ้ากำหนดให้ $F(x)$ คือการแจกแจงความถี่สะสมของข้อมูลทั้งหมด และ x_F คือข้อมูลที่มีค่ามากที่สุดในกลุ่มประชากร ถ้าหากพิจารณาค่าสุดขีดโดยการกำหนดระดับอ้างอิง (u) จะได้การแจกแจงความถี่สะสมของข้อมูลที่เป็นค่าสุดขีด (เส้นทึบ) แสดงได้ดังรูป 3.6 เมื่อกำหนดให้ค่าระดับอ้างอิงมีค่าเข้าใกล้อนันต์ทำให้ได้การแจกแจงความถี่สะสมที่สามารถประมาณด้วยการแจกแจงความถี่สะสมพาราโตทั่วไป (GPD) [23] แสดงได้ดังรูป 3.7



รูป 3.7 การแจกแจงความถี่สะสมของผลต่างของข้อมูลกับค่าระดับอ้างอิงที่ประมาณด้วยการแจกแจงความถี่สะสมพาราโตทั่วไป

การแจกแจงความถี่สะสมของค่าสุดขีดสามารถแสดงเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสมแบบเงื่อนไขแสดงได้ดังสมการ (3.29) [23, 28-30]

$$F_u(y) = P(X - u \leq y / X \geq u) \quad (3.29)$$

โดย X คือ ตัวแปรสุ่ม

เมื่อพิจารณาสมการ (3.28) ร่วมกับสมการ (3.29) โดยกำหนดให้ค่าสูงสุดของกลุ่มตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าหรือเข้าใกล้อนันต์ ($x_F \leq \infty$) อาศัยผลจากรายการอ้างอิง [23, 28-30] ทำให้สามารถเขียนฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสมส่วนเกินของค่าสุดขีดให้อยู่ในรูปการแจกแจงความถี่สะสมของกลุ่มตัวอย่างแสดงได้ดังสมการ (3.30)

$$\begin{aligned} F_u(y) &= \frac{F(u+y) - F(u)}{1 - F(u)} \\ &= \frac{F(x) - F(u)}{1 - F(u)} \end{aligned} \quad (3.30)$$

การพรรณนาการแจกแจงความถี่สะสมของผลต่างข้อมูลกับค่าระดับอ้างอิงนอกจากจะพิจารณาได้ด้วยสมการ (3.30) แล้วยังสามารถพรรณนาได้ดีด้วยฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสมพาราเรโตทั่วไป (GPD) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.31) และสมการ (3.32) [23, 28-30]

$$F_u(y) \approx G_{\xi,s}(y) \quad (3.31)$$

กำหนดให้ $u \rightarrow \infty$

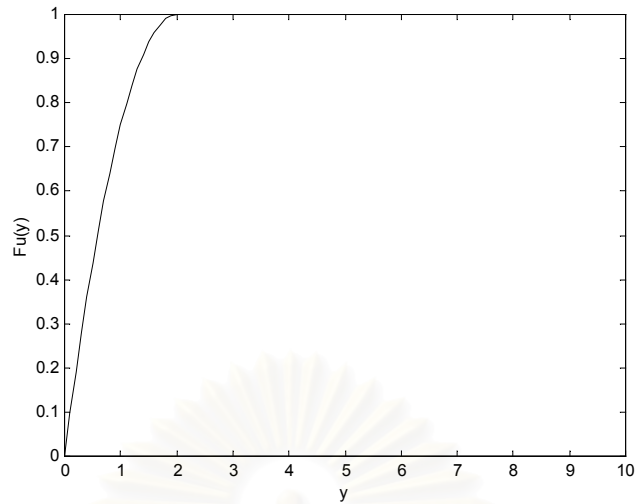
$$G_{\xi}(y,s) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\xi}{s}y\right)^{-1/\xi} & \text{if } \xi \neq 0 \\ 1 - e^{-y/s} & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

โดยที่ y อยู่ในช่วง $[0, x_F - u]$

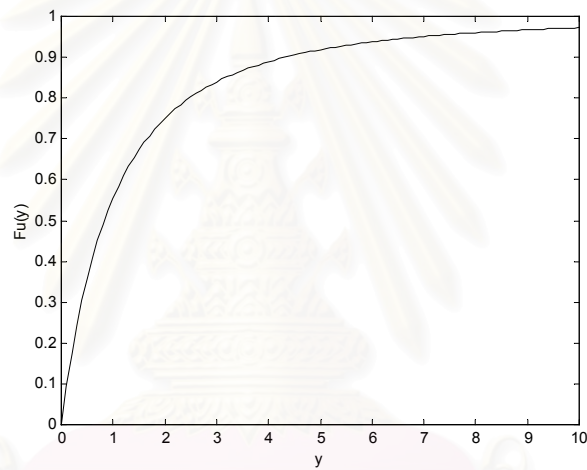
เมื่อหาอนุพันธ์อันดับแรกของฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสมพาราเรโตทั่วไปที่แสดงดังสมการ (3.32) จะได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นพาราเรโตทั่วไปแสดงดังสมการ (3.33)

$$g_{\xi}(y,s) = \begin{cases} \frac{1}{s} \left(1 + \frac{\xi}{s}y\right)^{-\left(\frac{1}{\xi}+1\right)} & \text{if } \xi \neq 0 \\ \frac{1}{s} e^{-y/s} & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

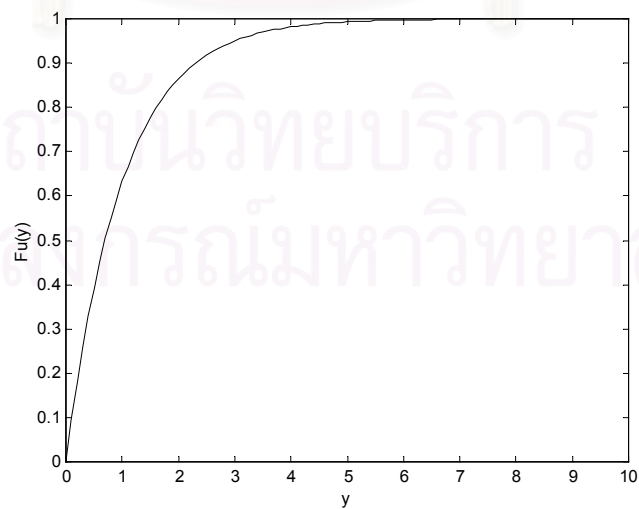
เมื่อแทนค่า $\xi = -0.5, 0.5, 0$ ลงในสมการ (3.33) โดยกำหนดให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับหนึ่ง จะได้รูปตัวอย่างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแสดงดังรูป 3.8 รูป 3.9 และรูป 3.10 ตามลำดับ



รูป 3.8 การแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป เมื่อ $\xi = -0.5$



รูป 3.9 การแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป เมื่อ $\xi = 0.5$



รูป 3.10 การแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป เมื่อ $\xi = 0$

หากสังเกตรูป (3.8)- รูป (3.10) จะเห็นว่าค่าปัจจัยรูปร่าง (ξ) เป็นตัวกำหนดลักษณะรูปร่างของฟังก์ชันดังกล่าวซึ่งค่าปัจจัยรูปร่างนี้จะต้องสอดคล้องกับข้อมูลกลุ่มประชากร

การระบุค่ามูลค่าความเสี่ยงหรือค่าสุดขีดของกลุ่มประชากรโดยการกำหนดค่าระดับอ้างอิงนั้นสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันผกผันของฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสมแสดงได้ดังสมการ (3.2) ดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการ (3.2), สมการ (3.30) และสมการ (3.32) จะได้ค่ามูลค่าความเสี่ยงแสดงได้ดังสมการ (3.34) [23] ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ค และวิธีการเลือกค่าระดับอ้างอิงที่เหมาะสมแสดงในภาคผนวก ง

$$VaR_p = u + \frac{s}{\xi} \left(\left(\frac{n}{N_u} p \right)^{-\xi} - 1 \right) \quad (3.34)$$

โดย p คือ เปอร์เซนต์ความผิดพลาด

u คือ ค่าระดับอ้างอิง

s คือ ค่าความแปรปรวน หรือ ค่าปัจจัยมาตราส่วน

ξ คือ ค่าดัชนีปลาย

n คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมด

N_u คือ จำนวนตัวอย่างที่มีค่ามากกว่าค่าระดับอ้างอิง

การระบุค่าสุดขีดจากการแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไปและการแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไปสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (3.32) และสมการ (3.33) ตามลำดับ โดยค่าปัจจัยต่างๆ นั้นสามารถคำนวณได้จากกรรมวิธีการประมาณค่าความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation, MLE) [27] หรือ กรรมวิธีกระดาษความน่าจะเป็น (probability paper) [22] รายละเอียดการวิเคราะห์จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.3 การคำนวณค่าปัจจัยของการแจกแจงทฤษฎีค่าสุดขีด

การคำนวณค่าปัจจัยต่างๆ ของการแจกแจงทฤษฎีค่าสุดขีดนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้สองกรรมวิธีคือ วิธีแรกการประมาณค่าความควรจะเป็นสูงสุด (MLE) ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่หาค่าประมาณของค่าปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุดเพียงค่าเดียวเรียกว่า การประมาณค่าแบบจุด (point estimation) และวิธีที่สองกรรมวิธีกระดาษความน่าจะเป็นซึ่งกรรมวิธีนี้จะประมาณค่าปัจจัยต่างๆ ด้วยการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุด (least-squares estimate) ของกลุ่มตัวอย่างกับ

ฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสมที่แปลงเป็นสมการเส้นตรงโดยรายละเอียดการคำนวณของแต่ละวิธีจะกล่าวถึงเป็นลำดับดังต่อไปนี้

3.3.1 การประมาณค่าปัจจัยด้วยกรรมวิธีค่าความควรจะเป็นสูงสุด (MLE) [27]

การประมาณค่าปัจจัยต่างๆ ด้วยการประมาณค่าความควรจะเป็นสูงสุดนั้นจะต้องกำหนดฟังก์ชันความควรจะเป็น (likelihood function) โดยปกติจะเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นร่วม (joint pdf) ของตัวแปรสุ่ม X_1, X_2, \dots, X_n ซึ่งตัวแปรสุ่มจะเป็นอิสระต่อกันและมีการแจกแจงเหมือนกัน (iid) เมื่อกำหนดให้ θ เป็นค่าปัจจัยที่ไม่รู้ค่า ดังนั้นสามารถเขียนฟังก์ชันความควรจะเป็นในรูปทั่วไปได้ดังสมการ (3.35)

$$\begin{aligned} l(\theta) &= f(x_1, x_2, \dots, x_n / \theta) \\ &= f_X(x_1 / \theta) \cdot f_X(x_2 / \theta) \cdot \dots \cdot f_X(x_n / \theta) \end{aligned} \quad (3.35)$$

โดย l คือ ฟังก์ชันความควรจะเป็น หรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดตัวอย่าง x_1, x_2, \dots, x_n

ถ้าเขียนฟังก์ชันความควรจะเป็นในรูปลอการิทึมธรรมชาติ (ln) สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.36)

$$\begin{aligned} L(\theta) &= \ln f(x_1, x_2, \dots, x_n / \theta) \\ &= \prod_{i=1}^n \ln(f(x_i / \theta)) \end{aligned} \quad (3.36)$$

โดย L คือ ฟังก์ชันความควรจะเป็นเชิงล็อก หรือความน่าจะเป็นเชิงล็อกที่จะเกิดตัวอย่าง x_1, x_2, \dots, x_n

เมื่อค่าประมาณ θ ที่ทำให้ฟังก์ชันความควรจะเป็นเชิงล็อกมีค่าสูงสุด (MLE) หรือเมื่อเขียนในรูปอนุพันธ์ย่อยอันดับแรกของฟังก์ชันความควรจะเป็นเชิงล็อกเทียบกับพจน์ θ มีค่าเท่ากับศูนย์ได้ดังสมการ (3.37)

$$\frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (3.37)$$

การประมาณค่าปัจจัยต่างๆ ด้วยกรรมวิธีค่าประมาณความควรจะเป็นสูงสุดในฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นค่าสุดขีดทั่วไปของค่าสูงสุดและฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นพาเรโตทั่วไปที่แสดงดังสมการ (3.24) และสมการ (3.33) ตามลำดับ โดยฟังก์ชันค่าความควรจะเป็นของความหนาแน่นของความน่าจะเป็นค่าสุดขีดทั่วไปแสดงดังสมการ (3.38)

$$L^h(x; \bar{x}, s, \xi) = \begin{cases} -N \ln s - \left(\frac{1}{\xi} + 1\right) \cdot \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right) - \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right)^{-\frac{1}{\xi}} & \text{if } 1 + \xi \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right) > 0 \\ -N \ln s - \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} + e^{-\frac{x_i - \bar{x}}{s}}\right) & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.38)$$

โดย L^h คือ ฟังก์ชันความควรจะเป็นล็อกของค่าสุดขีดทั่วไป (GEV)
 N คือ จำนวนข้อมูลค่าสุดขีด

และฟังก์ชันค่าความควรจะเป็นของพาเรโตทั่วไปแสดงดังสมการ (3.39)

$$L^g(y; s, \xi) = \begin{cases} N_u \ln s - \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \cdot \sum_{i=1}^{N_u} \ln \left(1 + \frac{\xi}{s} y_i\right) & \text{if } \xi \neq 0 \\ -N_u \ln s - \frac{1}{s} \sum_{i=1}^{N_u} y_i & \text{if } \xi = 0 \end{cases} \quad (3.39)$$

โดย L^g คือ ฟังก์ชันความควรจะเป็นล็อกของการแจกแจงพาเรโตทั่วไป (GPD)

การประมาณค่าปัจจัย \bar{x} , s , ξ ในสมการ (3.38) และสมการ (3.39) ด้วยกรรมวิธีการประมาณความควรจะเป็นล็อกสูงสุด (MLE) สามารถประมาณได้จากฟังก์ชัน fmincon.m ในโปรแกรม MatLab 5.3

3.3.2 การประมาณค่าปัจจัยด้วยกรรมวิธีกระดาษความน่าจะเป็น [22]

การประมาณค่าปัจจัยด้วยกรรมวิธีกระดาษความน่าจะเป็นคือกรรมวิธีที่แปลงฟังก์ชันการแจกแจงการสะสมที่ต้องการประมาณค่าปัจจัยเป็นสมการเส้นตรงแล้วใช้วิธีการ

ประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุด (least - squares estimate) เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของ สมการเส้นตรงแล้วเทียบค่าสัมประสิทธิ์เพื่อคำนวณค่าปัจจัยที่ต้องการ

กำหนดให้ $F(x; \theta)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงการสะสมซึ่งมี θ เป็นค่าปัจจัยที่ต้องการประมาณ และฟังก์ชันการแจกแจงการสะสมนี้เขียนแทนด้วยสมการเส้นโค้ง Y ซึ่งสมการเส้นโค้งนี้จะกำหนดให้เท่ากับฟังก์ชันผกผันของสมการเส้นตรงแสดงได้ดังสมการ (3.40)

$$Y = F(x; \theta) = h^{-1}(a g(x) + b) \quad (3.40)$$

โดย x คือ ตัวแปรสุ่ม

$g(x)$ คือ ฟังก์ชันตัวแปรสุ่ม

a, b คือ สัมประสิทธิ์สมการเส้นตรง

จากสมการ (3.40) เมื่อแปลงสมการเส้นโค้ง y ให้เป็นสมการเส้นตรงแสดงได้ดังสมการ (3.41)

$$h(y) = a g(x) + b \quad (3.41)$$

กำหนดให้ $h(Y)$ เท่ากับ η และ $g(x)$ เท่ากับ ζ สมการ (3.39) จึงเขียนแสดงได้ดังสมการ (3.42)

$$\eta = a \zeta + b \quad (3.42)$$

การประมาณค่าปัจจัยต่างๆ ด้วยกรรมวิธีกระดาษความน่าจะเป็นของฟังก์ชันการแจกแจงการสะสมค่าสุดขีดทั่วไปและฟังก์ชันการแจกแจงการสะสมพาราเรโตทั่วไปที่แสดงดังสมการ (3.23) และสมการ (3.32) ตามลำดับ ซึ่งค่าสุดขีดทั่วไป (GEV) สามารถแปลงเป็นสมการเส้นตรงได้โดยอาศัยคุณสมบัติลอการิทึมฐานธรรมชาติแสดงได้ดังสมการ (3.43)

$$-\ln \left[\ln \left(\frac{1}{Y} \right) \right] = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad \text{if } \xi = 0 \quad (3.43)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (3.43) กับสมการ (3.41) และสมการ (3.42) จะได้

$$\zeta = g(x) = x \quad (3.44)$$

$$\eta = h(Y) = -\ln \left[\ln \left(\frac{1}{Y} \right) \right] \quad (3.45)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1}{s} \\ b &= -\frac{\bar{x}}{s} \end{aligned} \right\} \quad (3.46)$$

เมื่อแทนสมการ (3.43) – สมการ (3.46) จะได้ฟังก์ชันการแจกแจงการสะสมค่าสุดขีดทั่วไปในรูปแบบสมการเส้นตรงแสดงได้ดังสมการ (3.47)

$$\eta = a\zeta + b = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad (3.47)$$

ฟังก์ชันการแจกแจงการสะสมพหุเรติทั่วไปสามารถแปลงเป็นสมการเส้นตรงได้โดยอาศัยคุณสมบัติลอการิทึมฐานธรรมชาติแสดงได้ดังสมการ (3.48)

$$\ln \left(\frac{1}{1-Y} \right) = \frac{y}{s} \quad (3.48)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (3.48) กับสมการ (3.41) และสมการ (3.42) จะได้

$$\zeta = g(y) = y \quad (3.49)$$

$$\eta = h(Y) = \ln \left(\frac{1}{1-Y} \right) \quad (3.50)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1}{s} \\ b &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.51)$$

เมื่อแทนสมการ (3.49) – สมการ (3.51) จะได้ฟังก์ชันการแจกแจงการสะสมพหุเรติทั่วไปในรูปแบบสมการเส้นตรงแสดงได้ดังสมการ (3.52)

$$\eta = a\zeta = \frac{y}{s} \quad (3.52)$$

ถ้าหากเปรียบเทียบการประมาณค่าปัจจัยต่างๆ ของฟังก์ชันการแจกแจงการสะสมของ ทฤษฎีค่าสุดขีด (EVT) ด้วยกรรมวิธีการประมาณค่าความควรจะเป็นสูงสุด (MLE) กับกรรมวิธี กระดาษความน่าจะเป็น (probability paper) จะสังเกตเห็นว่ากรรมวิธีการประมาณค่าความควรจะเป็นสูงสุดนั้นสามารถประมาณค่าปัจจัยได้มากกว่ากรรมวิธีกระดาษความน่าจะเป็น แต่จะมีความซับซ้อนในการคำนวณมากกว่ากรรมวิธีกระดาษความน่าจะเป็น

3.4 ตัวเลขสัญญาณรบกวน (noise figure)

ระดับสัญญาณรบกวนเป็นปัจจัยสำคัญที่จะระบุว่าสถานีที่ใดสามารถที่จะจัดตั้งเป็น สถานีทดสอบแบบกลางแจ้งได้ โดยค่าระดับสัญญาณรบกวนจะเป็นกลุ่มตัวอย่างประชากรที่อยู่ใน รูปตัวเลขสัญญาณรบกวน (noise figure) [21] แสดงได้ดังสมการ (3.53)

$$F_a = 10 \log_{10} f_a \quad (3.53)$$

จากสมการ (3.53) f_a คือ ตัวประกอบสัญญาณรบกวน (noise factor) สามารถคำนวณได้จาก สมการ (3.54)

$$f_a = \frac{p_n}{kT_o B} \quad (3.54)$$

โดย p_n คือ ค่ากำลังของระดับสัญญาณรบกวน, วัตต์
 k คือ ค่าคงที่โบลตซ์แมน มีค่าเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
 B คือ แบนด์วิดท์สัญญาณรบกวน, Hz
 T_o คือ อุณหภูมิอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 288 K

เมื่อพิจารณาค่ากำลังสัญญาณรบกวน η สายอากาศรับสามารถคำนวณได้จากสูตรการส่งผ่าน ของพริสแสดงได้ดังสมการ (3.55)

$$p_n = S_n \times A_m$$

$$p_n = S_n \cdot G_r \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (3.55)$$

A_m เป็นขนาดของช่องเปิดประสิทธิภาพของสายอากาศภาครับมีค่าเท่ากับ $G_r \frac{\lambda^2}{4\pi}$ เมื่อ G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ ถ้าหากแทน f_a จากสมการ (3.51) ลงในสมการ (3.50) จะเขียนตัวเลขสัญญาณรบกวน ใหม่แสดงได้ดังสมการ (3.56)

$$F_a = P_n + 204 - 10 \log_{10} B \quad (3.56)$$

โดย P_n คือ ค่ากำลังของระดับสัญญาณรบกวนในหน่วย dB

การระบุตัวประกอบสัญญาณรบกวนนั้นจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยกำลังสัญญาณรบกวน ซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างส่วนมากหรือกลุ่มตัวอย่างที่อยู่ในบริเวณส่วนกลางของการแจกแจงค่ากำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนจะเป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างได้ดีก็ต่อเมื่อการแจกแจงกำลังสัญญาณรบกวนมีลักษณะสมมาตรหรือเป็นการแจกแจงปกติ แต่ในบางครั้งอาจเกิดกรณีที่ค่ากำลังสัญญาณรบกวนอยู่ในบริเวณหางของการแจกแจงหรือที่เรียกว่าค่าสุดขีด (มีค่ามากกว่ากำลังเฉลี่ย) ถ้าค่าระดับสัญญาณรบกวนสุดขีดนี้มีค่าเกินกว่ามาตรฐาน CISPR 16-1 [2] กำหนด จะทำให้การทดสอบบริเวณทางไฟฟ้าด้วยการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเกิดข้อผิดพลาด ได้ดังนั้นค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสุดขีดจึงมีนัยสำคัญต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง การระบุค่ากำลังของระดับสัญญาณรบกวนสุดขีดนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีค่าสุดขีดซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.27) หรือสมการ (3.34) ขึ้นอยู่กับวิธีการนิยามค่าสุดขีด เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสุดขีดแล้วก็นำค่ากำลังนี้ไปคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนแสดงได้ดังสมการ (3.57)

$$F_a^{GEV, GPD} = P_n^{GEV, GPD} + 204 - 10 \log_{10} B \quad (3.57)$$

โดย F_a^{GEV} คือ ตัวเลขสัญญาณรบกวนสุดขีดกรณี GEV

F_a^{GPD} คือ ตัวเลขสัญญาณรบกวนสุดขีดกรณี GPD

P_n^{GEV} คือ ค่ากำลังของระดับสัญญาณรบกวนสุดขีดกรณี GEV

P_n^{GPD} คือ ค่ากำลังของระดับสัญญาณรบกวนสุดขีดกรณี GPD

จากสมการ (3.57) สามารถคำนวณตัวเลขสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสูงสุดชดจากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนที่กำหนดในมาตรฐาน CISPR 16-1 [2] ว่าเป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่

จากที่กล่าวมาในบทที่ 2 และบทที่ 3 เป็นการพิจารณาผลกระทบจากปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนอันเนื่องมาจากระนาบดินมีขนาดจำกัดและค่าปัจจัยระดับสัญญาณรบกวนต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งตามลำดับ นอกจากนี้ผลกระทบจากค่าปัจจัยทั้งสองดังกล่าวแล้วยังมีผลกระทบจากสิ่งกีดขวางที่อยู่ในบริเวณสถานทดสอบซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในบทถัดไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

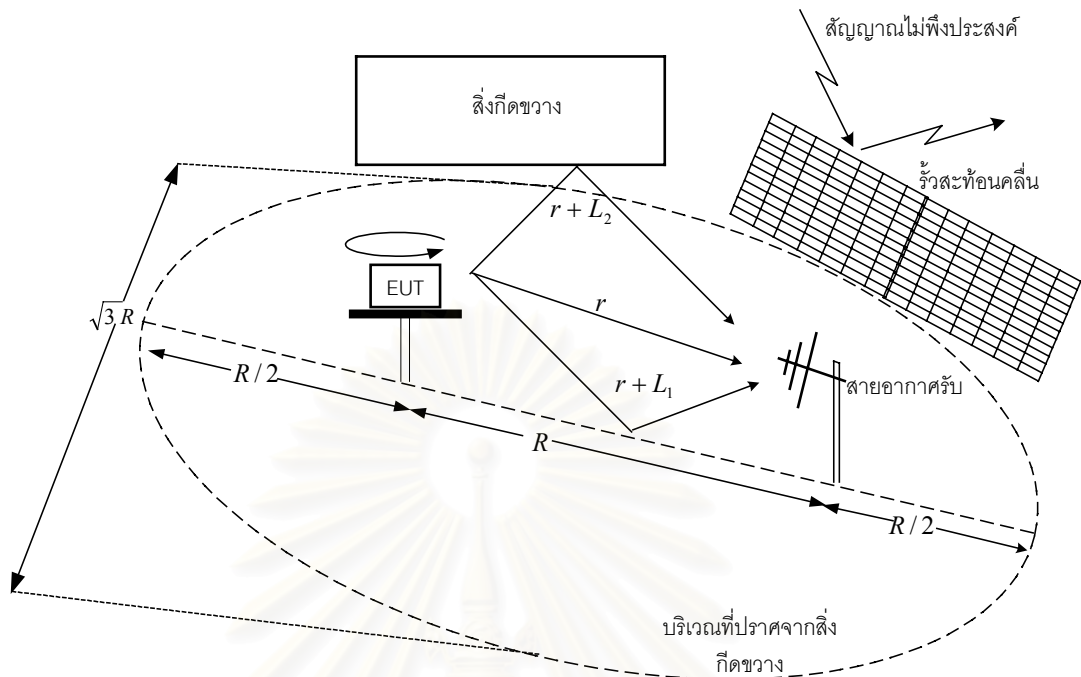
ผลกระทบของสิ่งกีดขวางต่อการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง

ความนำ

การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของบริภัณฑ์ทางไฟฟ้าในทางอุดมคตินั้นบริภัณฑ์ทางไฟฟ้าจะจัดวางอยู่บนระนาบดินที่เป็นตัวนำสมบูรณ์แบบที่มีขนาดใหญ่เป็นอนันต์และสถานทดสอบนั้นต้องเป็นพื้นที่ที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (obstruction free area) เมื่อพิจารณาค่าสมรรถนะของสถานทดสอบหรือค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (NSA) จะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงสองวิถีเท่านั้นคือ คลื่นวิถีตรงและคลื่นหลายวิถีที่สะท้อนมาจากระนาบดิน แต่ถ้าหากบริเวณที่ใช้เป็นสถานทดสอบนั้นมีสิ่งกีดขวางจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าวิถีไม่พึงประสงค์ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบ ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้างกล่าวสามารถลดได้โดยมี 2 วิธี วิธีแรกคือ ประสิทธิภาพโดยวิธีนี้ต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถวิเคราะห์ในอาณาจักรเวลาได้เพื่อกรองคลื่นที่มาจากหลายวิถีออกไป และวิธีที่สองคือ การใช้รั้วสะท้อน (diffraction fence) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเปลี่ยนทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิถี ทำให้คลื่นหลายวิถีนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบและผลการตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริภัณฑ์ทางไฟฟ้า รายละเอียดการพิจารณาจะกล่าวถึงในหัวข้อ 4.1 และหัวข้อ 4.2 ตามลำดับดังต่อไปนี้

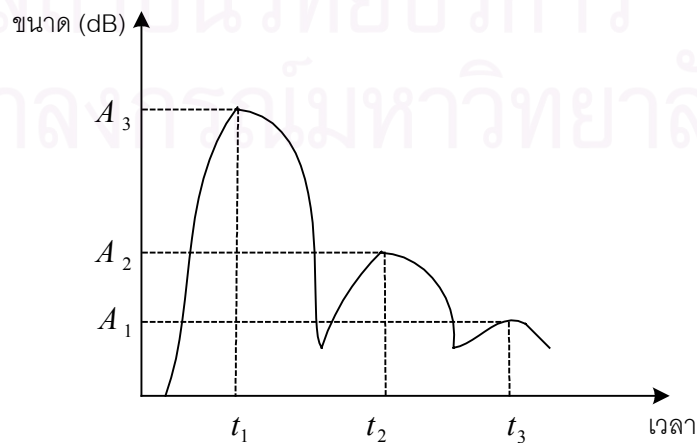
4.1 การลดผลกระทบคลื่นหลายวิถีด้วยกรรมวิธีการกรองทางเวลา

การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งตามที่มาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR16-1 [2] กำหนดนั้นต้องการสถานทดสอบที่มีบริเวณกว้างและปราศจากสิ่งกีดขวาง โดยพื้นที่ดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากตาราง 2.1 – ตาราง 2.4 ถ้าหากบริเวณที่ใช้เป็นสถานทดสอบมีสิ่งกีดขวางจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าวิถีไม่พึงประสงค์แสดงได้ดังรูป 4.1



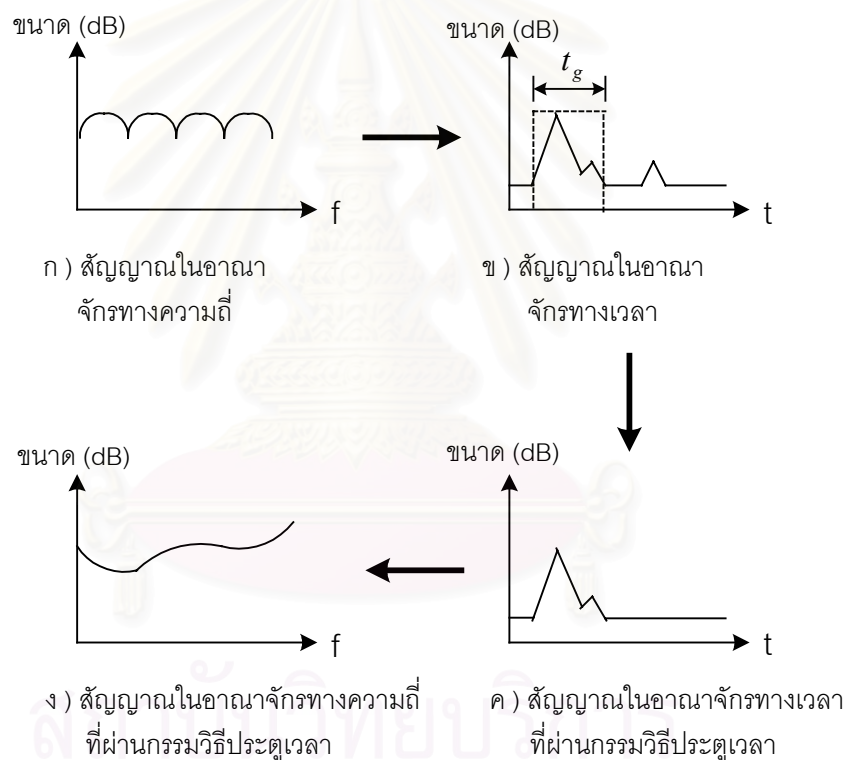
รูป 4.1 การวางตำแหน่งของบริเวณที่ทดสอบกับสายอากาศรับ, คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลายวิถี
ที่มายังสายอากาศภาครับ และตัวอย่างการวางตำแหน่งของตัวสะท้อนคลื่น

จากรูป 4.1 จะสังเกตเห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิถีที่เดินทางเป็นระยะทาง r และ $r + L_1$ นั้นเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต้องการในการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะมาถึงสายอากาศรับ ณ เวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ ส่วนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิถีที่เดินทางเป็นระยะทาง $r + L_2$ นั้นเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่พึงประสงค์โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะมาถึงสายอากาศรับ ณ เวลา t_3 แสดงได้ดังรูป 4.2



รูป 4.2 สัญญาณ ณ สายอากาศรับในอาณาจักรเวลา

ถ้าหากต้องการลดผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่พึงประสงค์นี้ด้วยกรรมวิธี ประชูดเวลา (time domain gating) สามารถกระทำได้โดยเริ่มจากแปลงสัญญาณในอาณาจักร ทางความถี่ (frequency domain) ให้เป็นสัญญาณในอาณาจักรทางเวลา (time domain) แล้ว จากนั้นใช้กรรมวิธีประชูดเวลาเพื่อกรองสัญญาณในช่วงเวลาที่ต้องการออกมาซึ่งในการจัดตั้งสถาน ทดสอบแบบบกลางแจ้งช่วงเวลาดังกล่าวก็คือ ช่วงเวลาที่คลื่นวิถีตรงและวิถีสะท้อนจากระนาบดิน มาถึงสายอากาศครับ เมื่อใช้กรรมวิธีประชูดแล้วก็จะได้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิถีที่ต้องการแต่สัญญาณ ดังกล่าวยังอยู่ในอาณาจักรเวลาจากนั้นแปลงสัญญาณให้กลับไปอยู่ในอาณาจักรทางความถี่จะ ได้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิถีที่ต้องการ สามารถแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์นี้ได้ดังรูป 4.3



รูป 4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์กรรมวิธีประชูดเวลา

จากรูป 4.3 ก) การแปลงสัญญาณในอาณาจักรทางความถี่ไปเป็นสัญญาณในอาณาจักร ทางเวลาได้โดยผ่านผลการแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) ของฟังก์ชัน $G(f)$ แสดง ดังสมการ 4.1 [31]

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df \quad (4.1)$$

โดย $g(t)$ คือ สัญญาณในอาณาจักรทางเวลา
 $G(f)$ คือ สัญญาณในอาณาจักรทางความถี่

เมื่อแปลงสัญญาณในอาณาจักรทางความถี่เป็นสัญญาณในอาณาจักรทางเวลาแล้วขั้นตอนต่อไปคือการใช้กรรมวิธีประตูเวลา [32] แสดงดังรูป 4.3 ข) ซึ่งกรรมวิธีประตูเวลานั้นทำหน้าที่เปรียบเสมือนวงจรกรองทางเวลาสามารถเขียนฟังก์ชันแสดงได้ดังสมการ (4.2)

$$h(t_g) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_1 \leq t_g \leq t_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.2)$$

โดย t_g คือ ความกว้างช่วงเวลาของประตูเวลา
 t_1 คือ เวลาที่สัญญาณวิถีตรงมาถึงสายอากาศรับ
 t_2 คือ เวลาที่สัญญาณวิถีสะท้อนระนาบดินมาถึงสายอากาศรับ

ถ้าหากแปลงสัญญาณทางเวลาที่ผ่านมากรรมวิธีการกรองทางเวลาแสดงดังรูป 4.3 ค) ให้อยู่ในอาณาจักรทางความถี่แสดงได้ดังรูป 4.3 ง) และสามารถเขียนแสดงฟังก์ชันการวิเคราะห์ที่ได้ดังสมการ (4.3)

$$G_{gate}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{gate}(t) \cdot h(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.3)$$

โดย $G_{gate}(f)$ คือ สัญญาณในอาณาจักรทางความถี่ที่ได้จากกรรมวิธีประตูเวลา
 $g_{gate}(t)$ คือ สัญญาณในอาณาจักรทางเวลาที่ได้จากกรรมวิธีประตูเวลา

การผลผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิถีไม่พึงประสงค์นอกจากจะใช้กรรมวิธีประตูเวลาแล้วยังสามารถใช้รั้วสะท้อนคลื่นได้ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.2 การลดผลกระทบคลื่นหลายวิถีด้วยรั้วสะท้อนคลื่น

การใช้รั้วสะท้อน (diffraction fence) [33] คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิถีทำให้คลื่นหลายวิถีนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการตรวจวัดคลื่นแม่เหล็ก

ไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริษัททางไฟฟ้าแสดงดังรูป 4.1 ถ้าหากบริเวณที่ใช้ในการจัดตั้งสถานทดสอบเพื่อการทดสอบแบบกลางแจ้งนั้นได้รับสัญญาณรบกวนที่เกิดจากมนุษย์สร้างขึ้น เช่น สัญญาณวิทยุโทรทัศน์, สัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น การใช้รื้อสะท้อนคลื่นก็อาจเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่เพียงประสงค์ได้แต่การใช้รื้อสะท้อนคลื่นนั้น อาจจะทำให้เกิดคลื่นไม่เพียงประสงค์ที่สะท้อนมาจากสิ่งกีดขวางในบริเวณทดสอบได้แต่อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบของรื้อสะท้อนคลื่นมายังสายอากาศรับได้ ซึ่งปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบนี้ก็จะกลายเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิธีไม่เพียงประสงค์โดยจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบ หรือถ้าหากส่งผลกระทบต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบก็ต้องอยู่ในขอบเขตตามที่มาตรฐาน CISPR 16-1 [2] กำหนด

รื้อสะท้อนคลื่นนั้นอาจสร้างมาจากวัสดุที่เป็นตัวนำสมบูรณ์และมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ แต่การสร้างรื้อสะท้อนคลื่นในลักษณะนี้จะต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง แนวทางหนึ่งที่สามารถลดค่าใช้จ่ายในการสร้างลงได้คือการสร้างรื้อสะท้อนคลื่นที่มีลักษณะเป็นกริดโดยระยะห่างระหว่างช่องกริดที่สามารถสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีคือ หนึ่งในสิบของค่าความยาวคลื่น [33]

จากที่กล่าวมาข้างต้นจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อทดสอบความสามารถปรากฏร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้านั้นไม่สามารถกระทำในภาวะอุดมคติได้เนื่องมาจากสาเหตุ 3 ประการ ประการแรก คือ ระดับของสัญญาณรบกวน ส่วนประการที่สอง คือ ขนาดของระนาบดินที่มีขนาดจำกัด และประการที่สาม คือ สิ่งกีดขวางที่อยู่ในสถานทดสอบ ดังที่กล่าวมาในบทที่ 2, บทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาศึกษาผลกระทบจากสาเหตุดังกล่าวไว้ในบทผลการวิเคราะห์ที่จะกล่าวต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์และแนวทางการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง

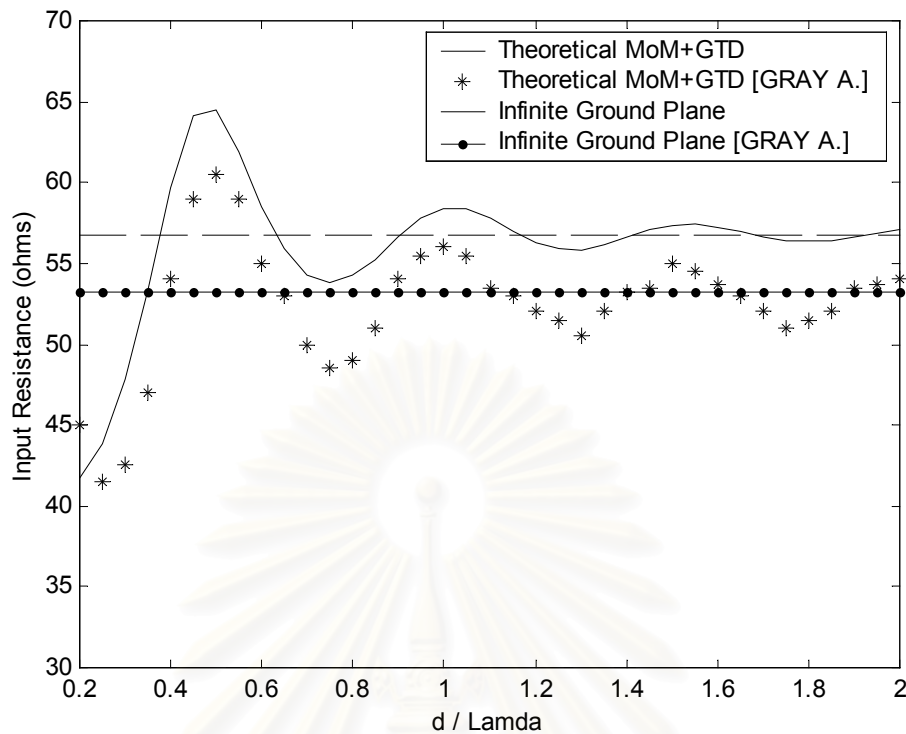
ความนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ปรากฏการณ์เลี้ยวที่ขอบและปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่มุมของระนาบดินขนาดจำกัดต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบหรือค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วที่ได้วิเคราะห์ในบทที่ 2 โดยวิเคราะห์กรณีขนาดระนาบดินของมาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และมาตรฐาน CISPR 16-1 [2] และในกรณีขนาดระนาบดินที่มีขนาดเล็กกว่าตามที่กำหนดในมาตรฐานทั้งสองดังกล่าว และกล่าวถึงแนวทางการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งโดยจะศึกษาผลกระทบจากระดับสัญญาณที่เป็นค่าสูงสุดที่เป็นค่าปัจจัยบ่งชี้ว่าความถี่ใดสามารถใช้ทดสอบโดยการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งแบบเบื้องต้นได้ และผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าวิธีไม่พึ่งประสงค์ซึ่งผลกระทบดังกล่าวสามารถลดได้โดยกรรมวิธีประจวบเวลา

หัวข้อแรกที่จะกล่าวถึงการตรวจสอบระเบียบวิธีที่ใช้วิเคราะห์ หัวข้อที่สองจะกล่าวถึงผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวที่ขอบและปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่มุมของระนาบดิน หัวข้อที่สามจะกล่าวถึงผลกระทบจากระดับสัญญาณรบกวน หัวข้อที่สี่จะกล่าวถึงการลดผลกระทบของสิ่งกีดขวางต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบด้วยกรรมวิธีประจวบเวลา และหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงแนวทางการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อทดสอบความสามารถปรากฏการณ์ร่วมกันได้เชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้นรายละเอียดในแต่ละเรื่องซึ่งแยกเป็นหัวข้อตามที่แสดงไว้ข้างต้นมีดังนี้

5.1 การตรวจสอบระเบียบวิธีที่ใช้วิเคราะห์

เพื่อให้เห็นว่าขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีผสมผสานนั้นมีความถูกต้องในเกณฑ์ที่เชื่อถือได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยของ Gary A. Thiele [11] ซึ่งได้วิเคราะห์สายอากาศโมโนโพล (monopole) บนระนาบดินขนาดจำกัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด d ต่อค่าความยาวคลื่นและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 0.0072 เท่าของค่าความยาวคลื่นโดยระเบียบวิธีผสมผสานที่ใช้วิเคราะห์คือวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต (Geometrical Theory of Diffraction, GTD) เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานด้านเข้า (input resistance) ของสายอากาศโมโนโพลแสดงผลการวิเคราะห์ได้ดังรูป 5.1



รูป 5.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าความต้านทานด้านเข้าของสายอากาศโมโนโพล
เมื่อวางอยู่บนระนาบดินขนาดต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานด้านเข้าของสายอากาศโมโนโพลที่วางอยู่บนระนาบดินขนาดต่างๆ ในงานวิจัยของ Gary A. Thiele [11] พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่จะมีความคลาดเคลื่อนยกกระดบเฉลี่ยประมาณ 5 โอห์ม

5.2 ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวที่ขอบและที่มุมของระนาบดินต่อค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว

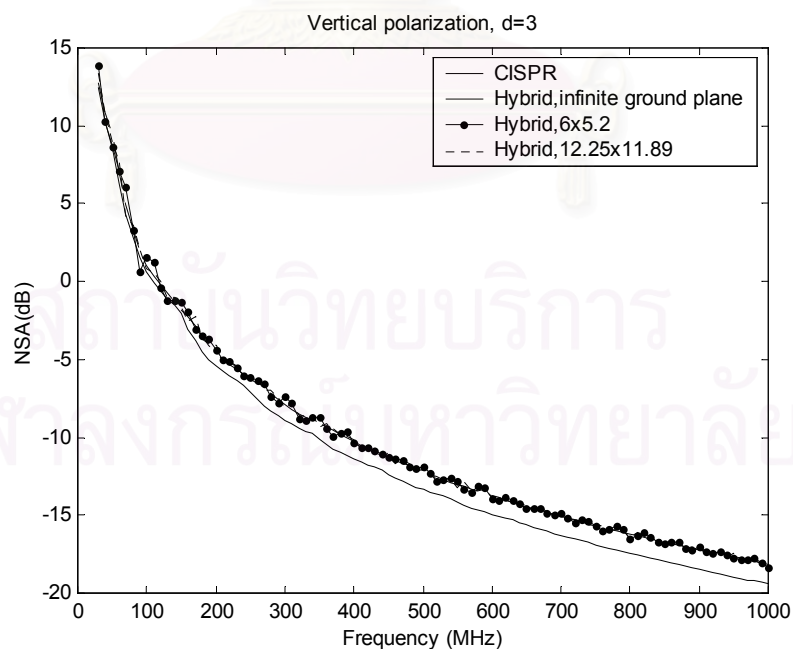
5.2.1 ผลการคำนวณ

เนื่องจากการทดสอบแบบการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งนี้มีการทดสอบที่ระยะต่างๆ แต่ระยะทดสอบนั้นมีขนาดระนาบดินขนาดต่างๆ ขึ้นอยู่กับระยะทดสอบนั้น การวิเคราะห์ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบและปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่มุมอันเนื่องมาจากระนาบดินขนาดจำกัดต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบนั้นจะแบ่งการวิเคราะห์เป็นสามกรณีตามระยะทดสอบคือ กรณีแรกระยะทดสอบ 3 เมตร กรณีที่สองระยะทดสอบ 10 เมตร และกรณีที่สามระยะทดสอบ 30 เมตร โดยทั้งสามกรณีจะวิเคราะห์ค่าสมรรถนะของสถานทดสอบทั้งกรณีที่ใช้โต๊ะ

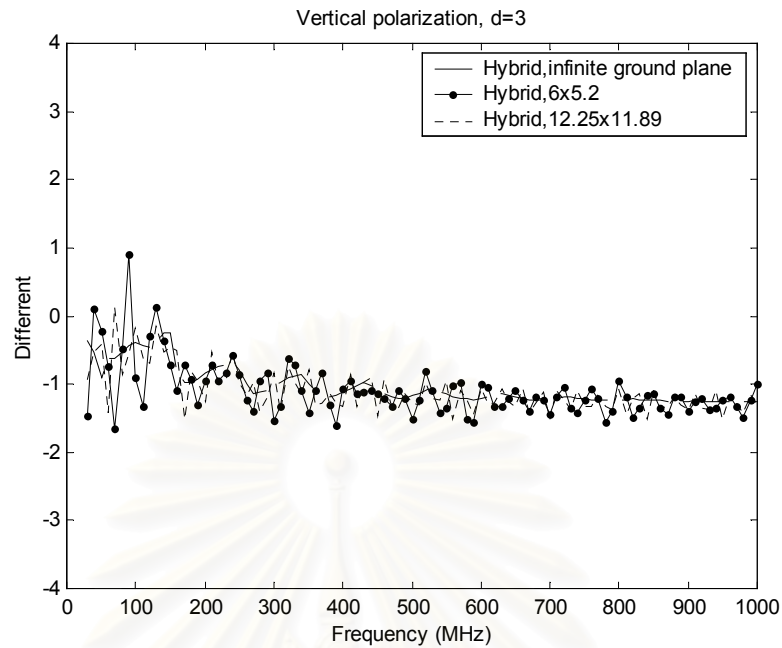
หมุ่นในการทดสอบและกรณีที่ไม่ใช้โต๊ะหมุ่นในการทดสอบ (บริษัทที่ทดสอบอยู่ประจำที่) เมื่อสายอากาศส่งกับสายอากาศรับวางตัวอยู่ในแนวโพลาริเซชันแนวตั้งและโพลาริเซชันแนวราบ ในการหาผลกระทบต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบเนื่องจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบและปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่มุมสามารถวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีผสมผสานแสดงดังหัวข้อ 2.3 โดยทำการเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีในมาตรฐาน CISPR 16-1 [2] แสดงดังหัวข้อ 2.1 ซึ่งผลการคำนวณค่าสมรรถนะของสถานทดสอบแสดงได้ตามลำดับดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ผลกระทบของระนาบดินขนาดจำกัดต่อค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว เมื่อระยะทดสอบ 3 เมตร

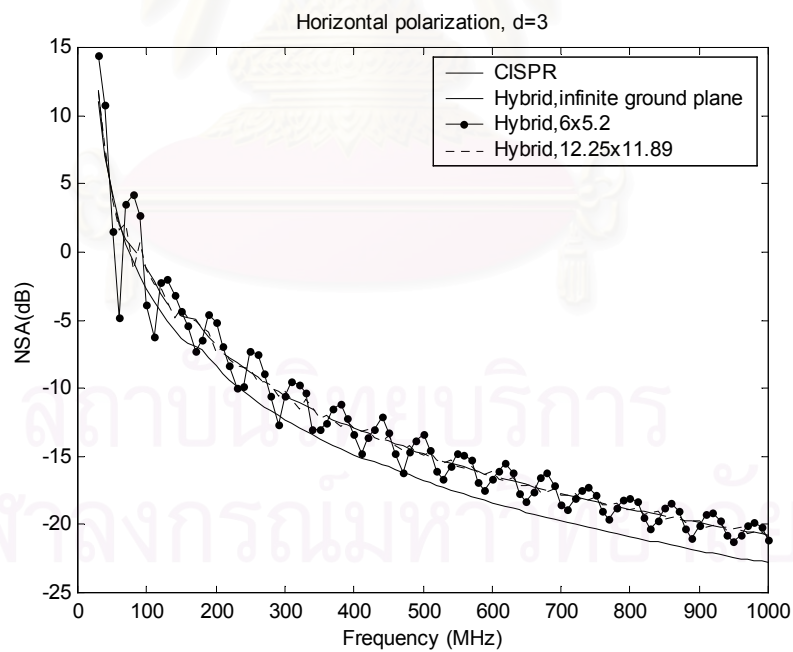
การพิจารณาค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วเมื่อสายอากาศวางอยู่ในแนวโพลาริเซชันแนวตั้งและใช้โต๊ะหมุ่นในการทดสอบ ตามมาตรฐาน CISPR 16-1 [2] จะกำหนดให้สายอากาศส่งสูง 2.75 เมตร และสายอากาศรับมีความสูงอยู่ในช่วง 1-4 เมตร แต่ถ้าหากสายอากาศวางอยู่ในแนวโพลาริเซชันแนวราบกำหนดให้สายอากาศส่งสูง 2.00 เมตร ส่วนความสูงสายอากาศรับจะเหมือนกับกรณีสายอากาศวางอยู่ในแนวโพลาริเซชันแนวตั้ง สามารถแสดงผลการคำนวณค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วได้ดังรูป 5.2 ถึง รูป 5.4 ตามลำดับ



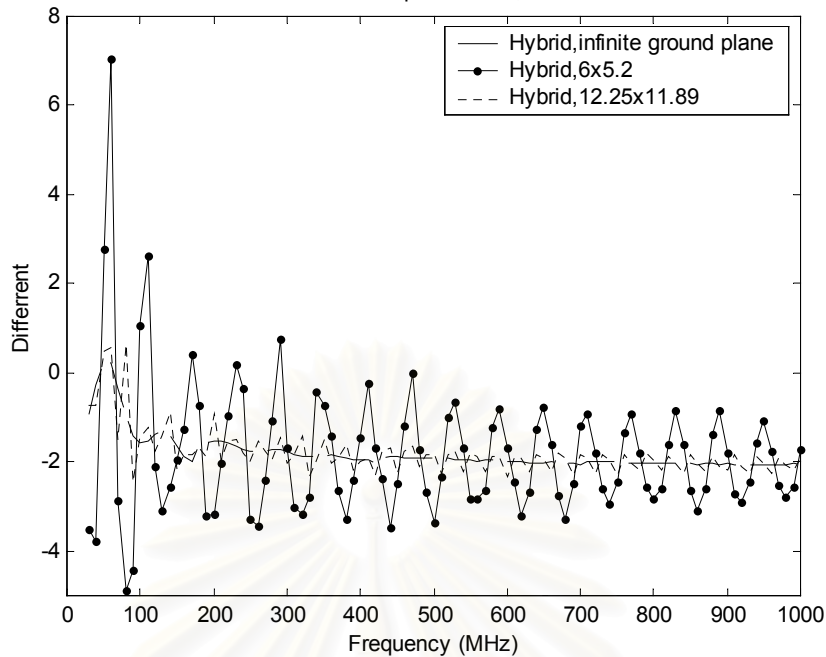
รูป 5.2 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดอนันต์และขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุ่นในการทดสอบ



รูป 5.3 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



รูป 5.4 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดอนันต์และขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ



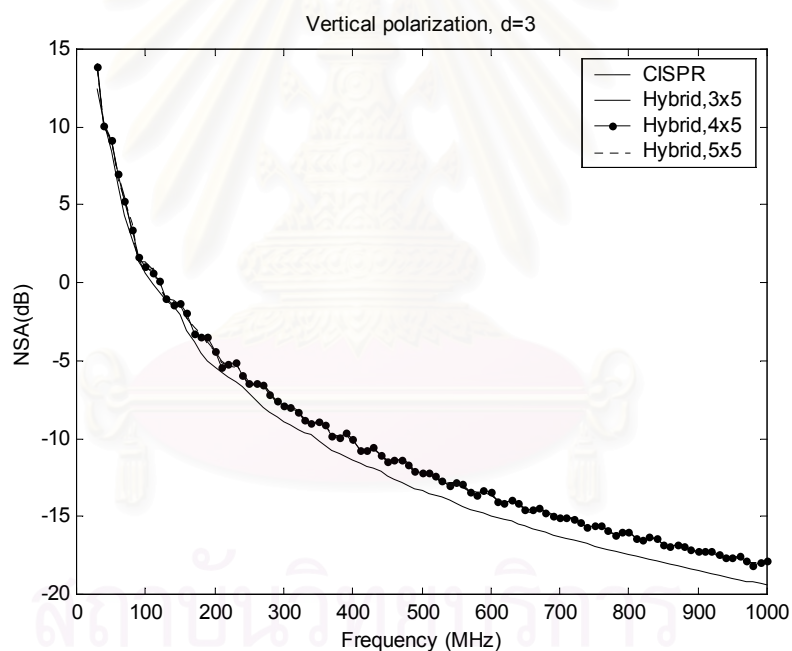
รูป 5.5 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ

จากรูป 5.2 และรูป 5.4 จะสังเกตเห็นว่ากรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวราบจะมีค่า NSA แกว่งตัวมากกว่ากรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวตั้งเมื่อระนาบดินขนาดเท่ากับ 6×5.2 ตารางเมตร (CISPR 16-1 [2]) และระนาบดินขนาดเท่ากับ 12.25×11.89 ตารางเมตร (ANSI [1]) ซึ่งมีสาเหตุมาจากสายอากาศส่งที่วางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวราบนั้นมีความสูงน้อยกว่ากรณีสายอากาศส่งที่วางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวตั้งดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงทำให้ค่า NSA กรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวราบจะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ชอบและจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่มุมมากกว่ากรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวตั้ง การแกว่งตัวของค่า NSA ในกรณีระนาบดินขนาดจำกัดที่ปรากฏดังรูป 5.2 และรูป 5.4 นั้นสามารถอธิบายได้ว่าเกิดมาจากวิฤภาคของคลื่นเลี้ยวเบนที่ชอบและคลื่นเลี้ยวเบนที่มุมในแต่ละความถี่เคลื่อนที่มายังสายอากาศรับนั้นมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากระยะทางเมื่อเทียบกับค่าความยาวคลื่นนั้นแตกต่างกันเมื่อความถี่แตกต่างกันจึงทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่น ณ สายอากาศรับมีทั้งแบบเสริมและแบบหักล้างกันดังนั้นจึงเป็นสาเหตุทำให้ค่า NSA ของระนาบดินขนาดจำกัดมีการแกว่งตัว

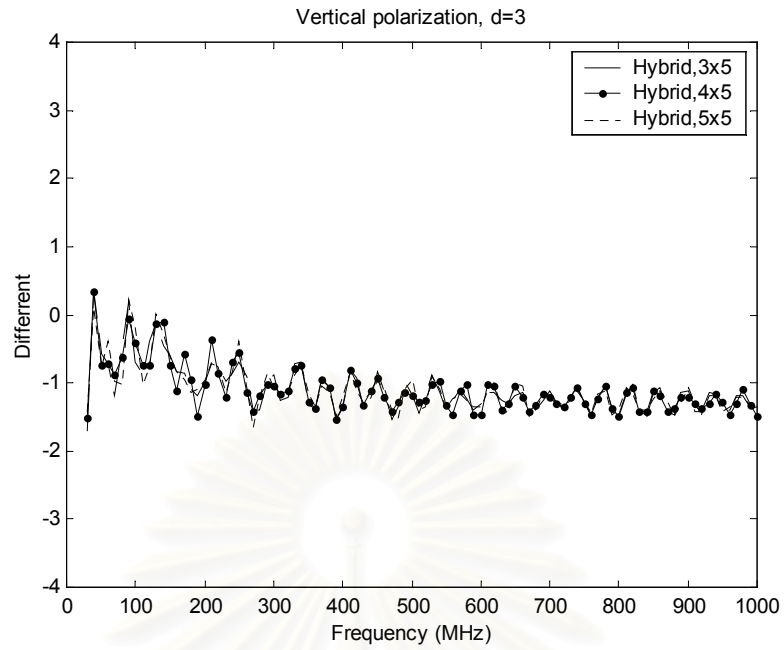
จากรูป 5.3 จะสังเกตเห็นว่ากรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวตั้งจะมีค่าผลต่างสูงสุดของค่า NSA ที่พิจารณาตามระเบียบวิธีมาตรฐาน CISPR 16-1 กับค่า NSA ที่พิจารณา

ด้วยระเบียบวิธีผสมผสาน เมื่อระนาบดินขนาด 6×5.2 ตารางเมตร และระนาบดินขนาด 12.25×11.89 ตารางเมตร มีค่าเท่ากับ 1.65 dB ณ ความถี่ 70 MHz, 1.52 dB ณ ความถี่ 170 MHz ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันจากรูป 5.5 จะสังเกตเห็นว่ากรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวราบจะมีค่าความแตกต่าง NSA เท่ากับ 7.06 dB ณ ความถี่ 60 MHz, 2.46 dB ณ ความถี่ 90 MHz เมื่อระนาบดินขนาด 6×5.2 ตารางเมตร และระนาบดินขนาด 12.25×11.89 ตารางเมตร ตามลำดับ

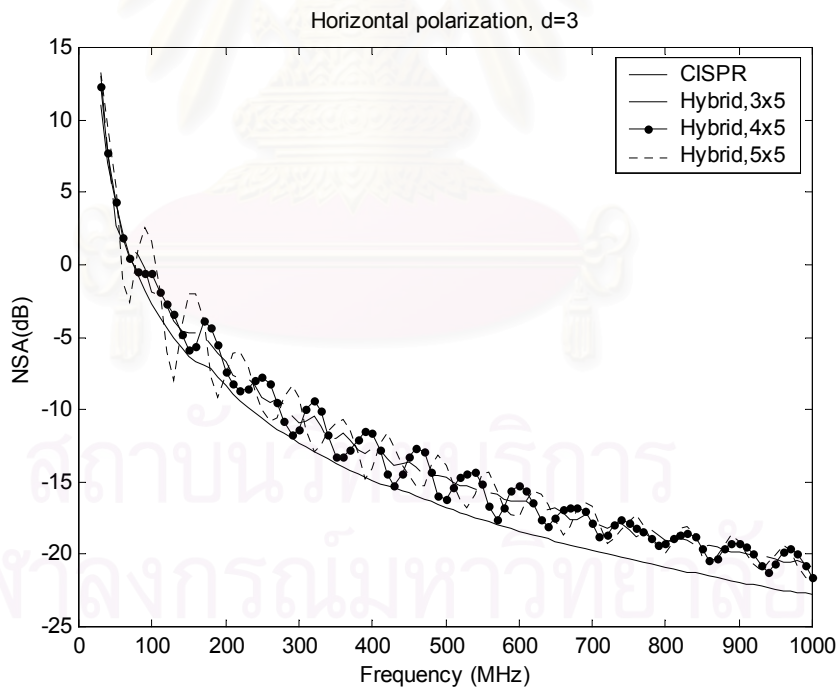
ถ้าหากลดขนาดระนาบดินให้มีขนาดเล็กกว่าตามที่มาตรฐาน CISPR 16-1 [2] กำหนด โดยขนาดระนาบดินตัวอย่างคือ 3×5 ตารางเมตร, 4×5 ตารางเมตร และ 5×5 ตารางเมตร ค่า NSA และผลต่างของค่า NSA เมื่อเทียบกับค่า NSA ของมาตรฐาน CISPR 16-1 แสดงได้ดังรูป 5.6 - รูป 5.9 ตามลำดับ



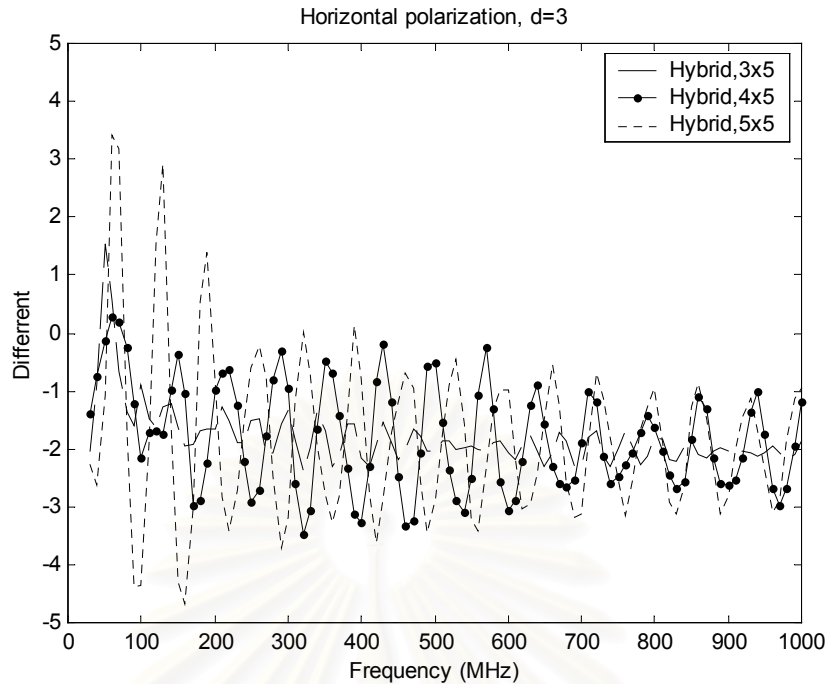
รูป 5.6 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



รูป 5.7 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



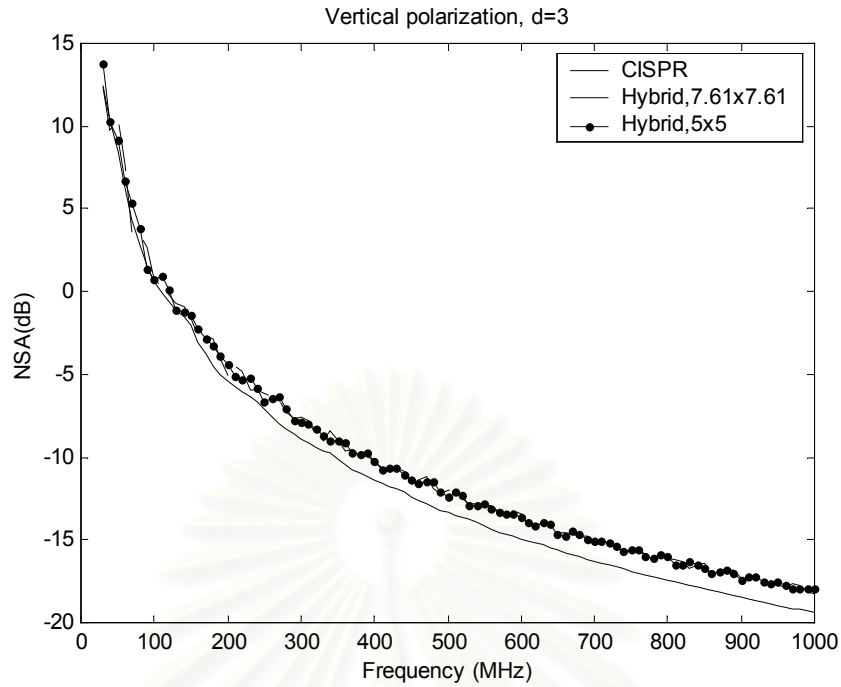
รูป 5.8 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



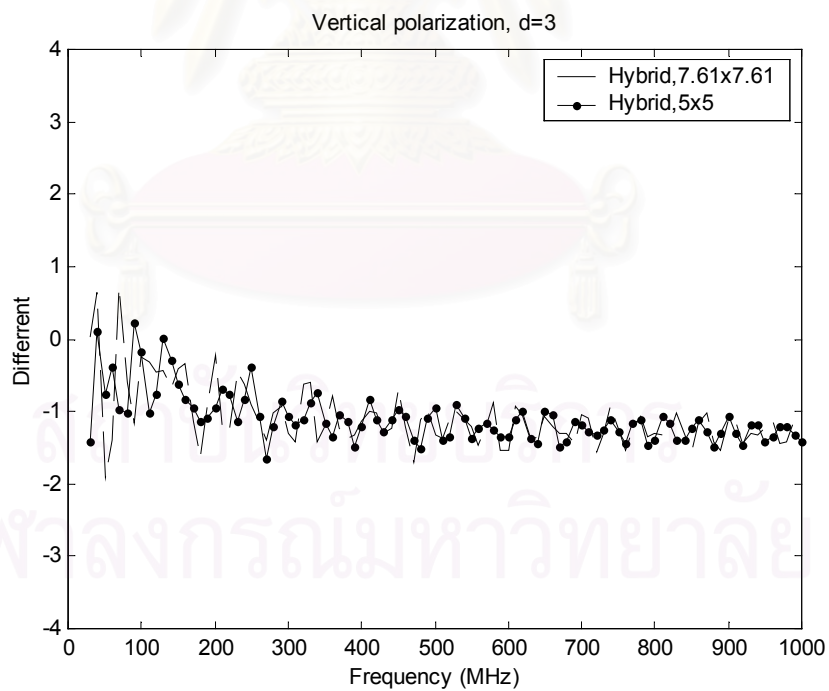
รูป 5.9 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผลสนามกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ

การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อทดสอบบริษัททางไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่จะไม่สะดวกที่จะจัดตั้งบริษัททางไฟฟ้านั้นบนโต๊ะหมุน ดังนั้นในการทดสอบจึงทำการเคลื่อนย้ายสายอากาศรับรอบบริษัททางไฟฟ้าทดสอบแทนการทดสอบแบบใช้โต๊ะหมุน เมื่อพิจารณาระนาบดิน จะได้ว่ามีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขนาดแสดงได้ดังตาราง 2.4 ค่าสมรรถนะของสถานทดสอบ แต่ละสถานที่ที่มีขนาดต่างกันโดยสายอากาศวางตัวในโพลาริเซชันแนวตั้งและโพลาริเซชันแนวราบเมื่อบริษัททดสอบอยู่ประจำที่ โดยความสูงสายอากาศส่งและสายอากาศรับจะเหมือนกับกรณีใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ แสดงได้ดังรูป 5.10 – รูป 5.13

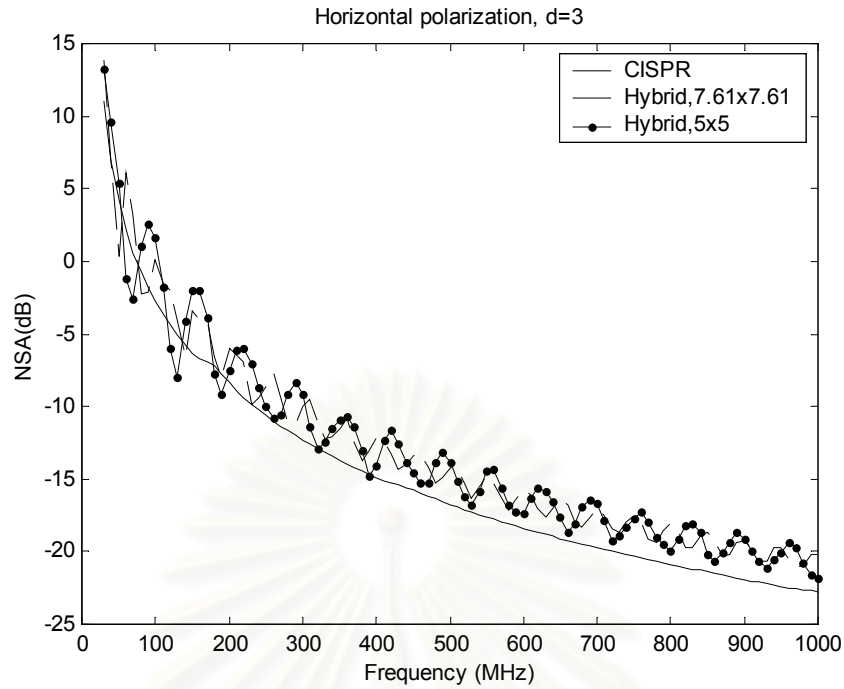
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



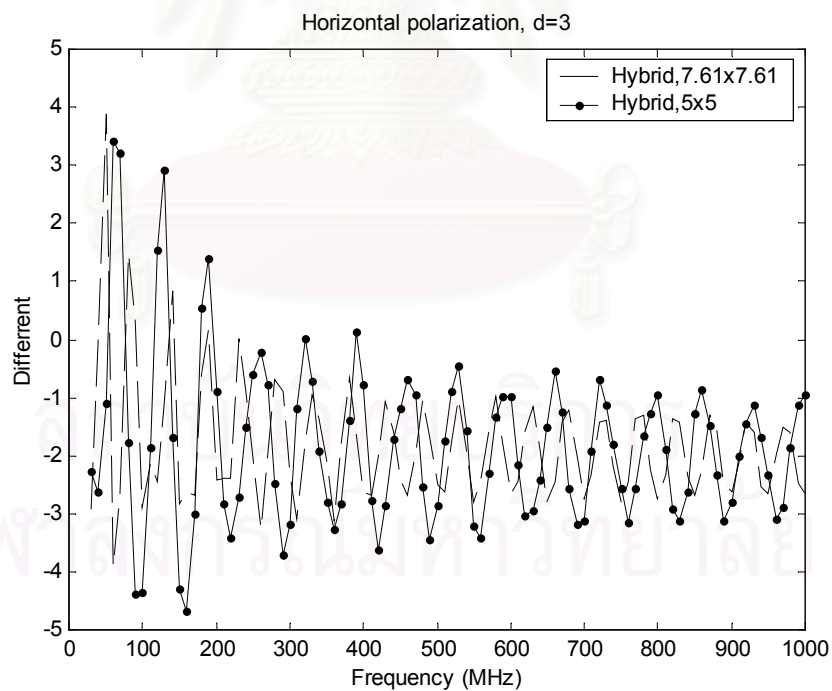
รูป 5.10 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่



รูป 5.11 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่



รูป 5.12 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ
ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อปริกณฑ์ทดสอบอยู่ประจำที่



รูป 5.13 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผลสนามกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ
ที่ระยะห่าง 3 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อปริกณฑ์ทดสอบอยู่ประจำที่

จากตาราง 5.1 จะสังเกตเห็นว่าระนาบดินขนาด 3×5 ตารางเมตรนั้นมีค่าผลต่างของค่า NSA เมื่อเทียบกับค่า NSA ของมาตรฐาน CISPR 16-1 นั้นมีความแตกต่างมากที่สุด เนื่องมาจาก ระนาบดินขนาดดังกล่าวนี้มีขนาดเล็กที่สุดทำให้ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ ขอบและปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่มุมมากที่สุด แต่ค่าความแตกต่างที่มีค่าสูงที่สุดนั้นยังอยู่ใน ขอบเขตตามที่มาตรฐาน CISPR 16-1 กำหนดกล่าวคือมีค่าไม่เกิน ± 4 dB โดยพื้นที่ระนาบดินนั้น คิดเป็นร้อยละ 48.08 % เมื่อเทียบกับพื้นที่ที่มาตรฐาน CISPR 16-1 กำหนด โดยสามารถคำนวณ ได้จากสมการ (5.1)

$$Area\% = \frac{A}{A_{CISPR}} \times 100 \quad (5.1)$$

โดย A คือ พื้นที่ระนาบดิน

A_{CISPR} คือ พื้นที่ระนาบดินที่กำหนดตามมาตรฐาน CISPR 16-1

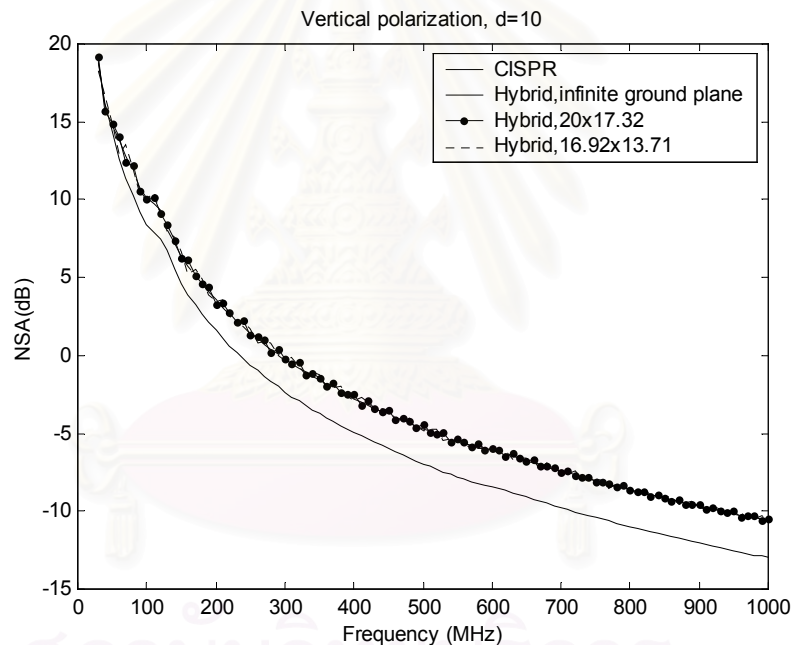
ตาราง 5.1 ค่าขนาดความแตกต่างสูงสุดของค่า NSA กรณี CISPR 16-1 กับกรณีระนาบดินขนาด ต่างๆ และพื้นที่(%) ณ ระยะทดสอบ 3 เมตร

ขนาดระนาบดิน (ตารางเมตร)	ขนาดความแตกต่างสูงสุด ของค่า NSA (dB)		ความแตกต่างสูงสุดของค่า NSA ณ ความถี่ (MHz)		พื้นที่ (%)
	โพลาริเซชัน แนวตั้ง	โพลาริเซชัน แนวราบ	โพลาริเซชัน แนวตั้ง	โพลาริเซชัน แนวราบ	
3×5	1.69	2.39	30	320	48.08
4×5	1.54	3.47	390	320	64.10
5×5	1.54	4.68	270	160	-
7.61×7.61 (ANSI)	1.91	3.93	50	60	-

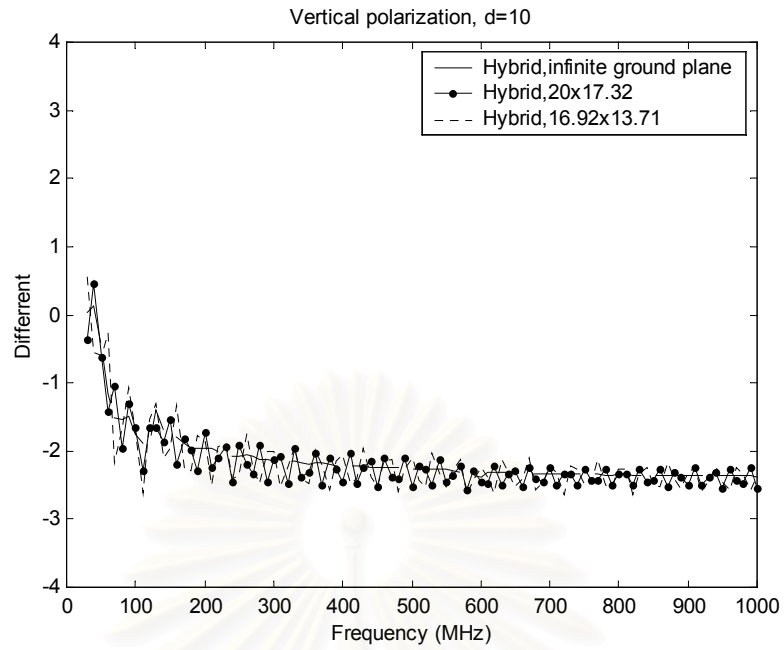
และจะสังเกตเห็นจากตาราง 5.1 ว่าถ้าหากจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งโดยบริษัททดสอบ อยู่ประจำที่จะใช้ระนาบดินขนาด 7.61×7.61 ตารางเมตร ตามที่มาตรฐาน ANSI [1] กำหนดนั้นมี ค่าสมรรถนะสถานทดสอบที่มีค่าแตกต่างสูงสุดไม่เกิน ± 4 dB ทั้งกรณีโพลาริเซชันแนวตั้งและ โพลาริเซชันแนวราบเมื่อเทียบกับกรณี CISPR 16-1 [2]

กรณีที่ 2 ผลกระทบของระนาบดินขนาดจำกัดต่อค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว เมื่อระยะทดสอบ 10 เมตร

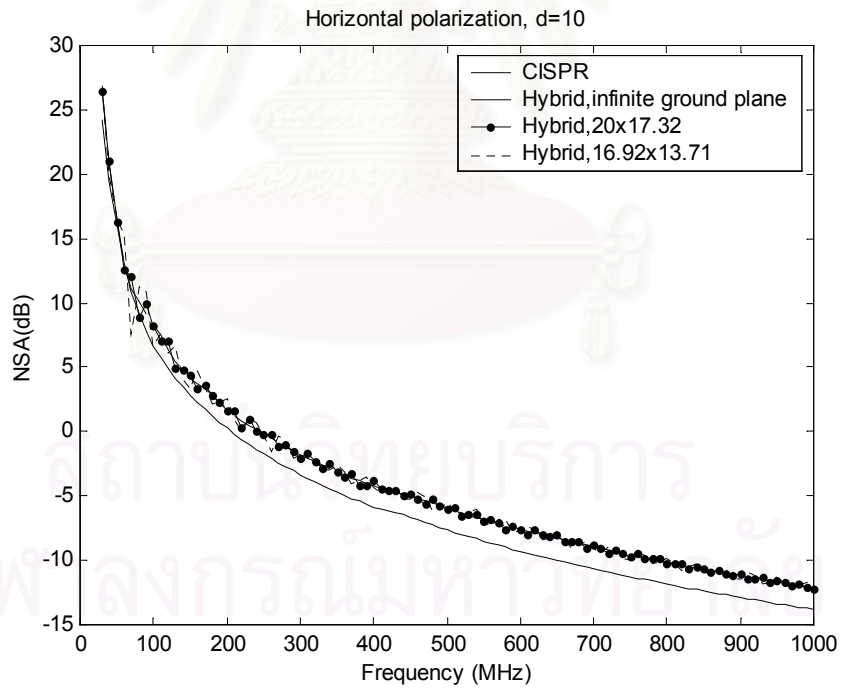
การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเมื่อระยะทดสอบ 10 เมตร ในกรณีสายอากาศวางในแนวโพลาริเซชันแนวตั้งกำหนดให้ความสูงของสายอากาศส่งเท่ากับ 2.75 เมตร และสายอากาศรับมีความสูงอยู่ในช่วง 1-4 เมตร ส่วนสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวราบจะกำหนดให้เท่ากับ 2.00 เมตร ซึ่งมีความสูงที่ต่ำกว่ากรณีสายอากาศวางตัวในแนวแนวโพลาริเซชันแนวตั้ง โดยความสูงของสายอากาศรับจะมีค่าเท่ากับในกรณีสายอากาศวางตัวอยู่ในแนวโพลาริเซชันแนวตั้งคือ ความสูงอยู่ในช่วง 1-4 เมตร ต่อไปสามารถแสดงผลการคำนวณค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้วหรือค่าสมรรถนะของสถานทดสอบได้ดังรูป 5.14 ถึง รูป 5.17 ตามลำดับ



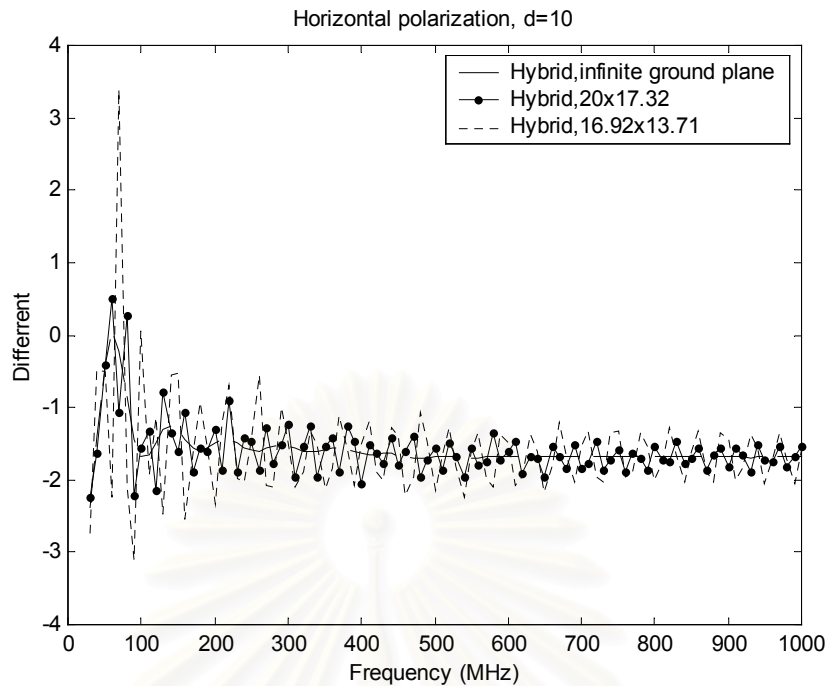
รูป 5.14 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดอนันต์และขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



รูป 5.15 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



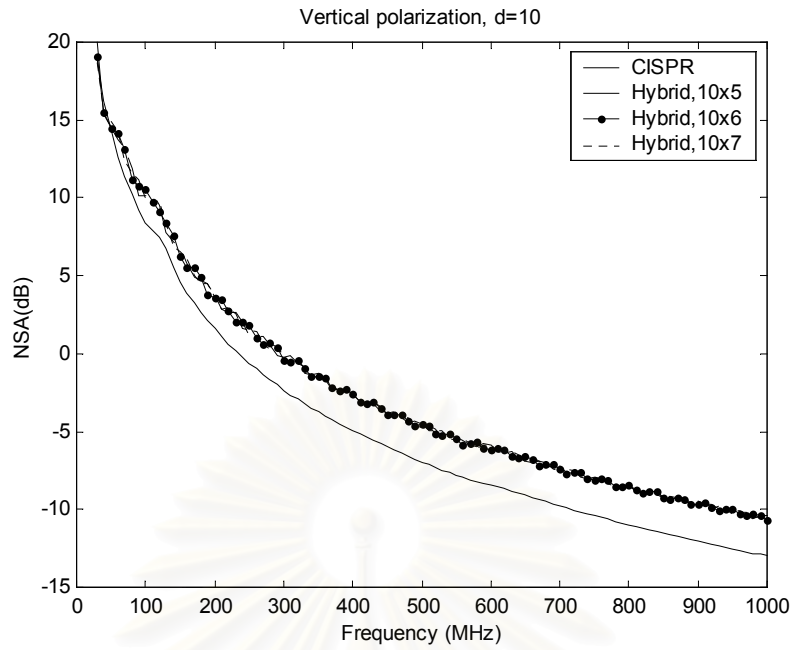
รูป 5.16 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดอนันต์และขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



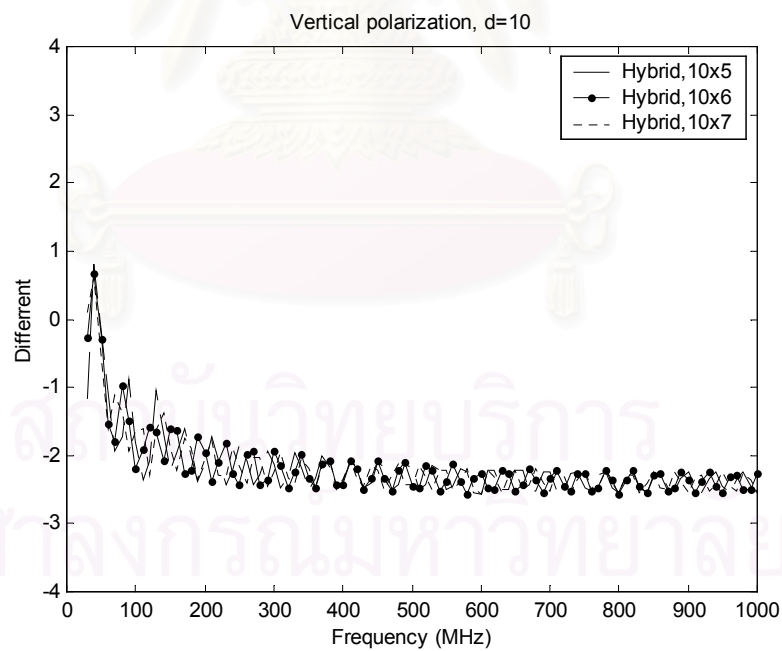
รูป 5.17 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ

จากรูป 5.14 – รูป 5.15 จะสังเกตเห็นว่าค่า NSA กรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวราบจะมีการแกว่งตัวมากกว่ากรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวตั้ง เช่น ระนาบดินขนาด 16.92×13.71 ตารางเมตร กรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวราบ จะการแกว่งตัวของค่า NSA อยู่ในช่วง 3.39 dB ถึง -3.12 dB ส่วนกรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวตั้งมีการแกว่งตัวของค่า NSA อยู่ในช่วง 0.23 dB ถึง -1.66 dB

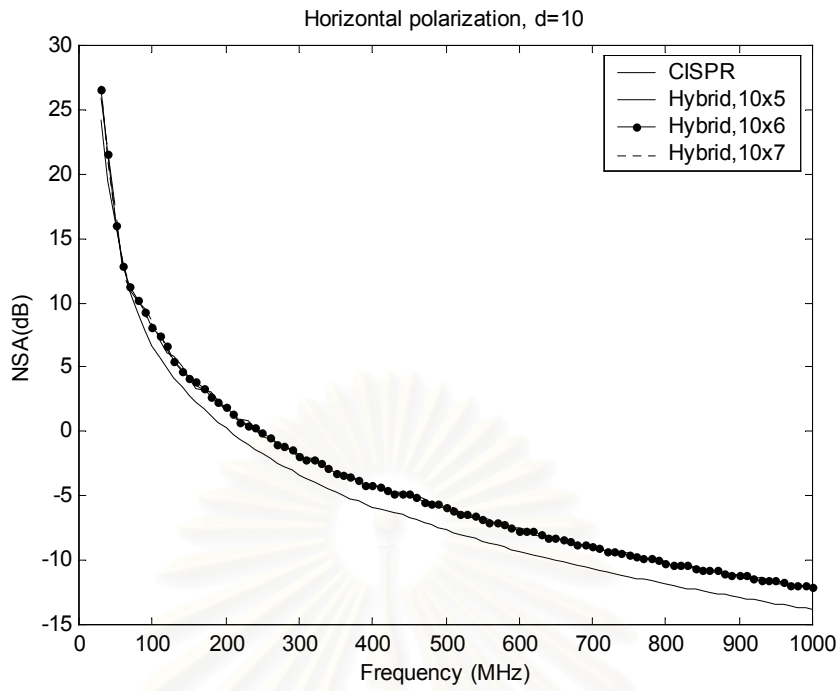
ถ้าหากลดขนาดระนาบดินให้มีขนาดเล็กกว่าตามที่มาตรฐาน CISPR 16-1 [2] กำหนด โดยขนาดระนาบดินตัวอย่างคือ 10×5 ตารางเมตร, 10×6 ตารางเมตร และ 10×7 ตารางเมตร กรณีใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ ค่า NSA และผลต่างของค่า NSA เมื่อเทียบกับค่า NSA ของมาตรฐาน CISPR 16-1 แสดงได้ดังรูป 5.18 - รูป 5.21 ตามลำดับ



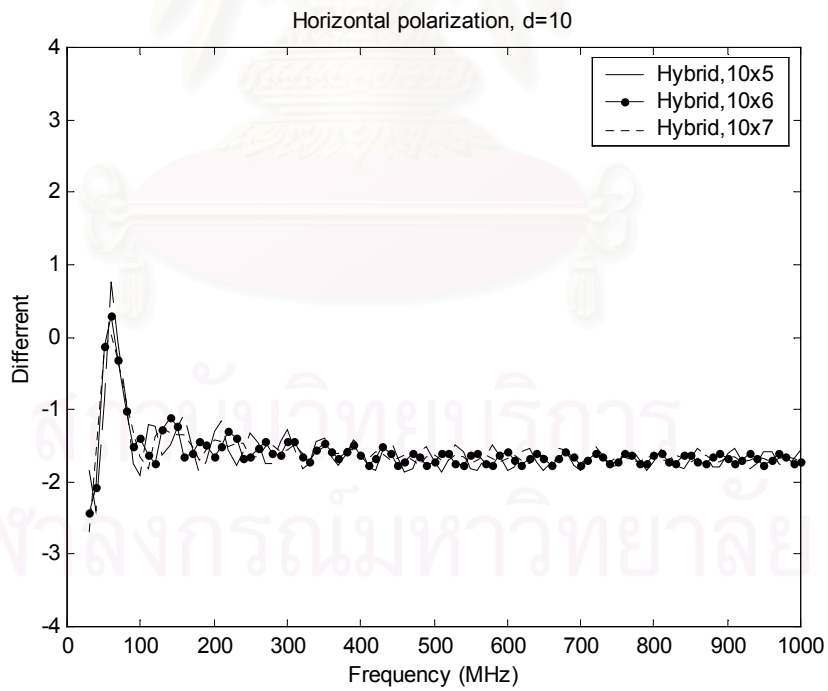
รูป 5.18 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



รูป 5.19 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



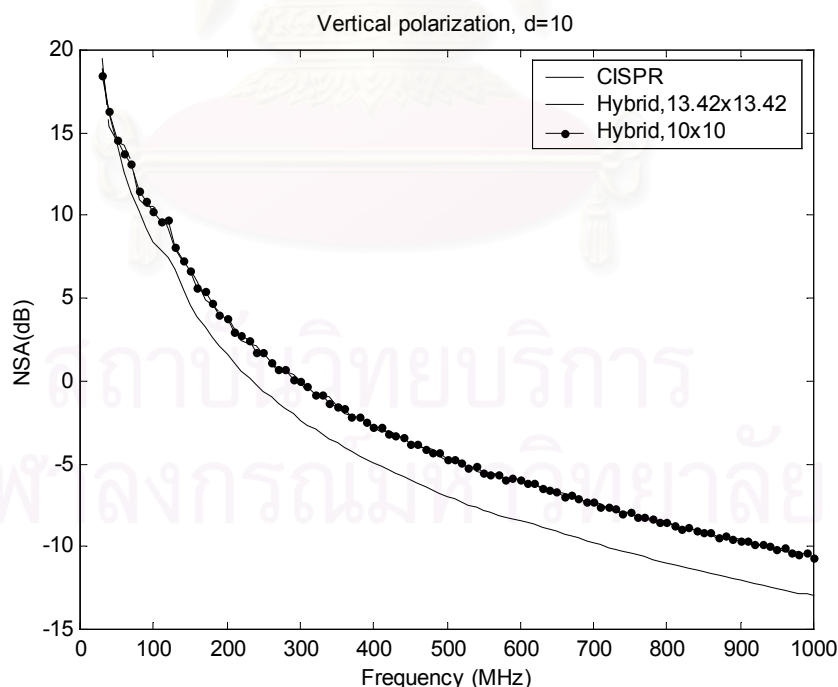
รูป 5.20 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



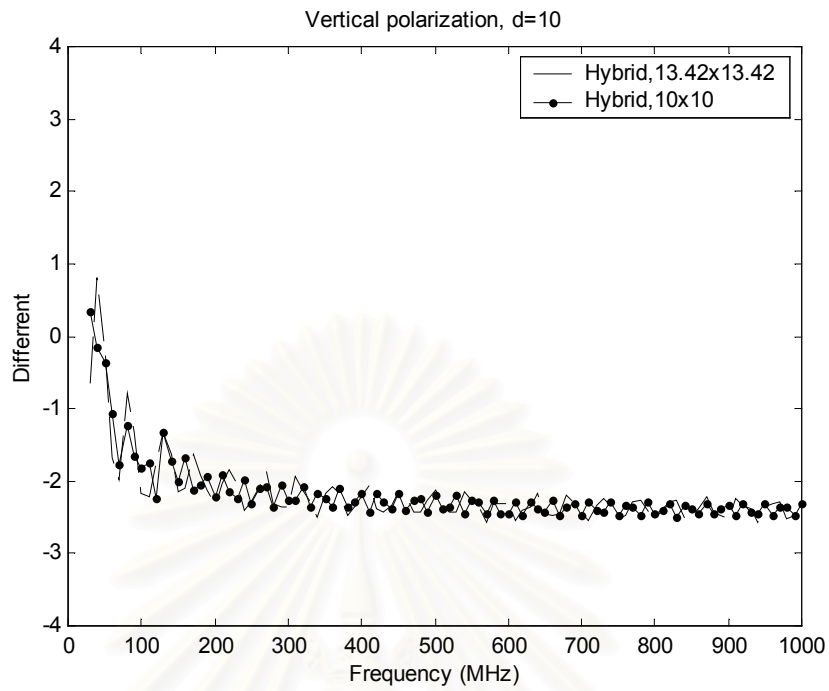
รูป 5.21 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ

จากรูป 5.18 – รูป 5.19 จะสังเกตเห็นว่ากรณีระนาบดินขนาด 10×5 ตารางเมตร, 10×6 ตารางเมตรและ 10×7 ตารางเมตร กรณีใช้โตะหมุ่นในการทดสอบเมื่อสายอากาศวางตัวในโพลาไรเซชันแนวตั้งมีการแกว่งตัวอยู่ในช่วง 0.80 dB ถึง -2.57 dB, 0.67 dB ถึง -2.58 dB และ 0.63 dB ถึง -2.57 dB ตามลำดับ ส่วนรูป 5.20 – รูป 5.21 เป็นกรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาไรเซชันแนวราบ โดยมีการแกว่งตัวของค่า NSA กรณีระนาบดินขนาด 10×5 ตารางเมตร, 10×6 ตารางเมตรและ 10×7 ตารางเมตร อยู่ในช่วง 0.76 dB ถึง -2.41 dB, 0.30 dB ถึง -2.44 dB และ 0.3 dB ถึง -2.69 dB ตามลำดับ

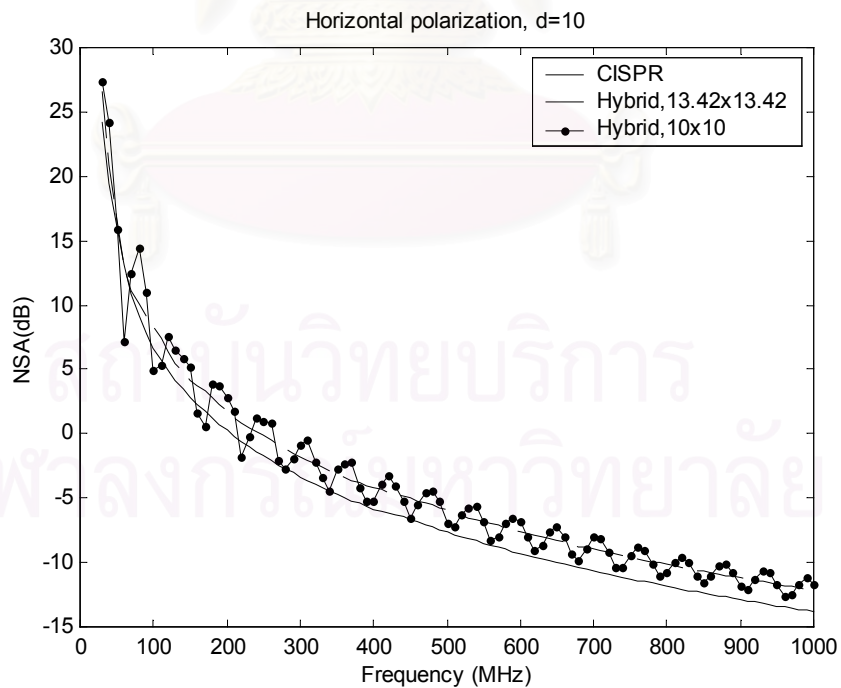
การจั๊กตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง ณ ระยะทดสอบ 10 เมตร เมื่อไม่ใช้โตะหมุ่นในการทดสอบหรือกล่าวอีกนัยคือบริภัณฑ์ทดสอบอยู่ประจำที่ โดยขนาดระนาบที่ใช้ในการจัดตั้งสถานทดสอบที่ระยะทดสอบนี้คือ 13.42×13.42 ตารางเมตร ซึ่งขนาดระนาบดินนี้เป็นไปตามที่มาตรฐาน ANSI [1] กำหนด และระนาบดินขนาด 10×10 ตารางเมตร ซึ่งเป็นระนาบดินขนาดเล็กกว่าตามมาตรฐาน ANSI กำหนด ค่า NSA และผลต่างของค่า NSA เมื่อเทียบกับค่า NSA ของมาตรฐาน CISPR 16-1 ทั้งกรณีสายอากาศวางตัวในโพลาไรเซชันแนวตั้งและโพลาไรเซชันแนวราบ แสดงได้ดังรูป 5.22 - รูป 5.25 ตามลำดับ



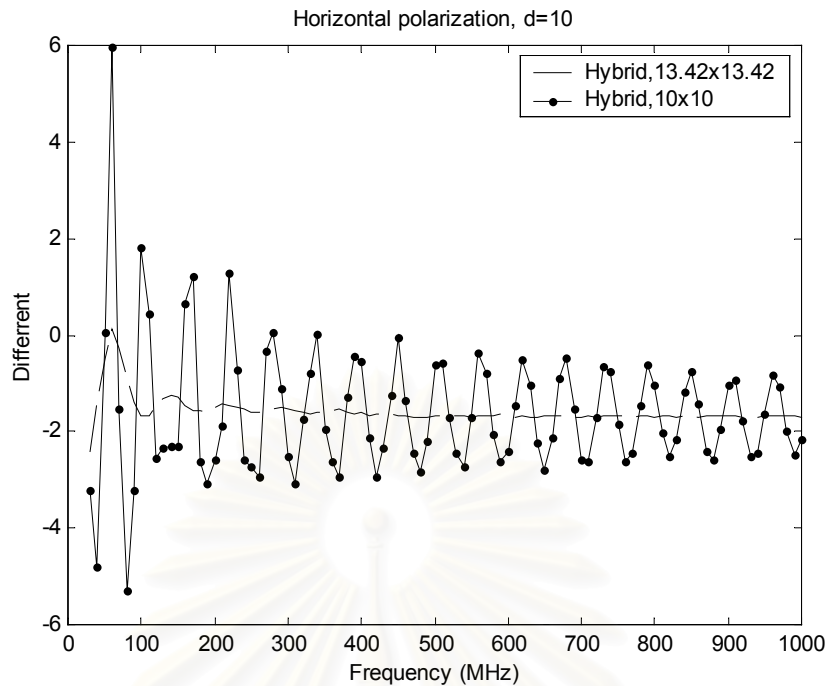
รูป 5.22 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพลาไรเซชันแนวตั้ง, เมื่อบริภัณฑ์ทดสอบอยู่ประจำที่



รูป 5.23 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพล่าไรเซชันแนวตั้ง, เมื่อบริภัณฑ์ทดสอบอยู่ประจำที่



รูป 5.24 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพล่าไรเซชันแนวราบ เมื่อบริภัณฑ์ทดสอบอยู่ประจำที่



รูป 5.25 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 10 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่

ตาราง 5.2 ค่าขนาดความแตกต่างสูงสุดของค่า NSA กรณี CISPR 16-1 กับกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ และพื้นที่(%) ณ ระยะทดสอบ 10 เมตร

ขนาดระนาบดิน (ตารางเมตร)	ขนาดความแตกต่างสูงสุด ของค่า NSA (dB)		ความแตกต่างสูงสุดของค่า NSA ณ ความถี่ (MHz)		พื้นที่ (%)
	โพลาริเซชัน แนวตั้ง	โพลาริเซชัน แนวราบ	โพลาริเซชัน แนวตั้ง	โพลาริเซชัน แนวราบ	
	10×5	2.57	2.41	600	
10×6	2.58	2.44	580	30	17.32
10×7	2.57	2.69	600	30	20.20
10×10	2.49	5.97	830	60	-
13.42×13.42 (ANSI)	2.57	2.40	940	30	45.02

จากตาราง 5.2 จะสังเกตเห็นว่าระนาบดินขนาด 10×5 ตารางเมตร เป็นระนาบดินขนาดเล็กที่สุดที่มีค่าผลต่างของค่า NSA เมื่อเทียบกับค่า NSA ของมาตรฐาน CISPR 16-1 [2] นั้นมีความแตกต่างเท่ากับ 2.57 dB ในกรณีสายอากาศวางตัวในโพลาริเซชันแนวตั้ง และมีค่าเท่ากับ

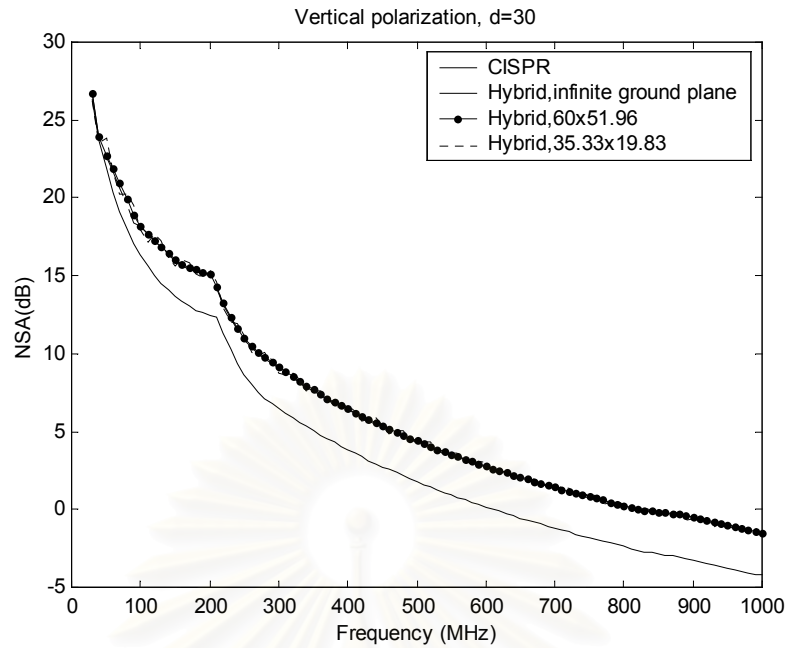
2.41 dB ในกรณีสายอากาศวางตัวในโพลาไรเซชันแนวราบ ซึ่งค่าความแตกต่างทั้งสองดังกล่าวยังอยู่ในขอบเขตตามที่มาตรฐาน CISPR 16-1 กำหนดกล่าวคือมีค่าไม่เกิน ± 4 dB โดยอาศัยสมการ (5.1) จะได้ว่าพื้นที่ระนาบดินนั้นคิดเป็นร้อยละ 14.43 %

จะสังเกตเห็นจากตาราง 5.2 ได้อีกว่าถ้าหากจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งโดยบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่โดยใช้ระนาบดินขนาด 10×10 ตารางเมตร ซึ่งขนาดระนาบดินนี้จะมีขนาดเล็กกว่าตามที่มาตรฐาน ANSI [1] และมาตรฐาน CISPR 16-1 [2] กำหนด ค่าสมรรถนะสถานทดสอบที่มีค่าแตกต่างสูงสุดคือ 5.97 dB ณ ความถี่ 60 MHz ในกรณีโพลาไรเซชันแนวราบซึ่งมีค่าเกิน ± 4 dB เมื่อเทียบกับกรณี CISPR 16-1 [2] ทำให้ระนาบดินขนาดดังกล่าวไม่สามารถใช้ในการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งได้

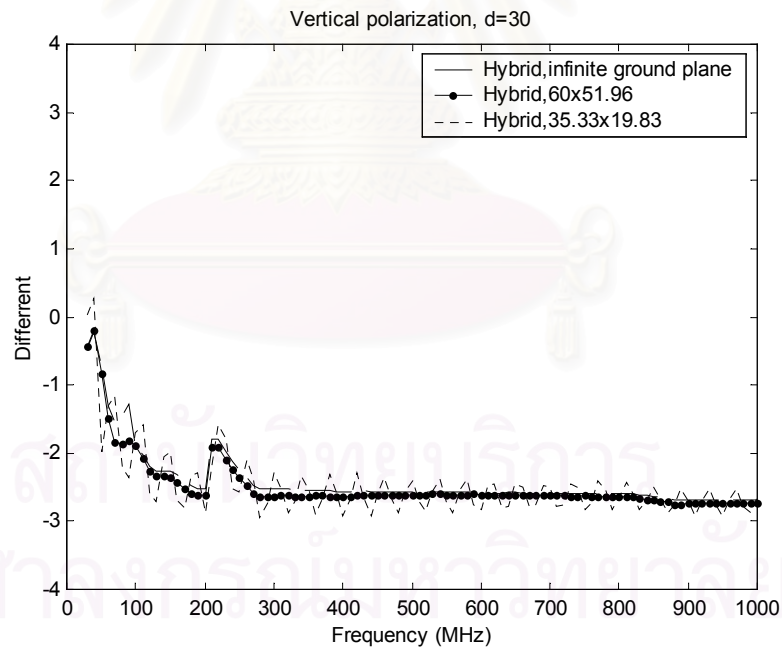
กรณีที่ 3 ผลกระทบของระนาบดินขนาดจำกัดต่อค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว
เมื่อระยะทดสอบ 30 เมตร

การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเมื่อระยะทดสอบเท่ากับ 30 เมตร ในกรณีสายอากาศวางในแนวโพลาไรเซชันแนวตั้งกำหนดให้ความสูงของสายอากาศส่งเท่ากับ 2.75 เมตร และสายอากาศรับมีความสูงอยู่ในช่วง 2 - 6 เมตร ส่วนสายอากาศวางตัวในแนวโพลาไรเซชันแนวราบจะกำหนดให้เท่ากับ 2.00 เมตร ความสูงของสายอากาศรับจะมีค่าเท่ากับในกรณีสายอากาศวางตัวอยู่ในแนวโพลาไรเซชันแนวตั้งคือ ความสูงอยู่ในช่วง 2 - 6 เมตร ซึ่งความสูงของสายอากาศภาครับ ณ ระยะทดสอบ 30 เมตร ซึ่งช่วงความสูงนี้จะสูงกว่าช่วงความสูงเมื่อระยะทดสอบเท่ากับ 3 เมตร และระยะทดสอบเท่ากับ 10 เมตร ต่อไปสามารถแสดงผลการคำนวณค่าลดทอนสถานทดสอบที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (NSA) หรือค่าสมรรถนะของสถานทดสอบได้ดังรูป 5.26 ถึงรูป 5.29 ตามลำดับ

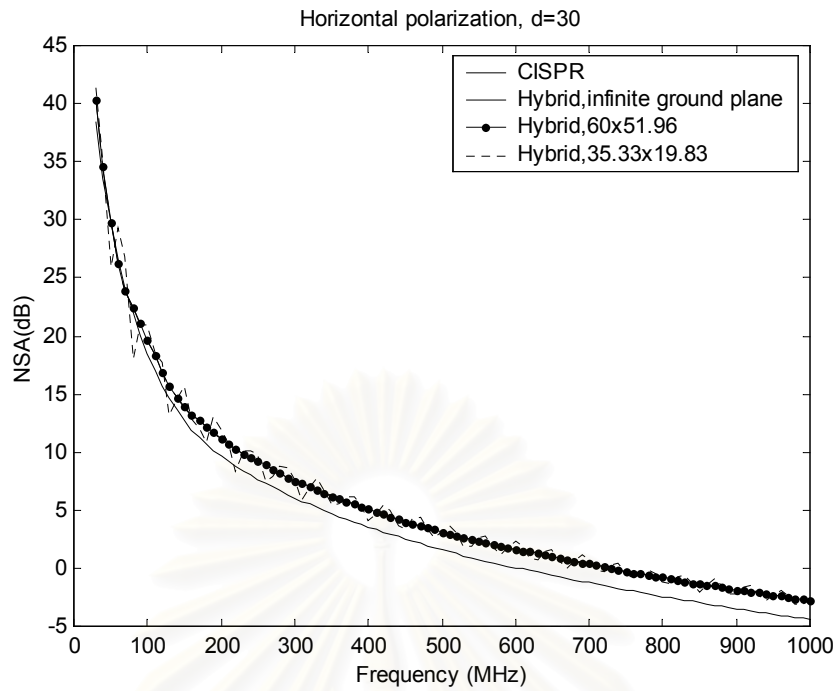
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



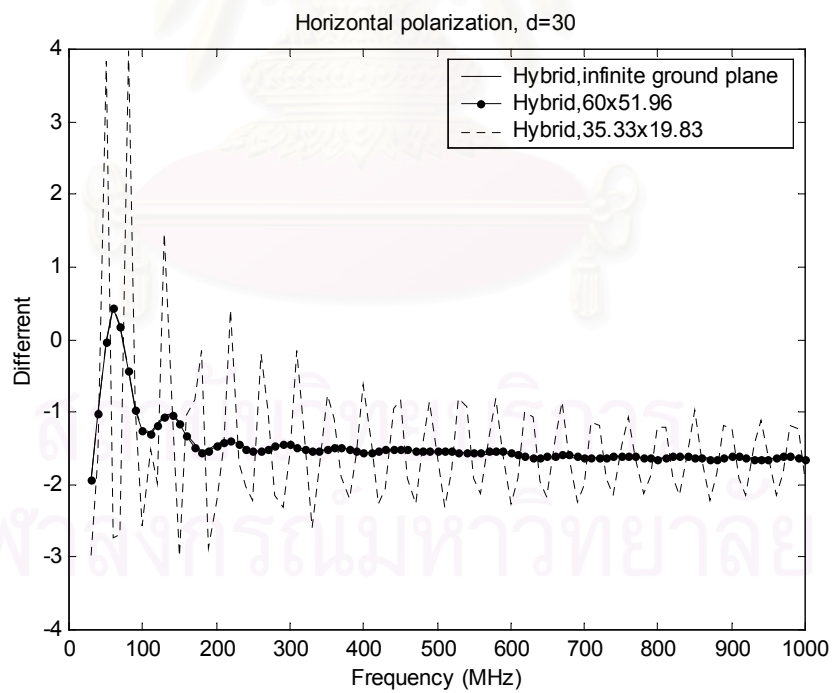
รูป 5.26 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดอนันต์และขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



รูป 5.27 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



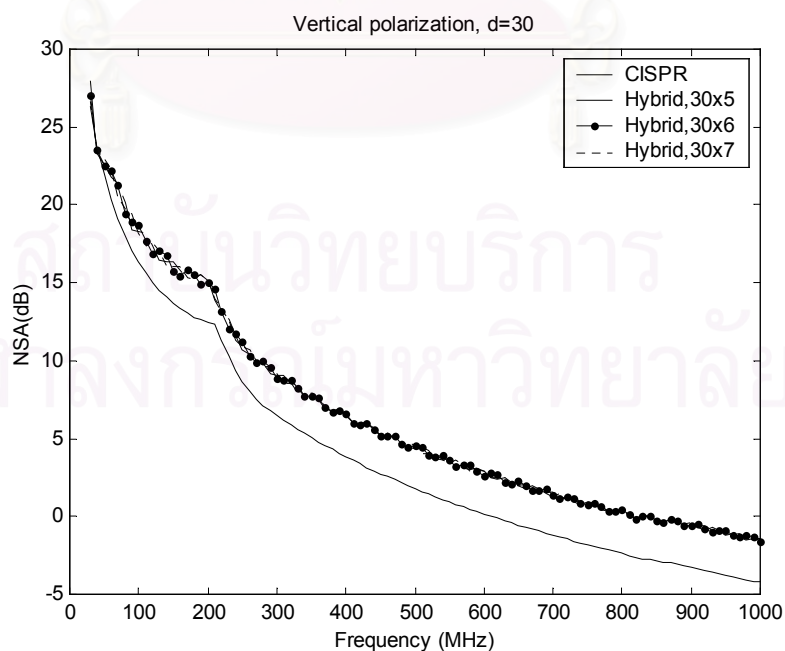
รูป 5.28 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดอนันต์และขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



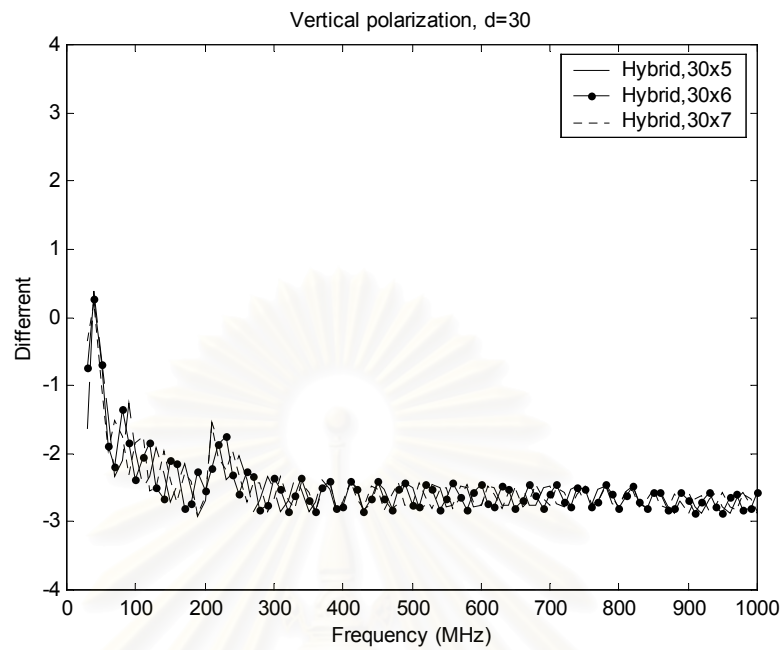
รูป 5.29 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ

จากรูป 5.26 – รูป 5.29 จะสังเกตเห็นว่าค่า NSA กรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวราบจะมีช่วงการแกว่งตัวมากกว่ากรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวตั้ง เช่น ระนาบดินขนาด 35.33×19.83 ตารางเมตร ซึ่งเป็นขนาดระนาบดินที่กำหนดโดยมาตรฐาน ANSI [1] ในกรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวราบจะการแกว่งตัวของค่า NSA อยู่ในช่วง 3.98 dB ถึง -3.00 dB ส่วนกรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวตั้งมีการแกว่งตัวของค่า NSA อยู่ในช่วง 0.28 dB ถึง -2.93 dB ถ้าหากสังเกตกรณีระนาบดินขนาด 60×51.96 ตารางเมตร ซึ่งเป็นขนาดระนาบดินที่กำหนดโดยมาตรฐาน CISPR 16-1 [2] จะเห็นว่าค่า NSA นั้นไม่มีการแกว่งตัวหรือมีค่าที่ใกล้เคียงกับกรณีระนาบดินขนาดอนันต์เมื่อพิจารณาด้วยระเบียบวิธีผสมผสานทั้งกรณีสายอากาศวางตัวในโพลาริเซชันแนวตั้งและโพลาริเซชันแนวราบ เนื่องจากระนาบดินขนาด 60×51.96 ตารางเมตร เป็นระนาบดินขนาดใหญ่ทำให้ค่า NSA ได้รับผลกระทบไม่มากนักจากปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่ขอบและปรากฏการณ์คลื่นเลี้ยวเบนที่มุม หรือสามารถเปรียบเทียบได้ว่าระนาบดินขนาด 60×51.96 ตารางเมตร ดังกล่าวเสมือนกับระนาบดินขนาดอนันต์

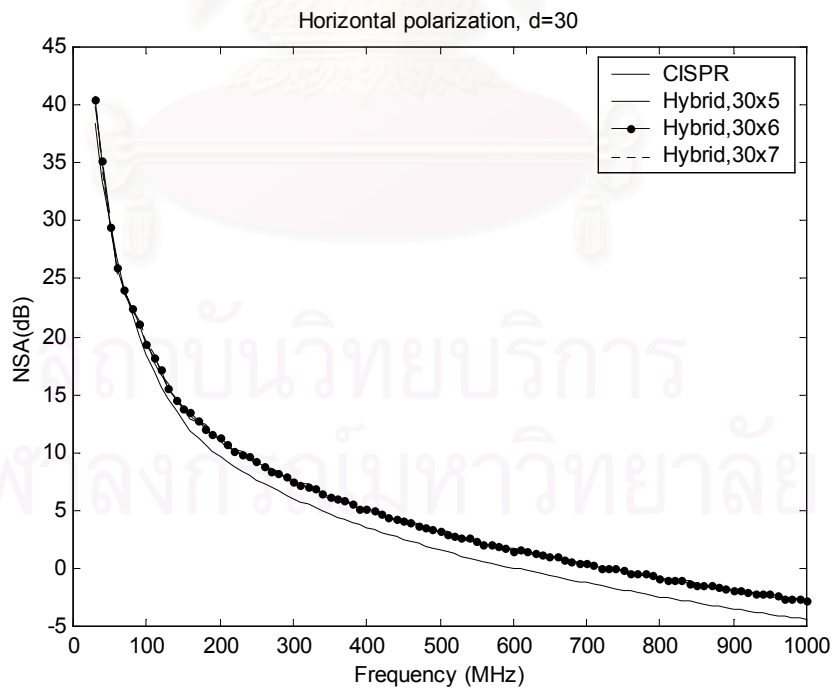
ถ้าหากลดขนาดระนาบดินให้มีขนาดเล็กกว่าตามที่มาตรฐาน CISPR 16-1 [2] กำหนดโดยขนาดระนาบดินตัวอย่างคือ 30×5 ตารางเมตร, 30×6 ตารางเมตรและ 30×7 ตารางเมตร กรณีใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ ค่า NSA และผลต่างของค่า NSA เมื่อเทียบกับค่า NSA ของมาตรฐาน CISPR 16-1 แสดงได้ดังรูป 5.18 - รูป 5.21 ตามลำดับ



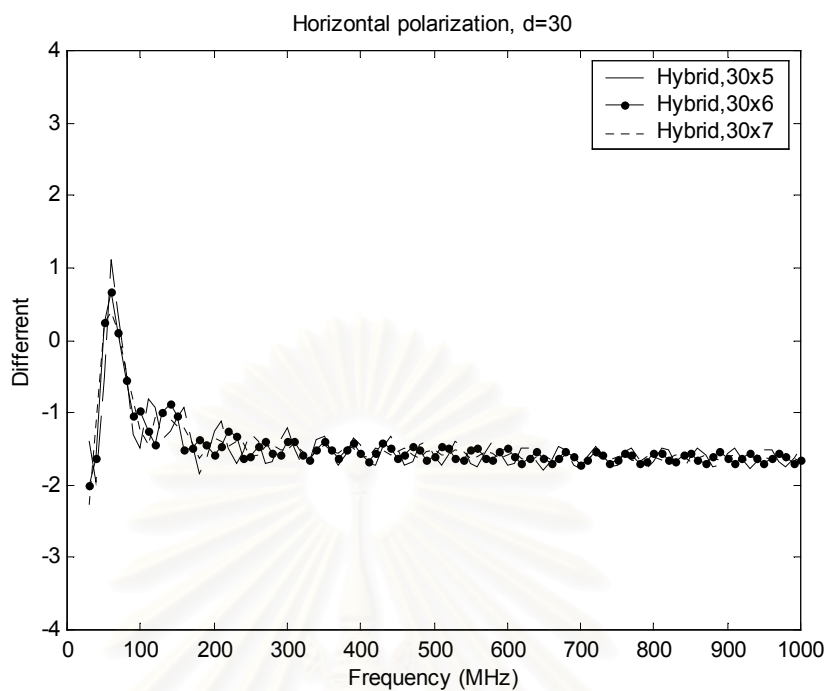
รูป 5.30 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



รูป 5.31 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



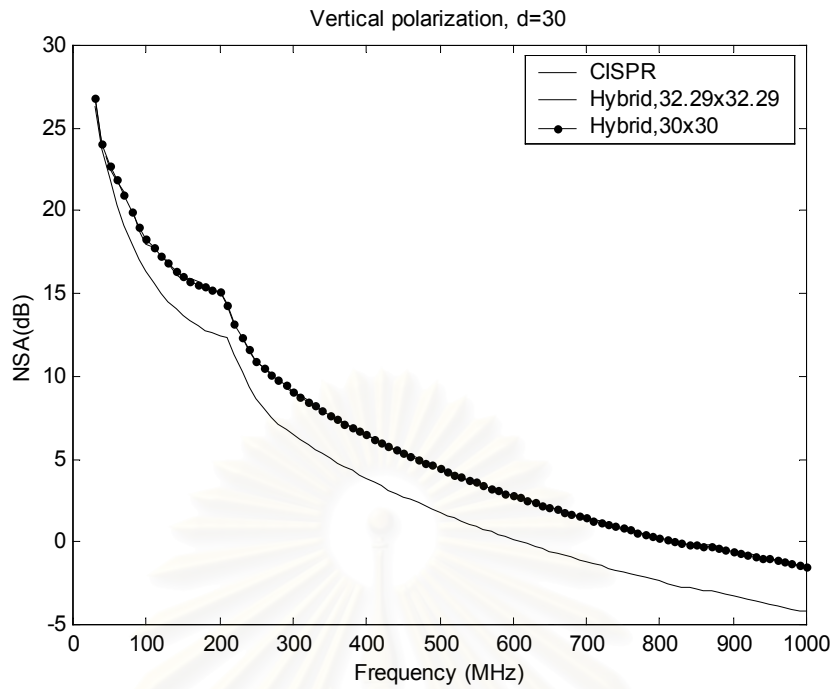
รูป 5.32 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ



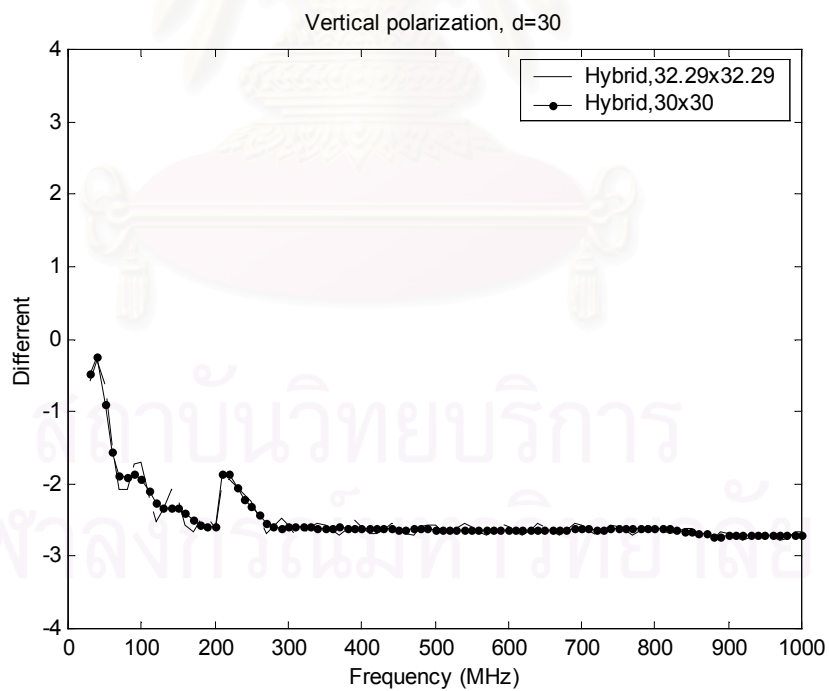
รูป 5.33 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบ

จากรูป 5.30 – รูป 5.31 จะสังเกตเห็นว่ากรณีระนาบดินขนาด 30×5 ตารางเมตร, 30×6 ตารางเมตรและ 30×7 ตารางเมตร กรณีใช้โต๊ะหมุนในการทดสอบเมื่อสายอากาศวางตัวในโพลาริเซชันแนวตั้งมีการแกว่งตัวอยู่ในช่วง 0.39 dB ถึง -2.93 dB, 0.26 dB ถึง -2.88 dB และ 0.22 dB ถึง -2.90 dB ตามลำดับ ส่วนรูป 5.32 – รูป 5.33 เป็นกรณีสายอากาศวางตัวในแนวโพลาริเซชันแนวราบ โดยมีการแกว่งตัวของค่า NSA กรณีระนาบดินขนาด 30×5 ตารางเมตร, 30×6 ตารางเมตรและ 30×7 ตารางเมตร อยู่ในช่วง 1.12 dB ถึง -1.97 dB, 0.66 dB ถึง -2.00 dB และ 0.39 dB ถึง -2.25 dB ตามลำดับ

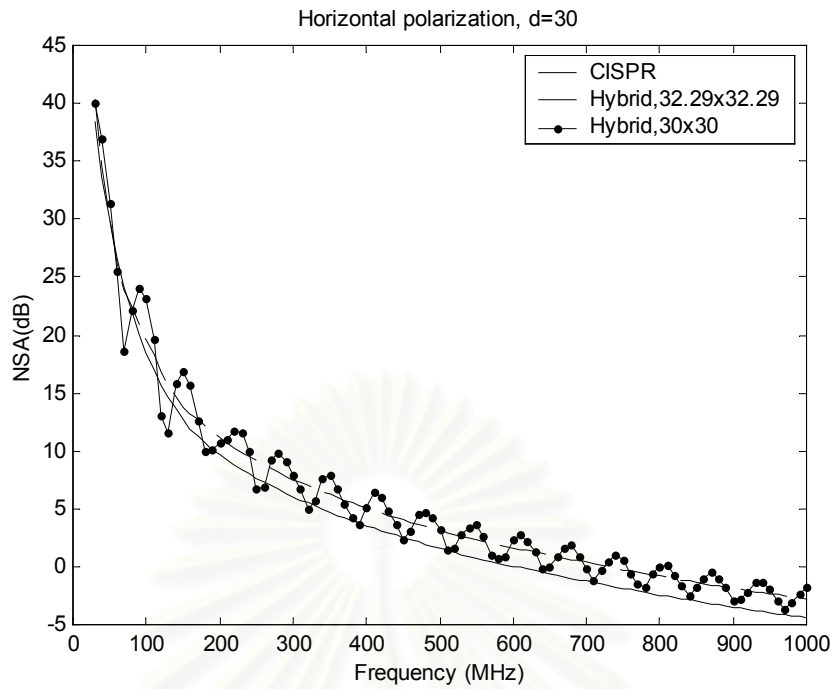
ถ้าหากบริษัททดสอบอยู่ประจำที่การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้ง ณ ระยะทดสอบ 30 เมตร มีขนาดระนาบดินเท่ากับ 30.29×30.29 ตารางเมตร ซึ่งขนาดระนาบดินนี้เป็นไปตามที่มาตรฐาน ANSI [1] กำหนด และระนาบดินขนาด 30×30 ตารางเมตร ซึ่งเป็นระนาบดินขนาดเล็กกว่าตามที่มาตรฐาน ANSI กำหนด ค่า NSA และผลต่างของค่า NSA เมื่อเทียบกับค่า NSA ของมาตรฐาน CISPR 16-1 ทั้งกรณีสายอากาศวางตัวในโพลาริเซชันแนวตั้งและโพลาริเซชันแนวราบแสดงได้ดังรูป 5.34 - รูป 5.37 ตามลำดับ



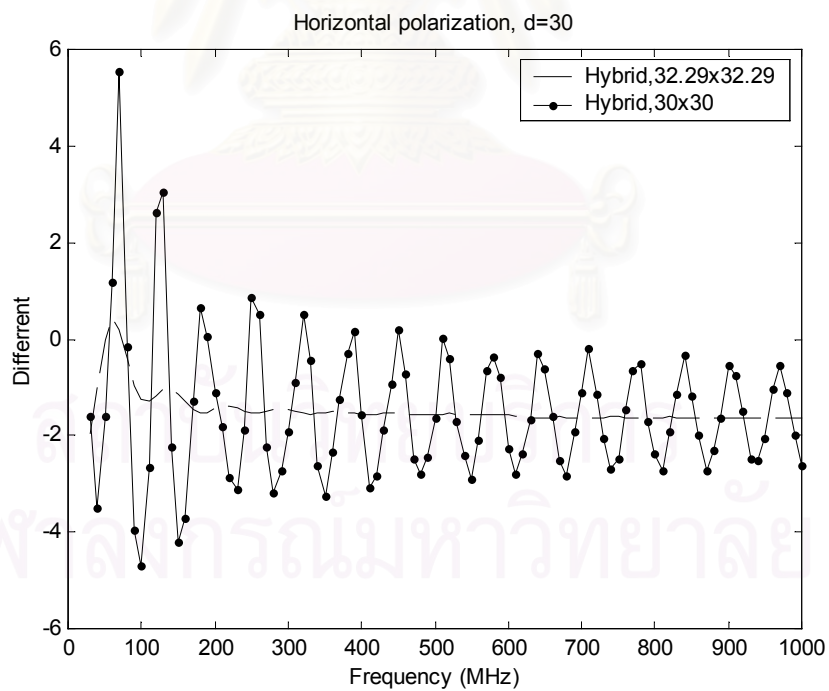
รูป 5.34 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่



รูป 5.35 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวตั้ง เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่



รูป 5.36 ผลการคำนวณ NSA กรณีระนาบดินขนาดต่างๆ
ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่



รูป 5.37 ผลต่าง NSA กรณี CISPR 16-1 [2] กับระเบียบวิธีผสมผสานกรณีระนาบดินขนาดต่างๆ
ที่ระยะห่าง 30 เมตร, โพลาริเซชันแนวราบ เมื่อบริเวณที่ทดสอบอยู่ประจำที่

ตาราง 5.3 ค่าขนาดความแตกต่างสูงสุดของค่า NSA กรณี CISPR 16-1 กับกรณีระนาบดินขนาด
ต่างๆ และพื้นที่(%) ณ ระยะทดสอบ 30 เมตร

ขนาดระนาบดิน (ตารางเมตร)	ขนาดความแตกต่างสูงสุด ของค่า NSA (dB)		ความแตกต่างสูงสุดของค่า NSA ณ ความถี่ (MHz)		พื้นที่ (%)
	โพลาริเซชัน แนวตั้ง	โพลาริเซชัน แนวราบ	โพลาริเซชัน แนวตั้ง	โพลาริเซชัน แนวราบ	
30×5	2.93	1.97	190	40	4.81
30×6	2.88	2.00	910	30	5.77
30×7	2.90	2.25	190	30	6.74
30×30	2.72	5.53	880	40	-
30.29×30.29 (ANSI)	2.79	1.94	920	30	25.49

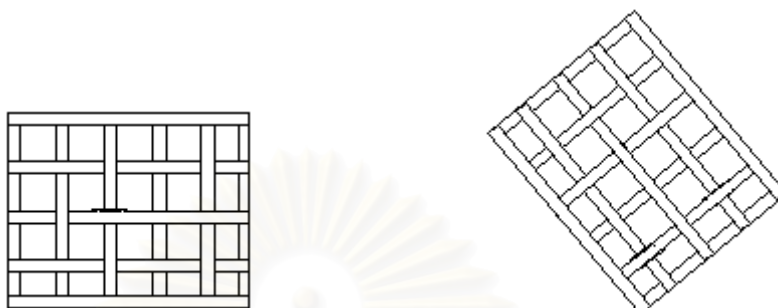
จากตาราง 5.3 จะสังเกตเห็นว่าระนาบดินขนาด 30×5 ตารางเมตร เป็นระนาบดินขนาดเล็กที่สุดที่มีค่าผลต่างของค่า NSA เมื่อเทียบกับค่า NSA ของมาตรฐาน CISPR 16-1 [2] นั้นมีความแตกต่างเท่ากับ 2.93 dB ในกรณีสายอากาศวางตัวในโพลาริเซชันแนวตั้ง และมีค่าเท่ากับ 1.97 dB ในกรณีสายอากาศวางตัวในโพลาริเซชันแนวราบ ซึ่งค่าความแตกต่างทั้งสองดังกล่าวยังอยู่ในขอบเขตตามที่มาตรฐาน CISPR 16-1 กำหนดกล่าวคือมีค่าไม่เกิน ± 4 dB โดยอาศัยสมการ (5.1) จะได้ว่าพื้นที่ระนาบดินนั้นคิดเป็นร้อยละ 4.81 %

จะสังเกตเห็นจากตาราง 5.2 ได้อีกว่าถ้าหากจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งโดยบริษัททดสอบอยู่ประจำที่โดยใช้ระนาบดินขนาด 30×30 ตารางเมตร ซึ่งเป็นขนาดระนาบตามที่มาตรฐาน ANSI [1] กำหนด ค่าสมรรถนะสถานทดสอบที่มีค่าแตกต่างสูงสุดคือ 2.79 dB ณ ความถี่ 920 MHz ในกรณีโพลาริเซชันแนวตั้ง ซึ่งมีค่าไม่เกิน ± 4 dB เมื่อเทียบกับกรณี CISPR 16-1 [2] ทำให้ระนาบดินขนาดดังกล่าวสามารถใช้ในการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งได้

5.2.2 การทดสอบการสะท้อนจากระนาบดินแบบต่างๆ

การทดสอบบริษัททางไฟฟ้าด้วยการทดสอบแบบกลางแจ้งแบบเต็มรูปแบบนั้นจำเป็นต้องใช้ระนาบดินชนิดตัวนำสมบูรณ์ที่มีขนาดใหญ่ทำให้มูลค่าต้นทุนของบริษัททางไฟฟ้านั้นสูงขึ้นตามไปด้วย การลดขนาดของระนาบดินที่ใช้ในการทดสอบจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถลดมูลค่าต้นทุนของบริษัททดสอบได้ แต่การลดขนาดระนาบดินนั้นจะสามารถลดลงได้ถึงขนาดที่จำกัดขนาดหนึ่งเนื่องมาจากข้อจำกัดของขนาดบริษัททดสอบ แนวทางหนึ่งที่สามารถลด

ต้นทุนของบริษัททดสอบลงได้กล่าวคือ การใช้ระนาบดินแบบตาราง (grid ground plane) ซึ่งการสานระนาบดินแบบตารางนี้สามารถสานได้สองวิธีดังนี้ วิธีที่หนึ่งการสานตารางแบบฉาก และวิธีที่สองคือการสานตารางแบบเอียง แสดงดังรูป 5.38 (ก) และรูป 5.38 (ข) ตามลำดับ



(ก) การสานตารางแบบฉาก

(ข) การสานตารางแบบเอียง

รูป 5.38 การสานตารางแบบต่าง ๆ

การนำระนาบดินแบบตารางนี้มาใช้แทนระนาบดินแบบแผ่นเรียบนั้นจะทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) ลดลงเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนของระนาบดินแบบแผ่นเรียบ ระนาบดินแบบตารางจะมีช่องว่างบนระนาบดินที่ทำให้ต้องเพิ่มสัมประสิทธิ์การสะท้อนให้แก่ระนาบดินแบบตาราง ในกรณีนี้ต้องเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุที่อยู่ในช่องว่างของระนาบดินโดยเปลี่ยนแปลงค่าสภาพนำทางไฟฟ้า (conductivity, σ) และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity, ϵ) ในที่นี้วัตถุที่อยู่ระหว่างช่องว่างของตารางคือ ดิน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสมบัติไฟฟ้าที่สะดวกและมีราคาถูกที่สุดคือการใช้น้ำเปลี่ยนแปลงสมบัติไฟฟ้าของดินเพื่อช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนให้แก่ระนาบดินแบบตาราง

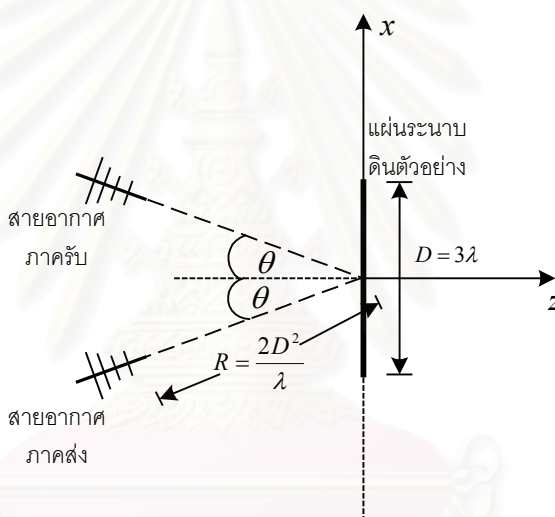
การตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนของระนาบดินจะแบ่งเป็นสองกรณีดังนี้

กรณีที่หนึ่ง สนามไฟฟ้าวางตัวในโพลาริเซชันแบบตั้งฉาก (perpendicular polarization) การตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนนี้จะตรวจวัดทั้งในกรณีที่ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบบนในแนวปกติ (normal incidence) และกรณีที่ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตกกระทบบนในแนวเอียง (oblique incidence) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้ กรณีคลื่นตกกระทบบนในแนวปกติ กล่าวคือ ทิศทางการเดินทางของคลื่นตั้งฉากกับผิวสะท้อนจะได้สัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยที่สุด [12] เมื่อเทียบกับทิศทางการเดินทางของคลื่นที่มุมอื่นๆ กับผิวสะท้อน และกรณีคลื่นตกกระทบบนในแนวเอียง กล่าวคือ ทิศทางการเดินทางของคลื่นที่ทำมุมกับผิวสะท้อน เพื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ มุมต่างๆ ในที่นี้จะตรวจวัด ณ มุมตกกระทบบนนี้ 68.20° เนื่องจากมุมนี้นับว่าเป็นมุมตัวอย่างที่ทิศทาง

คลื่นตกกระทบกับระนาบดินในการทดสอบแบบกลางแจ้งที่ระยะทดสอบ 10 เมตร และความสูงของสายอากาศภาครับ ณ ตำแหน่ง 2 เมตร

กรณีที่สอง สนามไฟฟ้าวางตัวในโพลาไรเซชันแบบขนาน (parallel polarization) โดยการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนนี้จะตรวจวัดทั้งในกรณีที่ทิศทางการเดินทางของคลื่นตกกระทบอยู่ในแนวปกติและกรณีที่ทิศทางการเดินทางของคลื่นตกกระทบอยู่ในแนวเอียงตั้งรายละเอียดที่กล่าวมาแล้ว

ระนาบดินแบบตารางที่จะทำการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะแบ่งเป็นตารางขนาดดังต่อไปนี้ คือ $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$ และ $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$ ตารางเมตร ในการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนของระนาบดินแบบต่างๆ นั้นจะตรวจวัดจากแผ่นระนาบดินตัวอย่างขนาด $3\lambda \times 3\lambda$ และรูปเรขาคณิตที่ใช้ในการตรวจวัดแสดงได้ดังรูป 5.39



รูป 5.39 เรขาคณิตการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) สามารถนิยามจากผลหารของความเข้มสนามไฟฟ้าสะท้อน (E_r) กับความเข้มสนามไฟฟ้าตกกระทบ (E_i) [12] แสดงได้ดังสมการ (5.2)

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} \quad (5.2)$$

การตรวจวัดนั้นจะปรับเทียบกับแผ่นอลูมิเนียมเรียบขนาด $3\lambda \times 3\lambda$ โดยการตรวจวัดจะใช้เครื่องวิเคราะห์โคจรข่ายยี่ห้อ HP รุ่น 8735C ผลการตรวจวัดสามารถแสดงตามลำดับแต่ละกรณีได้ดังต่อไปนี้

ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อน

กรณี 1. สนามไฟฟ้าวางตัวในโพลาไรเซชันแบบตั้งฉาก

ตาราง 5.4 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
สนามแบบฉากในอากาศ, โพลาไรเซชันแบบตั้งฉาก

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.84
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.43	0.69
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.38	0.50
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.18	0.29

ตาราง 5.5 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
สนามแบบเอียงในอากาศ, โพลาไรเซชันแบบตั้งฉาก

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.95
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.60	0.85
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.57	0.79
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.31	0.30

ตาราง 5.6 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
 สานแบบฉากบนดิน, โพลาริเซชันแบบตั้งฉาก

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.83
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.45	0.62
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.36	0.60
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.27	0.41

ตาราง 5.7 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
 สานแบบเฉียงบนดิน, โพลาริเซชันแบบตั้งฉาก

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.88
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.53	0.82
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.44	0.70
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.26	0.36

จากตาราง 5.4 ถึง ตาราง 5.7 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อขนาดช่องว่างบนแผ่นสะท้อนตัวอย่างมี
 ค่าเท่ากัน การสานตารางแบบเฉียงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมากกว่ากรณีที่สานตารางแบบ
 ตั้งฉาก

ตาราง 5.8 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
 สานแบบฉากบนดินเปียกน้ำ, โพลาริเซชันแบบตั้งฉาก

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.89
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.74	0.84
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.77	0.81
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.75	0.75

ตาราง 5.9 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
 สานแบบเฉียงบนดินเปียกน้ำ, โพลาริเซชันแบบตั้งฉาก

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.92
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.71	0.91
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.65	0.87
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.69	0.78

จากตาราง 5.8 ถึงตาราง 5.9 จะสังเกตเห็นว่าระนาบดินที่สานแบบฉากและระนาบดินที่
 สานแบบเฉียงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การ
 สะท้อนในตาราง 5.6 และตาราง 5.7

กรณี 2. สนามไฟฟ้าวางตัวในโพลาริเซชันแนวราบ

ตาราง 5.10 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
สนามแบบฉากในอากาศ, โพลาริเซชันแนวราบ

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.86
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.45	0.58
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.42	0.43
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.34	0.14

ตาราง 5.11 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
สนามแบบเอียงในอากาศ, โพลาริเซชันแนวราบ

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.99
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.37	0.54
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.33	0.44
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.28	0.24

ตาราง 5.12 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
 สถานแบบฉากบนดิน, โพลาริเซชันแนวราบ

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.82
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.58	0.86
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.44	0.76
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.32	0.56

ตาราง 5.13 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
 สถานแบบเอียงบนดิน, โพลาริเซชันแนวราบ

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.85
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.55	0.83
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.49	0.84
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.28	0.51

จากตาราง 5.10 ถึง ตาราง 5.13 จะสังเกตเห็นว่าถ้าขนาดช่องว่างบนแผ่นสะท้อนตัว
 อย่างมีค่าเท่ากับระนาบดินที่สถานตารางแบบเอียงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมากกว่ากรณี
 ระนาบดินสถานตารางแบบตั้งฉาก

ตาราง 5.14 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
 สานแบบฉากบนดินเปียกน้ำ, โพลาริเซชันแนวราบ

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.83
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.75	0.80
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.71	0.75
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.65	0.67

ตาราง 5.15 ผลการตรวจวัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อวางแผ่นระนาบดินที่
 สานแบบเฉียงบนดินเปียกน้ำ, โพลาริเซชันแนวราบ

ชนิดระนาบดิน	มุมตกกระทบ	
	0°	68.20°
แผ่นเรียบ	1	0.76
ตาราง, $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$	0.75	0.71
ตาราง, $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$	0.73	0.69
ตาราง, $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$	0.64	0.65

จากตาราง 5.14 ถึงตาราง 5.15 จะสังเกตเห็นว่าระนาบดินที่สานแบบฉากและระนาบดินที่สานแบบเฉียงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในตาราง 5.6 และตาราง 5.7

สรุป

ระนาบดินที่เป็นแบบสานแบบเฉียงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่มากกว่าระนาบดินที่สานแบบฉาก ถ้าหากตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อแผ่นระนาบดินตัวอย่างวางอยู่บนพื้นดินที่เปียกน้ำจะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแผ่นระนาบดินที่วางแบบฉากมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจากผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่แสดงดังตาราง 5.4 ถึงตาราง 5.15 และถ้าหาก

พิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเมื่อช่องว่างของระนาบดินแบบसानเท่ากับ $\frac{\lambda}{10} \times \frac{\lambda}{10}$ ตารางเมตร กับ $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$ ตารางเมตร จะได้ว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ระนาบดินที่सानแบบฉาก โดยมีขนาดช่องว่างเท่ากับ $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$ ตารางเมตร และเพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจึงวางระนาบดินดังกล่าวบนพื้นดินที่เปียกน้ำ

5.2.3 การตรวจวัดค่าลดทอนสถานที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้บริเวณสนามฟุตบอล คณะรัฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นตัวอย่างการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบเบื้องต้นซึ่งมีสภาพแวดล้อมทั่วไป ดังนี้ขนาดสนามฟุตบอลเท่ากับ 34.27×51.00 ตารางเมตร และปราศจากสิ่งกีดขวางโดยระนาบดินเป็นพื้นดินเรียบประกอบด้วยหญ้าปกคลุมเป็นยอมๆ โดยบริเวณข้างสนามฟุตบอลนั้นจะเป็นที่ตั้งของอาคารเรียนมีความสูงเฉลี่ยประมาณ 10 เมตร ณ บริเวณปลายสุดทั้งสองของสนามฟุตบอลนั้นจะเป็นที่ตั้งของประตูฟุตบอลมีความสูงประมาณ 2 เมตร และบริเวณหลังประตูฟุตบอลประกอบไปด้วยรั้วซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ลูกฟุตบอลไปไกลจากบริเวณสนามฟุตบอล นอกจากประโยชน์ดังกล่าวแล้วในทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นรั้วสะท้อนคลื่นซึ่งมีลักษณะเป็นตารางมีความขนาดช่องกว้างประมาณ 5×5 ตารางเซนติเมตร

การตรวจวัดค่าลดทอนสถานที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (NSA) จะตรวจวัดกรณีนี้ที่ระยะทดสอบเท่ากับ 10 เมตร โดยระนาบดินขนาดเท่ากับ 12×5 ตารางเมตร และมีลักษณะเป็นตารางसानแบบฉากมีขนาดช่องว่างเท่ากับ $\frac{\lambda}{4} \times \frac{\lambda}{4}$ ตารางเมตร พิจารณาค่าความยาวคลื่นที่ความถี่สูงสุด การตรวจวัดค่า NSA จะตรวจวัดที่ความถี่ 55 MHz, 150 MHz และ 230 MHz เนื่องจากความถี่ดังกล่าวอยู่ในช่วง 30 MHz – 230 MHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ขีดจำกัดขั้นต่ำของสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายคลื่น ส่วนช่วงความถี่ 230 MHz – 1000 MHz เป็นช่วงความถี่ที่กำหนดขีดจำกัดขั้นสูงของสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายคลื่นแสดงได้ดังตาราง 5.16 [34]

ตาราง 5.16 ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนที่แผ่กระจายคลื่นของบริภัณฑ์เทคโนโลยีสารสนเทศ

ความถี่ (MHz)	ขีดจำกัดค่ายอดเสริม $dB(\mu V/m)$	
	ประเภท A	ประเภท B
30 - 230	40	30
230 - 1000	47	37
หมายเหตุ ความถี่ช่วงเปลี่ยนกำหนดให้ใช้ขีดจำกัดล่าง		

การตรวจวัดค่า NSA ของสถานทดสอบตัวอย่างนั้นจะตรวจวัดโดยใช้สายอากาศ 3 ตัว [4,7] เพื่อหาค่าตัวประกอบสายอากาศ (antenna factor, AF) ของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ โดยค่า NSA สามารถคำนวณได้จากสมการ (5.3)

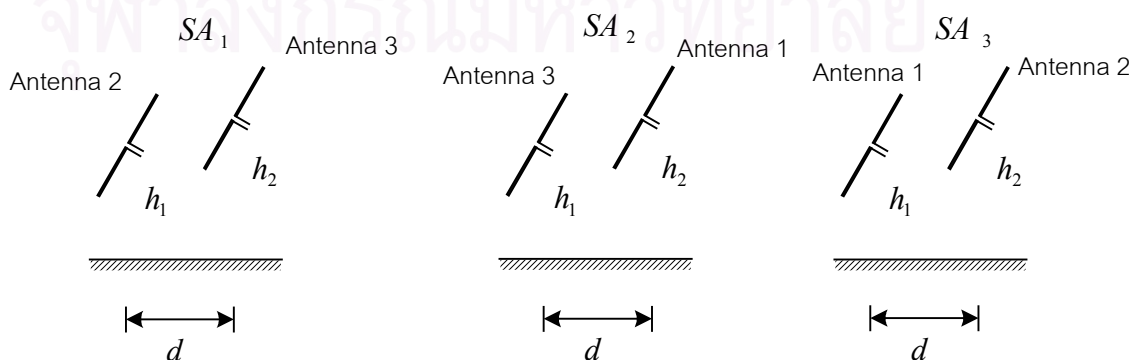
$$NSA(dB) = V_i - V_s - AF_1 - AF_2 - \Delta AF \quad (5.3)$$

โดย V_i คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของคลื่นวิถีตรง
 V_s คือ ค่าแรงเคลื่อนของคลื่นหลายวิถี
 AF_1 คือ ตัวประกอบสายอากาศภาคส่ง (transmitting antenna factor)
 AF_2 คือ ตัวประกอบสายอากาศภาครับ (receiving antenna factor)
 ΔAF คือ ตัวแก้แอมพีแดนซ์ร่วม (mutual impedance correction factor)

การตรวจวัดค่าสมรรถนะของสถานทดสอบโดยใช้วิธีสายอากาศ 3 ตัวนั้นจะเริ่มตรวจวัดค่าลดทอนสถานทดสอบ (SA) ที่แสดงดังสมการ (2.34) ถ้าหากเขียนค่าลดทอนสถานทดสอบนี้ให้อยู่ในรูป dB จะได้

$$SA = 20 \log \left(\frac{79.58 \sqrt{30 P_t G_t}}{2} \right) + AF_T + AF_R - 20 \log f_{MHz} - E^{\max} \quad (5.4)$$

โดย P_t คือ กำลัง ณ สายอากาศส่ง
 G_t คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง
 f_M คือ ความถี่ปฏิบัติการ, MHz
 E^{\max} คือ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่สายอากาศใดโพล ณ ภาครับรับได้ในช่วงความสูง $h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}$ ทั้งในโพลาริเซชันแนวราบ และในโพลาริเซชันแนวตั้ง



รูป 5.40 การตรวจวัดตัวประกอบสายอากาศ

จากรูป 5.40 เป็นการตรวจวัด 3 ครั้ง โดยตรวจวัดครั้งแรก Antenna2 กับ Antenna3 ครั้งที่สอง Antenna3 กับ Antenna1 และการตรวจวัดครั้งที่สาม Antenna1 กับ Antenna2 จากสมการ (5.4) สามารถเขียนโดยมีความสัมพันธ์ตามคู่สายอากาศแสดงได้ดังสมการ (5.5), สมการ (5.6) และ สมการ (5.7) ตามลำดับ

$$AF_3 + AF_2 = SA_1 - 20 \log \left(\frac{79.58 \sqrt{30P_t G_t}}{2} \right) + 20 \log f_{MHz} + E^{\max} \quad (5.5)$$

$$AF_1 + AF_3 = SA_2 - 20 \log \left(\frac{79.58 \sqrt{30P_t G_t}}{2} \right) + 20 \log f_{MHz} + E^{\max} \quad (5.6)$$

$$AF_2 + AF_1 = SA_3 - 20 \log \left(\frac{79.58 \sqrt{30P_t G_t}}{2} \right) + 20 \log f_{MHz} + E^{\max} \quad (5.7)$$

โดย AF_1 คือ ตัวประกอบสายอากาศตัวที่ 1

AF_2 คือ ตัวประกอบสายอากาศตัวที่ 2

AF_3 คือ ตัวประกอบสายอากาศตัวที่ 3

SA_1 คือ ค่าลดทอนสถานที่ทดสอบเมื่อสายอากาศตัวที่ 2 กับสายอากาศตัวที่ 3

SA_2 คือ ค่าลดทอนสถานที่ทดสอบเมื่อสายอากาศตัวที่ 3 กับสายอากาศตัวที่ 1

SA_3 คือ ค่าลดทอนสถานที่ทดสอบเมื่อสายอากาศตัวที่ 1 กับสายอากาศตัวที่ 2

อาศัยสมการ (5.5) ถึง สมการ (5.7) สามารถวิเคราะห์หาตัวประกอบสายอากาศตัวที่ 1, ตัวประกอบสายอากาศตัวที่ 2 และตัวประกอบสายอากาศตัวที่ 3 แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$AF_1 = \frac{1}{2}(SA_2 + SA_3 - SA_1) - 20 \log \left(\frac{79.58 \sqrt{30P_t G_t}}{2} \right) + 10 \log f_{MHz} + \frac{1}{2} E^{\max} \quad (5.8)$$

$$AF_2 = \frac{1}{2}(SA_3 + SA_1 - SA_2) - 20 \log \left(\frac{79.58 \sqrt{30P_t G_t}}{2} \right) + 10 \log f_{MHz} + \frac{1}{2} E^{\max} \quad (5.9)$$

$$AF_3 = \frac{1}{2}(SA_1 + SA_2 - SA_3) - 20 \log \left(\frac{79.58 \sqrt{30P_t G_t}}{2} \right) + 10 \log f_{MHz} + \frac{1}{2} E^{\max} \quad (5.10)$$

ผลการตรวจวัดค่า SA, ผลการคำนวณตัวประกอบสายอากาศจากสมการ (5.8) ถึงสมการ (5.10) อาศัยค่า SA กับค่าตัวประกอบสายอากาศจะได้ค่า NSA แสดงได้ดังตาราง 5.17

ตาราง 5.17 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาดตาราง 0.30×0.30 ตารางเมตร ระนาบดินसानแบบฉาก สายอากาศวางตัวโพลาริเซชันแนวตั้ง

ความถี่ (MHz)	SA_1	SA_2	SA_3	AF_1	AF_2	AF_3	NSA	Δ_{CISPR}	Δ_{Hybrid}
55	40.50	39.57	39.15	15.15	14.22	13.80	11.13	-2.27	-2.92
150	40.45	42.26	41.23	16.31	18.12	17.09	6.02	2.75	1.55
230	39.53	44.15	42.23	15.93	20.55	18.63	3.04	2.85	2.66

ตาราง 5.18 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาดตาราง 0.30×0.30 ตารางเมตร ระนาบดินसानแบบฉาก สายอากาศวางตัวโพลาริเซชันแนวราบ

ความถี่ (MHz)	SA_1	SA_2	SA_3	AF_1	AF_2	AF_3	NSA	Δ_{CISPR}	Δ_{Hybrid}
55	39.53	44.15	42.23	14.47	13.74	11.59	13.87	-0.28	-1.23
150	40.51	41.67	39.88	17.62	18.78	16.99	4.10	1.23	-0.02
230	43.16	41.49	38.77	21.22	19.55	16.83	2.38	3.36	1.60

- หมายเหตุ 1. Δ_{CISPR} คือ ผลต่างของค่า NSA ที่ตรวจวัดกับค่า NSA ที่กำหนดโดยมาตรฐาน CISPR 16-1 [2]
2. Δ_{CISPR} คือ ผลต่างของค่า NSA ที่ตรวจวัดกับค่า NSA ที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีผสมผสาน

จากตาราง 5.17 และตาราง 5.18 จะสังเกตเห็นว่าค่า NSA ที่ได้จากการตรวจวัดนั้นมีค่าความแตกต่างไม่เกิน ± 4 dB จากค่า NSA ที่กำหนดโดยมาตรฐาน CISPR 16-1 ดังนั้นการทดสอบแบบกลางแจ้ง ณ บริเวณสนามฟุตบอล คณะรัฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสามารถใช้จัดตั้งทดสอบ ณ ความถี่ 55 MHz, 150 MHz และ 230 MHz ได้ และจะเห็นได้ก็อีกว่าจากตาราง 5.17 และตาราง 5.18 ค่า NSA ณ ความถี่ 55 MHz ที่ตรวจวัดมานั้นมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐาน CISPR 16-1 มากกว่าที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีผสมผสาน แต่ที่ความถี่ 150 MHz และ

230 MHz นั้นค่า NSA ที่ตรวจวัดจะมีค่า NSA ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีผสมผสานมากกว่า NSA ที่กำหนดโดยมาตรฐาน CISPR 16-1

ผลการตรวจวัดค่า NSA กรณีที่ระยะทดสอบเท่ากับ 10 เมตร โดยระนาบดินขนาดเท่ากับ 12×5 ตารางเมตร และมีลักษณะเป็นตารางสนามแบบฉากมีขนาดช่องว่างเท่ากับ $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$ ตารางเมตรที่วางบนดินที่เปียกน้ำ ขนาดช่องว่างสามารถพิจารณาได้จากค่าความยาวคลื่นของความถี่สูงสุดในที่นี้คือ 0.60×0.60 ตารางเมตร แสดงได้ดังตาราง 5.19 ถึงตาราง 5.20

ตาราง 5.19 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาดตาราง 0.60×0.60 ตารางเมตร ระนาบดินสนามแบบฉาก สายอากาศวางตัวโพลาริเซชันแนวตั้ง

ความถี่ (MHz)	SA_1	SA_2	SA_3	AF_1	AF_2	AF_3	NSA	Δ_{CISPR}	Δ_{Hybrid}
55	39.63	38.87	41.52	13.75	12.99	15.64	12.89	-0.53	-1.20
230	40.00	44.51	42.10	15.94	20.45	18.04	3.62	3.43	1.02

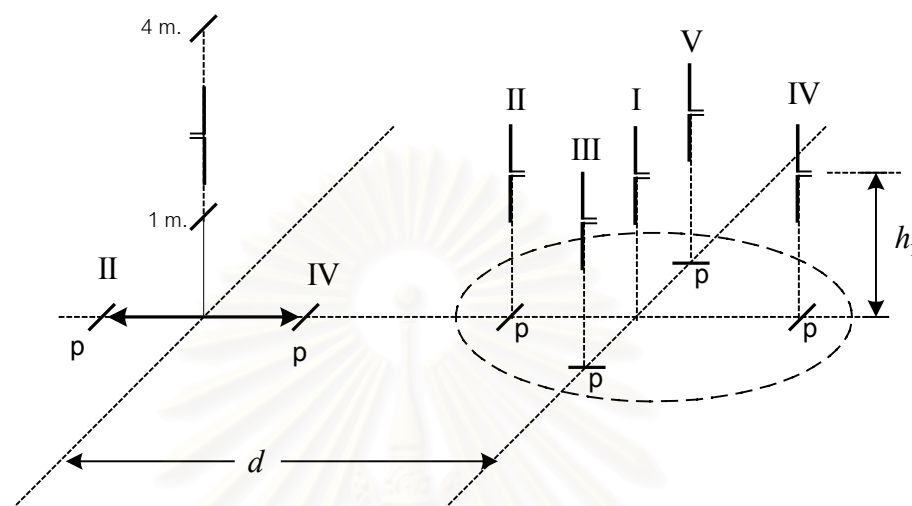
ตาราง 5.20 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาดตาราง 0.60×0.60 ตารางเมตร ระนาบดินสนามแบบฉาก สายอากาศวางตัวโพลาริเซชันแนวราบ

ความถี่ (MHz)	SA_1	SA_2	SA_3	AF_1	AF_2	AF_3	NSA	Δ_{CISPR}	Δ_{Hybrid}
55	41.19	46.57	39.53	10.46	15.84	8.80	14.89	0.39	-0.21
230	42.24	40.25	38.67	21.81	19.82	18.24	0.61	-0.37	-0.17

จากตาราง 5.19 ถึงตาราง 5.20 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อวางระนาบดินแบบตารางบนพื้นดินที่เปียกน้ำจะได้สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นดินที่แห้ง ค่า NSA กรณีช่องว่างตารางขนาดเท่ากับ $\frac{\lambda}{2} \times \frac{\lambda}{2}$ ตารางเมตรจึงมีค่าเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน CISPR 16-1

เนื่องจากบริษัททางไฟฟ้านั้นมีปริมาตรดังนั้นการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งจึงต้องตรวจวัดค่า NSA ของสถานทดสอบที่เลือกได้ (alternative test site) [1] ในปริมาตรทดสอบโดยสายอากาศส่งต้องเคลื่อนที่อยู่ภายในปริมาตรของบริษัททดสอบทั้งกรณีทั้งสายอากาศวางตัวโพลาริเซชันแนวตั้งและสายอากาศวางตัวโพลาริเซชันแนวราบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ

บริษัททดสอบตัวอย่าง ณ ระยะทดสอบ 10 เมตร คือ 1.00 เมตร หรือรัศมีเท่ากับ 0.50 เมตร สามารถแสดงการตรวจวัดค่า NSA ของสถานทดสอบที่เลือกได้ดังรูป 5.41



รูป 5.41 ตำแหน่งสายอากาศของการตรวจวัดค่า NSA ของสถานทดสอบที่เลือกได้

การตรวจวัดค่า NSA ของสถานทดสอบที่เลือกได้นั้นจะกระทำได้โดยเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสายอากาศส่งโดยตำแหน่งการตรวจวัดจะจัดตั้งบนตำแหน่งขอบเส้นรอบวง (p) ของบริษัททดสอบเมื่อหมุนรอบ 360 องศา การตรวจวัดนั้นต้องรักษาระยะทดสอบให้เท่ากับระยะทดสอบโดยตำแหน่ง II และตำแหน่ง IV ต้องมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสายอากาศรับเพื่อรักษาระยะทดสอบให้เท่าเดิม (d) การตรวจวัดจะตรวจวัดทั้งโพลาริเซชันแนวตั้งและโพลาริเซชันแนวราบผลการตรวจวัดแสดงได้ดังตาราง 5.21

ตาราง 5.21 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของสถานทดสอบที่เลือกเมื่อระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาดตาราง 0.30×0.30 ตารางเมตร ระนาบดินसानแบบฉาก สายอากาศวางตัวโพลาริเซชันแนวตั้ง

ความถี่ (MHz)	NSA				
	ตำแหน่ง I	ตำแหน่ง II	ตำแหน่ง III	ตำแหน่ง IV	ตำแหน่ง V
55	12.28	12.15	13.80	13.25	12.35
150	7.32	7.58	7.88	6.52	7.64
230	2.58	2.47	2.78	2.97	2.67

ตาราง 5.22 ผลการตรวจวัดค่า NSA ของสถานทดสอบที่เลือกเมื่อระนาบดินขนาด 12×5 ตารางเมตรและขนาดตาราง 0.30×0.30 ตารางเมตร ระนาบดินसानแบบฉาก สายอากาศวางตัวโพลาริเซชันแนวราบ

ความถี่ (MHz)	NSA				
	ตำแหน่ง I	ตำแหน่ง II	ตำแหน่ง III	ตำแหน่ง IV	ตำแหน่ง V
55	14.24	13.44	13.79	15.52	15.17
150	4.52	5.17	4.67	4.92	4.93
230	2.87	2.66	2.14	2.30	2.88

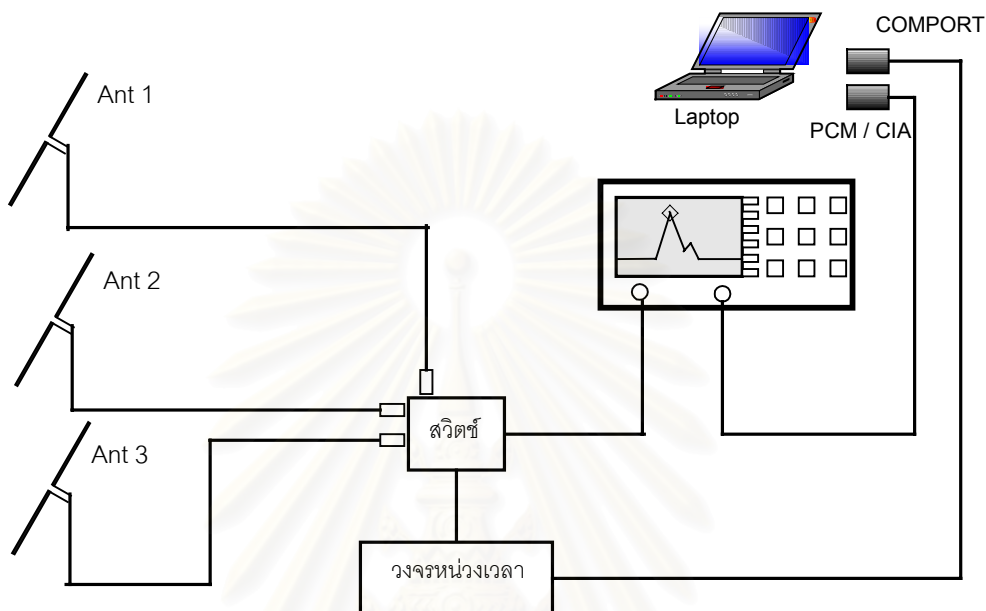
จากตาราง 5.21 ถึงตาราง 5.22 จะสังเกตเห็นว่า ความถี่ 55 MHz มีการแกว่งตัวของค่า NSA อยู่ในช่วง 2.65 dB กับ 2.08 dB ในโพลาริเซชันแนวตั้งกับโพลาริเซชันแนวราบตามลำดับ, ความถี่ 150 MHz มีการแกว่งตัวของค่า NSA อยู่ในช่วง 1.36 dB กับ 0.65 dB ในโพลาริเซชันแนวตั้งกับโพลาริเซชันแนวราบตามลำดับ และความถี่ 230 MHz มีการแกว่งตัวของค่า NSA อยู่ในช่วง 0.50 dB กับ 0.74 dB ในโพลาริเซชันแนวตั้งกับโพลาริเซชันแนวราบตามลำดับ ซึ่งค่า NSA ณ ความถี่ 55 MHz, 150 MHz และ 230 MHz มีค่าไม่เกิน ± 4 dB เมื่อเปรียบเทียบกับ CISPR 16-1 [2] ดังนั้นความถี่ทั้งสามดังกล่าวมีการแกว่งตัวอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

นอกจากค่า NSA จะบ่งบอกค่าสมรรถนะของสถานทดสอบแล้วระดับสัญญาณรบกวนก็เป็นค่าปัจจัยที่สำคัญที่จะบ่งบอกสามารถทดสอบปริกนัททดสอบ ณ ความถี่นั้นๆ ได้ ต่อไปจะกล่าวถึงผลการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนดังกล่าว

5.3 ผลการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนและการบ่งชี้ระดับสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสูงสุด

การตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนนั้นจะตรวจวัด ณ บริเวณสนามฟุตบอล คณะรัฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การตรวจระดับสัญญาณรบกวนนั้นจะใช้สายอากาศไดโพลโดยการตรวจวัดนั้นจะตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนทั้งแกน X, Y และ Z ในระบบพิกัดฉาก และตำแหน่งในการตรวจวัดจะจัดตั้งสายอากาศสามตำแหน่งคือ บริเวณหน้าสนามฟุตบอลทั้งสองและบริเวณกลางสนามฟุตบอลซึ่งสายอากาศแต่ละตัวห่างกันประมาณ 25 เมตร ค่าระดับสัญญาณรบกวนที่ตรวจวัดนั้นจะตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนโดยใช้วงจรหน่วงเวลา (delay circuit) ร่วมกับสวิตช์เป็นวงจรควบคุมเพื่อตรวจวัดสัญญาณรบกวน การตรวจวัดค่าระดับ

สัญญาณรบกวนนั้นจะใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (รุ่น HP8590L) แสดงแผนภูมิอุปกรณ์ของการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนดังรูป 5.42



รูป 5.42 แผนภูมิอุปกรณ์ของการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวน

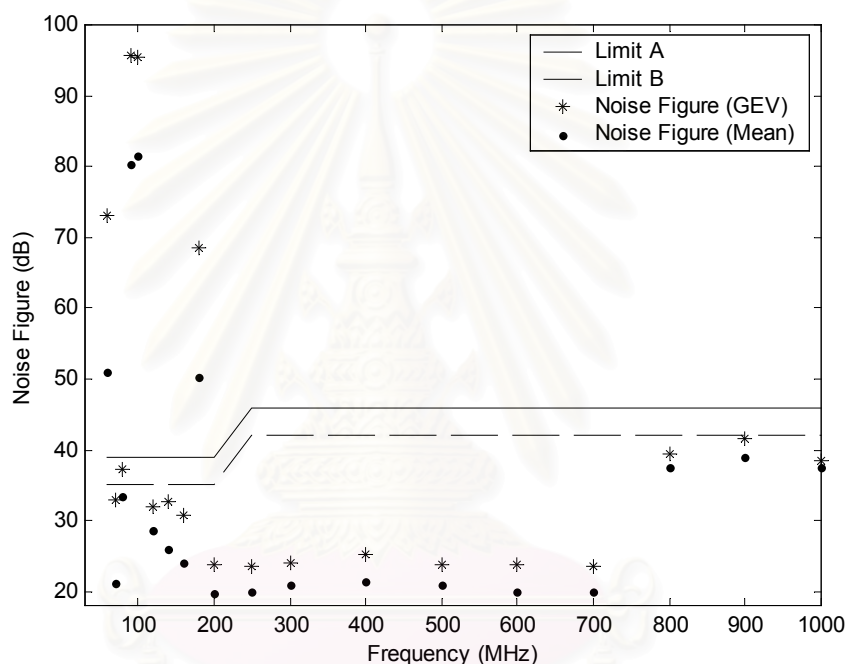
การตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนนั้นจะตรวจวัด ณ ความถี่ตัวอย่างได้แก่ 60 MHz, 70 MHz, 80 MHz, 90 MHz, 100 MHz, 120 MHz, 140 MHz, 160 MHz, 180 MHz, 200 MHz, 250 MHz, 300 MHz, 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz และ 1000 MHz แสดงผลการตรวจวัดและการคำนวณค่าสูงสุดด้วยการแจกแจงความถี่สะสมค่าสูงสุดทั่วไป (GEV) และการแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป (GPD) แสดงดังตาราง 5.23 และตาราง 5.24 ตามลำดับ

ตาราง 5.23 ผลการตรวจวัดและผลการคำนวณค่าปัจจัยทฤษฎีค่าสุดขีดทั่วไป (GEV)

ความถี่ (MHz)	ค่าเฉลี่ย (dB)	ส่วนเบี่ยง เบนมาตร ฐาน (dB)	GEV			ประเภทขีดจำกัด ค่า รากเฉลี่ย กำลังสองของตัว เลข สี่ ญ ญา ณ รบกวน(dB) [34]	
			\bar{x}	s	R^k	A	B
60	59.92	6.18	56.69	4.71	73.06	39.00	35.00
70	21.21	1.42	22.10	2.02	32.83		
80	33.31	0.29	36.46	0.33	37.17		
90	80.28	2.72	87.49	2.01	95.73		
100	81.46	3.69	83.13	3.00	95.41		
120	28.61	0.75	28.99	0.71	31.90		
140	25.93	1.28	26.59	1.52	32.78		
160	24.02	1.42	24.75	1.46	30.73		
180	50.19	4.43	52.34	4.01	68.38		
200	19.80	0.69	20.17	0.88	23.78		
250	19.96	0.74	20.34	0.77	23.47	46.00	42.00
300	20.90	0.73	21.26	0.67	24.01		
400	21.27	0.75	21.66	0.85	25.13		
500	20.78	0.64	21.10	0.66	23.79		
600	20.00	0.86	20.44	0.83	23.83		
700	19.92	0.78	20.31	0.79	23.54		
800	37.53	0.50	37.78	0.49	39.39		
900	38.92	0.58	39.23	0.69	41.64		
1000	37.42	0.47	37.64	0.41	38.53		

จากตาราง 5.23 เป็นผลการคำนวณค่าปัจจัยต่างๆ ของทฤษฎีค่าสุดขีดทั่วไป (GEV) โดยอาศัยการพิจารณาจากหัวข้อ 3.2.1 ซึ่งมีผลการคำนวณด้วยกรรมวิธีการประมาณความควรจะเป็น

เป็นลิมิตสูงสุด (MLE) ดังกล่าวถึงในหัวข้อ 3.3.1 สมการ (3.38) เมื่อกำหนดให้ $\xi = 0$ กล่าวคือ เป็นกรณีของ *GUMBEL* ที่อาณาจักรของค่าสูงสุดขีดอยู่ในจำนวนจริง และกำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นของการคำนวณค่าปัจจัยต่างๆ ด้วยกรรมวิธี MLE มีค่าเท่ากับ 95% อาศัยค่าปัจจัย \bar{x} และ s จะทำให้สามารถระบุค่าสูงสุดขีดได้จากสมการ (3.27) ค่าขีดจำกัดตัวเลขสัญญาณรบกวนนั้นจะคำนวณเมื่ออุณหภูมิ $288^{\circ}K$ [21] เมื่อเปรียบเทียบค่าสูงสุดขีดที่ได้จากทฤษฎีค่าสูงสุดขีดทั่วไป (GEV) กับค่าขีดจำกัดค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของตัวเลขสัญญาณรบกวน [34] จากตาราง 5.22 แสดงได้ดังรูป 5.43



รูป 5.43 เปรียบเทียบค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของตัวเลขสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสูงสุดขีดจากทฤษฎีค่าสูงสุดขีดทั่วไป (GEV) กับค่าขีดจำกัดตามมาตรฐาน มอก. 1956-2542 [34]

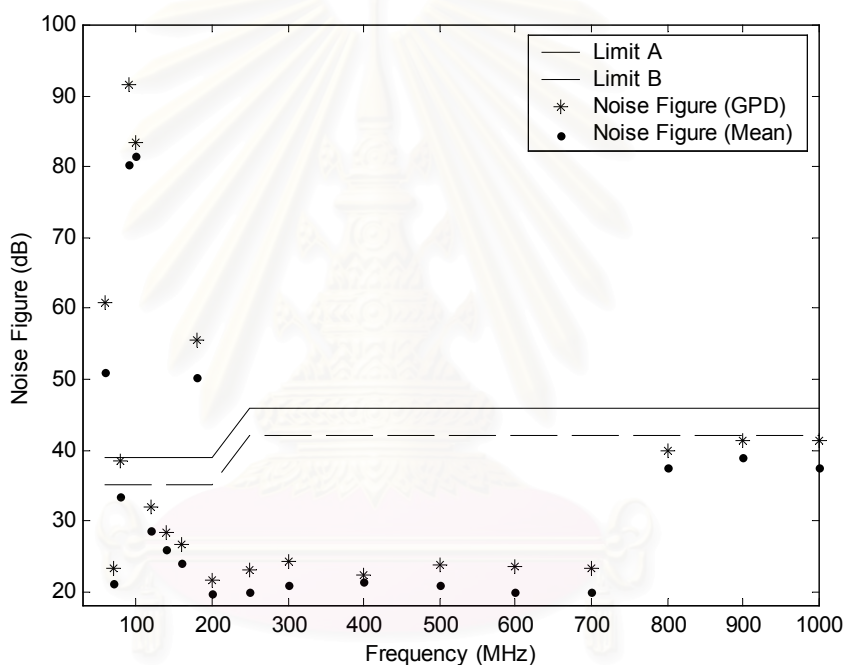
จากรูป 5.43 จะสังเกตเห็นว่าค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 60 MHz, 90 MHz, 100 MHz และ 180 MHz มีค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนสูงสุดขีดเกินกว่าค่าขีดจำกัดตัวเลขสัญญาณรบกวนทั้งประเภท A และประเภท B ที่มาตรฐานกำหนดจึงไม่สามารถใช้ความถี่ทั้งสองดังกล่าวในการทดสอบได้ ข้อสังเกตจากรูป 5.43 จะเห็นว่า ณ ความถี่ 80 MHz ค่าเฉลี่ยของตัวเลขสัญญาณรบกวนนั้นผ่านทั้งประเภท A และประเภท B แต่ถ้าหากพิจารณาค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสูงสุดขีดจะสังเกตเห็นว่าประเภท A ผ่านแต่ประเภท B นั้นไม่ผ่านมาตรฐาน ส่วนความถี่อื่นๆ นั้นมีค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนสูงสุดขีดเป็นไปข้อกำหนดในรายการอ้างอิงที่ [34] จึงสามารถใช้ความถี่

ดังกล่าวในการทดสอบได้แต่ต้องพิจารณาค่า NSA ประกอบด้วยว่าเป็นไปตามข้อกำหนดการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งหรือไม่

ตาราง 5.24 ผลการตรวจวัดและผลการคำนวณค่าปัจจัยของการแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป (GPD)

ความถี่ (MHz)	ค่าเฉลี่ย (dB)	ส่วนเบี่ยง เบนมาตร ฐาน (dB)	GPD			ประเภทขีดจำกัด ค่ารากเฉลี่ย กำลังสองของตัว เลขสัญญาณ รบกวน(dB) [34]	
			ξ	s	$VaR_{0.01}$	A	B
60	59.92	6.18	0.453	0.017	60.88	39.00	35.00
70	21.21	1.42	0.455	0.017	23.38		
80	33.31	0.29	0.869	0.016	38.49		
90	80.28	2.72	0.864	0.016	91.57		
100	81.46	3.69	0.453	0.017	83.34		
120	28.61	0.75	0.865	0.016	32.02		
140	25.93	1.28	0.452	0.017	28.27		
160	24.02	1.42	0.456	0.017	26.65		
180	50.19	4.43	0.454	0.017	55.56		
200	19.80	0.69	0.452	0.016	21.71		
250	19.96	0.74	0.857	0.017	23.17	46.00	42.00
300	20.90	0.73	0.087	0.016	24.30		
400	21.27	0.75	0.100	0.100	22.31		
500	20.78	0.64	0.859	0.016	23.69		
600	20.00	0.86	0.861	0.016	23.51		
700	19.92	0.78	0.861	0.016	23.41		
800	37.53	0.50	0.864	0.016	39.88		
900	38.92	0.58	0.852	0.017	41.43		
1000	37.42	0.47	1.000	0.015	41.25		

จากตาราง 5.24 เป็นผลการคำนวณค่าปัจจัยต่างๆ ของการแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป (GPD) โดยอาศัยการพิจารณาจากหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งมีผลการคำนวณด้วยกรรมวิธีการประมาณความควรจะเป็นล็อกสูงสุด (MLE) ดังกล่าวถึงในหัวข้อ 3.3.1 สมการ (3.39) เมื่อกำหนดให้ $\xi \neq 0$ และในทำนองเดียวกันกับการคำนวณค่าปัจจัยต่างๆ ของ GEV จะกำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นของการคำนวณค่าปัจจัยต่างๆ ด้วยกรรมวิธี MLE มีค่าเท่ากับ 95% จะได้ค่าปัจจัย ξ และ s เมื่อได้ค่าปัจจัยต่างๆ แล้วจะทำให้สามารถระบุค่าสุดขีดได้จากสมการ (3.34) แสดงได้ดังตาราง 5.24 ถ้าหากเปรียบเทียบค่าสุดขีดที่ได้จาก GPD กับค่าขีดจำกัดค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของตัวเลขสัญญาณรบกวน [34] จากตาราง 5.23 แสดงได้ดังรูป 5.44



รูป 5.44 เปรียบเทียบค่าสุดขีดที่ได้จากการแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป (GPD) กับค่าขีดจำกัดค่ารากเฉลี่ยกำลังสองของตัวเลขสัญญาณรบกวน [34]

จากรูป 5.44 เป็นผลการคำนวณค่าสุดขีดที่ได้จาก GPD จะสังเกตเห็นว่าได้ผลการคำนวณค่าสุดขีดเป็นไปในทางเดียวกับการคำนวณด้วย GEV ที่แสดงดังรูป 5.43 กล่าวคือ ค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสุด ณ ความถี่ 60 MHz, 80 MHz, 90 MHz, 100 MHz และ 180 MHz มีค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนเกินกว่าค่าขีดจำกัดตัวเลขสัญญาณรบกวนทั้งประเภท A และประเภท B ส่วนความถี่อื่นๆ นอกเหนือจากความถี่ดังกล่าวมาแล้วจะมีค่าตัวเลขสัญญาณรบกวนเป็นไปตามข้อกำหนดทั้งประเภท A และประเภท B

5.4 ผลการตรวจวัดค่า NSA ด้วยกรรมวิธีการกรองทางเวลา

การลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่ไม่พึงประสงค์ด้วยกรรมวิธีการกรองทางเวลาซึ่งการกรองนั้นจะกระทำในอาณาจักรทางเวลาได้โดยผ่านการกรองสัญญาณทางเวลา ความกว้างของประตูเวลาโดยเวลาเริ่มต้นของประตูเวลานั้นสามารถคำนวณได้จากเวลาที่คลื่นวิถีตรงเดินทางมาถึงสายอากาศรับ (t_1) ส่วนจุดสิ้นสุดของประตูเวลาสามารถคำนวณได้จากเวลาที่คลื่นสะท้อนจากระนาบดินเดินทางมาถึงสายอากาศรับ (t_2) ผลการตรวจวัดค่า NSA เมื่อใช้กรรมวิธีการกรองทางเวลาแสดงได้ดังตาราง 5.25

ตาราง 5.25 เปรียบเทียบผลการตรวจวัดค่า NSA เมื่อไม่ใช้กรรมวิธีการกรองทางเวลา และ เมื่อใช้กรรมวิธีการกรองทางเวลา

ความถี่ (MHz)	NSA		NSA (time domain gating)	
	โพลาริเซชัน แนวตั้ง	โพลาริเซชัน แนวราบ	โพลาริเซชัน แนวตั้ง	โพลาริเซชัน แนวราบ
55	11.13	13.87	12.16	14.52
150	6.02	4.10	5.54	3.23
230	3.04	2.38	2.18	1.71

จากตาราง 5.25 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อความถี่สูงขึ้นค่า NSA จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกรณีที่
ไม่ใช้กรรมวิธีการกรองทางเวลา ถ้าหากเทียบค่า NSA เมื่อใช้กรรมวิธีการกรองทางเวลากับค่าที่
กำหนดโดย CISPR 16-1 [2] จะสังเกตเห็นว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น กรรมวิธี
การกรองทางเวลานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นเมื่อใช้ในย่านความถี่ที่สูงขึ้น ถึงแม้กรรมวิธีการกรอง
ทางเวลาจะทำให้ค่า NSA นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดในมาตรฐาน CISPR 16-1 มากขึ้นแต่
มีขีดจำกัด ณ ความถี่ต่ำเนื่องจากที่ความถี่ต่ำนั้นสายอากาศมีแถบความถี่ใช้งานที่แคบกว่าเมื่อ
เทียบกับสายอากาศความถี่สูง

บทที่ 6

สรุปรงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปรงานวิจัย

การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากบริษัททางไฟฟ้าแบบเต็มรูปแบบตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ANSI C63.4 [1] และ CISPR 16-1 [2] ต้องการสถานทดสอบที่มีระนาบดินชนิดตัวนำสมบรูณ์ขนาดใหญ่ ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายในการจัดตั้งสถานทดสอบสูงมากจึงทำให้ต้นทุนของบริษัททางไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย งานวิจัยนี้จึงได้เสนอการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเพื่อการทดสอบเบื้องต้นโดยระนาบดินนั้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดตามที่มาตรฐานกำหนดซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการจัดตั้งสถานทดสอบลดลง การลดขนาดระนาบดินจะส่งผลกระทบต่อค่าสมรรถนะของสถานทดสอบแต่ถ้ายังอยู่ในขอบเขตที่มาตรฐานกำหนดก็สามารถใช้ระนาบดินขนาดนั้นในการจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งเบื้องต้นได้ โดยระนาบดินลดลง 52.92% ของระนาบดินที่กำหนดจากมาตรฐาน CISPR 16-1 [2] เมื่อระยะทดสอบเท่ากับ 3 เมตร ในทำนองเดียวกัน ระนาบดินลดลง 85.57% เมื่อระยะทดสอบเท่ากับ 10 เมตร และระนาบดินลดลง 95.19% เมื่อระยะทดสอบเท่ากับ 30 เมตร

ค่าระดับสัญญาณรบกวนเป็นปัจจัยที่บ่งชี้ว่าความถี่ใดสามารถทดสอบได้ ตามมาตรฐาน IEEE Std 473-1985 [21] ได้กำหนดว่าให้ค่าเฉลี่ยของระดับสัญญาณรบกวนเป็นตัวแทนของระดับสัญญาณรบกวนที่ความถี่นั้นๆ ถ้าหากในสถานทดสอบนั้นเกิดค่าระดับสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสูงสุดขึ้นก็จะทำให้ผลการทดสอบผิดพลาดได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เสนอการใช้ทฤษฎีค่าสูงสุดมาวิเคราะห์หาค่าสูงสุดซึ่งจะถือว่าเป็นตัวแทนของระดับสัญญาณรบกวนที่ความถี่นั้นๆ แล้วนำตัวแทนระดับสัญญาณรบกวนนี้ไปเปรียบเทียบกับระดับสัญญาณรบกวนที่กำหนดในมาตรฐาน CISPR 16-1 ว่าเป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่โดยตัวอย่างผลการตรวจวัดระดับของสัญญาณรบกวนจะใช้บริเวณสนามฟุตบอล คณะรัฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นกรณีตัวอย่าง ผลการตรวจวัดพบว่าความถี่ 60 MHz 80 MHz 90 MHz 100 MHz และ 180 MHz นั้นค่าระดับสัญญาณรบกวนเกินกว่าที่ค่ามาตรฐาน CISPR 16-1 กำหนด เนื่องจากความถี่ดังกล่าวเป็นความถี่ของสถานีวิทยุกระจายเสียงแบบ FM และสถานีวิทยุโทรทัศน์

การจัดตั้งสถานทดสอบแบบกลางแจ้งนั้นไม่ต้องทำให้มีสิ่งกีดขวางอยู่ในบริเวณทดสอบ แต่ถ้าหากในบริเวณสถานทดสอบมีสิ่งกีดขวางจะทำให้ค่าสมรรถนะของสถานทดสอบลดลง

ในงานวิจัยนี้จึงใช้กรรมวิธีประตุเวลาเพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณวิถีไม่พึงประสงค์ทำให้ค่าสมรรถนะของสถานทดสอบดีขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. การคำนวณค่าสมรรถนะของสถานทดสอบด้วยระเบียบวิธีผสมผสาน กล่าวคือระเบียบวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปซึ่งเป็นการประมาณคลื่นเป็นรังสีหรือประมาณให้จุดตกกระทบของคลื่นนั้นเป็นจุดแต่ระเบียบวิธีทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเอกรูปจะมีความแม่นยำเมื่อระนาบดินมีขนาดมากลึบเท่าของความยาวคลื่น ดังนั้นถ้าหากต้องการความแม่นยำในการคำนวณค่าสมรรถนะของสถานทดสอบสูงขึ้น ณ ความถี่ต่ำ ซึ่งจะต้องใช้ระเบียบวิธีย่านความถี่ต่ำเพียงอย่างเดียว โดยอาจใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์
2. การตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนนั้นควรจะตรวจวัดในเวลาที่ยาวขึ้น เพื่อจะได้ตัวแทนของค่าระดับสัญญาณรบกวนที่เป็นค่าสุดขีดที่ดีขึ้นและควรเพิ่มตำแหน่งในการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนเพื่อจะได้ตัวแทนของข้อมูลที่ครอบคลุมบริเวณสถานทดสอบมากขึ้น
3. เมื่อจัดตั้งระนาบดินที่เป็นตัวนำสมบูรณ์แล้วควรจะมีการตรวจวัดระดับสัญญาณรบกวนเนื่องจากระนาบดินนี้อาจทำให้ค่าระดับสัญญาณรบกวนเปลี่ยนแปลง
4. การลดผลกระทบจากคลื่นวิถีไม่พึงประสงค์ด้วยกรรมวิธีการกรองทางเวลานั้นมีขีดจำกัดอยู่ที่การใช้งาน ณ ย่านความถี่ต่ำการใช้รั้วสะท้อนคลื่นจึงเป็นทางออกหนึ่ง การใช้รั้วสะท้อนคลื่นถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนแปลงทิศทางของคลื่นวิถีไม่พึงประสงค์ได้แต่อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบด้วย ซึ่งผลกระทบต้องไม่ทำให้ค่าสมรรถนะของสถานทดสอบมีค่าเกินกว่าที่มาตรฐาน CISPR 16-1 [2] กำหนด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ANSI C63.4-2001. American National Standard Guide for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 KHz to 40 KHz. IEEE. New York: NY. 2001.
- [2] CISPR 16-1 (1993-08). Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus.
- [3] Albert A. Smith, JR., James B. Pate. Calculation of site Attenuation From Antenna Factor. IEEE Trans on EMC. EMC-24, 3, (August 1982): 301-316.
- [4] V. Prasad Kodali. Engineering Electromagnetic Compatibility- Principles, Measurements, Technologies. New York: IEEE, Inc. 2001.
- [5] ANSI C63.7-1988: American National Standard Guide for Construction of Open Area Test Site for Performing Radiated Emission Measurements. IEEE. New York: NY. 1988.
- [6] C.A. Balanis. Antenna Theory. 2nd Edition. USA: John Wiley & Son, 1997.
- [7] Albert A. Smith, JR. Standard-site Method for Determining Antenna Factor. IEEE Trans on EMC. EMC-24, 3, (August 1982): 316-322.
- [8] Melvin M. Weiner, Stephen P. Cruze, Cho-Chou Li, Warren J. Wilson. Monopole Elements on Circular Ground Plane. USA: Artech House, 1987.
- [9] Gary A. Thiele, Thomas H. Newhouse. A Hybrid Technique for Combining Moment Methods with the Geometrical Theory of Diffraction. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. AP-23, 1, (January 1975): 62-69.
- [10] R. Mittra. Numerical and Asymptotic Techniques in Electromagnetic. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975.
- [11] Gary A. Thiele. Overview of selected Hybrid Methods in Radiating System Analysis. IEEE Proceedings on Antennas and Propagation. 80, 1, (January 1992): 66-77.

- [12] C.A. Balanis. Advanced Engineering Electromagnetics. USA: John Wiley & Son, 1989.
- [13] D.H. Werner, P.L. Werner, J. K. Breakall. Some Computation Aspects of Pocklington's Electric Field Integral Equation for Thin Wire. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. AP-42, 4, (April 1994): 561-563.
- [14] F.A. Sikta, W.D. Burnside, Tai-Tseng Chu, L. Peters JR. First-Order Equivalent Current and Corner Diffraction Scattering from Flat Plate Structures. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. AP-31, 4, (July 1983): 584-589.
- [15] Xu Zhang, Naoki Inagaki, Nobuyoshin Kikuma. Raidation Pattern Analysis of Major Angle Corner Reflector Antenna by GTD Including corner Diffraction, IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium. AP-S 1, (24-28 June 1991): 10-13.
- [16] Philip J. Joseph, Albert D. Tyson, Walter D. Burnside. An Absorber Tip Diffraction Coefficient. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. EMC-36, 4, (November 1994): 372-379.
- [17] Asoke K. Bhattacharyya. High-Frequency Electromagnetic Techniques: Recent Advances and Applications. USA: John Wiley & Son, 1995.
- [18] D.A. McNamara, C.W.I. Pistorius, J.A.G. Malherbe. Introduction to The Uniform Geometrical Theory of Diffraction. London: Artech House, 1990.
- [19] ฉัตรชัย ไวยยาพัฒนกร. การวิเคราะห์สายอากาศ. กทม: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [20] Roger F. Harrington. Field Computation by Moment Methods. New York: IEEE, 1993.
- [21] IEEE Std 473-1985: IEEE Recommended Practice for an Electromagnetic Site Survey (10 kHz to 10 GHz). IEEE. New York: NY, 1985.
- [22] Enrique Castillo. Extreme Value Theory in Engineering. USA: Academic Press, 1988.

- [23] Evis Kellezi. Extreme Value Theory for Tail-Related Risk Measures. Computation Finance 2000 conference. London Business School, (31 May-2 June 2000)
- [24] John Neter, William Wasserman, G.A. Whitmore. Applied Statistic. 4nd Edition. USA: Prentice Hall, 1993.
- [25] Stuart Coles, Luis R. Pericchi, Scott Sisson. A Fully Probabilistic Approach to Extreme Rainfall Modeling. Journal of Hydrology. 273, 1-4, (25 March 2003): 35-50.
- [26] Alexander J. McNeil. Estimating the Tail of Loss Severity Distribution using Extreme Value Theory. ASTIN Bulletin. 27, (1997): 117-137.
- [27] Richard E. Mortensen. Random Signal and Systems. Singapore. John Wiley & Son, Inc. 1987.
- [28] Eric Parent, Jacques Bernier. Encoding Prior Experts Judgments to Improve Risk Analysis of Extreme Hydrological Events via POT Modeling. Journal of Hydrology. 283, 1-4, (10 December 2003): 1-18.
- [29] Stuart Coles, Edward Casson. Extreme Value Modelling of Hurricane Wind Speeds. Structural Safety. 20, 3, (1998): 283-296.
- [30] C.W. Anderson, G. Shi, H. V. Atkinson, C.M. Sellars. The Precision of Methods Using The Statistics of Extremes for The Estimation OF The Maximum Size of Inclusions in Clean Steels. Acta Materialia. 48, 17, (November 2000): 4235-4246.
- [31] มงคล เดชนครินทร์. คณิตศาสตร์วิศวกรรมไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 2. กทม: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538.
- [32] C. Waiyapattanakorn, C.G Parini. Theoretical and Experimental Investigation of Using Time Domain Gating in Antenna Pattern Measurement. IEE Conference on Antenna and Propagation. UK: 1993.
- [33] Gary E. Evans. Antenna Measurement Techniques. London: Artech House, Inc. 1990.
- [34] มอก. 1956-2542 บริษัทเทคโนโลยีสารสนเทศ: ขีดจำกัดสัญญาณรบกวนวิทยุ, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การขจัดภาวะเอกฐานของสมการอินทิเกรตของพ็อกลิงตัน

ถ้าหากสังเกตสมการอินทิเกรตของพ็อกลิงตันที่แสดงดังสมการ (2.58) จะเห็นว่าพจน์ที่ทำให้เกิดภาวะเอกฐานแสดงได้ดังสมการ (ก.1)

$$K(z, z') = \frac{e^{-j\beta R}}{R^5} \left[(2R^2 - 3a^2)(1 + j\beta R) + (\beta R a)^2 \right] \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อกระจาย $\frac{e^{-j\beta R}}{R^5}$ ของสมการ (ก.1) ด้วยอนุกรม Maclaurin ห้าพจน์แรกแสดงได้ดังสมการ (ก.2)

$$\begin{aligned} F(R) &= \frac{e^{-j\beta R}}{R^5} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-j\beta)^n}{n!} R^{n-5} \\ &= \frac{1}{R^5} - \frac{j\beta}{R^4} - \frac{\beta^2}{2R^3} + \frac{j\beta^3}{6R^2} + \frac{\beta^4}{24R} \end{aligned} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อแทนสมการ (ก.1) ลงในสมการ (ก.2) จะได้

$$\begin{aligned} K(z, z') &= \left[\frac{1}{R^5} - \frac{j\beta}{R^4} - \frac{\beta^2}{2R^3} + \frac{j\beta^3}{6R^2} + \frac{\beta^4}{24R} \right] \left[(2R^2 - 3a^2)(1 + j\beta R) + (\beta R a)^2 \right] \\ &= \frac{2}{R^3} + \frac{j2\beta}{R^2} - \frac{3a^2}{R^5} - \frac{j3\beta a^2}{R^4} + \frac{\beta^2 a^2}{R^3} + \frac{j2\beta}{R^2} + \frac{2\beta^2}{R} + \frac{j3\beta a^2}{R^4} - \frac{3\beta^2 a^2}{R^3} - \frac{j\beta^3 a^2}{R^2} \\ &\quad - \frac{\beta^2}{R} - \frac{j2\beta}{2} + \frac{3\beta^2 a^2}{2R^3} + \frac{j3\beta^3 a^2}{2R^2} - \frac{\beta^4 a^2}{2R} - \frac{j\beta^3}{3} - \frac{2\beta^4 R}{6} - \frac{j3\beta^3 a^2}{6R^2} + \frac{3\beta^4 a^2}{6R} \\ &\quad + \frac{j\beta^5 a^2}{6} + \frac{\beta^4 R}{12} + \frac{j2\beta^5 R^2}{24} - \frac{3\beta^4 a^2}{24R} - \frac{j3\beta^5 a^2}{24} + \frac{\beta^6 a^2 R}{24} \end{aligned} \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อเขียนสมการ (ก.4) ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายแสดงได้ดังสมการ (ก.5)

$$K(z, z') = \frac{-j2\beta^3}{3} - \frac{\beta^4 R}{4} + \frac{\beta^5}{24} [j(a^2 + 2R^2) + \beta a^2 R] \\ + \frac{\beta^2}{R} \left[1 - \frac{1}{8} (\beta a)^2 \right] + \frac{2}{R^3} \left[1 - \frac{1}{4} (\beta a)^2 \right] - \frac{3a^2}{R^5} \quad (\text{ก.5})$$

จากสมการ (ก.5) พจน์ย่อยที่ประกอบด้วย $1/R$, $1/R^3$ และ $1/R^5$ จะทำให้สมการอินทิเกรตของพ็อกลิงตันเกิดภาวะเอกฐานและกำหนดให้เท่ากับ

$$K_s(z, z') = \frac{\beta^2}{R} \left[1 - \frac{1}{8} (\beta a)^2 \right] + \frac{2}{R^3} \left[1 - \frac{1}{4} (\beta a)^2 \right] - \frac{3a^2}{R^5} \quad (\text{ก.5})$$

ดังนั้นสามารถจัดภาวะเอกฐานได้โดยอาศัยสมการ (ก.6)

$$K(z, z') = [K(z, z') - K_s(z, z')] + K_s(z, z') \quad (\text{ก.6})$$

อาศัยสมการ (ก.1) กับสมการ (ก.6) จะได้ว่า

$$K(z, z') - K_s(z, z') = \left\{ \frac{[e^{-j\beta R} + j\beta R - 1][(2R^2 - 3a^2)(1 + j\beta R) + (\beta R a)^2]}{R^5} \right. \\ \left. + \frac{[R^2/2][(2 + (\beta a/2)^2)(\beta R)^2 - (3 + j2\beta R)(\beta a)^2]}{R^5} \right\} \quad (\text{ก.7})$$

แทนสมการ (ก.5) และสมการ (ก.7) ลงในสมการ (ก.6) จะได้ $K(z, z')$ ที่จัดภาวะเอกฐานจากนั้นนำไปแทนในสมการอินทิเกรตของพ็อกลิงตันในสมการ (2.58) แล้วประมาณหาค่าคำตอบด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ซึ่งถ้าหากพิจารณาพจน์ที่เป็นภาวะเอกฐานจะได้ผลการอินทิเกรตแสดงดังสมการ (ก.8)

$$\int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} K_s dz' = \beta^2 \left\{ \left[1 - \frac{1}{8} (\beta a)^2 \right] \ln \left[\frac{\zeta_2 + R_2}{\zeta_1 + R_1} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\zeta_1}{R_1} - \frac{\zeta_2}{R_2} \right] + \left[\frac{1}{(\beta R_1)^2} \frac{\zeta_1}{R_1} - \frac{1}{(\beta R_2)^2} \frac{\zeta_2}{R_2} \right] \right\} \quad (\text{ก.8})$$

เมื่อ

$$\zeta_1 = (z_m - z_n) - \Delta/2 \quad (\text{ก.9})$$

$$\zeta_2 = (z_m - z_n) + \Delta/2 \quad (\text{ก.10})$$

$$R_1 = \sqrt{\zeta_1^2 + a^2} \quad (\text{ก.11})$$

$$R_2 = \sqrt{\zeta_2^2 + a^2} \quad (\text{ก.12})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การพิจารณาค่า Return Level

การพิจารณาค่า Return Level ได้โดยพิจารณาจากฟังก์ชันผกผันของการแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไป (GEV) จากสมการ (3.23) สามารถพิจารณาได้จากกรณีต่อไปนี้

กรณี $\xi \neq 0$

$$x = e^{-\left(1 + \xi \left(\frac{y - \bar{x}}{s}\right)\right)^{\frac{1}{\xi}}} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อเขียนอยู่ในรูปล็อกฐานธรรมชาติจะได้

$$\ln x = -\left(1 + \xi \left(\frac{y - \bar{x}}{s}\right)\right)^{\frac{1}{\xi}}$$

$$\left(\ln \frac{1}{x}\right)^{-\xi} = 1 + \xi \left(\frac{y - \bar{x}}{s}\right) \quad (\text{ข. 2})$$

จะได้

$$H^{-1} = y = x + \frac{\bar{x}}{s} \left(1 - \ln\left(\frac{1}{x}\right)^{\xi}\right) \quad (\text{ข. 3})$$

ดังนั้นค่า Return Level กรณี $\xi \neq 0$ จะได้

$$R^k \left(1 - \frac{1}{k}\right) = x + \frac{\bar{x}}{s} \left(1 - \left[-\ln\left(1 - \frac{1}{k}\right)\right]^{\xi}\right) \quad (\text{ข. 4})$$

กรณี $\xi = 0$

$$x = e^{-e^{-\left(\frac{y - \bar{x}}{s}\right)}} \quad (\text{ข. 5})$$

เมื่อเขียนอยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติจะได้

$$\ln x = -e^{-\left(\frac{y-\bar{x}}{s}\right)} \quad (\text{ข. 6})$$

$$\ln \ln \frac{1}{x} = -\left(\frac{y-\bar{x}}{s}\right) \quad (\text{ข. 7})$$

$$H^{-1} = y = \bar{x} - s \ln \ln \left(\frac{1}{x}\right) \quad (\text{ข. 8})$$

ดังนั้นค่า Return Level กรณี $\xi = 0$ จะได้

$$R^k \left(1 - \frac{1}{k}\right) = \bar{x} - s \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{k}\right)\right) \quad (\text{ข. 9})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การพิจารณาค่า VaR_p

การพิจารณาค่า VaR_p ได้โดยพิจารณาจากฟังก์ชันผกผันของการแจกแจงความถี่สะสมค่าสุดขีดทั่วไป (GPD) จากสมการ (3.28) สามารถพิจารณาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F(x) = (1 - F(u))F_u(x) + F(u) \quad (\text{ค. 1})$$

แทนค่า $F(u)$ ด้วยค่า $(n - N_u)/n$ เมื่อ n คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมด และ N_u คือจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่เกินค่าระดับอ้างอิง u แทนลงในสมการ (ค.1) แสดงได้ดังสมการ (ค. 2)

$$F(x) = 1 - \frac{N_u}{n} \left(1 + \frac{\xi}{s} (x - u)^{-\frac{1}{\xi}} \right) + \left(1 - \frac{N_u}{n} \right) \quad (\text{ค. 2})$$

เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายแสดงได้ดังสมการ (ค. 3)

$$F(x) = 1 - \frac{N_u}{n} \left(1 + \frac{\xi}{s} (x - u)^{-\frac{1}{\xi}} \right) \quad (\text{ค. 3})$$

เมื่อหา VaR_p จากฟังก์ชันผกผันในสมการ (ค. 3) แสดงขั้นตอนการพิจารณาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$x = 1 - \frac{N_u}{n} \left(1 + \frac{\xi}{s} (y - u)^{-\frac{1}{\xi}} \right) \quad (\text{ค. 4})$$

$$\frac{n}{N_u} (1 - x) = \left(1 + \frac{\xi}{s} (y - u)^{-\frac{1}{\xi}} \right) \quad (\text{ค. 5})$$

$$\frac{\xi}{s} (y - u) = \left(\frac{n}{N_u} (1 - x) \right)^{-\xi} - 1 \quad (\text{ค. 6})$$

จะได้

$$F^{-1} = y = u + \frac{s}{\xi} \left(\frac{n}{N_u} (1-x) \right)^{-\xi} - 1 \quad (\text{ค. 7})$$

อาศัยสมการ (3.1) ร่วมกับสมการ (ค. 7) จะได้ค่าสุดขีดแสดงดังสมการ (ค. 8)

$$VaR_p = u + \frac{s}{\xi} \left(\left(\frac{n}{N_U} p \right)^{-\xi} - 1 \right) \quad (\text{ค. 8})$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

**วิธีการพิจารณาเลือกค่าระดับอ้างอิงที่เหมาะสม
ของการแจกแจงความถี่สะสมพาเรโตทั่วไป (GPD)**

ระดับอ้างอิง u ที่เหมาะสมในทางทฤษฎีนั้นจะต้องมีค่าเข้าใกล้อนันต์เพราะว่ายิ่งค่าระดับอ้างอิงมีค่าสูงมากเข้าใกล้อนันต์มากเพียงใดการแจกแจงแบบพาเรโตทั่วไปจะสามารถพรรณนาการแจกแจงค่าส่วนเกินที่แทนด้วยตัวแปร y ในสมการ (3.28) ได้ดียิ่งขึ้น ถ้าหากในการพิจารณาค่าส่วนเกินนี้ให้มีค่าที่สูงจะทำให้จำนวนตัวอย่างที่มีค่ามากกว่าค่าระดับอ้างอิง (N_u) มีจำนวนลดลงทำให้มีจำนวนกลุ่มตัวอย่างไม่มากพอที่จะใช้คำนวณหาค่าปัจจัย s และ ξ ได้อย่างแม่นยำ แต่ถ้าหากกำหนดให้ยิ่งค่าระดับอ้างอิงมีค่าต่ำลงจะทำให้ได้ N_u เป็นจำนวนมากขึ้นอาจจะทำให้ผลการวิเคราะห์เกิดการเบี่ยงเบน (bias) เนื่องจากค่าส่วนเกิน y ที่ได้รับนั้นอาจจะขยายไปครอบคลุมค่าอื่นๆ ซึ่งไม่ได้เป็นค่าสุดขีด

การระบุค่าระดับอ้างอิง u สามารถกระทำได้โดย การวิเคราะห์กราฟของ Hill โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรกกำหนดค่าระดับอ้างอิงขึ้นมาค่าหนึ่งโดยจะมีค่ามากกว่าศูนย์ ($u_L > 0$) และมีค่าไม่สูงมากนัก แล้วจากนั้นนำค่า u_L ไประบุกลุ่มตัวอย่างที่มีค่าเกินกว่าค่าระดับอ้างอิง u_L จะแทนด้วย R ซึ่งจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ค่าระดับอ้างอิงนี้จะแทนด้วย N ตัว ขั้นตอนที่สองนำกลุ่มตัวอย่างนี้มาเรียงให้เป็นลำดับจากค่าน้อยไปหาค่ามากแสดงได้ดังสมการ (ง.1)

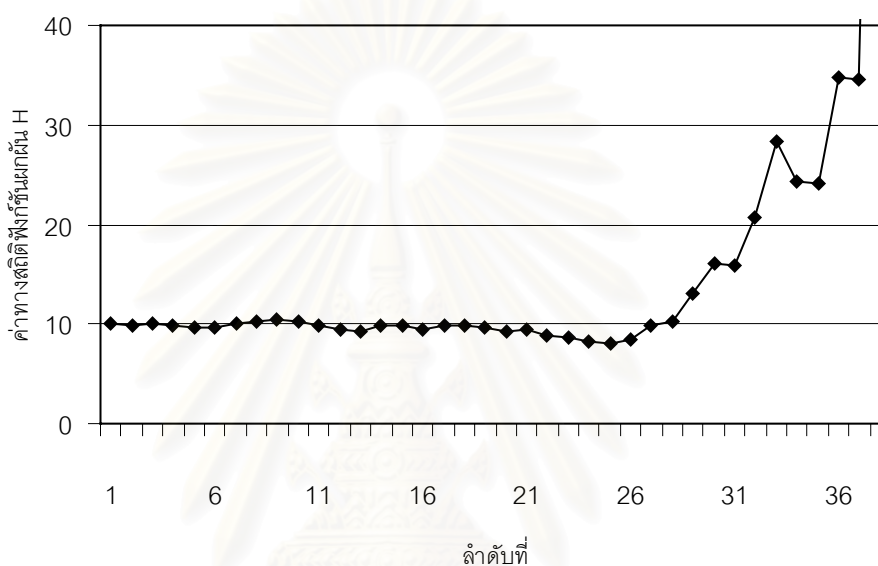
$$R_{(1)} \leq R_{(2)} \leq R_{(3)} \dots \leq R_{(N)} \quad (\text{ง. 1})$$

โดยที่ตัวแปร $R_{(1)}$ มีค่าน้อยที่สุดและตัวแปร $R_{(N)}$ มีค่ามากที่สุด จากนั้นขั้นตอนที่สามคำนวณค่าทางสถิติของ Hill เขียนแทนด้วย $H_{k,N}$ สามารถคำนวณแสดงได้ดังสมการ (ง. 2)

$$H_{k,N} = \left(\frac{1}{N-k-1} \sum_{j=k}^N \ln(R_j) \right) - \ln(R_k) \quad (\text{ง. 2})$$

โดย $k = 1, 2, 3, \dots, N-1$

ขั้นตอนที่สี่เขียนความสัมพันธ์คู่ลำดับระหว่างค่าลำดับที่ k กับค่าฟังก์ชันผกผันของค่าทางสถิติของ Hill ณ ลำดับที่ k เขียนแทนด้วย $(k, H_{k,N}^{-1})$ เรียกว่า กราฟของ Hill และขั้นตอนสุดท้าย เลือกค่าระดับอ้างอิงโดยดูจากกราฟความสัมพันธ์ของคู่ลำดับในขั้นตอนที่สี่ซึ่งมีค่าทรงตัวแสดงกราฟตัวอย่างของคู่ลำดับได้ดังรูป (ง. 1)



รูป ง. 1 สัมพันธ์คู่ลำดับระหว่างค่าลำดับที่ k กับ
ค่าฟังก์ชันผกผันของค่าทางสถิติของ Hill ณ ลำดับที่ k

จากรูป ง. 1 จะสังเกตเห็นว่ากราฟของ Hill นั้นจะเริ่มทรงตัวเมื่อค่า k อยู่ในลำดับที่ 14 ซึ่งตรงกับค่าสุดขีดในลำดับที่ 14 ซึ่งมีค่าสุดขีดเท่ากับ 9.85 โดยจะกำหนดให้ค่าสุดขีด ณ ตำแหน่งที่ 14 นี้เท่ากับค่าระดับอ้างอิง (u) คือมีค่าเท่ากับ 9.85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายคทา สุวรรณวัฒน์ เกิดวันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2521 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสาขาวิชาวิศวกรรม โทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรม ไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย