

แบบจำลองช่องสัญญาณภายในอาคารโดยใช้วิธี FDTD

INDOOR CHANNEL MODELING USING FDTD METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 46554
วัน, เดือน, ปี- 4 เม.ย. 2546

พ.ศ.2545

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบเสนอปริญญาบัตร

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบจำลองช่องสัญญาณภายในอาคาร โดยใช้วิธี FDTD

นักศึกษา

นายวีระพงศ์ จำรัสพันธุ์

รหัสประจำตัว 43015888

นายศักดิ์ชัย หนูคล้าย

รหัสประจำตัว 43015890

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

อ.พิชญ สุพรรณกุล

ระดับการศึกษา

ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม

ภาควิชา

วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา

2545

ปริญญาบัตรฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

(อ.พิชญ สุพรรณกุล)

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	แบบจำลองช่องสัญญาณภายในอาคาร โดยใช้วิธี FDTD
นักศึกษา	นายวีระพงศ์ จรัสพันธ์ รหัสประจำตัว 43015888 นายศักดิ์ชัย หนูคล้าย รหัสประจำตัว 43015890
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	อ.พิชญ สุพรรณกุล
ระดับการศึกษา	ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีโทรคมนาคม
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2545

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ โดยใช้วิธี FDTD ใน 2 มิติ โดยได้แบ่งการวิเคราะห์คลื่นวิทยุให้มีการแพร่กระจายภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันสามแบบคือ สภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่าง สภาพแวดล้อมภายในห้องที่ว่างเปล่า และสภาพแวดล้อมภายในห้องที่มีสิ่งกีดขวาง ได้แสดงให้เห็นถึงการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าในชั้นเวลาตัวอย่าง ได้แสดงการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าตามเส้นทางที่กำหนด ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น และฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz ได้แสดงโปรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทางที่กำหนด ท้ายสุดได้คำนวณหาการหน่วงการเข้าถึงเฉลี่ยการแผ่การหน่วง rms และ โคอีเรนซ์แบนด์วิดซ์จากโปรไฟล์การหน่วงกำลัง

Thesis Title	Indoor Channel Modeling Using FDTD Method	
Students	Mr. Werapong Jumruspunth	Student ID. 43015888
	Mr. Sakchai Nooklay	Student ID. 43015890
Advisor	Pichaya Supanakoon	
Course	Bachelor of Industrial Technology in Telecommunication	
Department	Information Engineering	
Year	2002	



ABSTRACT

This thesis presents the analysis of indoor radiowave propagation by using the 2-dimensional FDTD method. The characteristics of radio wave propagation in the free space, the empty room and the room with the obstructive objects are considered. The electric field radiation at the sample time steps is illustrated. The electric field distribution along the specific paths, the probability density and the probability distribution functions at 900 and 1800 MHz are shown. The power delay profiles along the specific paths are demonstrated. Moreover, the mean excess delay, the rms delay spread and the coherent bandwidth are evaluated from the power delay profile.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจทานปริญญาานิพนธ์นี้จาก อาจารย์พิชญ สุพรรณกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ผู้ทำปริญญาานิพนธ์รู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์มนต์ชัย แซ่มซ้อย ที่ช่วยให้คำแนะนำ รวมทั้งเป็นที่ปรึกษา และช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์ ที่ให้คำแนะนำแนวทางการทำปริญญาานิพนธ์ รวมทั้งได้ให้ข้อคิดในการดำเนินชีวิต

ขอขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำงานกับผู้ทำปริญญาานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำ ให้กำลังใจ และช่วยตรวจทานปริญญาานิพนธ์นี้จนสำเร็จสมบูรณ์

และสุดท้ายขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่ได้ให้การสนับสนุนในการทำปริญญาานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์นี้ ทางผู้ทำปริญญาานิพนธ์ขอบพระคุณให้แต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วีระพงศ์ จำรัสพันธุ์
ศักดิ์ชัย หนูกล้า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 แนวความคิดของอี.....	3
2.3 สมการผลต่างสืบเนื่อง.....	7
2.4 เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข.....	9
2.5 เงื่อนไขขอบเขตการคูณขั้นแมตซ์สมบรูณ์.....	13
2.6 การขึ้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล.....	16
2.7 การส่งผ่านคลื่นสัญญาณ.....	17
2.8 การสูญเสียกำลัง (Path Loss).....	19
2.9 ผลกระทบชาโดว์อิง (Shadowing).....	20
2.10 ปัญหาของมัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath fading).....	20
2.11 โปรไฟล์การหน่วงกำลัง (Power Delay Profile).....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.12 ทฤษฎีทางสถิติและความน่าจะเป็น	22
2.13 ตัวแปรสุ่ม.....	22
2.14 ค่าเฉลี่ย.....	23
2.15 ความแปรปรวน.....	23
2.16 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	23
2.17 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น.....	24
2.18 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น.....	25
2.19 การแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม.....	25
2.20 การแจกแจงแบบเรย์ลี.....	26
2.21 การแจกแจงแบบริเชียน.....	27
2.22 สรุป.....	27
บทที่ 3 การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	28
3.1 บทนำ.....	28
3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	28
3.3 ขั้นตอนการหาโปรไฟล์การหน่วงกำลัง.....	32
3.4 ขั้นตอนการหาสัญญาณกำลังงานที่รับได้ที่ความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz...33	33
3.5 ขั้นตอนการหาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น.....	34
3.6 ขั้นตอนการหาฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น.....	35
3.7 สรุป.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	36
4.1 บทนำ.....	36
4.2 แหล่งกำเนิดแรงดันที่ใช้ในการทดลอง.....	36
4.3 ผลการทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในสภาพแวดล้อม ที่เป็นอากาศว่าง.....	37
4.4 ผลการทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในห้องที่ว่างเปล่า.....	50
4.5 ผลการทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในห้องที่มีสิ่งกีดขวาง.....	63
4.6 แบบจำลองทางสถิติของสัญญาณ.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ตำแหน่งของส่วนประกอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กใน หน่วยเซลล์ลูกบาศก์ตามแนวความคิดของยี.....5
2.2	แบบแผนชั้นเวลาตีพรอดตามแนวความคิดของยี สำหรับการแพร่กระจาย ของคลื่นในหนึ่งมิติ.....6
2.3	โครงสร้างของกริด FDTD สองมิติที่มี PML ABC.....15
2.4	ตัวอย่างแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณที่รับได้ เนื่องจากผลกระทบของมัลติพาทเฟดดิ้งและซาโคว์อิ่ง.....19
2.5	ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนกับพื้นผิวเรียบต่อสัญญาณที่รับได้.....20
2.6	ตัวอย่างการหน่วงกำลังของคลื่นภายในอาคาร.....22
2.7	การแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม.....26
3.1	ขั้นตอนการทำแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....29
3.2	ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุโดยใช้วิธี FDTD31
3.3	ขั้นตอนการหาความเข้มสนามไฟฟ้าของสัญญาณที่รับได้.....33
3.4	ขั้นตอนการหาโปรไฟล์การหน่วงกำลัง.....34
4.1	แหล่งกำเนิดแรงดันแหล่งกำเนิดแรงดันในสมการ (3.4) ในโดเมนเวลา.....36
4.2	แหล่งกำเนิดแรงดันแหล่งกำเนิดแรงดันในสมการ (3.4) ในโดเมนความถี่.....37
4.3	โดเมนการคำนวณที่ใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ภายในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่าง.....38
4.4	การแพร่กระจายของสนาม Ez ที่ระนาบ xy ตามชั้นเวลา.....40
4.5	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'.....40
4.6	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'.....41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'.....41
4.8	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'.....42
4.9	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'.....42
4.10	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'.....43
4.11	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'.....43
4.12	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'.....44
4.13	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'.....44
4.14	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'.....45
4.15	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'.....45
4.16	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'.....46
4.17	โปรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง AA'.....46
4.18	โปรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง BB'.....47
4.19	พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay) ตามเส้นทาง AA'.....47
4.20	พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay) ตามเส้นทาง BB'.....48
4.21	พารามิเตอร์การแผ่ การหน่วง rms (rms delay spread) ตามเส้นทาง AA'.....48
4.22	พารามิเตอร์การแผ่ การหน่วง rms (rms delay spread) ตามเส้นทาง BB'.....49
4.23	ค่าโคฮีเรนต์ แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง AA'.....49
4.24	ค่าโคฮีเรนต์ แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง BB'.....50
4.25	โดเมนการคำนวณที่ใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ภายในห้องที่ว่างเปล่า.....51
4.26	การแพร่กระจายของสนาม E_z ที่ระนาบ xy ตามชั้นเวลา.....53
4.27	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'.....53
4.28	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'.....54
4.29	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'.....54
4.30	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'.....55
4.31	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'.....55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'.....56
4.33	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'.....56
4.34	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'.....57
4.35	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'.....57
4.36	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'.....58
4.37	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'.....58
4.38	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'.....59
4.39	โพรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง AA'.....59
4.40	โพรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง BB'.....60
4.41	พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay) ตามเส้นทาง AA'.....60
4.42	พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay) ตามเส้นทาง BB'.....61
4.43	พารามิเตอร์การแผ่ การหน่วง rms (rms delay spread) ตามเส้นทาง AA'.....61
4.44	พารามิเตอร์การแผ่ การหน่วง rms (rms delay spread) ตามเส้นทาง BB'.....62
4.45	ค่าโคฮีเรนต์ แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง AA'.....62
4.46	ค่าโคฮีเรนต์ แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง BB'.....63
4.47	โดเมนการคำนวณที่ใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ภายในห้องที่มีสิ่งกีดขวาง.....64
4.48	การแพร่กระจายของสนาม E_z ที่ระนาบ xy ตามช่วงเวลา.....66
4.49	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'.....66
4.50	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'..... 67
4.51	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'.....67
4.52	สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB.....68
4.53	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'.....68
4.54	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'.....69
4.55	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'.....69
4.56	ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'.....70
4.57	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'.....70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.58 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'.....	71
4.59 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'.....	71
4.60 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'.....	72
4.61 โพรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง AA'.....	72
4.62 โพรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง BB'.....	73
4.63 พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay) ตามเส้นทาง AA'.....	73
4.64 พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay) ตามเส้นทาง BB'.....	74
4.65 พารามิเตอร์การแผ่ การหน่วง rms (rms delay spread) ตามเส้นทาง AA'.....	74
4.66 พารามิเตอร์การแผ่ การหน่วง rms (rms delay spread) ตามเส้นทาง BB'.....	75
4.67 ค่าโคฮีเรนซ์ แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง AA'.....	75
4.68 ค่าโคฮีเรนซ์ แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง BB'.....	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแบบจำลองทางสถิติของสัญญาณในสภาพแวดล้อมตามแบบจำลองโดเมน.....	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืน (Absorbing Boundary Condition)	ABC
ผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงจำกัด โดเมนเวลา (Finite Difference Time Domain)	FDTD
ชั้นแมตช์สมบูรณ์ (Perfectly Matched Layer)	PML
สนามไฟฟ้าตัดขวาง(Transverse Electric)	TE
สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวาง (Transverse Magnetic)	TM
เดซิเบล (Decibel)	<i>db</i>
เฮิรตซ์(Hertz)	<i>Hz</i>
เมตร(Meter)	<i>m</i>
โวลต์(Volt)	<i>V</i>
วัตต์(Watt)	<i>W</i>
ความเร็วแสง(Velocity of light), $c = f\lambda = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \approx 3 \times 10^8, m/s$	<i>c</i>
เวกเตอร์สนามไฟฟ้า(Electric field location), Vm^{-1}	\vec{E}
สนามไฟฟ้าในทิศทาง z (Electric field in z -direction), Vm^{-1}	E_z
ความถี่(Frequency), <i>Hz</i>	<i>f</i>
เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก(Magnetic field vector), Am^{-1}	\vec{H}
สนามแม่เหล็กในทิศทาง x (Magnetic field in x -direction), Am^{-1}	H_x
สนามแม่เหล็กในทิศทาง y (Magnetic field in y -direction), Am^{-1}	H_y
จุดกริดในทิศทาง x (Grid point in x -direction)	<i>i</i>
จุดกริดในทิศทาง y (Grid point in y -direction)	<i>j</i>
หมายเลขคลื่นในอวกาศว่าง(Wave number in free space), $k = 2\pi/\lambda, rad.m^{-1}$	<i>k</i>
หมายเลขคลื่นเชิงตัวเลขในทิศทาง x (Numeric wave number in x -direction), $rad.m^{-1}$	\tilde{k}_x
หมายเลขคลื่นเชิงตัวเลขในทิศทาง y (Numeric wave number in y -direction), $rad.m^{-1}$	\tilde{k}_y
อันดับการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียใน PML (Order of graded PML loss)	<i>N</i>
ขั้นเวลา (Time step)	<i>n</i>
ตัวร่วมการสะท้อนที่มุมศูนย์องศา (Reflection factor at zero degree)	$R(0)$
เวลา(Time), <i>s</i>	<i>t</i>
แหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage source), <i>V</i>	V_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

แรงดัน(Voltage), V	v
เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง x (Unit vector in x -direction)	\hat{x}
เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง y (Unit vector in y -direction)	\hat{y}
ความกว้างทั้งหมดของ (PML thickness), m	δ
ความลึกผิว(Skin dept), $\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$, (m)	δ
สภาพยอม(Permittivity), $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$, Fm^{-1}	ϵ
สภาพยอมอากาศว่าง(Permittivity of free space), $\epsilon_0 \approx 1/36\pi \times 10^{-9}$, Fm^{-1}	ϵ_0
สภาพยอมสัมพัทธ์(Relative permittivity), ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)	ϵ_r
ความยาวคลื่น(Wave length), m	λ
ความซึมซาบได้ (Permeability), $\mu = \mu_0\mu_r$, Hm^{-1}	μ
ความซึมซาบได้ของอากาศว่าง(Permeability of free space), $\mu_0 \approx 400\pi \times 10^{-9}$, Hm^{-1}	μ_0
ความซึมซาบสัมพัทธ์ (Relative permeability)	μ_r
ความกว้างของ PML ในแต่ละชั้น (Depth within each PML), m	ρ
สภาพต้านทานแม่เหล็กสมมูล (Equivalent magnetic receptivity), Ωm^{-1}	ρ'
สภาพนำ (Conductivity), $\Omega^{-1}m^{-1}$	σ
สภาพนำในทิศทาง x (Conductivity in x -direction), $\Omega^{-1}m^{-1}$	σ_x
สภาพนำในทิศทาง y (Conductivity in y -direction), $\Omega^{-1}m^{-1}$	σ_y
ความสูญเสียทางแม่เหล็กในทิศทาง x (Magnetic in x -direction), Ωm^{-1}	σ_x^*
ความสูญเสียทางแม่เหล็กในทิศทาง y (Magnetic in y -direction), Ωm^{-1}	σ_y^*
การเพิ่มขึ้นในทิศทาง x (x -direction increment), m	Δx
การเพิ่มขึ้นในทิศทาง y (y -direction increment), m	Δy
การเพิ่มขึ้นของเวลา (Time increment), s	Δt
ค่าเฉพาะ (Eigenvalue)	Λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในปัจจุบันการสื่อสารในย่านความถี่วิทยุที่ใช้ภายในอาคาร ได้มีความสำคัญมากขึ้น ไม่ว่าจะ เป็นระบบโครงข่ายโทรศัพท์ที่มีการติดตั้งไมโครเซลล์ภายในอาคาร เพื่อขจัดความบกพร่องของ สัญญาณหรือการใช้เทคโนโลยีบลูทูธ (Bluetooth) เพื่อสร้างเครือข่ายคอมพิวเตอร์ภายในสำนักงาน ที่มีคอมพิวเตอร์หลายเครื่อง แต่มีความต้องการใช้อุปกรณ์บางอย่างร่วมกัน เช่น ปริ้นเตอร์ หรือที่ เรียกว่า LAN ไร้สาย (WLAN)

เพื่อให้การสื่อสารนั้นมีประสิทธิภาพจึงได้มีการทำวิจัยหาแบบจำลองของการแพร่กระจาย คลื่นวิทยุเป็นอย่างมาก เนื่องจากข้อมูลที่ได้จะเป็นตัวกำหนดอัตราข้อมูล ที่เป็นไปได้มากที่สุดของ ระบบที่อยู่ในสถานะแวดล้อมนั้น ๆ รวมทั้งใช้กำหนดเทคนิคโคเวอเรจซีตีและการปรับเท่าที่เหมาะสม และใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบชนิดต่าง ๆ ได้โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเชิงตัวเลข นำ มาเขียนเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ นั้น สามารถทำได้ โดยการใช่วิธีเชิงตัวเลขเพื่อช่วยให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้น และได้เลือกใช่วิธี FDTD (Finite Difference Time Domain) มาวิเคราะห์ เนื่องจากวิธี FDTD เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์การแพร่ กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน โดเมนเวลา โดยมีพื้นฐานมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ของแมกซ์ เวลล์ มีขั้นตอนวิเคราะห์ที่มีระเบียบแบบแผนสามารถนำมาเขียนเป็น โปรแกรมได้ง่าย ใช้เวลาใน การคำนวณน้อย และมีความเที่ยงตรงเป็นที่ยอมรับ

ปริญญานิพนธ์นี้เสนอการศึกษาวิธี FDTD และทำแบบจำลองการแพร่กระจายของคลื่น วิทยุภายในอาคารตามสถานะแวดล้อม โดยใช้วิธี FDTD 2 มิติ และนำมาทำแบบจำลองทางสถิติ รวมทั้งหาโปรไฟล์ ของการหน่วงกำลัง (Power Delay Profile)

1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

ศึกษาวิธี FDTD และ รูปแบบของ PML แล้ววิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ เมื่อกระตุ้นด้วยสัญญาณแก๊สเซียนในชั้นเวลาต่าง ๆ โดยได้กำหนดสภาวะแวดล้อมในบริเวณที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง ภายในห้องที่ว่างเปล่า และภายในห้องที่มีสิ่งกีดขวาง หารูปแบบการแพร่กระจายของคลื่นที่ชั้นเวลาต่าง ๆ ทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองแบบ channel โดยใช้โปรไฟล์การหน่วงกำลัง คำนวณหาพารามิเตอร์ การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay, $\bar{\tau}$) และ การแผ่การหน่วง rms (rms delay spread, σ_{τ}) หาคุณลักษณะการจางหายของคลื่นตามเส้นทางที่กำหนดไว้แล้วทำแบบจำลองทางสถิติ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีวิธี FDTD และรูปแบบของ PML ABC
2. นำทฤษฎีที่ศึกษามาวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์
3. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณของคอมพิวเตอร์
4. แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ผลการทดลองซึ่งประกอบไปด้วย รูปแสดงการแพร่กระจายของสนาม E_z ที่ชั้นเวลาต่าง ๆ กัน กำลังงานของสัญญาณที่รับได้ตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ โปรไฟล์การหน่วงกำลัง และทำแบบจำลองทางสถิติ ซึ่งแสดงด้วย ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น และฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น
5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำไปใช้ออกแบบช่องสัญญาณ ตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งไมโครเซลล์ของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่เหมาะสม รวมถึงระบบ LAN ไร้สาย ภายในอาคาร หรือสำนักงาน
2. สามารถนำหลักการและวิธี FDTD ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในงานทางด้านสื่อสารโทรคมนาคมต่าง ๆ ได้

บทที่ 2

วิธีผลต่างสลับเนื่องจำกัดในโดเมนของเวลา

2.1 บทนำ

วิธีผลต่างสลับเนื่องจำกัดในโดเมนเวลา (FDTD) เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้หาผลเฉลยทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถึงแม้ว่าวิธีนี้ได้เกิดขึ้นมาตั้งแต่ 30 กว่าปีมาแล้วก็ตาม แต่ก็ยังนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

วิธี FDTD ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดยยี่ (Yee) ในปี ค.ศ. 1966 ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยืดหยุ่นและสะดวกในการแก้ปัญหามุมของสมการแมกซ์เวลล์โดยทำให้อยู่ในรูปแบบดิครีต (Discrete) โดยยี่ได้ใช้กริดสนามไฟฟ้า (\vec{E}) และกริดสนามแม่เหล็ก (\vec{H}) เพื่อทำการปรับปรุงสมการสนามที่อยู่ในโดเมนการคำนวณให้อยู่ในเทอมของสนามในโดเมนเวลาที่ผ่านมา การปรับปรุงสมการนี้จะใช้แบบแผนลีฟรอก (Leap frog) โดยที่จะทำการปรับปรุงสนาม \vec{E} และ \vec{H} สลับกันในโดเมนเวลา

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวความคิดของยี่ ซึ่งเป็นแนวความคิดพื้นฐานของวิธี FDTD ต่อมาจะแสดงที่มาของสมการผลต่างสลับเนื่องในสองมิติ และเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลขของสมการผลต่างสลับเนื่องนี้ หลังจากนั้นจะกล่าวถึงเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนแบบชั้นเมตซ์สมบรูณ์ (PML ABC) ซึ่งเป็นรูปแบบของเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืน จากหลักการและเงื่อนไขเหล่านี้ได้ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาในปริภูมิสามมิติ และการทำขั้นเวลาเอกซ์โพเนนเชียลสำหรับใช้กับเงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนแบบชั้นเมตซ์สมบรูณ์

2.2 แนวความคิดของยี่

ยี่ได้กำหนดสมการผลต่างสลับเนื่องจำกัดมาจากระบบสมการเคิร์ลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของแมกซ์เวลล์ (2.1) สำหรับในกรณีของวัสดุที่ไม่มีประจุอิสระ

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} - \frac{\rho'}{\mu} \vec{H} \quad (2.1a)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{H} - \frac{\sigma}{\epsilon} \vec{E} \quad (2.1b)$$

โดยที่ \vec{H} คือ เวกเตอร์สนามแม่เหล็ก (Magnetic field vector : Am^{-1}) \vec{E} คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้า (Electric field vector: Vm^{-1}) μ คือ ความซาบซึมได้ (Permeability: Hm^{-1}) ϵ คือ สภาพยอม (Permittivity: Fm^{-1}) ρ' คือ สภาพต้านทานทางแม่เหล็กสมมูล (Equivalent magnetic resistivity: Ωm^{-1}) และ σ คือ สภาพนำ (Conductivity: Ωm^{-1}) ซึ่งสามารถกระจายได้เป็น

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} + \rho' H_x \right) \quad (2.2a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} + \rho' H_y \right) \quad (2.2b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (2.3)$$

แนวความคิดพื้นฐานของยี่ซึ่งเป็นแนวความคิดพื้นฐานของวิธี FDTD มีดังต่อไปนี้

1. ทำการแก้ปัญหาทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในโดเมนเวลา และสเปซโดยใช้สมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์แทนที่จะแก้ปัญหาสถาปัตยกรรมไฟฟ้าอย่างเดียว (หรือสนามแม่เหล็กอย่างเดียว) โดยใช้สมการคลื่น

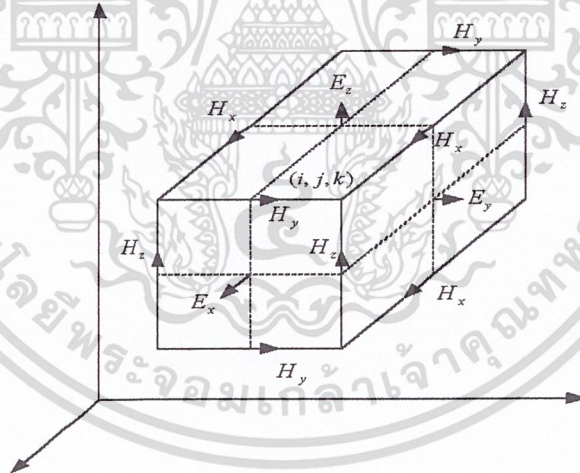
- ซึ่งจะเหมือนกับสูตรสมการอินทิกรัลสนามรวมในวิธีโมเมนต์ เมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทั้ง \vec{E} และ \vec{H} บนพื้นผิวของโครงสร้างวัสดุ
- การใช้ข้อมูลทั้ง \vec{E} และ \vec{H} จะได้ผลเฉลยที่ดีกว่าใช้สนามชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียว (เช่น จะมีความเที่ยงตรงสำหรับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่) คุณสมบัติวัสดุทางไฟฟ้าและแม่เหล็กสามารถกำหนดได้โดยทำเป็นแบบจำลอง
- สามารถทำแบบจำลองที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละสนามได้ ถ้ามีทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น เช่น สนาม \vec{H} ที่สัมผัสบริเวณขอบและมุม, สนาม \vec{H} ที่ล้อมรอบเส้นลวด, สนาม \vec{E} ในแนวรัศมีที่อยู่บริเวณจุด, ขอบ และเส้นลวด

2. ส่วนประกอบของสนาม \vec{E} และ \vec{H} ในสเปซสามมิติ ทุกส่วนประกอบของสนาม \vec{E} จะถูกล้อมรอบด้วยสี่ส่วนประกอบของสนาม \vec{H} และทุกส่วนประกอบของสนาม \vec{H} จะถูกล้อมรอบด้วยสี่ส่วนประกอบของสนาม \vec{E} ดังแสดงในรูปที่ 2.1

- จะได้รูปอย่างง่ายของสเปซสามมิติ ซึ่งประกอบไปด้วยแถวลำดับที่เชื่อมต่อกันตามกฎคอนทัวร์ของฟาราเดย์ และกฎคอนทัวร์ของแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลของนิพจน์ผลต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับอนุพันธ์สเปซที่ใช้ในตัวดำเนินการเกร็ดจะ
เป็นผลต่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบตรงกลาง
- ในกรณีที่มีความต่อเนื่องของสนามสัมผัส \vec{E} และ \vec{H} ข้ามรอยต่อของวัสดุที่มีชนิด
ต่างกัน และรอยต่อขนานกับแกนพิคซ์ของกริด จะได้ผลเฉลยของสนามแม่เหล็กไฟ
ฟ้าโดยไม่ต้องทำการแมตซ์เงื่อนไขขอบเขตสนามที่รอยต่อ โดยเพียงทำการกำหนด
สภาพยอมและความขาบซึมได้ของวัสดุที่แต่ละตำแหน่งส่วนประกอบสนาม ถ้าเป็น
เม็ช (Mesh) ทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากของยี่ จะมีลักษณะการประมาณพื้นผิวและรูปทรง
ภายในของโครงสร้างที่สนใจเป็นแบบขั้นบันได โดยกำหนดความละเอียดของสเปซ
จากขนาดของหน่วยเซลล์แลตทิซ (Lattice)
- ตำแหน่งส่วนประกอบสนาม \vec{E} และ \vec{H} ในกริดของยี่ และการดำเนินการผลต่างสี่
เหลี่ยมแบบตรงกลางบนส่วนประกอบเหล่านี้จะเป็นไปตามกฎของเกาส์



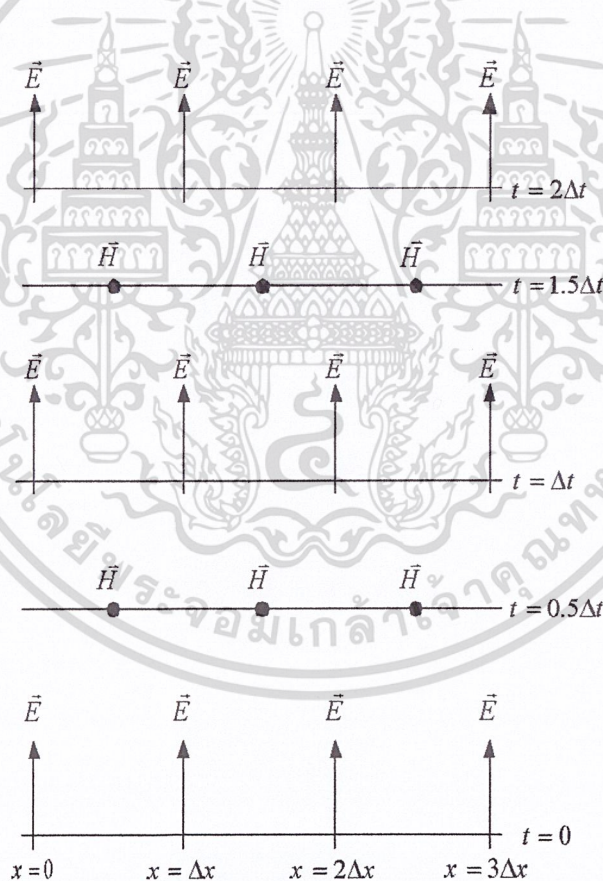
รูป 2.1 ตำแหน่งของส่วนประกอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในหน่วย เซลล์ลูก
บาศก์ตามแนวความคิดของยี่

3. ส่วนประกอบของสนาม \vec{E} และ \vec{H} ในเวลาจะอยู่ในเทอมของลิฟฟรอก การคำนวณ
สนาม \vec{E} ทั้งหมดในสเปซสามมิติเสร็จสมบูรณ์และถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำที่จุดเวลาเฉพาะโดย
ใช้ข้อมูลของสนาม \vec{H} ที่เก็บไว้แล้วในหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ ต่อมา การคำนวณสนาม \vec{H}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดในแบบจำลองสเปซเสรีจสมบูรณ์และถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำ โดยใช้ข้อมูลของสนาม \vec{E} ที่ฟังก์ชันคำนวณมาได้ การกระทำแบบนี้จะเกิดขึ้นอีกครั้ง โดยคำนวณส่วนประกอบของสนาม \vec{E} จากสนาม \vec{H} ที่ฟังก์ชันได้มา ซึ่งกระบวนการนี้จะกระทำต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะถึงขั้นเวลาตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

- กระบวนการทำขั้นเวลาลิฟรอกนี้จะมีกระบวนการที่แน่นอน จึงสามารถหลีกเลี่ยงการแก้สมการสองสมการพร้อมกันและการหาเมตริกผกผันได้อย่างสมบูรณ์
- ผลของนิพจน์ผลต่างสี่เหลี่ยมเนื่องจำกัดสำหรับอนุพันธ์เวลาที่ใช้ในสมการเคิร์ลจะเป็นผลต่างสี่เหลี่ยมเนื่องจำกัดแบบตรงกลาง
- ผลของความคืบหน้าเวลาจะไม่เป็นการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากแบบแผนคลื่นเชิงตัวเลขจะแพร่กระจายในเม็ทริกที่สร้างขึ้น โดยมีลักษณะที่เหมือนจริง



รูปที่ 2.2 แบบแผนขั้นเวลาลิฟรอกตามแนวความคิดของปีสำหรับการแพร่กระจายของคลื่นในหนึ่งมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สมการผลต่างสี่เหลี่ยม

เพื่อความสะดวก จะกำหนดสัญลักษณ์สำหรับจุดสเปซและฟังก์ชันของสเปซและเวลา โดยที่กำหนดให้สเปซในระบบพิกัดฉากสองมิติมีรูปแบบเป็น

$$(i, j) = (i\Delta x, j\Delta y) \quad (2.4a)$$

เมื่อ Δx และ Δy เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นในแลตทิซสเปซ (Lattice space) ในทิศทางพิกัด x และ y ตามลำดับ ส่วน i และ j เป็นจำนวนเต็ม ต่อมกำหนดให้ u เป็นฟังก์ชันใด ๆ ของสเปซ และเวลาที่จุดดิสครีตในกริดและจุดดิสครีตในเวลามีรูปแบบเป็น

$$u(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) = u_{i,j}^n \quad (2.4b)$$

เมื่อ Δt เป็นเวลาที่เพิ่มขึ้นในแต่ละขั้นเวลา โดยกำหนดให้มีการเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และ n เป็นจำนวนเต็มต่อมาทำการประมาณอนุพันธ์สเปซ และเวลาด้วยนิพจน์ของผลต่างสี่เหลี่ยมจกััดแบบตรงกลาง โดยมีความเที่ยงตรงอันดับที่สองในสเปซและเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะได้นิพจน์ของอนุพันธ์สเปซโดยกำหนดให้เวลางที่ที่ $t_n = n\Delta t$ และนิพจน์ของอนุพันธ์เวลาโดยกำหนดให้สเปซคงที่ที่จุด (x, y) เป็น

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) = \frac{u_{i+1/2,j}^n - u_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} \quad (2.5a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) = \frac{u_{i,j+1/2}^n - u_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} \quad (2.5b)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, n\Delta t) = \frac{u_{i,j}^{n+1/2} - u_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} \quad (2.5c)$$

นำนิพจน์อนุพันธ์สเปซและเวลาที่ขั้นเวลา n และจุดสเปซแลตทิซ (i, j) ของสมการ (2.5) แทนลงในระบบสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ (2.2) และ (2.3) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{H_x|_{i,j}^{n+1/2} - H_x|_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j}} \cdot \left(\frac{E_z|_{i,j-1/2}^n - E_z|_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} - \rho'_{j,j} \cdot H_x|_{i,j}^n \right) \quad (2.6a)$$

$$\frac{H_y|_{i,j}^{n+1/2} - H_y|_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu_{i,j}} \cdot \left(\frac{E_z|_{i+1/2,j}^n - E_z|_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} - \rho'_{i,j} \cdot H_y|_{i,j}^n \right) \quad (2.6b)$$

$$\frac{E_z|_{i,j}^{n+1} - E_z|_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j}} \cdot \left(\frac{H_y|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} - \frac{H_x|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} - \sigma_{i,j} \cdot E_z|_{i,j}^{n+1/2} \right) \quad (2.7)$$

ทำการประมาณค่าสนามแม่เหล็กในทิศทางใด ๆ ที่ช่วงเวลา n และค่าสนามไฟฟ้าในทิศทางใด ๆ ที่ช่วงเวลา $n+1/2$ เป็น

$$H_x|_{i,j}^n = \frac{H_x|_{i,j}^{n+1/2} + H_x|_{i,j}^{n-1/2}}{2} \quad (2.8a)$$

$$H_y|_{i,j}^n = \frac{H_y|_{i,j}^{n+1/2} + H_y|_{i,j}^{n-1/2}}{2} \quad (2.8b)$$

$$E_z|_{i,j}^{n+1/2} = \frac{E_z|_{i,j}^{n+1} + E_z|_{i,j}^n}{2} \quad (2.9)$$

นำสมการ (2.8) และ(2.9) แทนลงในสมการ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ จะได้สมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดสำหรับแต่ละส่วนประกอบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ใช้คำนวณในวิธี FDTD เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_x|_{i,j}^{n+1/2} = D_a|_{i,j} H_x|_{i,j}^{n-1/2} + D_b|_{i,j} \cdot \left(\frac{E_z|_{i,j-1/2}^n - E_z|_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} \right) \quad (2.10a)$$

$$H_y|_{i,j}^{n+1/2} = D_a|_{i,j} H_y|_{i,j}^{n-1/2} + D_b|_{i,j} \cdot \left(\frac{E_z|_{i+1/2,j}^n - E_z|_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} \right) \quad (2.10b)$$

$$E_z|_{i,j}^{n+1} = C_a|_{i,j} E_z|_{i,j}^n + C_b|_{i,j} \cdot \left(\frac{H_y|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_x|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \right) + \left(\frac{H_x|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_x|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \right) \quad (2.11)$$

โดยที่

$$C_a|_{i,j} = \left(1 - \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j}} \right) \Bigg/ \left(1 + \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j}} \right) \quad (2.12a)$$

$$C_b|_{i,j} = \left(\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j} \Delta_1} \right) \Bigg/ \left(1 + \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2\varepsilon_{i,j}} \right) \quad (2.12b)$$

$$D_a|_{i,j} = \left(1 - \frac{\rho'_{i,j} \Delta t}{2\mu_{i,j}} \right) \Bigg/ \left(1 + \frac{\rho'_{i,j} \Delta t}{2\mu_{i,j}} \right) \quad (2.13a)$$

$$D_b|_{i,j} = \left(\frac{\Delta t}{\mu_{i,j} \Delta_1} \right) \Bigg/ \left(1 + \frac{\rho'_{i,j} \Delta t}{2\mu_{i,j}} \right) \quad (2.13b)$$

2.4 เงื่อนไขความเสถียรภาพเชิงตัวเลข

เงื่อนไขความเสถียรภาพสำหรับสมการผลต่างสืบเนื่องจำกัดเริ่มต้นจากการพิจารณาสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ (2.1) โดยทำการนอร์มัลไรซ์ (Normalize) ให้ $\mu = 1$, $\varepsilon = 1$, $\sigma = 0$, $\rho' = 0$ และ $c = 1$ ต่อมานำสมการ (2.1a) บวกกับสมการ (2.1b) แล้วคูณด้วย j เมื่อ $j = \sqrt{-1}$ จะได้สมการของแมกซ์เวลล์ที่อยู่ในรูปแบบอย่างง่ายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$j\nabla \times (\vec{H} + j\vec{E}) = \frac{\partial}{\partial t} (\vec{H} + j\vec{E}) \quad (2.14a)$$

กำหนดให้ $\vec{V} = \vec{H} + j\vec{E}$ สมการ (2.14a) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$j\nabla \times \vec{V} = \frac{\partial}{\partial t} \vec{V} \quad (2.14b)$$

ความเสถียรเชิงตัวเลขสมการ (2.14b) สามารถพิจารณาได้โดยใช้ค่าเฉพาะ (Eigenvalue) ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{V} = \Lambda \vec{V} \quad (2.15a)$$

$$j\nabla \times \vec{V} = \Lambda \vec{V} \quad (2.15b)$$

ทำการหาค่าเฉพาะเวลา (Time eigenvalue) โดยที่ตัวดำเนินการอนุพันธ์ย่อยในสมการ (2.15a) สามารถเปลี่ยนมาเป็นตัวดำเนินการผลต่างสี่เหลี่ยมที่มีตำแหน่งขั้นเวลาสมมาตรที่ $\pm 1/2$ จากตำแหน่งจริงที่ต้องการหาค่า ซึ่งจะได้

$$\frac{V_{i,j}^{n+1/2} - V_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} = \Lambda V_{i,j}^n \quad (2.16)$$

ต่อมา นิยามตัวร่วมการเพิ่มขึ้น (Growth factor) ของผลเฉลย ($q_{i,j,k}$) เป็น

$$q_{i,j} = \frac{V_{i,j}^{n+1/2}}{V_{i,j}^n} = \frac{V_{i,j}^n}{V_{i,j}^{n-1/2}} \quad (2.17)$$

สำหรับทุกค่าของ n เราต้องทำให้ค่าของ $|q_{i,j}| \leq 1$ สำหรับทุกแบบแผนคลื่นสเปซในกริด FDTD และสำหรับทุกตำแหน่งกริด (i,j) เพื่อหลีกเลี่ยงการเพิ่มขึ้นของแบบแผนคลื่นใด ๆ โดยไม่มีข้อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำกัด (เพิ่มขึ้นตาม $q_{i,j}$ ยกกำลัง n) ในระหว่างการทำขั้นเวลา ซึ่งเป็นเงื่อนไขของความเสถียรเชิงตัวเลข แทน $q_{i,j}$ ลงไปในสมการ (2.16) แล้วเอาตัวร่วม $V_{i,j}^n$ หารตลอด ทำการจัดรูปใหม่ จะได้สมการกำลังสองสำหรับ $q_{i,j}$ เป็น

$$(q_{i,j})^2 - \Lambda \Delta t q_{i,j} - 1 = 0 \quad (2.18a)$$

แก้สมการหาค่า $q_{i,j}$ จะได้

$$q_{i,j} = a \pm \sqrt{a^2 + 1} \quad (2.18b)$$

เมื่อ

$$a = \frac{\Lambda \Delta t}{2} \quad (2.18c)$$

เราจะเห็นได้ว่าค่าของ $|q_{i,j}|$ จะมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ (อยู่ในเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข $|q_{i,j}| \leq 1$ เมื่อ a มีส่วนจริงเป็น 0 และมีส่วนจินตภาพอยู่ในช่วง $-j1$ ถึง $j1$ แทนค่าของ a ลงในช่วงนี้ แล้วจัดรูปใหม่ จะได้เงื่อนไขของค่าเจาะจงเวลาเป็น

$$\text{Re}(\Lambda) = 0 \quad (2.19a)$$

$$-\frac{2}{\Delta t} \leq \text{Im}(\Lambda) \leq \frac{2}{\Delta t} \quad (2.19b)$$

ทำการหาค่าเจาะจงสเปซ (Space eigenvalue) โดยกำหนดให้

$$\vec{V}_{i,j} = \vec{V}_0 e^{j(\vec{k}_x \Delta x + \vec{k}_y \Delta y)} \quad (2.20)$$

แสดงแบบแผนคลื่นสเปซแลตทิซใด ๆ ใช้การทำผลต่างสี่บเนื่องสเปซแบบตรงกลางแทนอนุพันธ์ย่อยของตัวดำเนินการเคิร์ลในสมการ (2.15b) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-2 \left[\frac{\hat{x}}{\Delta x} \sin(\tilde{k}_x \Delta x / 2) + \frac{\hat{y}}{\Delta y} \sin(\tilde{k}_y \Delta y / 2) \right] \times \vec{V}_{i,j} = \Lambda \vec{V}_{i,j} \quad (2.21)$$

เมื่อ \hat{x} และ \hat{y} เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางพิกัด x และ y ตามลำดับ หลังจากทำผลคูณเชิงเวกเตอร์ และเขียนสมการให้อยู่ในเทอมของส่วนประกอบ x และ y แล้วทำการแก้สมการหาค่าของ Λ^2 จะได้

$$\Lambda^2 = -4 \left[\frac{1}{(\Delta x)^2} \sin^2(\tilde{k}_x \Delta x / 2) + \frac{1}{(\Delta y)^2} \sin^2(\tilde{k}_y \Delta y / 2) \right] \quad (2.22)$$

สำหรับค่า \tilde{k}_x และ \tilde{k}_y ที่เป็นไปได้ทั้งหมด จะได้เงื่อนไขของค่าเจาะจงสเปซเป็น

$$\text{Re}(\Lambda) = 0 \quad (2.23a)$$

$$-2 \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}} \leq \text{Im}(\Lambda) \leq 2 \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}} \quad (2.23b)$$

สำหรับการหาเงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลข เงื่อนไขของค่าเจาะจงสเปซที่กำหนดโดยสมการ (2.23) จะต้องอยู่ในเงื่อนไขของค่าเจาะจงเวลาที่กำหนดโดยสมการ (2.19) อย่างสมบูรณ์ แล้วยกเลิกการนอแมลไรซ์ค่า c ซึ่งจะได้เงื่อนไขความเสถียรเชิงตัวเลขสำหรับสมการผลต่างสี่เหลี่ยมจตุรัสเป็น

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}}} \quad (2.24)$$

สำหรับในกรณีของขั้นเวลามAGIC (Magic time step) ซึ่งเป็นขั้นเวลาที่มีค่าผิดพลาดของการแพร่กระจายตามความถี่น้อยที่สุด จะมีเงื่อนไขเป็น

$$\Delta t = \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}}} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนแบบชั้นแมตซ์สมบูรณ์

ข้อจำกัดของการคำนวณด้วยวิธี FDTD โดยใช้คอมพิวเตอร์ คือ เมื่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางไปถึงปลายโดเมนการคำนวณที่เราจำกัดไว้ในทิศทาง x และ y สมการผลต่างสี่บ่งเนื่องจำกัดจะไม่สามารถหาค่าส่วนประกอบสนามที่สัมผัสขอบนอกโดเมนการคำนวณได้ จะเกิดการสะท้อนกลับที่ขอบของโดเมนการคำนวณ ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้นในบริเวณโดเมนที่เรากำลังพิจารณาอยู่ เพื่อที่จะจำกัด หรือทำให้สนามเกิดการสะท้อนกลับให้น้อยลง จะใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืน (ABC) วางไว้ที่ปลายโดเมนการคำนวณ เพื่อให้โดเมนการคำนวณเปรียบเสมือนมีขนาดเป็นระยะอนันต์

ได้มีการพัฒนาแนวความคิดของ ABC มาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีประสิทธิภาพการดูดกลืนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากตกกระทบให้มากที่สุด จนในปัจจุบันได้ใช้เงื่อนไขขอบเขตการดูดกลืนแบบชั้นแมตซ์สมบูรณ์ (PML ABC) ซึ่งเป็น ABC ที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด

แนวความคิดของ PML ABC มาจากสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ (2.1) โดยได้ทำการแก้ไขแบ่งแต่ละส่วนประกอบของสนามออกเป็นสองส่วนประกอบ ซึ่งทำให้สมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์กระจายออกมาเป็นสมการผลต่างสี่บ่งเนื่องจำกัดที่ใช้ร่วมกับ PML ABC ได้ทั้งหมด 12 สมการ คือ

$$\mu \frac{\partial H_{xy}}{\partial t} + \sigma_y^* H_{xy} = -\frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.26a)$$

$$\mu \frac{\partial H_{xz}}{\partial t} + \sigma_z^* H_{xz} = \frac{\partial E_z}{\partial z} \quad (2.26b)$$

$$\mu \frac{\partial H_{yz}}{\partial t} + \sigma_z^* H_{yz} = -\frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (2.26c)$$

$$\mu \frac{\partial H_{yx}}{\partial t} + \sigma_x^* H_{yx} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.26d)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (2.27a)$$

$$\varepsilon \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} = -\frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (2.27b)$$

โดยที่

$$H_x = H_{xy} + H_{xz} \quad (2.28a)$$

$$H_y = H_{yz} + H_{yx} \quad (2.28b)$$

$$E_z = E_{zx} + E_{zy} \quad (2.29)$$

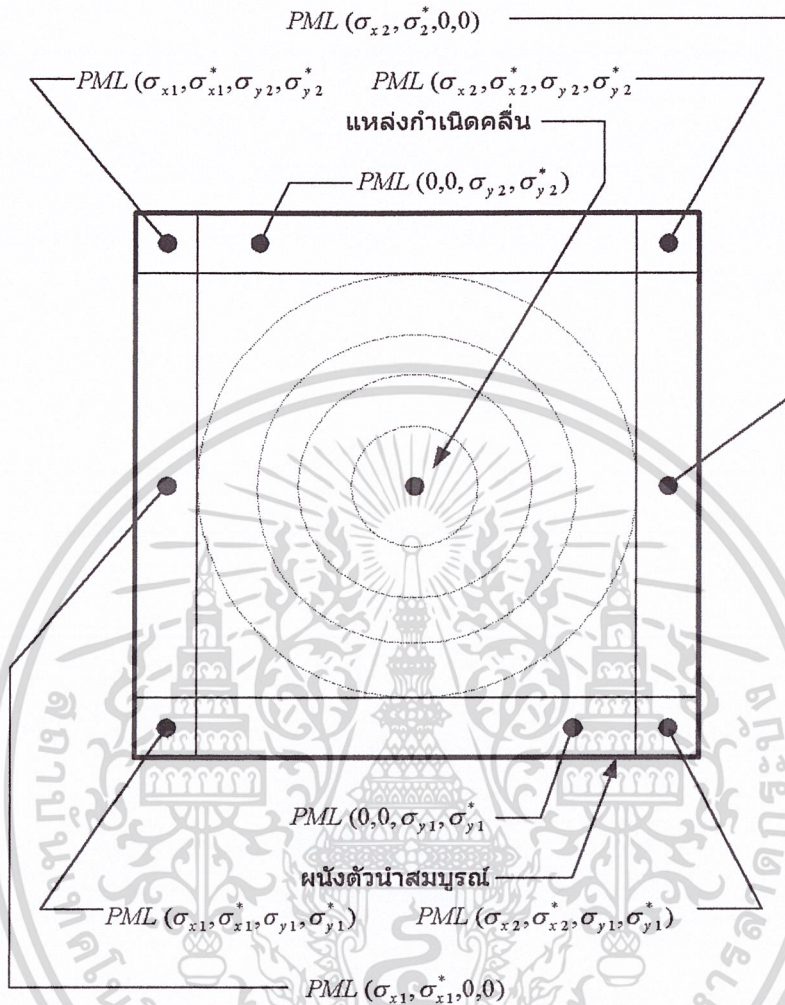
เมื่อ σ_x และ σ_y เป็นสภาพนำทางไฟฟ้าในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ส่วน σ_x^* และ σ_y^* เป็นความสูญเสียทางแม่เหล็กในทิศทาง x และ y ตามลำดับ โดยที่แต่ละชั้นของ PML ABC จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไข

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma^*}{\mu_0} \quad (2.30)$$

จากสมการ (2.30) จะได้อิมพีแดนซ์ (Impedance) ของคลื่นในตัวกลางที่มีความสูญเสียเท่ากับในตัวกลางที่ไม่มี การสูญเสีย และทำให้ไม่เกิดการสะท้อนเกิดขึ้นเมื่อคลื่นระนาบแพร่กระจายตั้งฉากข้ามรอยต่อระหว่างสองตัวกลางนี้ ตัวกลางที่มีความสูญเสียชนิดนี้เรียกว่าชั้นแมตซ์สมบรูณ์ (PML) ซึ่งจะนำมาใช้ที่ปลายโดเมนการคำนวณ FDTD โดยที่ประสิทธิภาพการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นของ PML ที่ใช้วิเคราะห์

เพื่อที่จะให้เข้าใจแนวความคิดของ PML ABC ได้ง่ายขึ้น ให้พิจารณากริด FDTD แบบแผนคลื่น TE (Transverse Electric mode) สองมิติ (พิกัด x และ y) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีโดเมนการคำนวณล้อมรอบด้วย PML โดยมีผนังตัวนำสมบรูณ์ (Perfectly conducting) อยู่ด้านนอกสุด ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของกริด (x_{min} และ x_{max}) แต่ละ PML จะมี σ_x และ σ_x^* เป็นไปตามเงื่อนไขของ (2.17) โดยมี $\sigma_y = \sigma_y^* = 0$ เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนข้ามรอยต่อระหว่างโดเมนการคำนวณกับ PML ส่วนด้านล่างและด้านบนของกริด (y_{min} และ y_{max}) แต่ละ PML จะมี σ_y และ σ_y^* เป็นไปตามเงื่อนไข (2.17) โดยมี $\sigma_x = \sigma_x^* = 0$ และที่มุมทั้งสี่ของกริดมีการซ้อนกันของสอง PML ดังนั้น จะมีทั้งหมดสี่ความสูญเสีย ($\sigma_x, \sigma_x^*, \sigma_y$ และ σ_y^*)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกริด FDTD สองมิติที่มี PML ABC

รูปแบบการแบ่ง PML ควรจะมีการเพิ่มขึ้นของสภาพนำทางไฟฟ้า และความสูญเสียทางแม่เหล็กอย่างราบเรียบ โดยมีความสัมพันธ์กับความกว้างของ PML ในแต่ละชั้น (ρ) ซึ่งรูปแบบการแบ่ง PML โดยทั่วไปจะมีสภาพนำทางไฟฟ้าอยู่ในเทอมของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล คือ

$$\sigma(\rho) = \sigma_{max} (\rho / \delta)^N \quad (2.31)$$

เมื่อ δ เป็นความกว้างทั้งหมดของ PML σ เป็นได้ทั้ง σ_x และ σ_y ส่วน N เป็นอันดับการเพิ่มขึ้นของ σ ค่าของ σ_{max} หาได้จากการกำหนดค่าของตัวร่วมการสะท้อนที่มุมศูนย์กลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

($R(0)$) โดยจะมีความสัมพันธ์เป็น

$$R(0) = e^{-2\sigma_{\max}\delta/(N+1)\epsilon_0 c} \quad (2.32)$$

เมื่อได้ค่าของสภาพนำไฟฟ้าใน PML แต่ละชั้นแล้ว จะหาค่าของความสูญเสียทางแม่เหล็กใน PML แต่ละชั้นได้โดยใช้สมการ (2.30) และในการทำขั้นเวลาในบริเวณของ PML จะต้องเป็นการทำขั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.6 การทำขั้นเวลาเอกซ์โพเนนเชียล

ในบริเวณของ PML ABC จะใช้การทำขั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียล เพื่อให้สนามที่แพร่กระจายในบริเวณนี้ถูกลดทอนอย่างรวดเร็ว พิจารณาระบบสมการของแมกซ์เวลล์ในตัวกลางนำไฟฟ้าของสมการ (2.26) และ (2.27) ทำการจัดรูปใหม่จะได้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งเป็น

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\sigma_y^*}{\mu} H_x = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (2.33a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} + \frac{\sigma_x^*}{\mu} H_y = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.33b)$$

$$\frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \frac{\sigma_x}{\epsilon} E_{zx} = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (2.34a)$$

$$\frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \frac{\sigma_y}{\epsilon} E_{zy} = -\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (2.34b)$$

ทำการแก้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งนี้ โดยกำหนดค่าเริ่มต้นให้ที่เวลา $t=0$ แต่ละส่วนประกอบสนามมีค่าเป็นศูนย์ แล้วทำผลเฉลยที่ได้ให้อยู่ในรูปของสมการผลต่างสี่บเนื่องจำกัด ซึ่งจะได้สมการผลต่างสี่บเนื่องจำกัดที่มีการทำขั้นเวลาแบบเอกซ์โพเนนเชียลเป็น

$$H_x \Big|_{i,j}^{n+1/2} = e^{-\sigma_y^* \Delta t / \mu} H_x \Big|_{i,j}^{n-1/2} + \frac{1 - e^{-\sigma_y^* \Delta t / \mu}}{\sigma_y^*} \left(\frac{E_z \Big|_{i,j-1/2}^n - E_z \Big|_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} \right) \quad (2.35a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_y \Big|_{i,j}^{n+1/2} = e^{-\sigma_x^* \Delta t / \mu} H_y \Big|_{i,j}^{n-1/2} + \frac{1 - e^{-\sigma_x^* \Delta t / \mu}}{\sigma_x^*} \cdot \left(\frac{E_z \Big|_{i+1/2,j}^n - E_z \Big|_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} \right) \quad (2.35b)$$

$$E_{zx} \Big|_{i,j}^{n+1} = e^{-\sigma_x \Delta t / \varepsilon} E_{zx} \Big|_{i,j}^n + \frac{1 - e^{-\sigma_x \Delta t / \varepsilon}}{\sigma_x} \cdot \left(\frac{H_y \Big|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \right) \quad (2.36a)$$

$$E_{zy} \Big|_{i,j}^{n+1} = e^{-\sigma_y \Delta t / \varepsilon} E_{zy} \Big|_{i,j}^n + \frac{1 - e^{-\sigma_y \Delta t / \varepsilon}}{\sigma_y} \cdot \left(\frac{H_x \Big|_{i,j-1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \right) \quad (2.36b)$$

2.7 การส่งผ่านคลื่นสัญญาณ

ผลกระทบต่อการส่งผ่านสัญญาณ คือ การสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (diffraction) และการแตกกระจาย (scattering)

- การสะท้อน (Reflection) ของคลื่นสัญญาณเกิดขึ้นเมื่อคลื่นมีการเคลื่อนที่จากสื่อกลางประเภทหนึ่ง ไปสู่อีกสื่อกลางชนิดหนึ่ง โดยที่สื่อกลางชนิดที่สองจะต้องมีพื้นที่ที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือคลื่นบางส่วนจะมีการสะท้อนออกและส่วนที่เหลือก็เคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่สื่อกลางชนิดที่สอง ตัวอย่างของการสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งก็เช่น การที่คลื่นเคลื่อนที่เข้ากระทบกำแพง หรือพื้นผิวโลกของโลก เป็นต้น
- การเลี้ยวเบน (Diffraction) ของคลื่นเกิดขึ้นในกรณีที่มีวัตถุบางอย่างที่มีขอบกีดขวางอยู่ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ทำให้ไม่มีเส้นทางตรง (line-of-sight) ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองที่คลื่นสัญญาณสามารถส่งผ่านได้ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นก็คือคลื่นสัญญาณจะเลี้ยวอ้อมวัตถุนั้น ๆ การเลี้ยวเบนของสัญญาณนี้เองที่ทำให้เรายังสามารถรับสัญญาณได้บางส่วนถึงแม้ว่าเครื่องรับสัญญาณจะถูกบดบังด้วยสิ่งกีดขวางด้วยเหตุนี้การเลี้ยวเบนของคลื่นสัญญาณจึงมีประโยชน์ต่อการส่งผ่านสัญญาณ
- การกระเจิง (Scattering) เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่กระทบวัตถุหรือพื้นผิวที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ ทำให้คลื่นสัญญาณเกิดการกระเจิงของสัญญาณก็เช่น ป้ายจราจร เสาโคมไฟตามถนน ใบไม้ และพื้นผิวที่ขรุขระ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

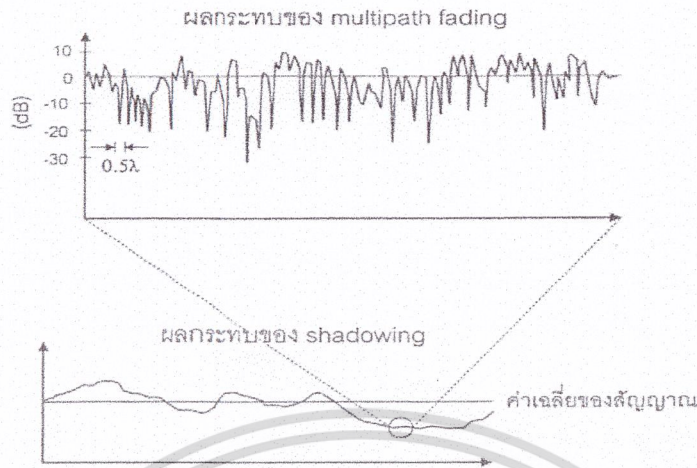
กลไกทั้ง 3 อย่างนี้เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการนำไปวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะการส่งผ่านคลื่นสัญญาณ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

จากการศึกษาพบว่า คุณลักษณะการลดทอนของสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. Path loss เป็นการลดทอนของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับสัญญาณ โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณจะลดลงตามค่า d^{-1} โดย d คือ ระยะทางระหว่างภาครับและภาคส่ง ส่วน n เป็นค่าคงที่ที่ค่าหนึ่งมีขนาดแตกต่างกันไปตามสภาพของบริเวณที่สัญญาณส่งผ่าน คุณตัวอย่างของค่า n สำหรับการคำนวณค่า path loss ในบริเวณต่าง ๆ สังเกตว่าค่าอัตราการลดทอนของสัญญาณมีขนาดที่สูงในบริเวณเมืองใหญ่ เมื่อเทียบกับบริเวณที่ว่างเปล่า เพราะมีปัญหาการบดบังของสัญญาณเนื่องมาจากตึก อาคาร และสถานที่

2. ชาโดว์อิง (Shadowing หรือ Large-scale fading) เกิดจากการที่สัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปชั่วขณะจากสิ่งแวดล้อมรอบข้าง เช่น อาคาร เหนินเขา เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้น สัญญาณที่รับได้ก็จะมีกำลังแรงคั้งเดิม ดังนั้นระดับของสัญญาณที่รับได้มักจะเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเท่า ๆ กับขนาดของสิ่งกีดขวาง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ประมาณหลายสิบลเมตร คุณตัวอย่างลักษณะของสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากชาโดว์อิงในรูปที่ 2.4

3. มัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath fading หรือ Small-scale fading) เกิดจากการที่สายอากาศของเครื่องรับสัญญาณอยู่ใกล้กับพื้นผิวมาก ดังนั้นสิ่งกีดขวางต่าง ๆ รอบข้างจึงส่งผลให้เกิดการสะท้อนและการหักเหของสัญญาณในหลายทิศทาง ส่งผลทำให้สัญญาณที่รับได้ประกอบด้วยจำนวนสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณที่เดินทางมาจากทิศทางที่แตกต่างกัน โดยมีทั้งขนาดและเฟสที่แตกต่างกัน ผลกระทบของมัลติพาทเฟดดิ้งทำให้ระดับของสัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างบ่อยครั้งมาก และการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณโดยทั่วไปจะอยู่ในระดับเดียวกันกับขนาดของความยาวคลื่น การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอาจเกิดขึ้นได้มากถึง 30-40 dB เพียงผู้ใช้โทรศัพท์มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะเพียงเศษส่วนของความยาวคลื่น รูปที่ 2.4 ประกอบ



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณที่รับได้เนื่องจากผลกระทบของมัลติพาทเฟดดิ้ง และ ซาโดว์อิ้ง

2.8 การสูญเสียกำลัง (Path Loss)

1. การสูญเสียกำลังในอากาศว่าง (Free Space Path Loss) ซึ่งเกิดจากการที่คลื่นแพร่กระจายออกไปด้วยมุมที่กว้าง ทำให้ความเข้มของกำลังคลื่นสัญญาณอ่อนตัวลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นแบบยกกำลังสอง คำว่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณในอากาศว่างนี้ได้นิยามให้เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังของสัญญาณที่ถูกส่งออกมา โดยที่คลื่นมีการแพร่กระจายในบริเวณที่ว่างเปล่า (free space propagation) อัตราส่วนนี้มีความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (2.37)$$

โดยที่

P_R คือ กำลังของสัญญาณที่รับได้

P_T คือ กำลังของสัญญาณที่ส่งออก

G_R คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ

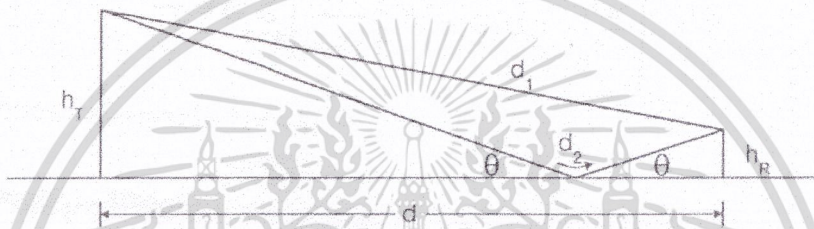
G_T คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง

λ คือ ค่าความยาวคลื่น

d คือ ระยะระหว่างภาครับและภาคส่ง (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสูญเสียกำลังเนื่องจากพื้นผิวเรียบ (Plane Path Loss) จะกล่าวถึงผลกระทบของพื้นผิวต่อการส่งผ่านสัญญาณ โดยเปรียบเทียบกับ การส่งผ่านสัญญาณในอวกาศว่าง ทั้งนี้สมมุติให้การส่งผ่านสัญญาณนี้เกิดขึ้นในบริเวณที่มีพื้นผิวที่ราบเรียบไม่มีสิ่งกีดขวางใด ๆ หรือเนินเขาในบริเวณนั้นเลย ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จะประกอบด้วยสัญญาณเพียง 2 ส่วนคือ ส่วนที่แพร่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยตรงและส่วนที่สะท้อนจากพื้นผิวดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างจากในกรณีของการส่งผ่านสัญญาณในอวกาศว่างที่ได้รับสัญญาณเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งสัญญาณจากส่วนที่สะท้อนกับพื้นผิว



รูปที่ 2.5 ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนกับพื้นผิวเรียบต่อสัญญาณที่รับได้

2.9 ผลกระทบของชาโดว์อิง (Shadowing)

การลดทอนของสัญญาณเนื่องจาก path loss ที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้เป็นการคำนวณค่าของสัญญาณที่คาดว่าจะรับได้ตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่า ณ ตำแหน่งที่ห่างจากภาคส่งสัญญาณเท่า ๆ กันก็จะได้รับสัญญาณที่มีกำลังเท่ากันด้วย แต่ในทางปฏิบัติสัญญาณที่รับได้ในแต่ละบริเวณอาจจะมีกำลังที่ไม่เท่ากันก็ได้ ถึงแม้ว่าจะอยู่ห่างจากสถานีส่งเท่ากัน ทั้งนี้เพราะกำลังของสัญญาณที่รับได้นั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในบริเวณที่สัญญาณส่งผ่านด้วย ดังนั้นในสภาพความเป็นจริงสัญญาณเหล่านี้จะมีการกระเพื่อมขึ้นและลงอยู่บนค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จาก path loss ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในลักษณะนี้ เราพบว่าสามารถจำลองได้ด้วยการใช้ตัวแปรเรณดคอมที่มีการแจกแจงแบบ log-normal distribution

2.10 ปัญหาของมัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath Fading)

การสะท้อนของคลื่นสัญญาณกับพื้นผิว หรือสิ่งต่าง ๆ รอบข้างส่งผลให้สัญญาณที่รับได้ประกอบด้วยสัญญาณที่แพร่มามากกว่าหนึ่งทิศทาง และโดยทั่วไปแล้วสัญญาณเหล่านี้มักจะเดินทางมาถึงภาครับด้วยเวลาที่แตกต่างกัน และมีขนาดที่แตกต่างกันด้วย เมื่อสัญญาณเหล่านี้มารวมเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกัน จะได้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดแปรเปลี่ยนได้อย่างมาก ปัญหานี้มีชื่อเรียกว่า มัลติพาทเฟดดิ้ง (multipath fading) ซึ่งโดยทั่วไปลักษณะการแปรเปลี่ยนของสัญญาณในสภาวะดังกล่าวสามารถจำลองได้ด้วยตัวแปรแรนดอมที่มีการกระจายแบบเรย์ลี (Rayleigh distribution)

2.11 โปรไฟล์การหน่วงกำลัง (Power Delay Profile)

เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของช่องสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง และทำการพัฒนาเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบระบบสื่อสารไร้สาย โดยใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม พารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาโปรไฟล์การหน่วงกำลังประกอบด้วย การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay) , การแผ่การหน่วง rms (rms delay spread) , การแผ่การหน่วงเฉลี่ย (excess delay spread) และ โคฮีเรนซ์ แบนด์วิดท์ (coherent bandwidth)

โดยค่าการหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย ($\bar{\tau}$) หาได้จาก

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (2.38)$$

และค่าการแผ่การหน่วง rms หาได้จาก

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} \quad (2.39)$$

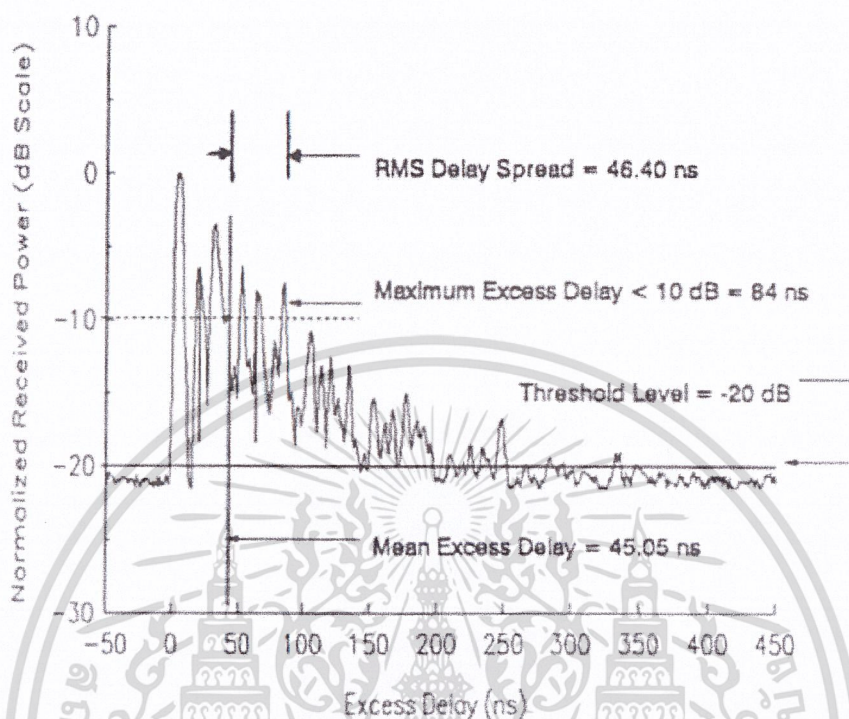
โดยที่

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (2.40)$$

โคฮีเรนซ์ แบนด์วิดท์ (B_c) ที่ประมาณด้วยค่า frequency correlation เท่ากับ 0.5 หาได้จาก

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการหน่วงกำลังของคลื่นภายในอาคาร

2.12 ทฤษฎีทางสถิติและความน่าจะเป็น

สัญญาณที่เราไม่สามารถรู้ค่าได้แน่นอน หรือไม่สามารถรู้ค่าล่วงหน้าได้ สัญญาณประเภทนี้จะเกิดขึ้นในระบบสื่อสารทั้งในลักษณะที่เป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการ ก็เป็นสัญญาณรบกวน และเป็นสัญญาณที่ต้องการคือมีข่าวสารอยู่ เนื่องจากสัญญาณเรณดัมเป็นสัญญาณที่เราไม่สามารถรู้การเปลี่ยนแปลงที่แน่นอนได้ การจัดการกับสัญญาณประเภทนี้จึงต้องใช้หลักการทางสถิติเข้ามาช่วย ประมาณคุณสมบัติของสัญญาณ โดยหาค่าเฉลี่ย ความแปรปรวน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ต่อมาหาฟังก์ชันความหนาแน่นและการแจกแจงความน่าจะเป็นเพื่อทำแบบจำลองทางสถิติ

2.13 ตัวแปรสุ่ม

นิยามเป็นฟังก์ชันที่มีค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของสัญญาณรบกวนอยู่ในฟังก์ชันนั้น หรือเข้าใจง่าย ๆ ว่าตัวแปรสุ่มนี้จะต้องประกอบไปด้วยข้อมูลแต่ละจุดของสัญญาณ ดังนั้น ตัวแปรสุ่มจะมีค่าอยู่ในช่วงที่น้อยที่สุดคือตั้งแต่ค่าที่น้อยที่สุด ไปถึงค่ามากที่สุดของข้อมูลสัญญาณ

2.14 ค่าเฉลี่ย

ถ้ากำหนดให้สัญญาณเป็นฟังก์ชัน $n(t)$ มีค่าอยู่ในช่วง t_1 ถึง t_2 จะได้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณเป็น

$$\bar{n} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} n(t) dt \quad (2.42)$$

ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB จะเป็นการวิเคราะห์สัญญาณแบบดิคริต ซึ่งจะเป็นข้อมูลแต่ละจุดสัญญาณ กำหนดให้มีข้อมูลของสัญญาณทั้งหมด N จุด ข้อมูลของแต่ละจุดแทนด้วย x_i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N$ จะได้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณเป็น

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.43)$$

2.15 ความแปรปรวน

ถ้ากำหนดให้สัญญาณเป็นฟังก์ชัน $n(t)$ มีค่าอยู่ในช่วง t_1 ถึง t_2 จะได้ความแปรปรวนของสัญญาณเป็น

$$\sigma^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [n(t) - \bar{n}]^2 dt \quad (2.43)$$

ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB จะเป็นการวิเคราะห์สัญญาณแบบดิคริต ซึ่งจะเป็นข้อมูลแต่ละจุดสัญญาณ กำหนดให้มีข้อมูลของสัญญาณทั้งหมด N จุด ข้อมูลของแต่ละจุดแทนด้วย x_i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N$ จะได้ความแปรปรวนของสัญญาณเป็น

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2 \quad (2.44)$$

2.16 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ถ้ากำหนดให้สัญญาณเป็นฟังก์ชัน $n(t)$ มีค่าอยู่ในช่วง t_1 ถึง t_2 จะได้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [n(t) - \bar{n}]^2 dt} \quad (2.45)$$

ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB จะเป็นการวิเคราะห์สัญญาณแบบดิคริต ซึ่งจะเป็นข้อมูลแต่ละจุดสัญญาณ กำหนดให้มีข้อมูลของสัญญาณทั้งหมด N จุด ข้อมูลของแต่ละจุดแทนด้วย x_i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N$ จะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณเป็น

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2} \quad (2.46)$$

2.17 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น

กำหนดให้ ความน่าจะเป็น $P\{X \leq x\}$ เป็นความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ $\{X \leq x\}$ และจะกำหนดให้ $f_x(x)$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ซึ่งนิยามเป็น

$$f_x(x) = \frac{d}{dx} P\{X \leq x\} \quad (2.47a)$$

ฟังก์ชันการความหนาแน่นความน่าจะเป็นมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ

$$1. f_x(x) \geq 0 \quad (2.47b)$$

$$2. \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) dx = 1 \quad (2.47c)$$

$$3. F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(\xi) d\xi \quad (2.47d)$$

$$4. P\{x_1 \leq X \leq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} f_x(x) dx \quad (2.47e)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.18 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น

กำหนดให้ ความน่าจะเป็น $P\{X \leq x\}$ เป็นความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ $\{X \leq x\}$ และจะกำหนดให้ $F_x(x)$ เป็นฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น ซึ่งนิยามเป็น

$$F_x(x) = P\{X \leq x\} \quad (2.48a)$$

ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ

$$1. F_x(-\infty) = 0 \quad (2.48b)$$

$$2. F_x(\infty) = 1 \quad (2.48c)$$

$$3. 0 \leq F_x(x) \leq 1 \quad (2.48d)$$

$$4. F_x(x_1) \leq F_x(x_2) \text{ เมื่อ } x_1 < x_2 \quad (2.48e)$$

$$5. P\{x_1 < x \leq x_2\} = F_x(x_2) - F_x(x_1) \quad (2.48f)$$

$$6. F_x(x^+) = F_x(x) \quad (2.48g)$$

2.19 การแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม

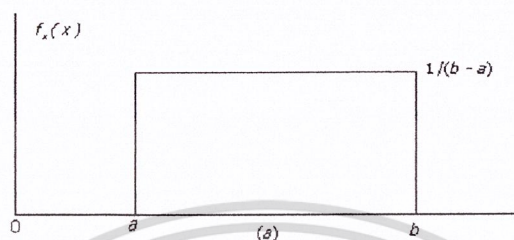
ความหนาแน่นความน่าจะเป็น และการแจกแจงความน่าจะเป็นถูกนิยามตามสมการ (2.49) และ (2.50) ตามลำดับ

$$f_x(x) = \begin{cases} 1/(b-a) & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.49)$$

$$F_x(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x \end{cases} \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าคงที่ ๆ มีค่า $-\infty < a < \infty$ และ $b > a$ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงคุณสมบัติของสมการ (2.49) และ (2.50) ตามลำดับ



รูป 2.7 การแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม

2.20 การแจกแจงแบบเรย์ลี

ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณจางหายแบบเรย์ลีนิยามตามสมการ (2.51)

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) & ; (0 \leq x < \infty) \\ 0 & ; (x < 0) \end{cases} \quad (2.51)$$

โดยที่ σ คือแรงดัน rms สัญญาณ และ σ^2 คือกำลังเฉลี่ยทางเวลาของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.21 การแจกแจงแบบบริเชียน

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบบริเชียนนิยามตามสมการ (2.52)

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{x}{2\sigma^2} I_0\left(\frac{mx}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2+m^2}{2\sigma^2}\right) & ; m \geq 0, x \geq 0 \\ 0 & ; x < 0 \end{cases} \quad (2.52)$$

ตัวแปร m เป็นแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ และ $I_0(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันเบสเซล (Bessel function)

2.22 สรุป

ทฤษฎีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปริภูมิพนธ์ฉบับนี้ โดยทฤษฎี FDTD จะใช้ในการวิเคราะห์คุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นวิทยุ โดยเขียนเป็นโปรแกรมแล้วให้คอมพิวเตอร์คำนวณผลที่ได้ออกมา ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวกับการส่งผ่านคลื่นสัญญาณนั้นจะอธิบายเกี่ยวกับการเดินทางของคลื่นจากเครื่องส่ง ไปยังเครื่องรับว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร และใช้หาค่าพารามิเตอร์ของโปรไฟล์การหน่วงกำลัง และสุดท้ายทฤษฎีตัวแปรสุ่ม และความน่าจะเป็น จะนำมาใช้ทำเป็นแบบจำลองทางสถิติ

บทที่ 3

การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยใช้วิธี FDTD กำหนดให้คลื่นวิทยุมีการแพร่กระจายในลักษณะ 2 มิติ และแพร่กระจายไปในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ กัน คือ ในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่าง ภายในห้องที่ว่างเปล่า และภายในห้องที่มีสิ่งกีดขวาง

วิธี FDTD เป็นวิธีประมวลผลเชิงตัวเลขในโดเมนเวลา นิยมใช้สำหรับวิเคราะห์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพราะเป็นวิธีการที่ง่าย และสะดวกในการแก้ปัญหาอนุพันธ์แมกซ์เวลล์ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ ในการวิเคราะห์ในสองมิตินี้ ได้กำหนดให้ส่วนประกอบสนามแม่เหล็ก (\vec{H}_x) และ (\vec{H}_y) เป็นเวกเตอร์ในทิศทางแนวแกน x และ y ตามลำดับ และส่วนประกอบสนามไฟฟ้า (\vec{E}_z) เป็นเวกเตอร์ในทิศทางแนวแกน z

ทำการพิจารณากำลังของสัญญาณที่รับได้ตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ใน โดเมนการคำนวณ ในย่านความถี่ที่ได้กำหนดไว้ คือ 900 MHz และ 1800 MHz ตามลำดับ เพื่อหาโปรไฟล์การหน่วงกำลัง (Power Delay Profile) แล้วจากโปรไฟล์การหน่วงกำลังที่ได้นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay, $\bar{\tau}$) และการแผ่การหน่วง rms (rms delay spread, σ_τ) ทาลักษณะการจางหายของคลื่นตามเส้นทางที่กำหนดไว้ จากนั้นหาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function) และฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น (Cumulative Distribution Function) แล้วทำเป็นแบบจำลองทางสถิติ โดยขั้นตอนทั้งหมดนี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยใช้วิธี FDTD แสดงในรูปที่ 3.2 โดยขั้นแรกจะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วย

จำนวนขั้นเวลา 2000 ขั้นเวลา

ค่าของ $\pi = 3.14159265358979$

ค่าของ $\mu_0 = 1.256637061435917 \times 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$

ค่าของ $\epsilon_0 = 8.854187818 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$

ค่าของ $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \text{ ms}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ $\Delta t = 1.25 \times 10^{-11}$ s

ค่าของ $\Delta x = \Delta y = 2c\Delta t = 0.0075$ m

จำนวนชั้นของ PML 16 ชั้น

อันดับการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียใน PML $N = 3$

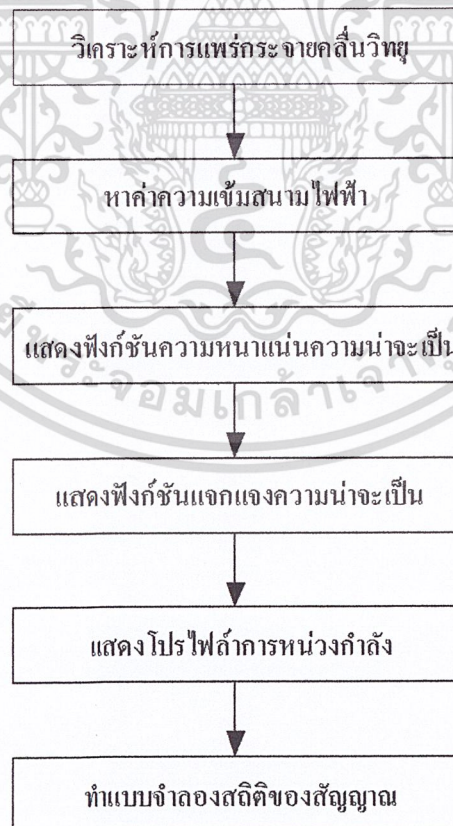
ตัวร่วมสะท้อนที่มุมศูนย์กลาง $R(0) = 1 \times 10^{-5}$

ขนาดของโดเมนการคำนวณขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์

ต่อมาทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ทำการวิเคราะห์ โดยให้มีความยาว (x) เท่ากับ 6 เมตร และความกว้าง (y) เท่ากับ 6 เมตร และจากที่กำหนดให้ใน 1 เซลล์ มีขนาดเท่ากับ 0.0075 เมตร ทำการหาจำนวนเซลล์ในแต่ละด้าน ได้ดังนี้

ที่ด้าน x จำนวนเซลล์เท่ากับ $\frac{6}{\Delta x} = 800$ เซลล์

ที่ด้าน y จำนวนเซลล์เท่ากับ $\frac{6}{\Delta y} = 800$ เซลล์



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี FDTD มีข้อจำกัดอยู่อย่างหนึ่งคือ เมื่อคลื่นวิทยุแพร่กระจายไปถึงขอบของโดเมนที่เราจำกัดไว้ สมการผลต่างสืบเนื่องไม่สามารถหาค่าส่วนประกอบสนามที่สัมผัสขอบโดเมนภายนอกได้ จะเกิดการสะท้อนกลับเข้ามาในโดเมนการคำนวณ ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้นในบริเวณที่เราพิจารณาอยู่ เพื่อที่จะจำลองให้คลื่นวิทยุแพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นในโดเมนคำนวณ และแพร่กระจายผ่านโดเมนคำนวณไปจนถึงระยะอนันต์นั้น จะต้องกำหนดให้ทุกด้านของโดเมนคำนวณมีชั้นของ PML ล้อมรอบอยู่เพื่อทำหน้าที่ดูดกลืน หรือทำให้สนามเกิดการสะท้อนกลับที่บริเวณขอบเขตที่จำกัดไว้ให้น้อยลง

ในการวิเคราะห์นี้ได้กำหนดชั้นของ PML 16 ชั้น เมื่อนำมารวมกับจำนวนเซลล์ที่กำหนดไว้ที่ด้าน x และด้าน y จะได้จำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมด 832×832 เซลล์

หาค่าพารามิเตอร์ของ PML 16 ชั้น โดยพิจารณาโครงสร้างกริด FDTD สองมิติที่มี PML ABC รูปที่ 2.3 เพื่อหาสภาพนำทางไฟฟ้า (σ) และความสูญเสียทางแม่เหล็ก (σ^*) ในแต่ละชั้นของ PML โดยใช้สมการที่ (2.30) ถึง (2.32)

จากสมการ (2.32) สามารถหาค่า σ_{\max} ได้ดังสมการ

$$\sigma_{\max} = -(N+1)\epsilon_0 c \ln R(0)/2\delta \quad (3.1)$$

โดย δ คือความกว้างทั้งหมดของ PML ซึ่งจะเท่ากับ $16 \times 0.0075 = 0.12 \text{ m}$

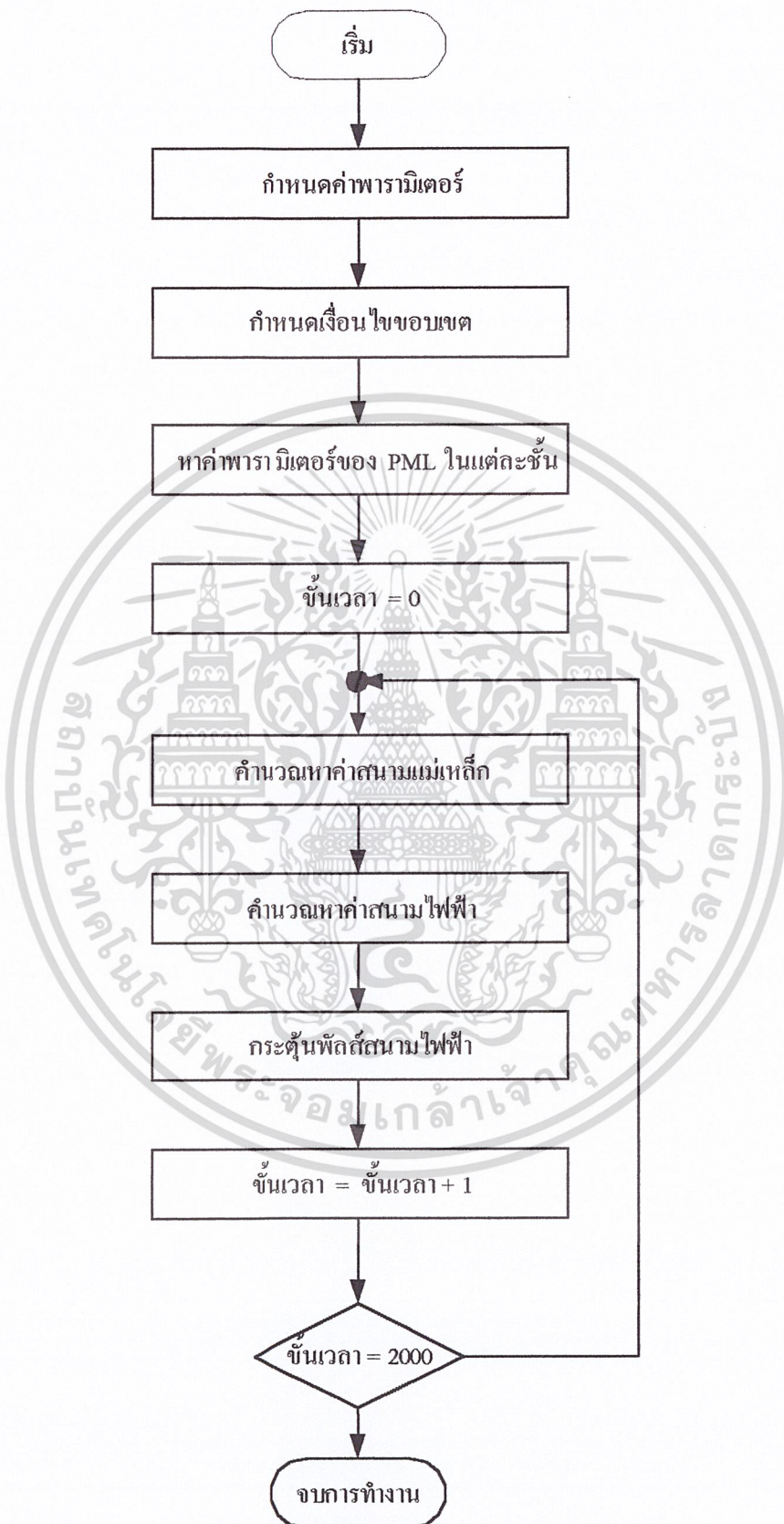
จากรูป 2.1 ที่แสดงตำแหน่งส่วนประกอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในหน่วยเซลล์ลูกบาศก์ตามแนวความคิดของปี จะเห็นว่าในหนึ่งเซลล์นั้นจะประกอบด้วยสนามไฟฟ้า (\vec{E}) และสนามแม่เหล็ก (\vec{H}) ที่อยู่คนละตำแหน่งกันทำให้ค่า σ ในแต่ละชั้นของ PML ประกอบไปด้วยค่า σ สองค่าคือค่าที่ใช้สำหรับหาส่วนประกอบสนามไฟฟ้าและค่าที่ใช้สำหรับหาส่วนประกอบสนามแม่เหล็กในแต่ละชั้นของ PML ซึ่งหาได้โดยใช้สมการ (2.31) และใช้สมการ (2.30) หาค่า σ^*

$$\sigma_H(\rho) = \sigma_{\max} [(\rho - 0.5)/\delta]^N \quad (3.2)$$

$$\sigma_E(\rho) = \sigma_{\max} [\rho/\delta]^N \quad (3.3)$$

โดย ρ คือตำแหน่งชั้นของ PML

δ คือจำนวนชั้นทั้งหมดของ PML ในที่นี้คือ 16 ชั้น



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุโดยใช้วิธี FDTD เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แล้วจึงนำไปคำนวณ โดยใช้สมการ (2.10) ถึง สมการ (2.13) หาค่าสนามแม่เหล็ก (\vec{H}_x) และ (\vec{H}_y) และค่าสนามไฟฟ้า (\vec{E}_z) ในโดเมนการคำนวณ และใช้สมการ (2.35) ถึง (2.36)หาค่าสนามแม่เหล็ก (\vec{H}_x) และ (\vec{H}_y) และค่าสนามไฟฟ้า (\vec{E}_z) ในส่วนของชั้น PML

ในการวิเคราะห์การแผ่กระจายคลื่นวิทยุนี้ จะใช้แหล่งกำเนิดแรงดันเป็น

$$V_s = \exp\left[\left(\frac{n-84}{28}\right)^2\right] \quad (3.4)$$

3.3 ขั้นตอนการหาความเข้มสนามไฟฟ้าของสัญญาณที่รับได้

การหาความเข้มสนามไฟฟ้าของสัญญาณที่รับได้มีขั้นตอนตามที่รูปที่ 3.3 โดยขั้นแรกจะหาค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ส่ง จะกำหนดให้สัญญาณมีฟังก์ชันเป็น $f(t)$ และทำการพิจารณาในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2

$$P_t = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f^2(t) dt \quad (3.5)$$

ต่อมาจะทำการนอร์มัลไรซ์(Normalize) สัญญาณที่รับได้ $r(t)$ ด้วยรากที่สองของกำลังเฉลี่ยที่ส่งออกมา ดังนั้นจะได้สัญญาณนอร์มัลไรซ์ที่รับได้ $\tilde{r}(t)$ เป็น

$$\tilde{r}(t) = \frac{1}{\sqrt{P_t}} r(t) \quad (3.6)$$

หลังจากนั้นแปลงสัญญาณนอร์มัลไรซ์ที่รับได้ไปสู่โดเมนความถี่โดยใช้ FFT ซึ่งจะได้สัญญาณนอร์มัลไรซ์ใน โดเมนความถี่เป็น

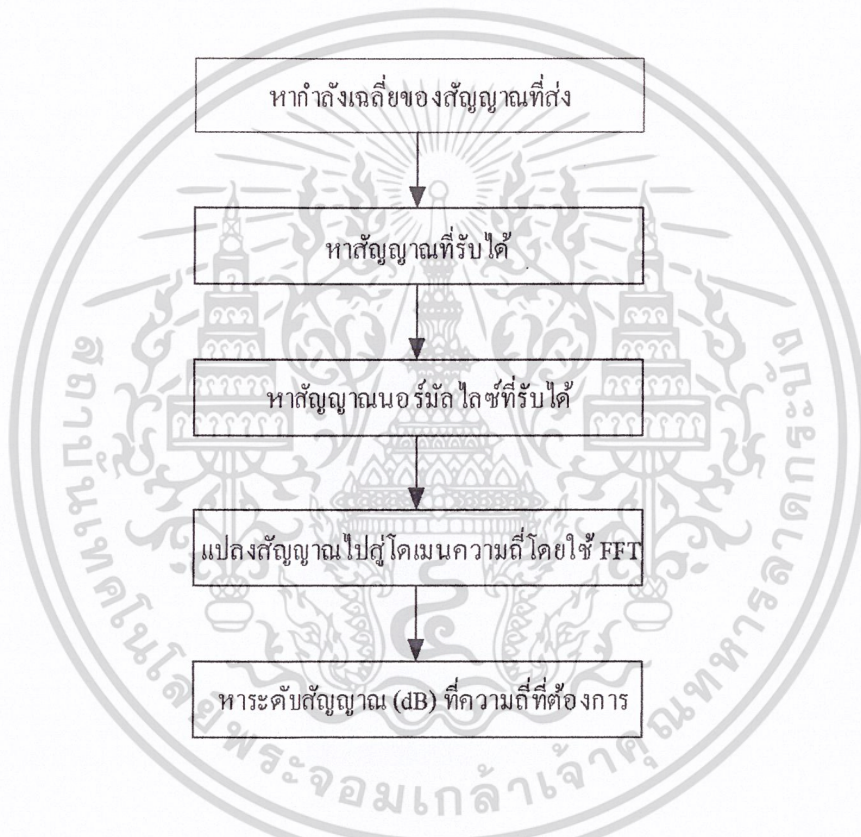
$$\tilde{R}(f) = F\{\tilde{r}(t)\} \quad (3.7)$$

เมื่อ $F\{\}$ เป็นตัวดำเนินการ FFT (Fast Fourier Transform) แปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

ขั้นสุดท้าย หาระดับสัญญาณ (dB) ที่ความถี่ที่ต้องการซึ่งได้จาก

$$P = 20 \log |\tilde{R}(F)| \text{ dB} \quad (3.8)$$

โดยที่ F คือความถี่ที่ต้องการ ในที่นี้จะกำหนดให้ F เป็นความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz

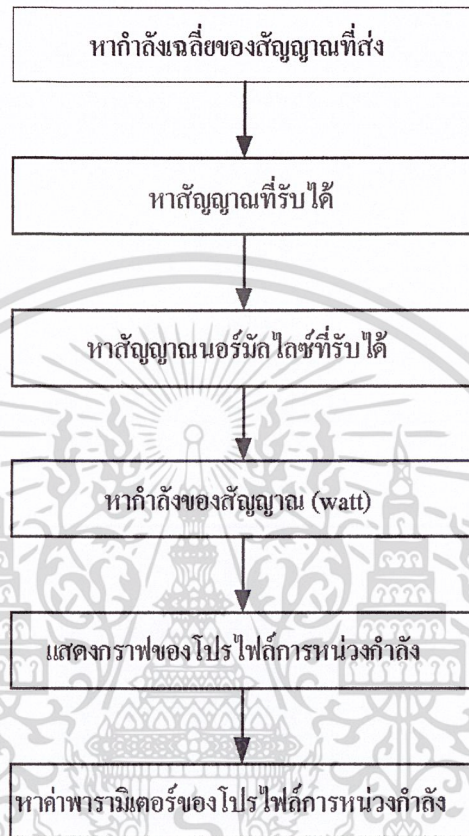


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหาความเข้มสนามไฟฟ้าของสัญญาณที่รับได้

3.4 ขั้นตอนการหาโปรไฟล์การหน่วงกำลัง

โดย 3 ขั้นตอนแรกจะเหมือนกับการหาความเข้มสนามไฟฟ้าของสัญญาณที่รับได้ คือหา กำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ส่ง, หาสัญญาณที่รับได้ และหาสัญญาณนอร์มัลไลซ์ที่รับได้ หลังจากนั้น จึงหาค่ากำลังงานของสัญญาณที่รับได้ แล้วนำมาแสดงเป็นกราฟของโปรไฟล์การหน่วงกำลัง และขั้นสุดท้ายจะทำการหาพารามิเตอร์ของโปรไฟล์การหน่วงกำลัง โดยค่าพารามิเตอร์ที่หาได้นี้คือการเข้า

ถึงเฉลี่ย (Mean Excess Delay), การแผ่การหน่วง rms (rms Delay Spread) และโคฮีเรนต์แบนด์วิดซ์ (Coherent Bandwidth)



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการหาโปรไฟล์การหน่วงกำลัง

3.5 ขั้นตอนการแสดงผลฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น

จากความเข้มสนามไฟฟ้าที่รับได้ตามตำแหน่งของเส้นทางที่กำหนดไว้ สามารถนำมาหาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นได้ดังนี้

1. หาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำสุด และสูงสุด ของสัญญาณที่รับตามเส้นทางที่กำหนดไว้ ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของสัญญาณที่รับได้จะอยู่ในช่วงระหว่างค่ากำลังต่ำสุด และสูงสุด ซึ่งค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของสัญญาณนี้จะกำหนดให้เป็นตัวแปรสุ่ม

2. หาค่าความน่าจะเป็นของสัญญาณตามตัวแปรสุ่ม โดยใช้กราฟฮิสโทแกรม

3. เปรียบเทียบกราฟความน่าจะเป็นที่ได้ว่า มีลักษณะเทียบได้กับรูปแบบการแจกแจงแบบใด เพื่อทำไปใช้เป็นแบบจำลองทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ขั้นตอนการหาฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น

จากฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นกำหนดให้มีฟังก์ชันเป็น $f(x)$ สามารถนำมาหาฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นได้เป็น

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < x_{\min} \\ \sum_{f=x_{\min}}^{x_{\max}} f(x_i) & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (3.9)$$

โดย x_{\min} แทนค่าต่ำสุดของตัวแปรสุ่ม

x_{\max} แทนค่าสูงสุดของตัวแปรสุ่ม

3.7 การทำแบบจำลองทางสถิติ

พิจารณากราฟที่ได้จากฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ว่ามีลักษณะการแจกแจงเป็นแบบใด เพื่อนำมาใช้อธิบายรูปแบบการแจกแจงของสัญญาณที่ได้จากการทำแบบจำลอง

3.8 สรุป

ขั้นตอนที่ใช้ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ตลอดจนสุดท้ายนำมาทำแบบจำลองทางสถิตินั้นจะเริ่มตั้งแต่การสร้างพัลซ์แหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้กระตุ้นสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่กำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่น แล้วให้คลื่นวิทยุแพร่กระจายออกไปในโดเมนโดยใช้วิธี FDTD ที่มี PML ABC อยู่รอบโดเมนคำนวณเพื่อทำหน้าที่ลดทอนคลื่นไม่ให้สะท้อนกลับเข้ามาให้โดเมนคำนวณ ทำให้มองเห็นว่าคลื่นวิทยุนี้แพร่กระจายผ่าน โดเมนคำนวณไปสู่ระยะอนันต์

เมื่อเสร็จขั้นตอนการวิเคราะห์ข้างต้นสิ่งที่ได้ทำการบันทึกไว้คือค่าสนาม E_z ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในโดเมนคำนวณที่คลื่นวิทยุแพร่กระจายออกไป ซึ่งค่าที่บันทึกไว้นี้จะนำมาคำนวณหา ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า โปรไฟล์การหน่วงกำลัง ความหนาแน่นความน่าจะเป็น และ การแจกแจงความน่าจะเป็น ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อต่าง ๆ ข้างต้น เพื่อนำมาทำเป็นแบบจำลองทางสถิติ

บทที่ 4

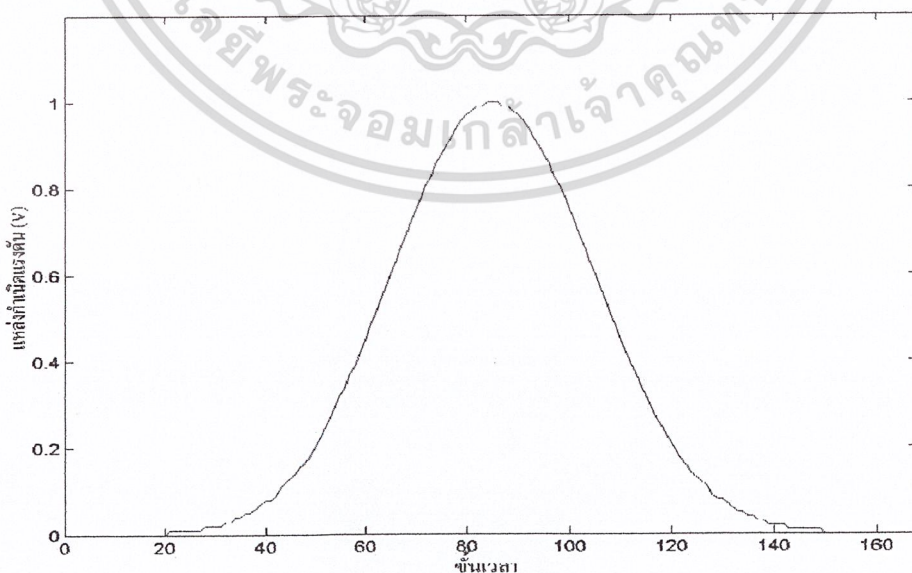
ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ผลที่ได้จากการทดลองการวิเคราะห์ การแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จะนำมาแสดงด้วยรูปแสดงการแพร่ของสนาม E_z ที่ชั้นเวลาต่าง ๆ กัน การแพร่กระจายสนามไฟฟ้าตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ แบบจำลองทางสถิติซึ่งแสดงด้วยฟังก์ชัน ความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function) และฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น (Cumulative Density Function) และแสดงโปรไฟล์การหน่วงกำลัง (Power Delay Profile) พารามิเตอร์ที่คำนวณจากโปรไฟล์การหน่วงกำลัง ได้แก่การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay, $\bar{\tau}$) การแผ่การหน่วง rms (rms Delay Spread, σ_τ) และ โคฮีเรนต์แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth)

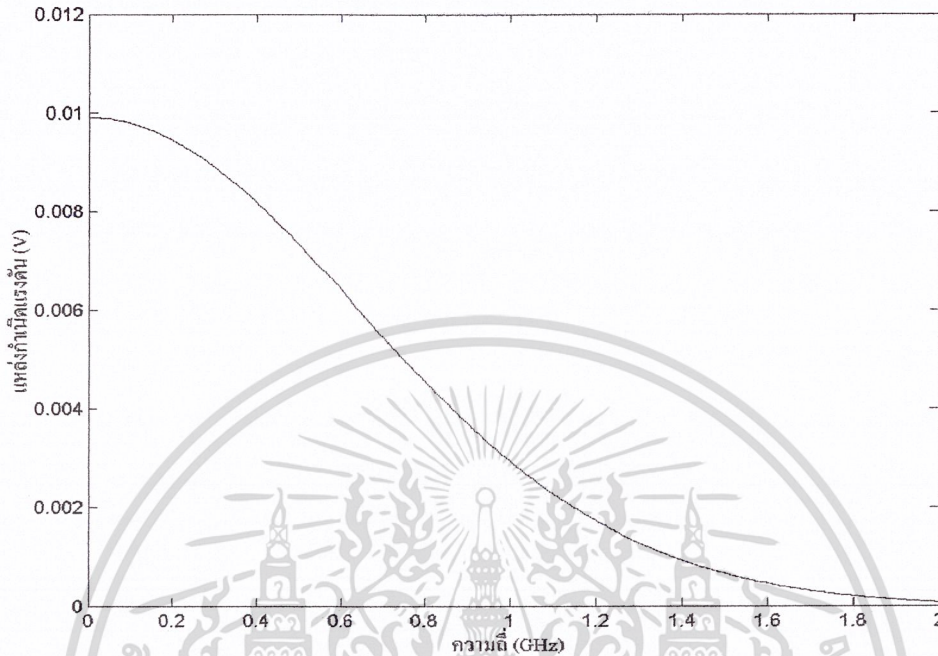
4.2 แหล่งกำเนิดแรงดันที่ใช้ในการทดลอง

กราฟของแหล่งกำเนิดแรงดันในสมการ (3.4) แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเมื่อทำการแปลงฟูเรียร์จะได้ส่วนประกอบของช่วงความถี่ตั้งแต่สัญญาณ DC จนถึง 2 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟแหล่งกำเนิดแรงดันในสมการ (3.4) ในโดเมนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



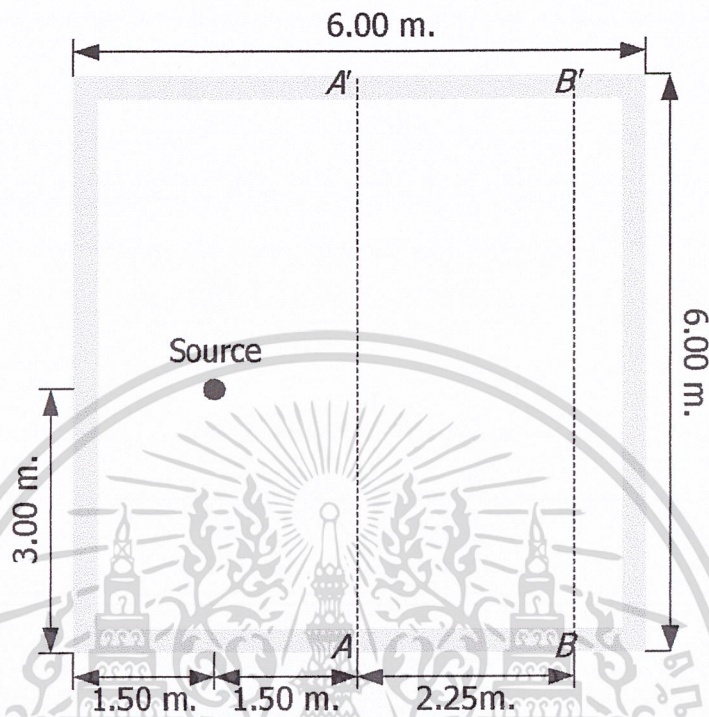
รูปที่ 4.2 กราฟแหล่งกำเนิดแรงดันในสมการ (3.4) ในโดเมนความถี่

4.3 ผลการทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่าง

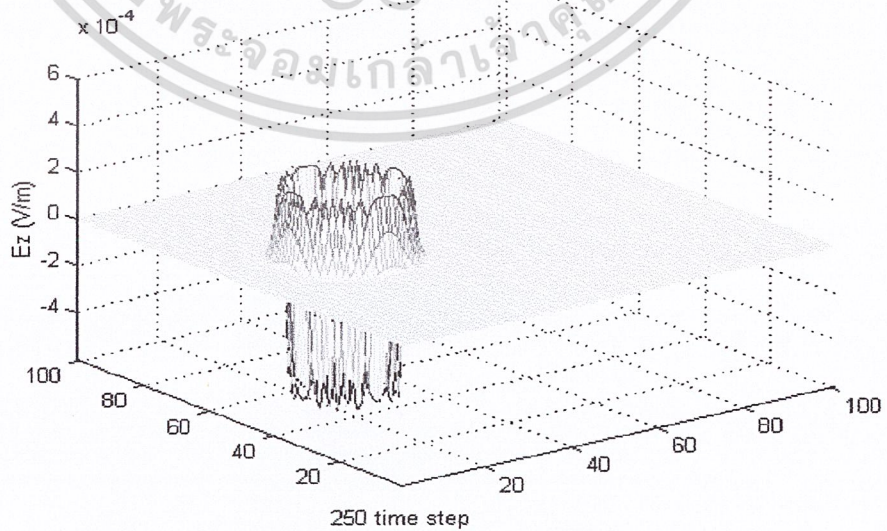
การทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่างนั้นได้กำหนดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุอยู่ที่จุด Source และตำแหน่งที่ทำการบันทึกส่วนประกอบสนามไฟฟ้า จะอยู่ตำแหน่งตามเส้นทาง AA' และ BB' ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย

1. ค่าสภาพนำ (Conductivity) ของอากาศว่าง $\sigma = 0 \text{ } \Omega^{-1}m^{-1}$
2. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของอากาศว่าง $\epsilon_r = 1$

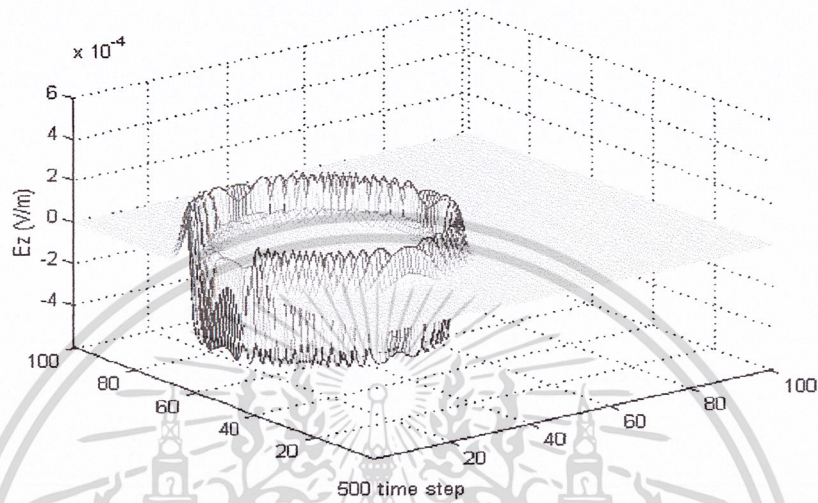


รูปที่ 4.3 โดเมนการคำนวณที่ใช้วิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ภายในสภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่าง

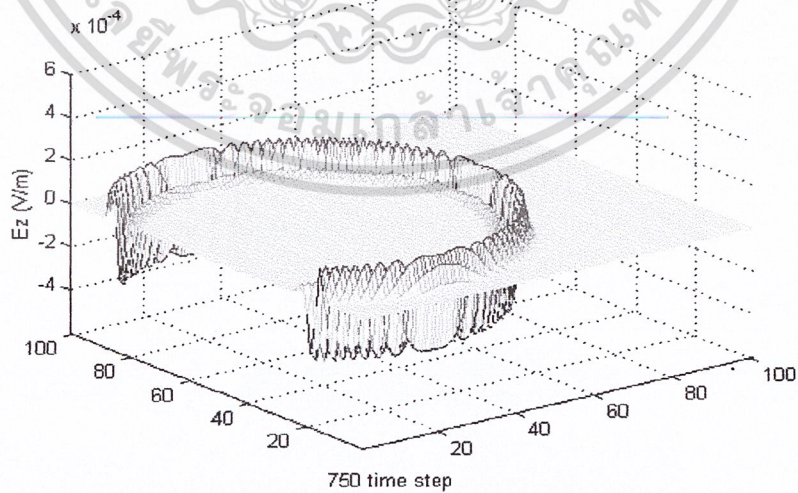


(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

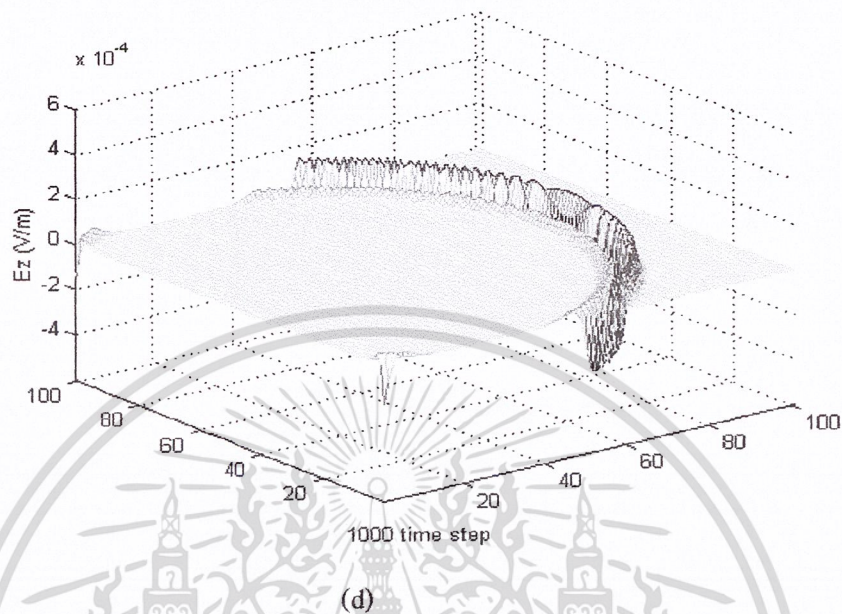


(b)

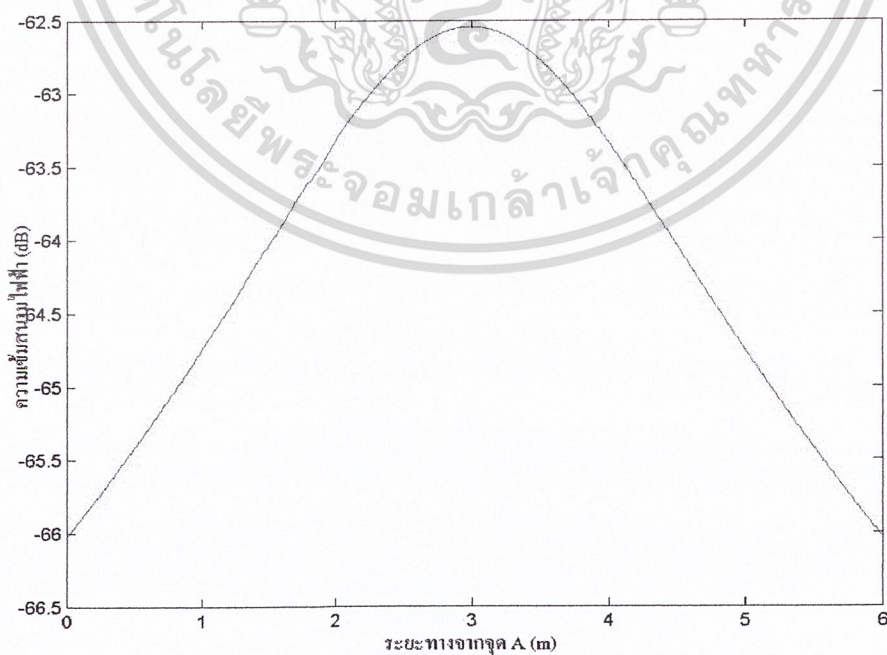


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

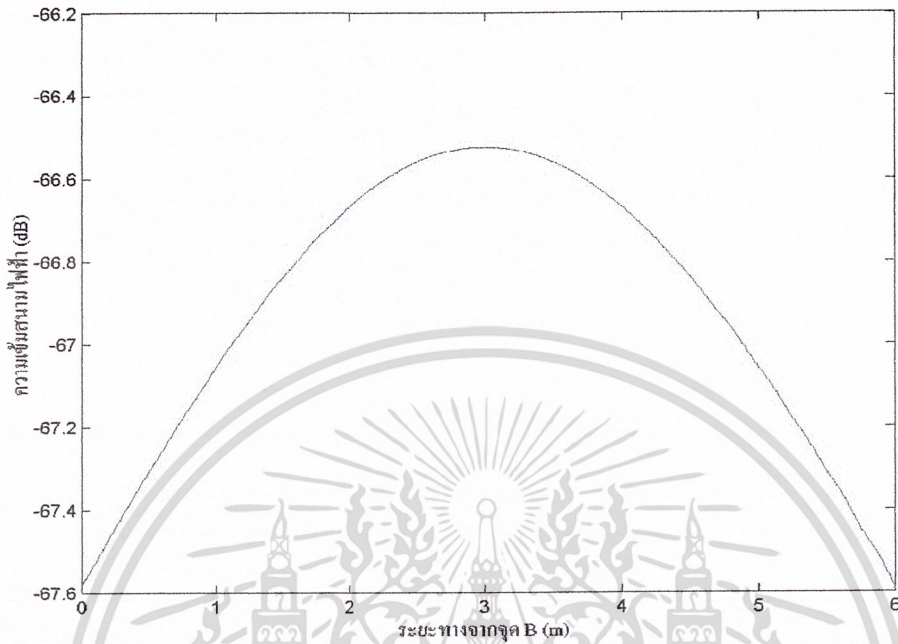


รูปที่ 4.4 การแพร่กระจายของสนาม E_z ที่ระนาบ xy ตามชั้นเวลาที่แสดงตามรูป (a) = 250 (b) = 500 (c) = 750 และ (d) = 1000 ชั้นเวลาตามลำดับ

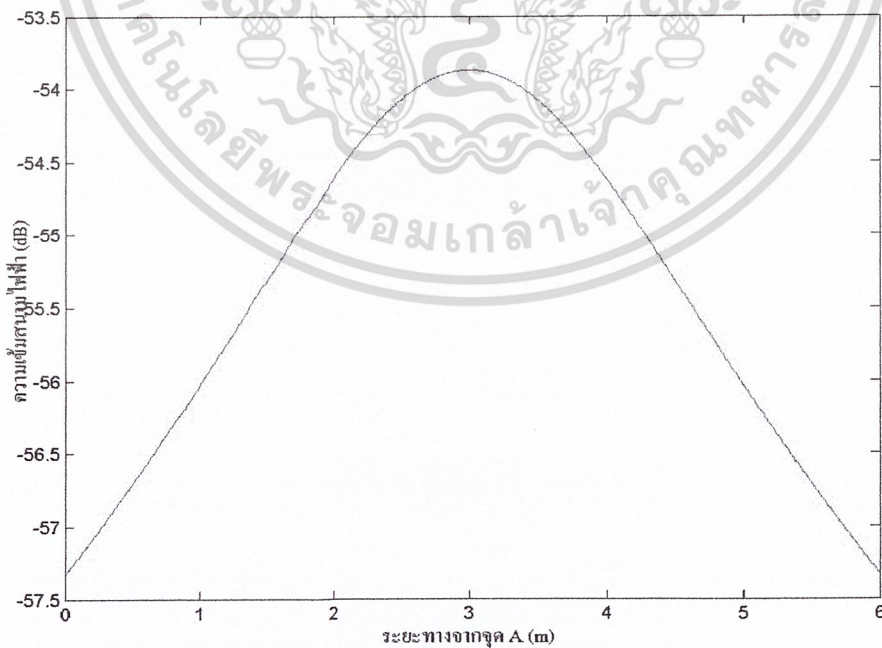


รูปที่ 4.5 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

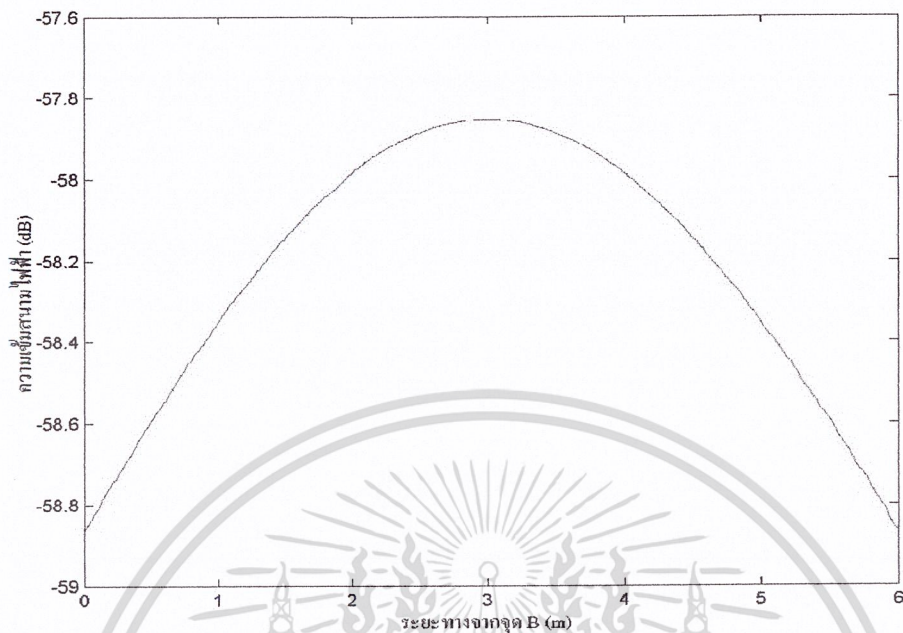


รูปที่ 4.6 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'

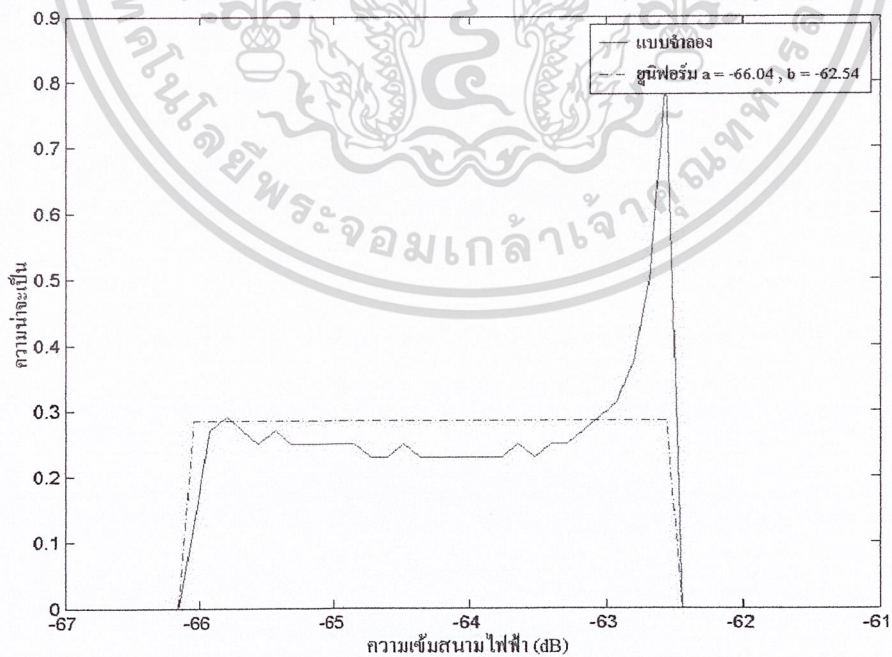


รูปที่ 4.7 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

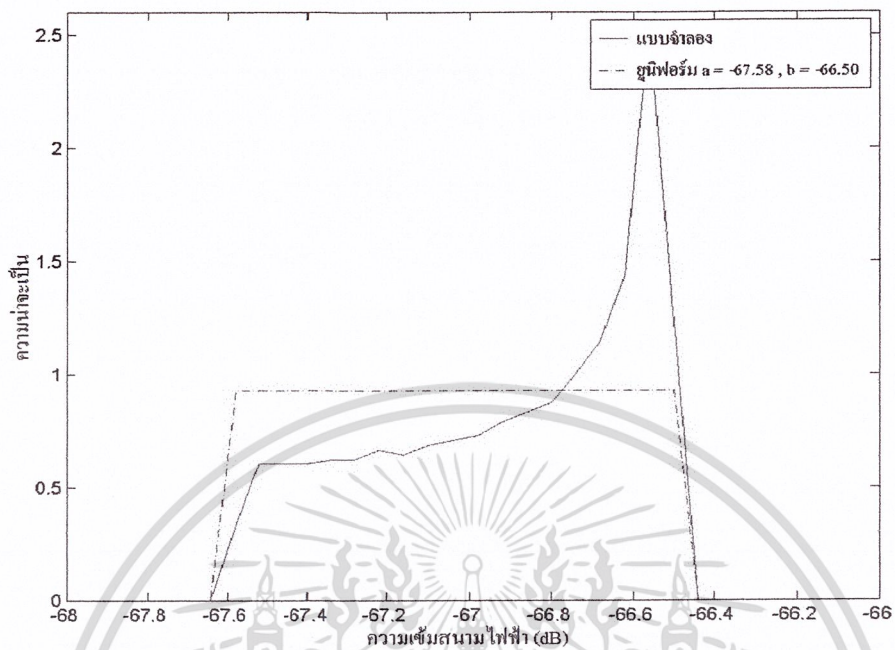


รูปที่ 4.8 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'

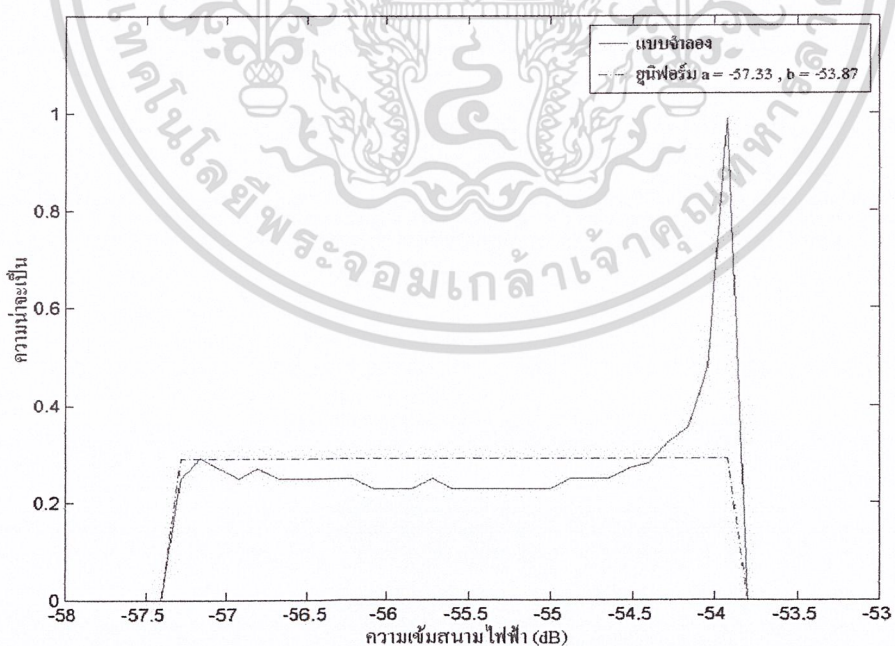


รูปที่ 4.9 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

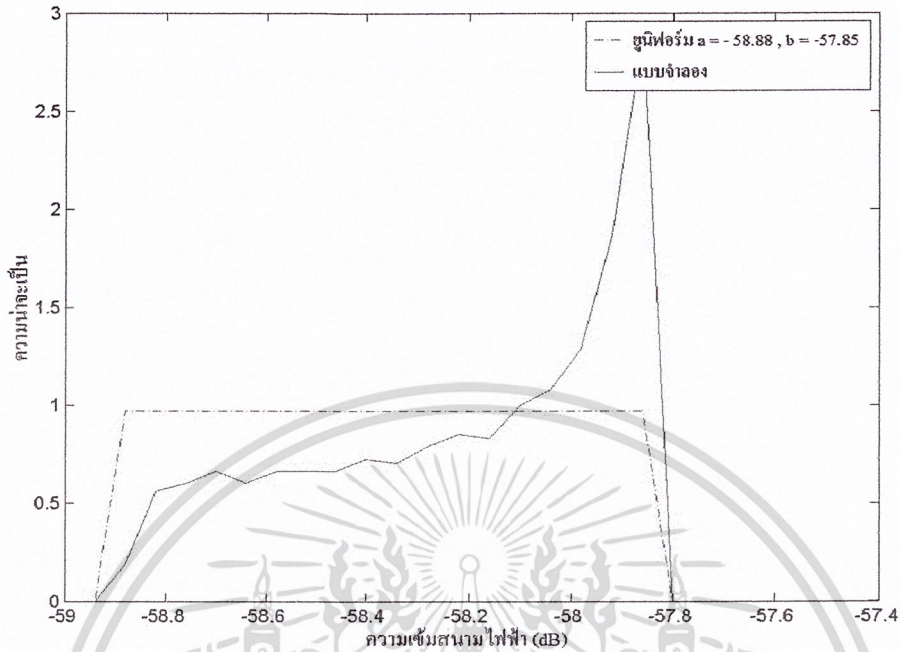


รูปที่ 4.10 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'

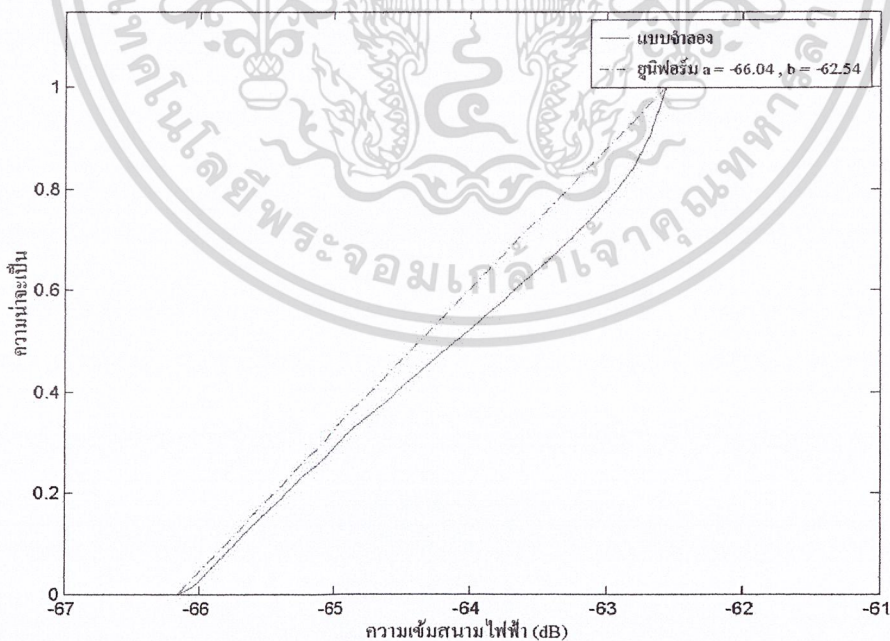


รูปที่ 4.11 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

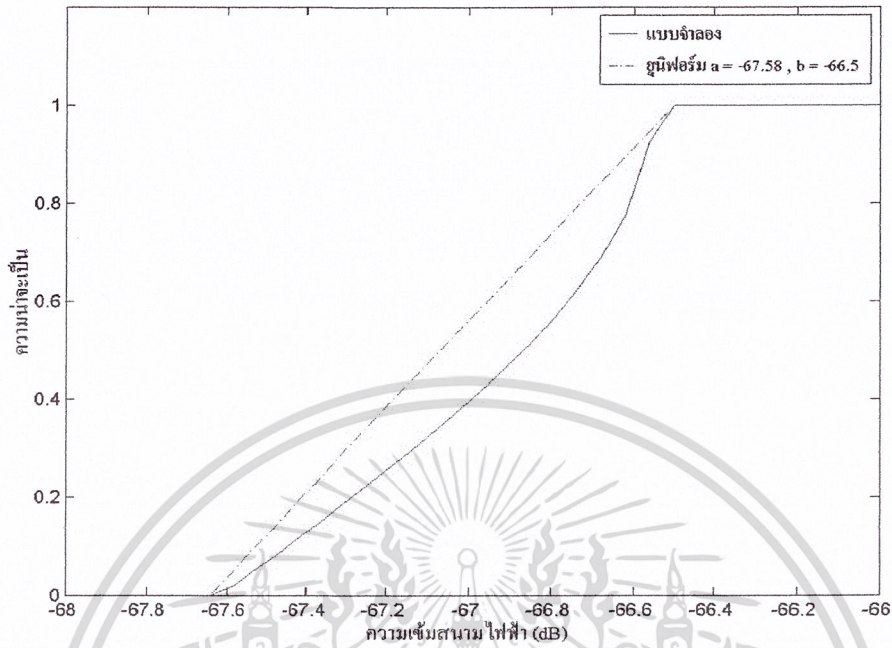


รูปที่ 4.12 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'

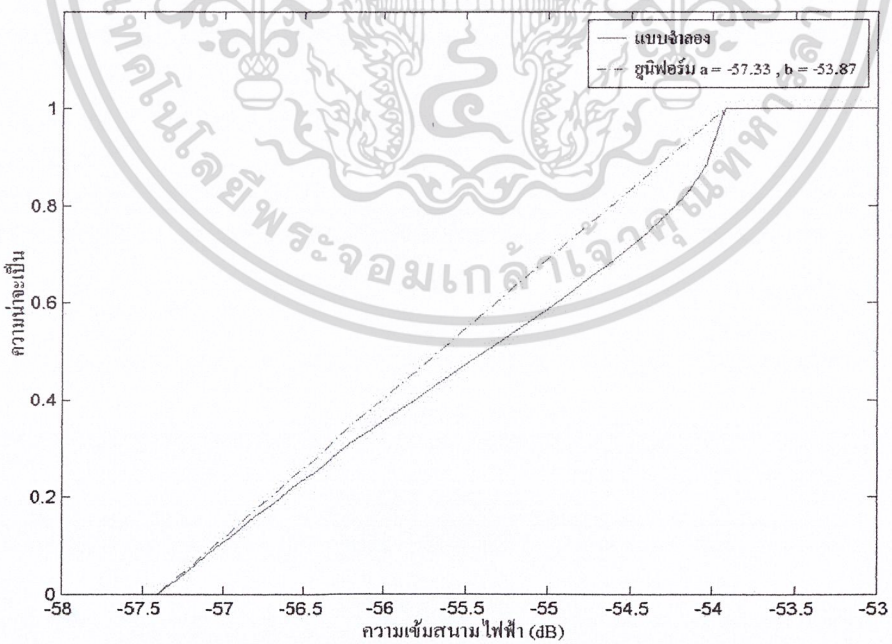


รูปที่ 4.13 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

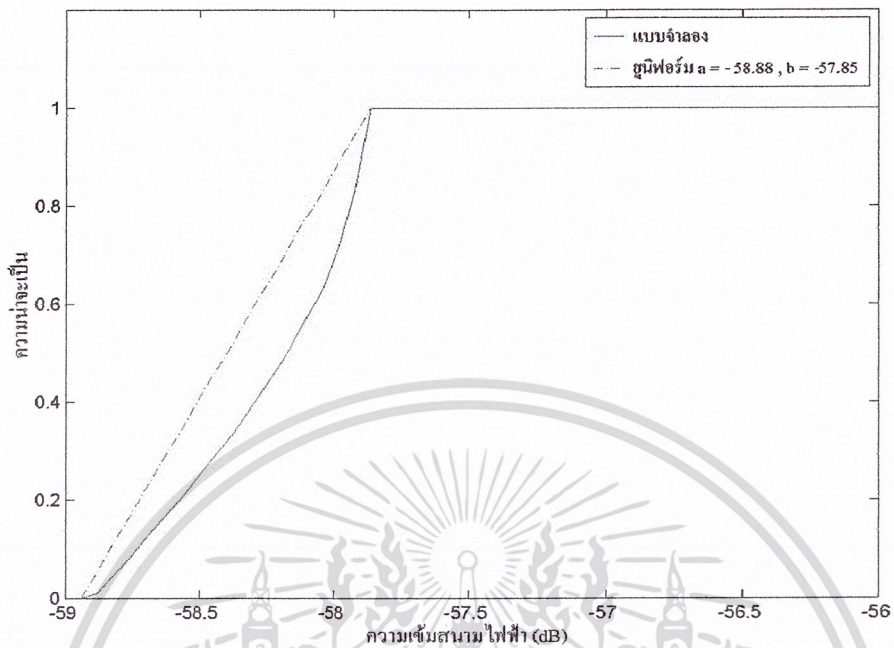


รูปที่ 4.14 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'

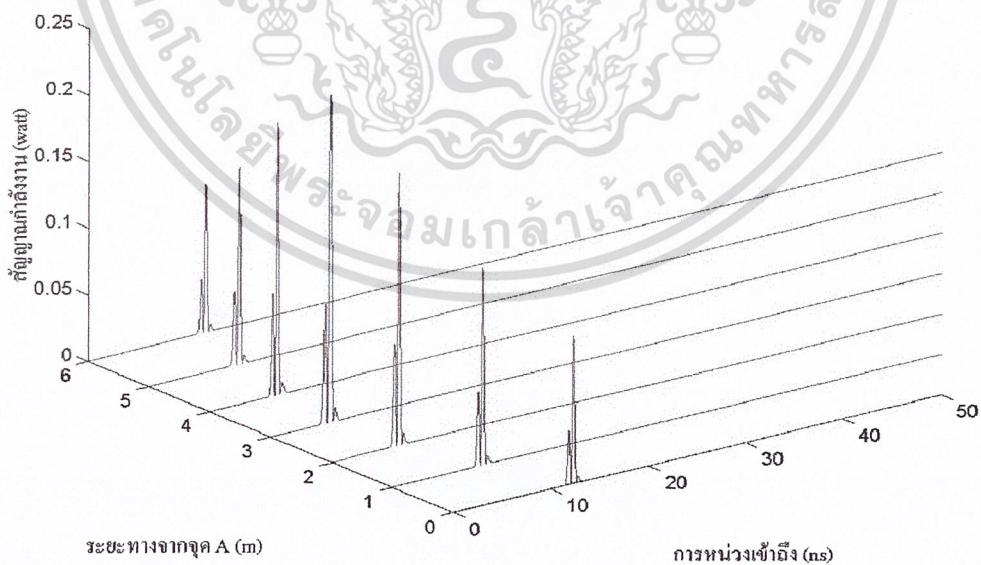


รูปที่ 4.15 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

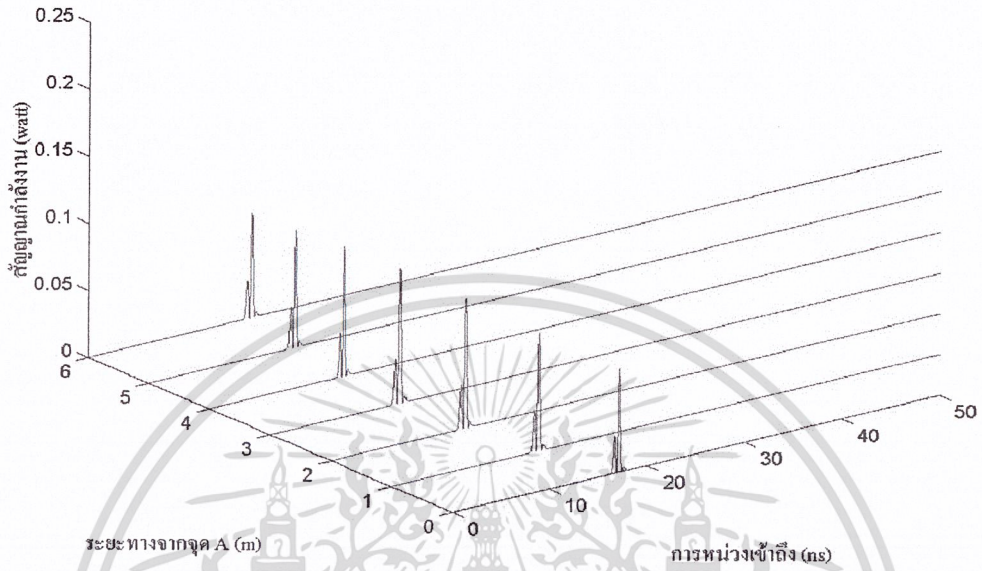


รูปที่ 4.16 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'

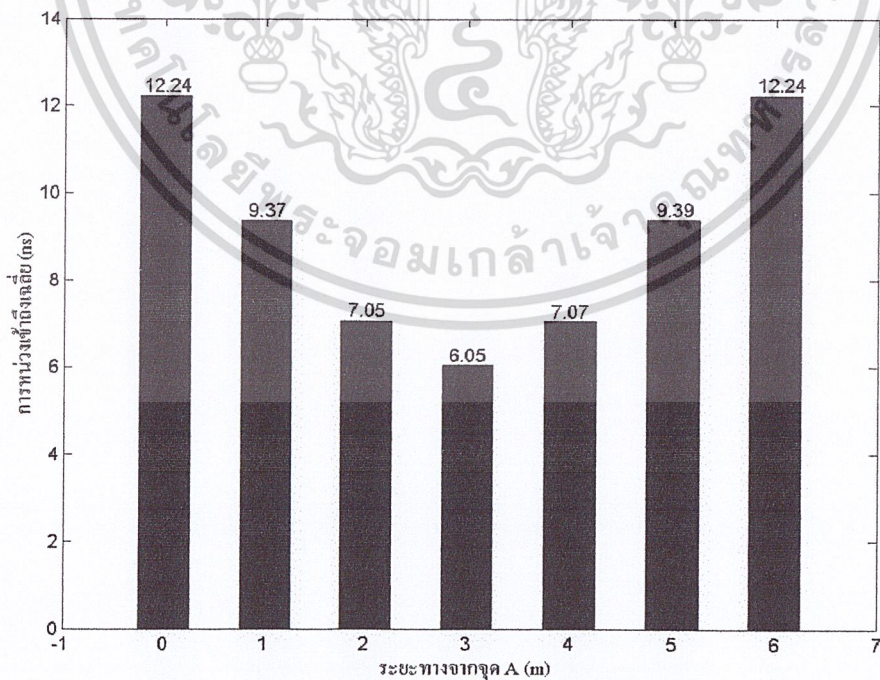


รูปที่ 4.17 โพรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

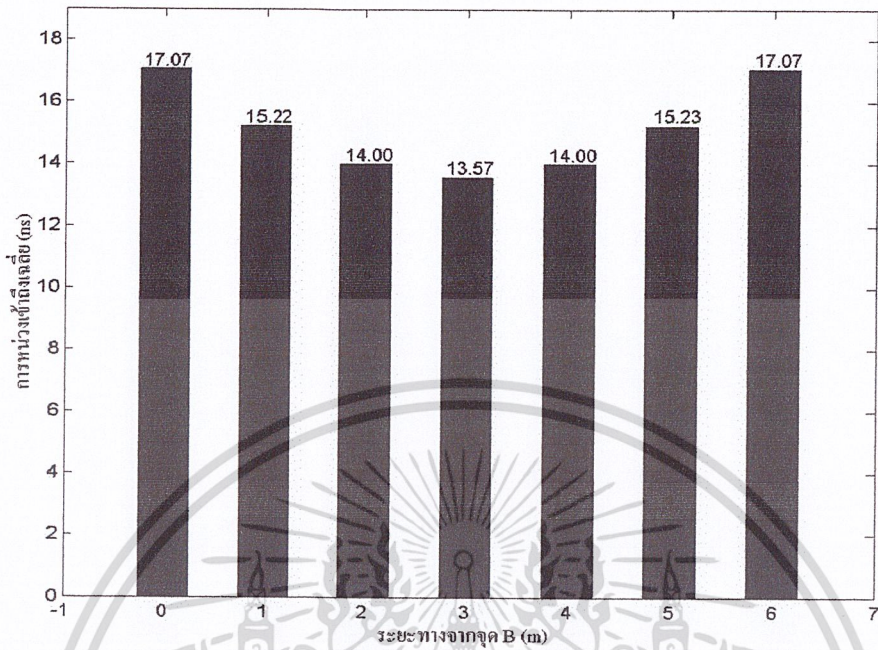


รูปที่ 4.18 โพรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง BB'

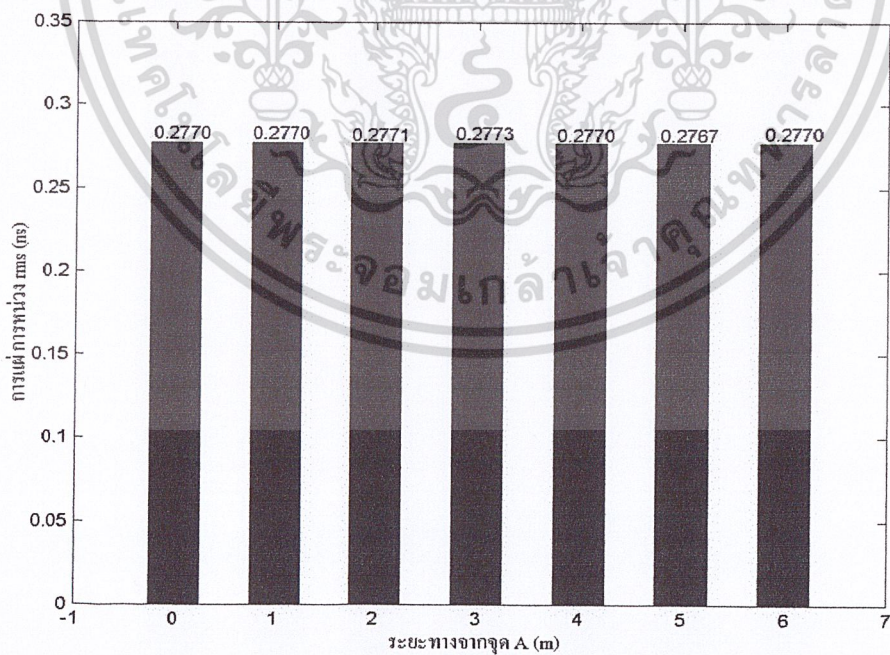


รูปที่ 4.19 พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay, $\bar{\tau}$) ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

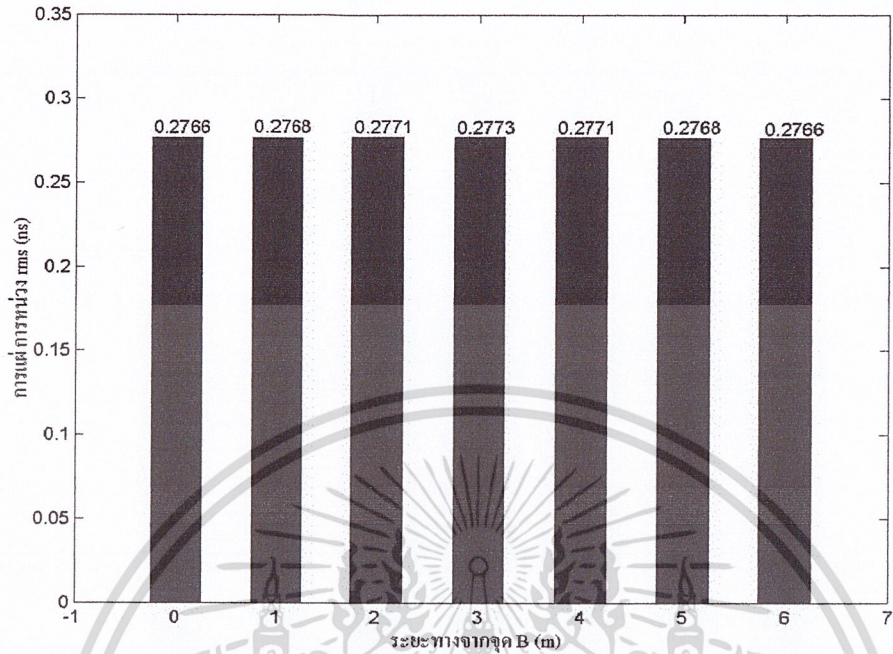


รูปที่ 4.20 พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay, $\bar{\tau}$) ตามเส้นทาง BB'

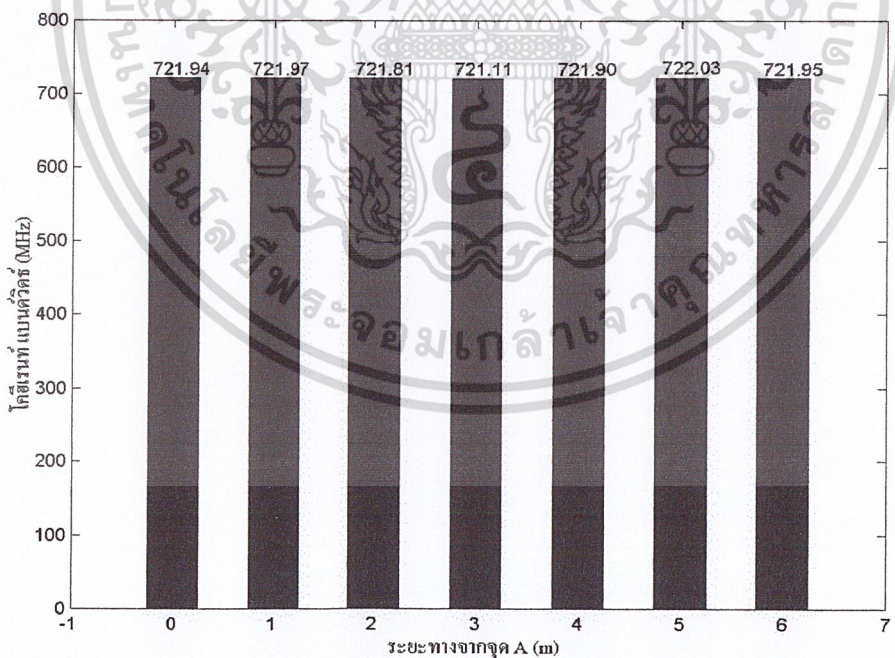


รูปที่ 4.21 พารามิเตอร์การแผ่การหน่วง rms (rms Delay Spread, σ_{τ}) ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

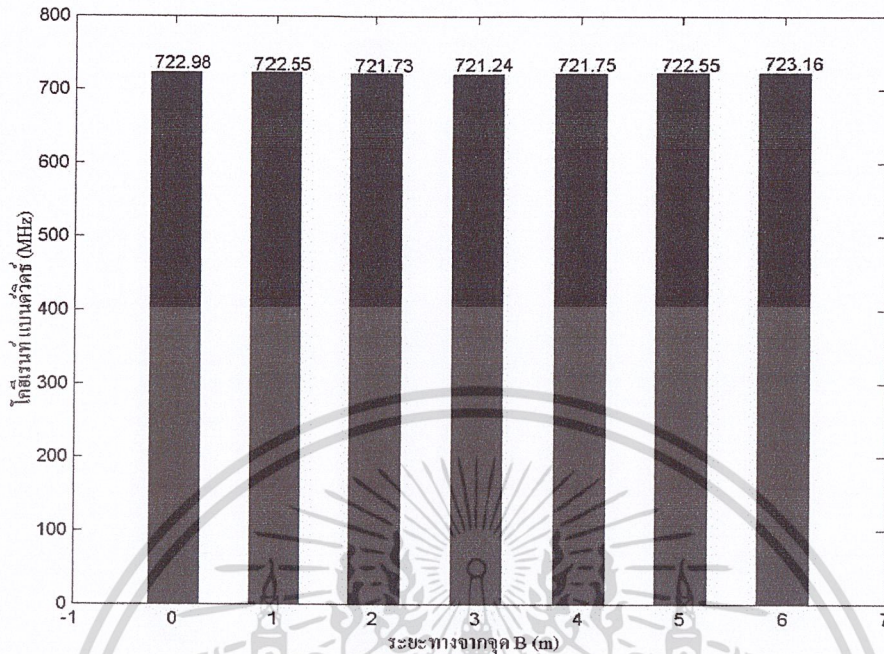


รูปที่ 4.22 พารามิเตอร์การแผ่การหน่วง rms (rms Delay Spread, σ_r) ตามเส้นทาง BB'



รูปที่ 4.23 ค่าโคฮีเรนซ์แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



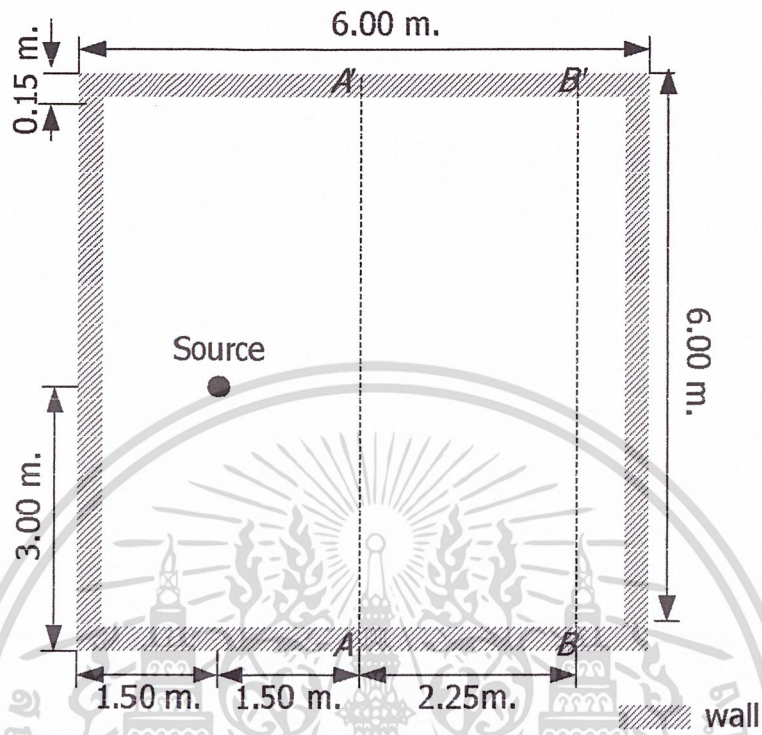
รูปที่ 4.24 ค่าโคฮีเรนซ์ แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง BB'

4.4 ผลการทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในห้องที่ว่างเปล่า

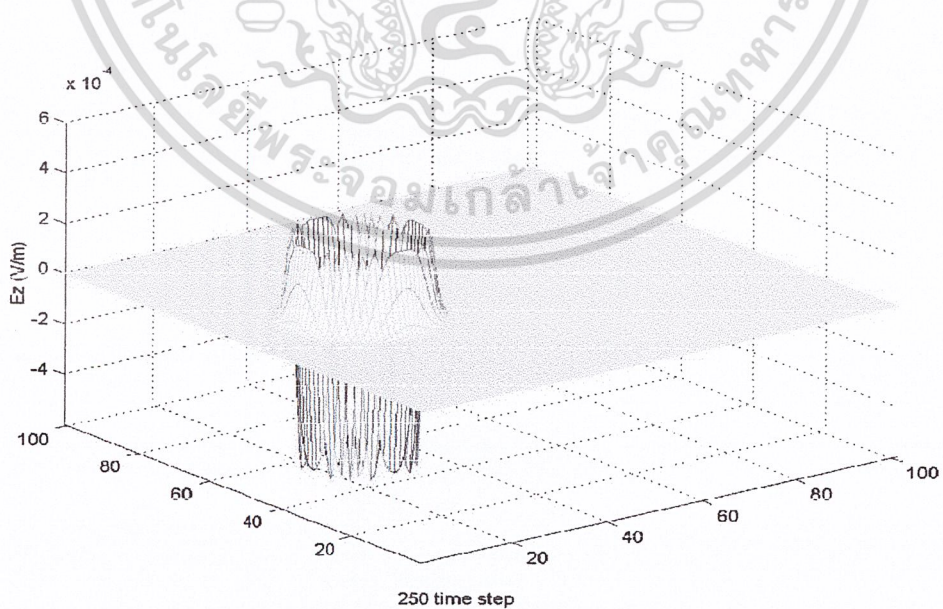
การทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในห้องที่ห้องว่างเปล่านั้นได้กำหนดให้ ห้องถูกสร้างด้วยกำแพงคอนกรีตทั้งสี่ด้านหน้าด้านหลัง 15 เซนติเมตร ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุอยู่ที่จุด Source และตำแหน่งที่ทำการบันทึกส่วนประกอบสนามไฟฟ้า จะอยู่ตำแหน่งตามเส้นทาง AA' และ BB' ดังแสดงในรูปที่ 4.25

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย

1. ค่าสภาพนำ (Conductivity) ของอากาศว่าง $\sigma = 0 \text{ } \Omega^{-1}m^{-1}$
2. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของอากาศว่าง $\epsilon_r = 1$
3. ค่าสภาพนำ (Conductivity) ของกำแพงคอนกรีต $\sigma = 0.012 \text{ } \Omega^{-1}m^{-1}$
4. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของกำแพงคอนกรีต $\epsilon_r = 8.0$

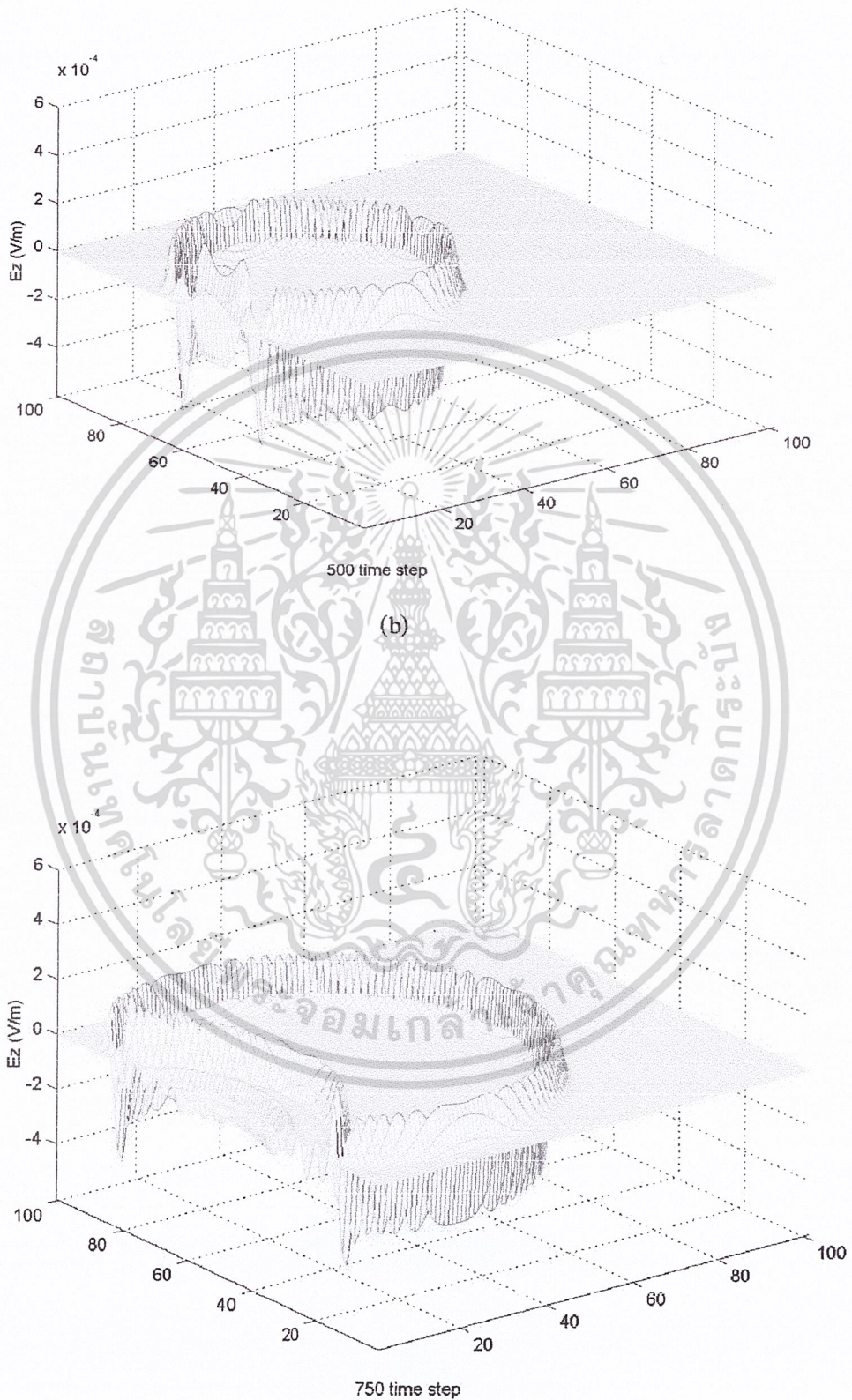


รูปที่ 4.25 โดเมนการคำนวณที่ใช้วิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ภายในห้องที่วางแปลน



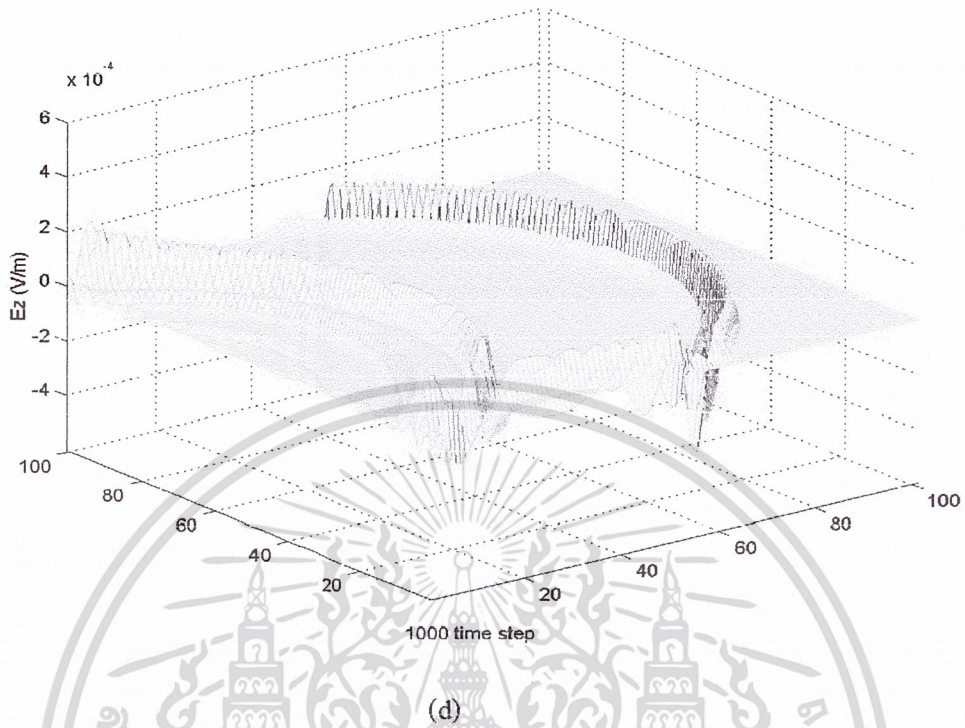
(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

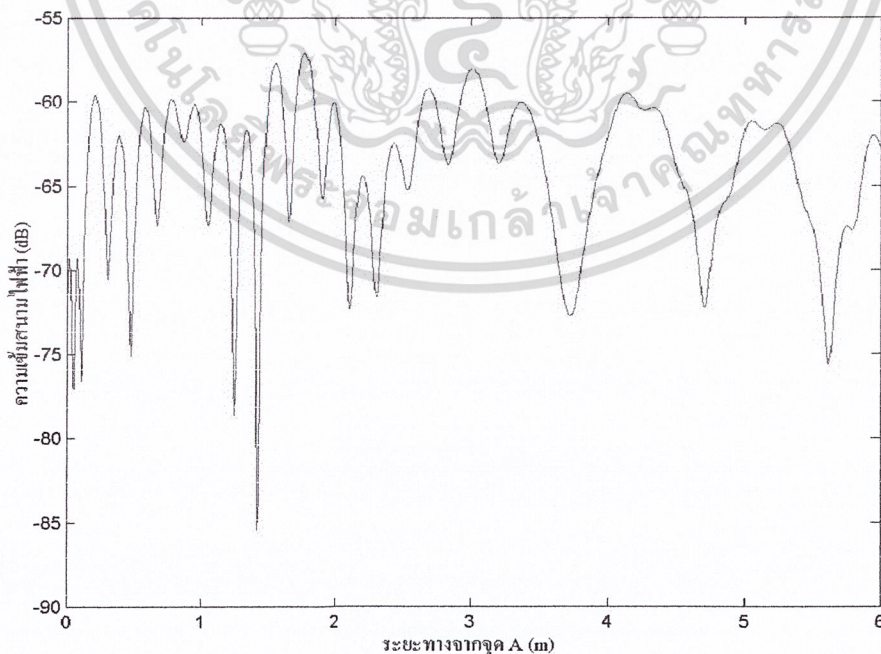


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

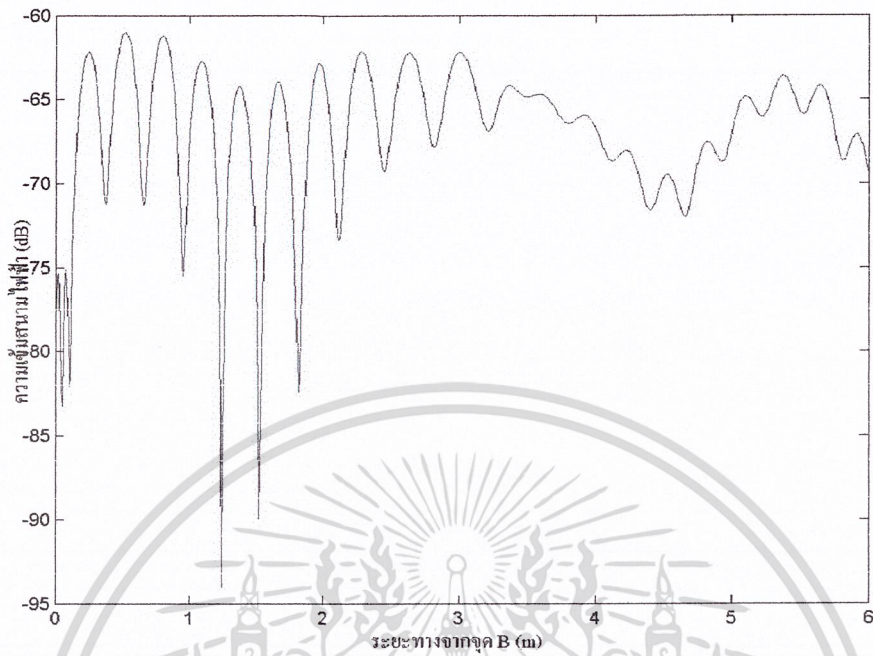


รูปที่ 4.26 การแพร่กระจายของสนาม E_z ที่ระนาบ xy ตามชั้นเวลาที่แสดงตามรูป (a) = 250 (b) = 500 (c) = 750 และ (d) = 1000 ชั้นเวลาตามลำดับ

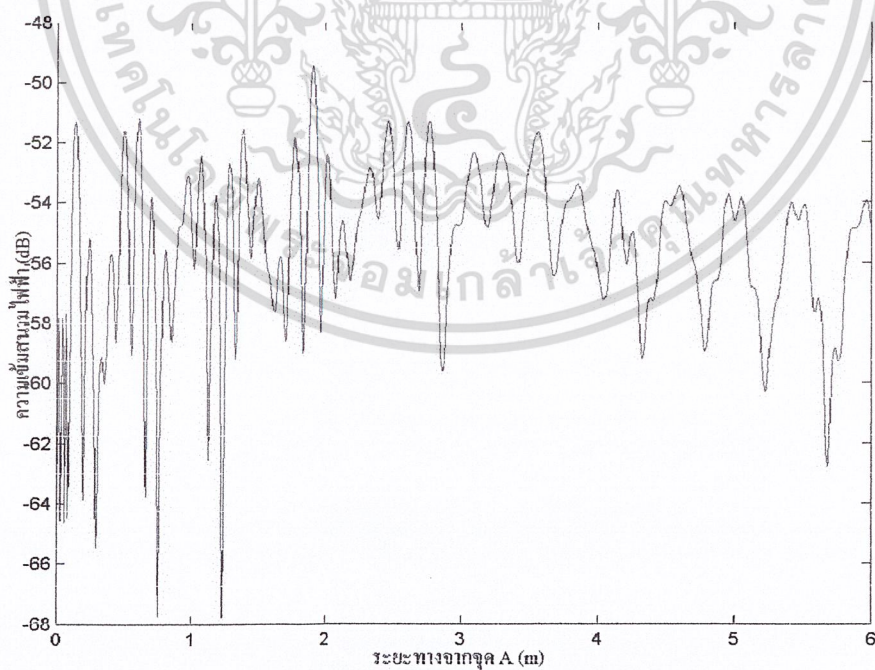


รูปที่ 4.27 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

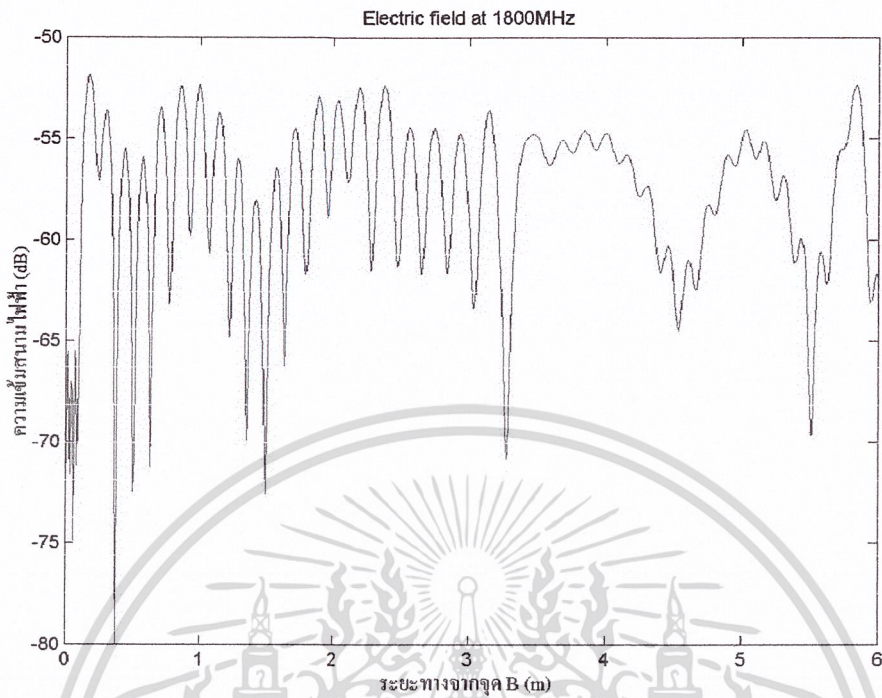


รูปที่ 4.28 พัลส์สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'

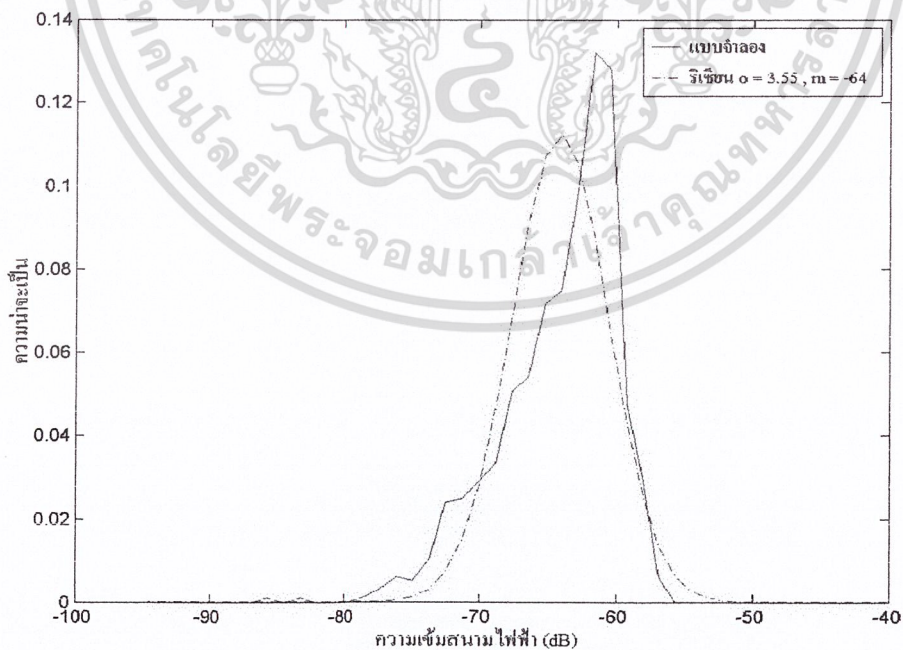


รูปที่ 4.29 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

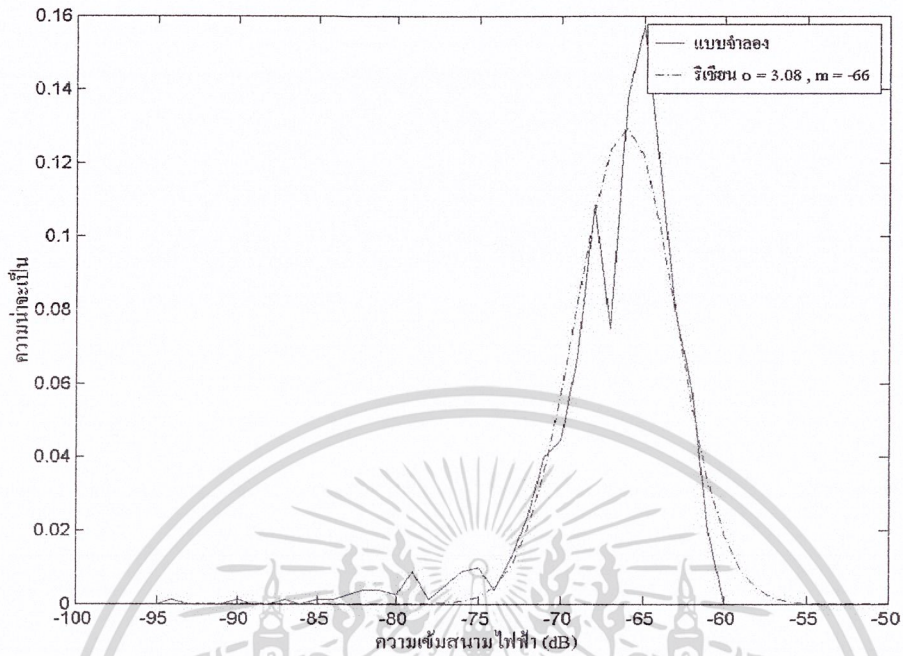


รูปที่ 4.30 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'

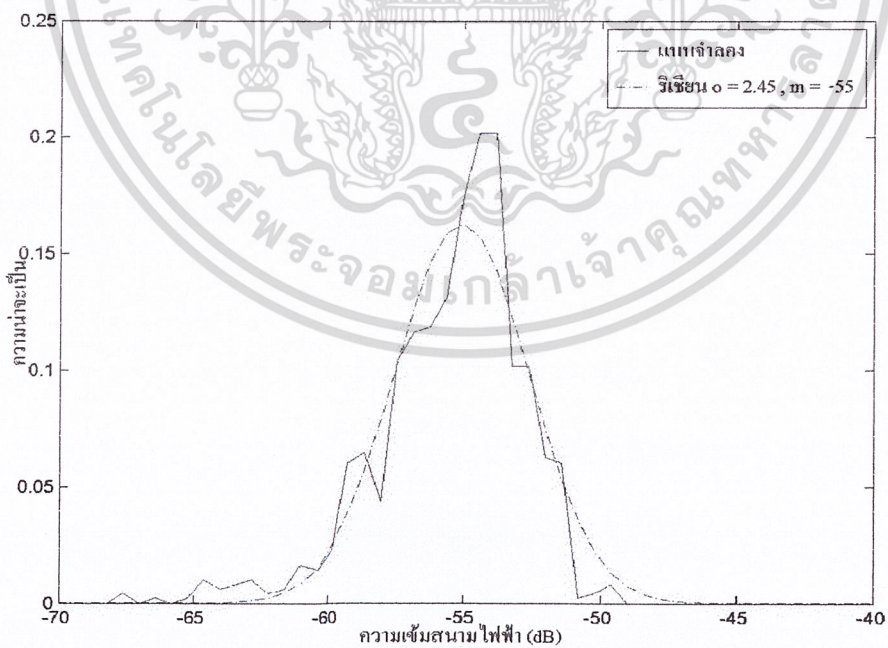


รูปที่ 4.31 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

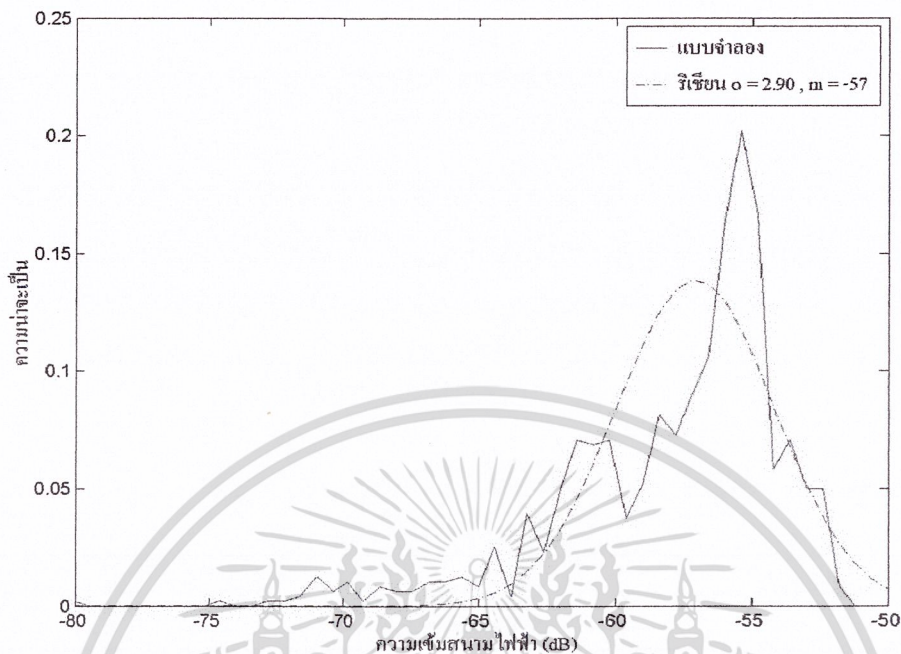


รูปที่ 4.32 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'

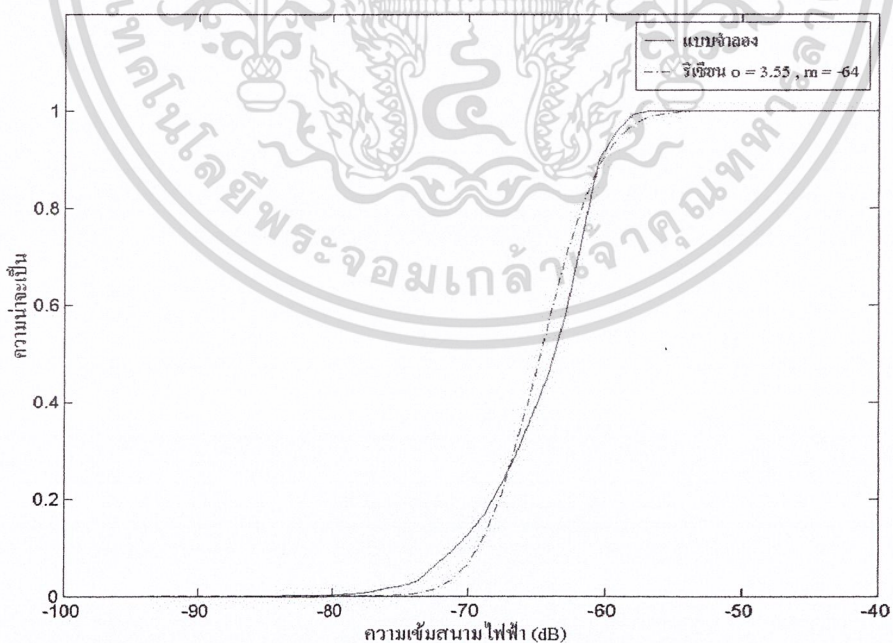


รูปที่ 4.33 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

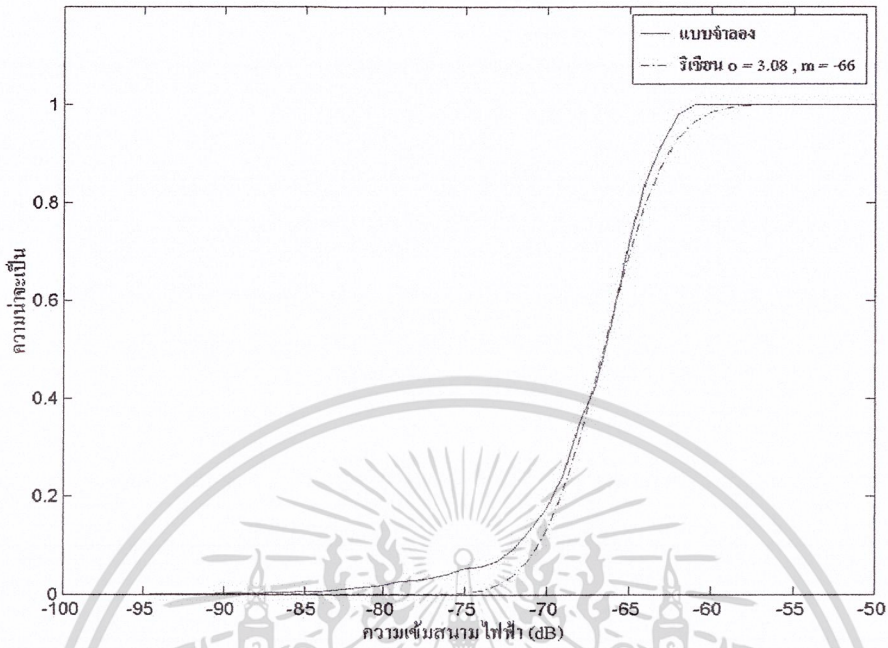


รูปที่ 4.34 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'

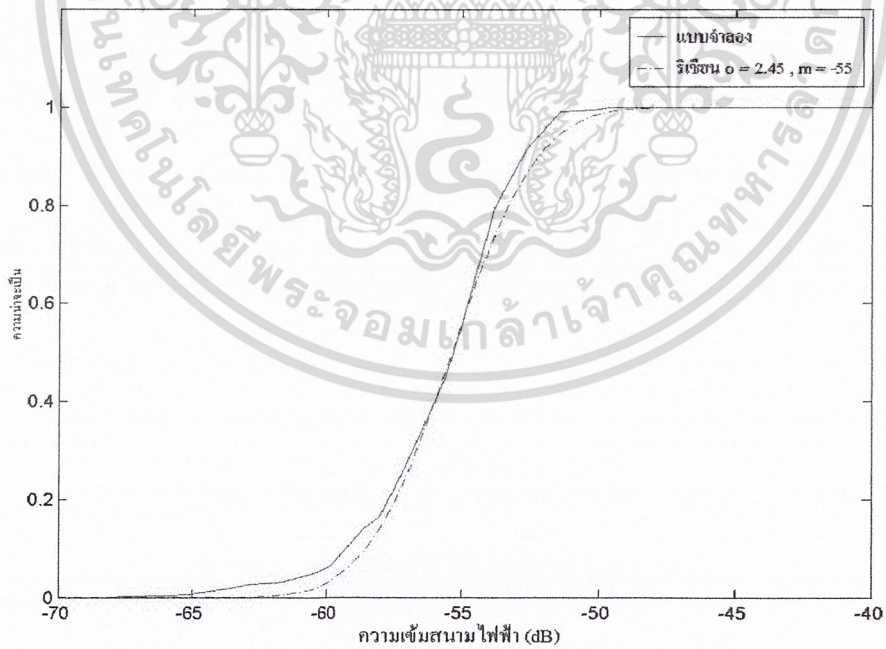


รูปที่ 4.35 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

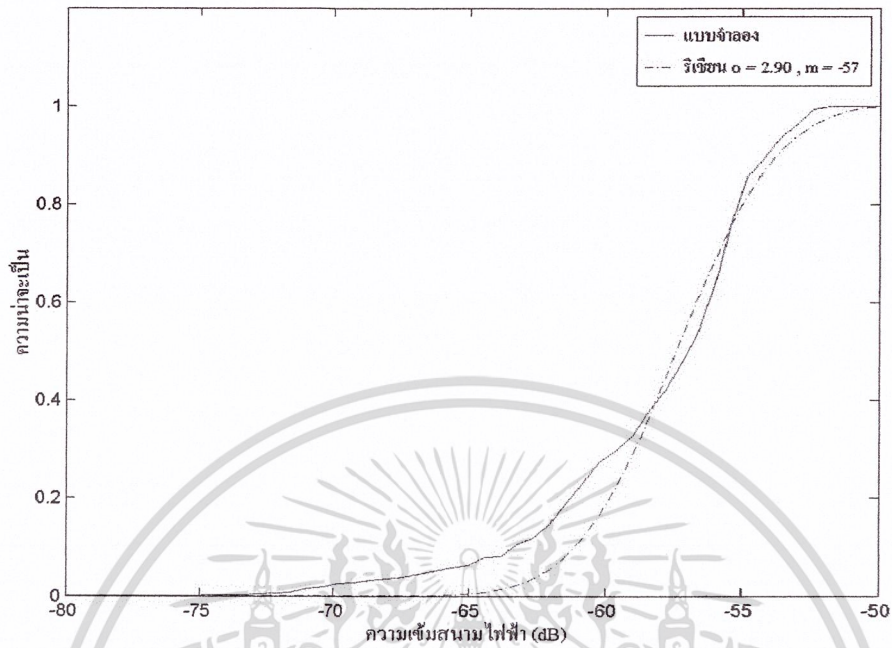


รูปที่ 4.36 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'

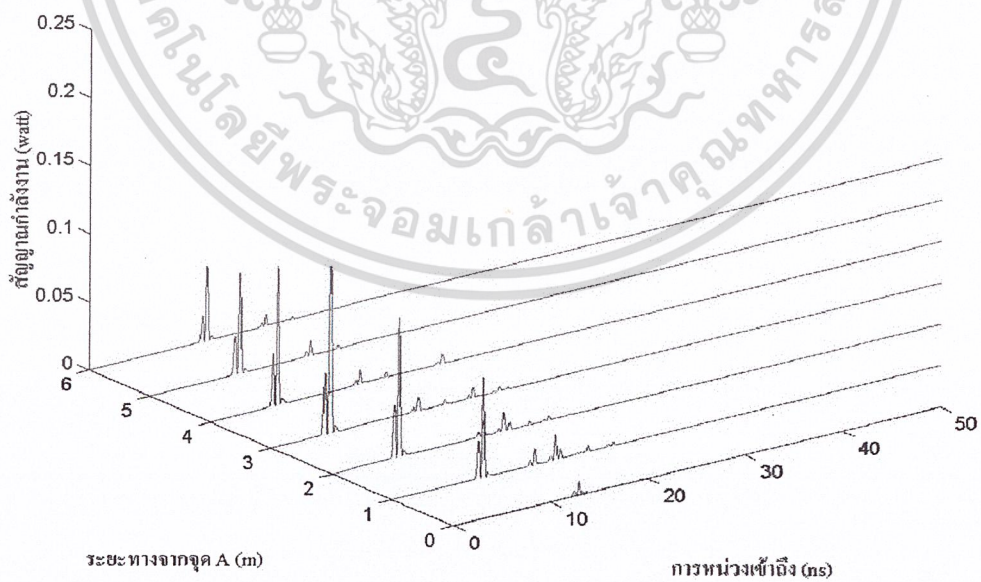


รูปที่ 4.37 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

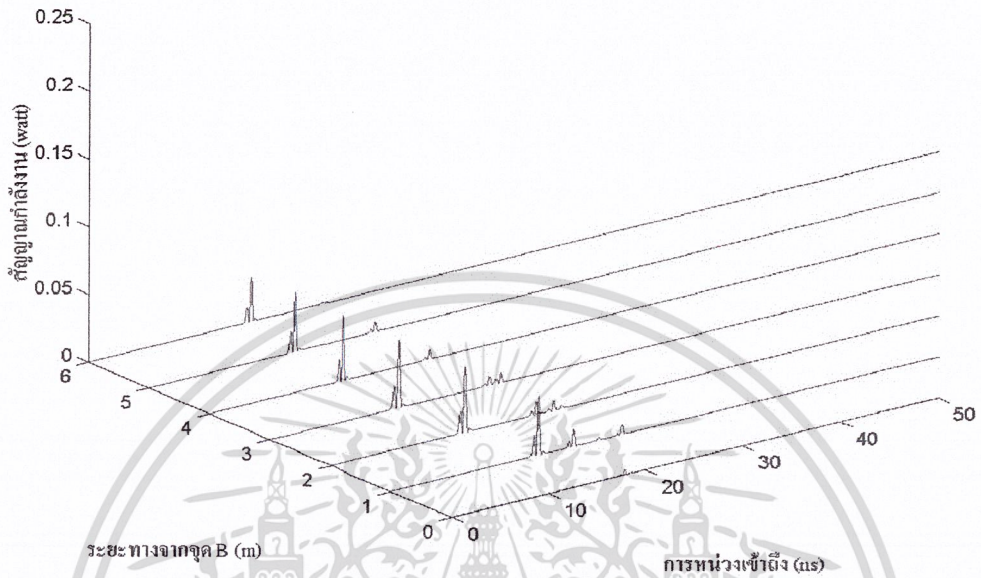


รูปที่ 4.38 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'

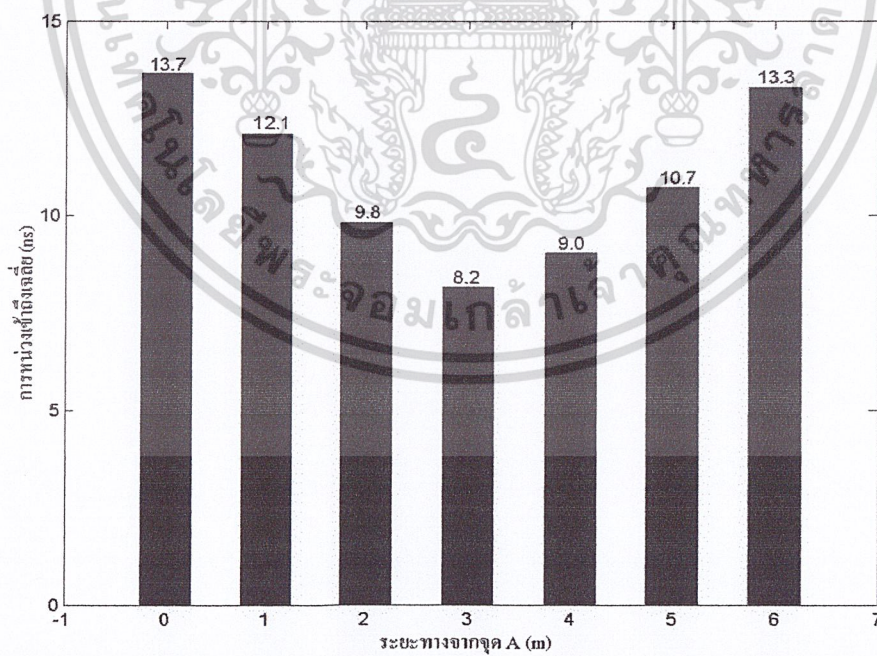


รูปที่ 4.39 โปรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

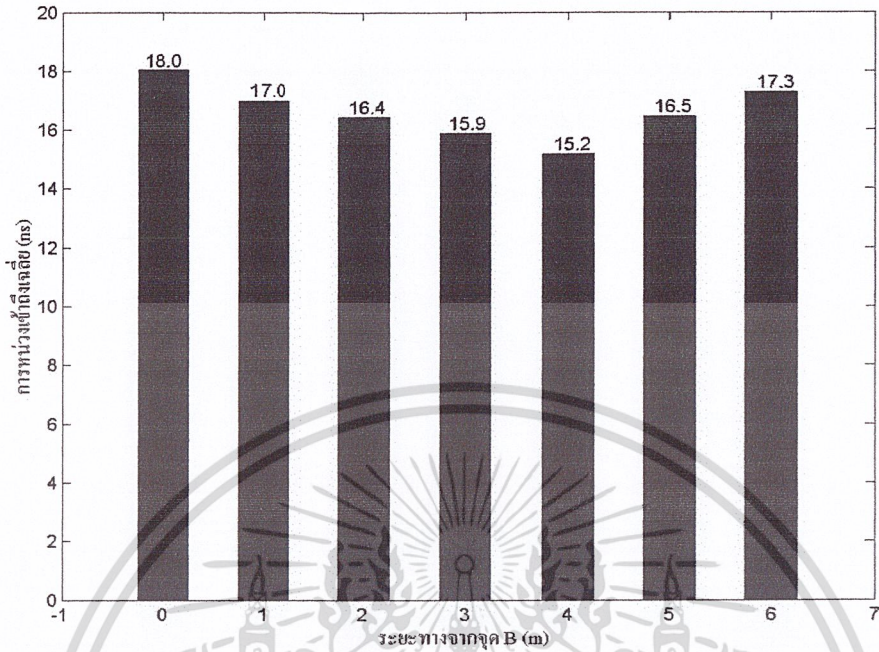


รูปที่ 4.40 โปรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง BB'

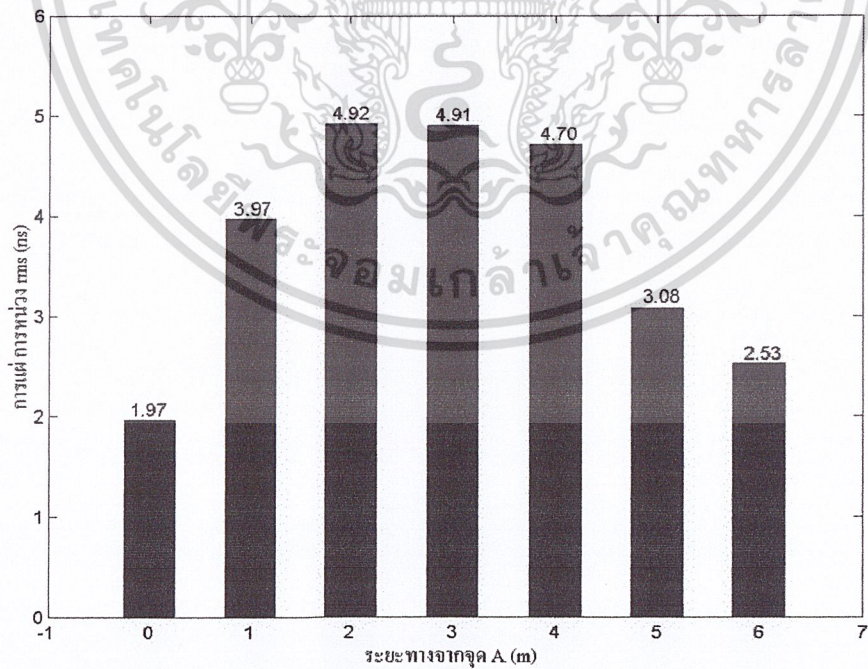


รูปที่ 4.41 พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay, $\bar{\tau}$) ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

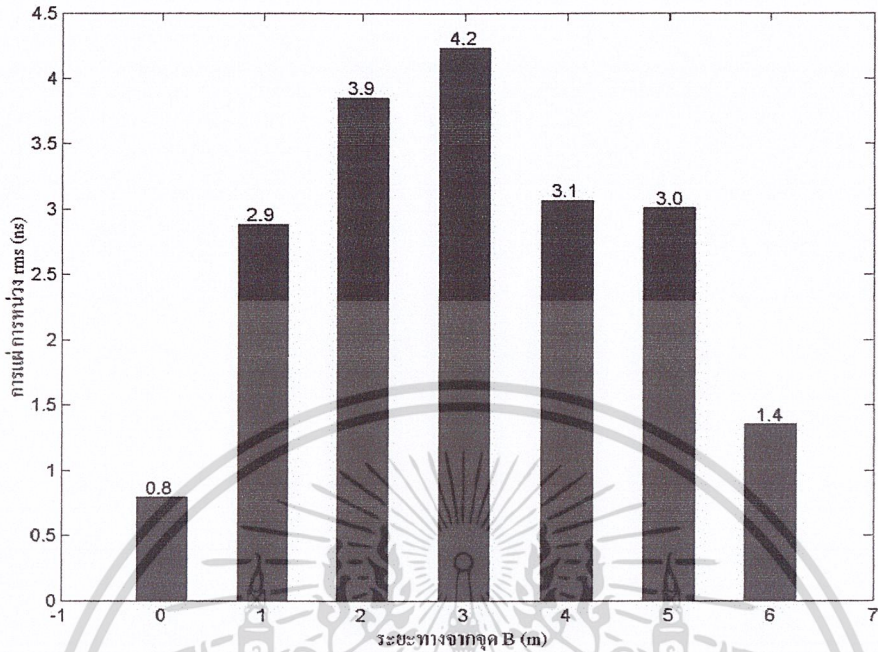


รูปที่ 4.42 พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay, $\bar{\tau}$) ตามเส้นทาง BB'

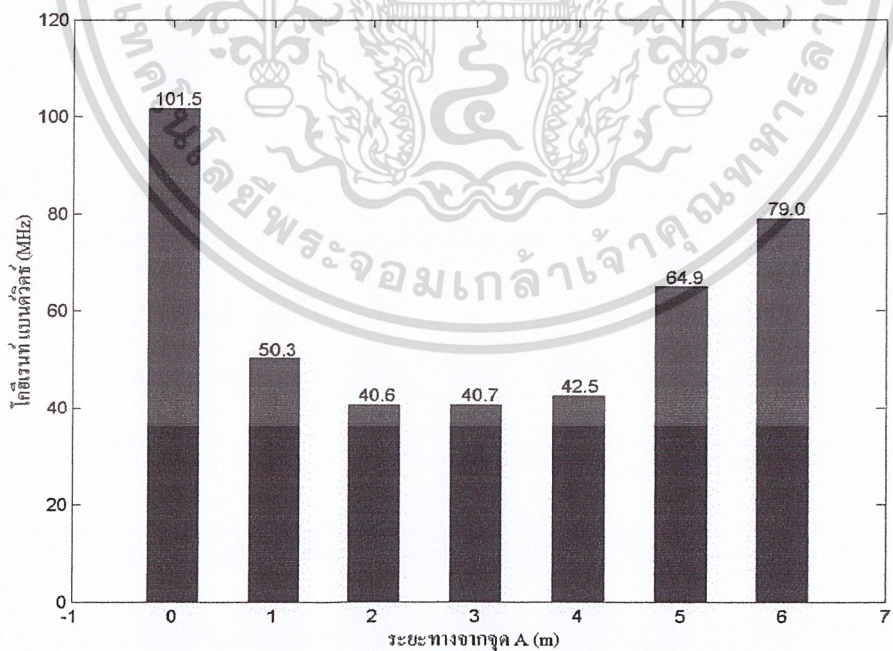


รูปที่ 4.43 พารามิเตอร์การแผ่การหน่วง rms (rms Delay Spread, σ_r) ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

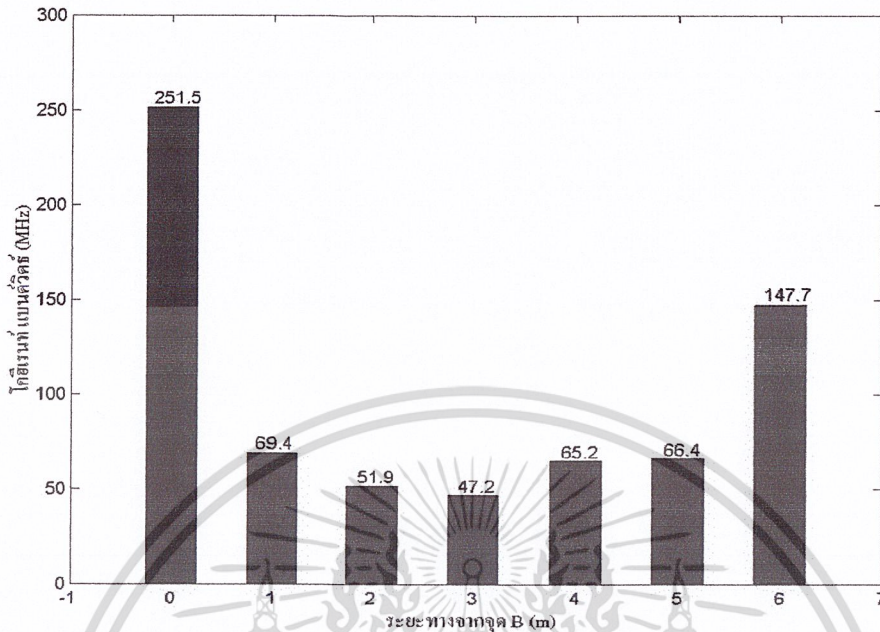


รูปที่ 4.44 พารามิเตอร์การแผ่การหน่วง rms (rms Delay Spread, σ_r) ตามเส้นทาง BB'



รูปที่ 4.45 ค่าโคฮีเรนซ์ แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 โคฮีเรนต์แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง BB'

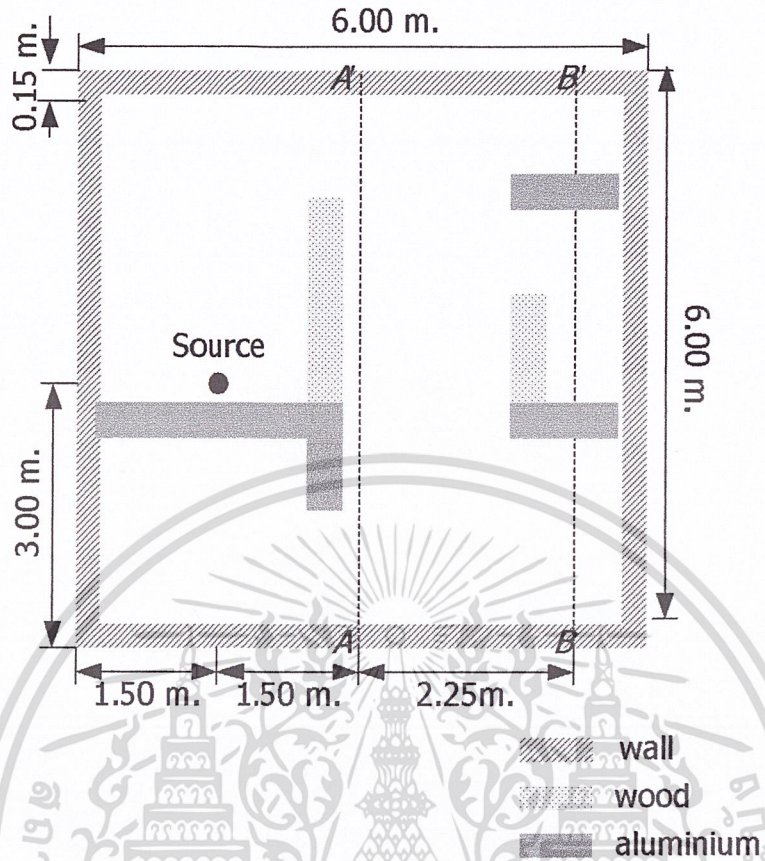
4.5 ผลการทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในห้องที่มีสิ่งกีดขวาง

การทดลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในห้อง ที่มีสิ่งกีดขวางนั้นได้กำหนดให้ห้องถูกสร้างด้วยกำแพงคอนกรีตหนาด้านละ 15 เซนติเมตร มีประตูไม้ 1 บาน และภายในห้องจะประกอบไปด้วย โต๊ะทำงานซึ่งทำจากไม้ และตู้เก็บแฟ้มเอกสารซึ่งทำจากอลูมิเนียมโดยวางไว้ตามรูป ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุอยู่ที่จุด Source และตำแหน่งที่ทำการบันทึกส่วนประกอบสนามไฟฟ้า จะอยู่ตำแหน่งตามเส้นทาง AA' และ BB' ดังแสดงในรูปที่ 4.47

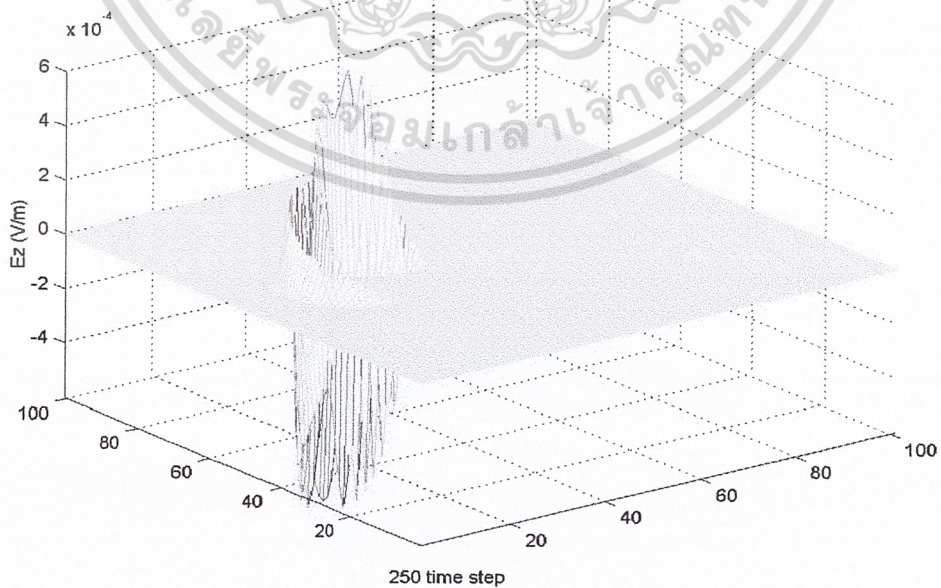
กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย

1. ค่าสภาพนำ (Conductivity) ของอากาศว่าง $\sigma = 0 \text{ } \Omega^{-1}m^{-1}$
2. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของอากาศว่าง $\epsilon_r = 1$
3. ค่าสภาพนำ (Conductivity) ของกำแพงคอนกรีต $\sigma = 0.012 \text{ } \Omega^{-1}m^{-1}$
4. ค่าสภาพนำ (Conductivity) ของไม้ $\sigma = 0 \text{ } \Omega^{-1}m^{-1}$
5. ค่าสภาพนำ (Conductivity) ของตู้อลูมิเนียม $\sigma = 3.82 \times 10^7 \text{ } \Omega^{-1}m^{-1}$
6. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของกำแพงคอนกรีต $\epsilon_r = 8.0$
5. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของไม้ $\epsilon_r = 1.5$
6. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของตู้อลูมิเนียม $\epsilon_r = 8.8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

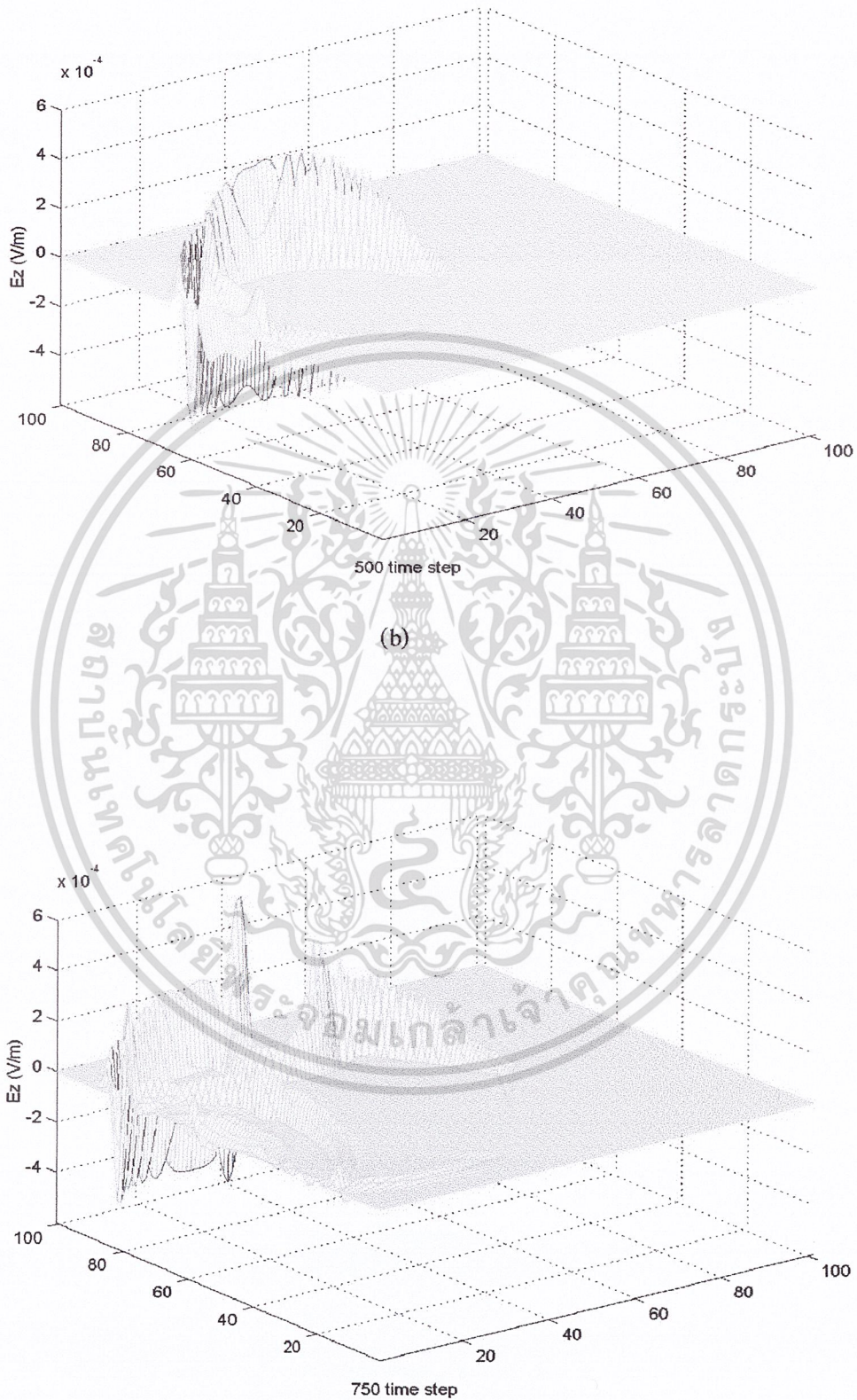


รูปที่ 4.47 โดเมนการคำนวณที่ใช้วิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายในห้องที่มีสิ่งกีดขวาง



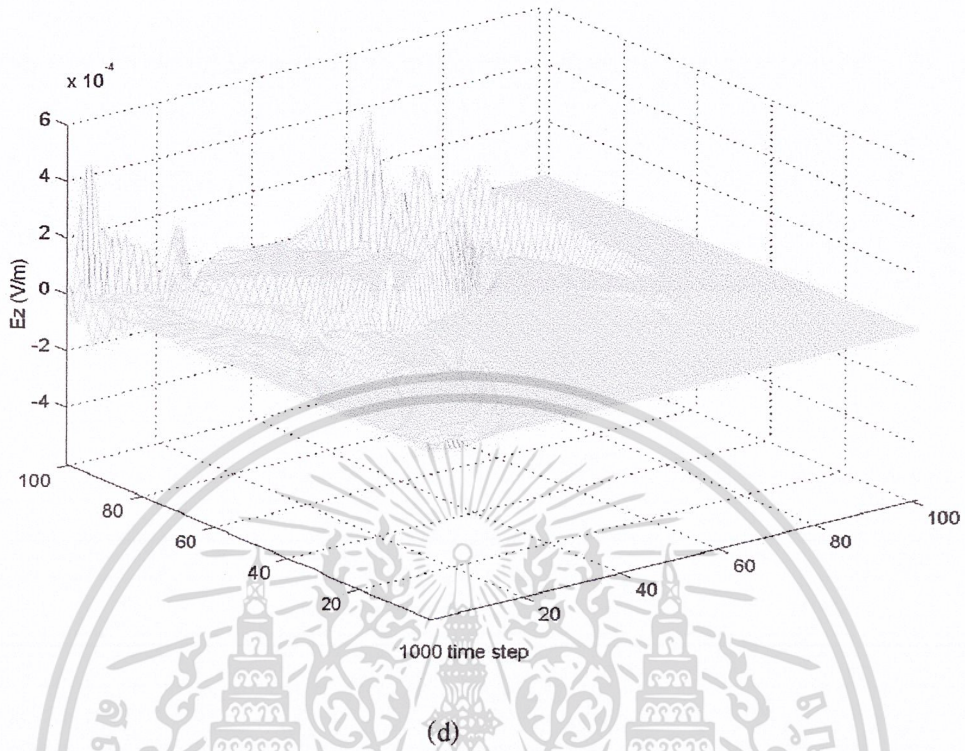
(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

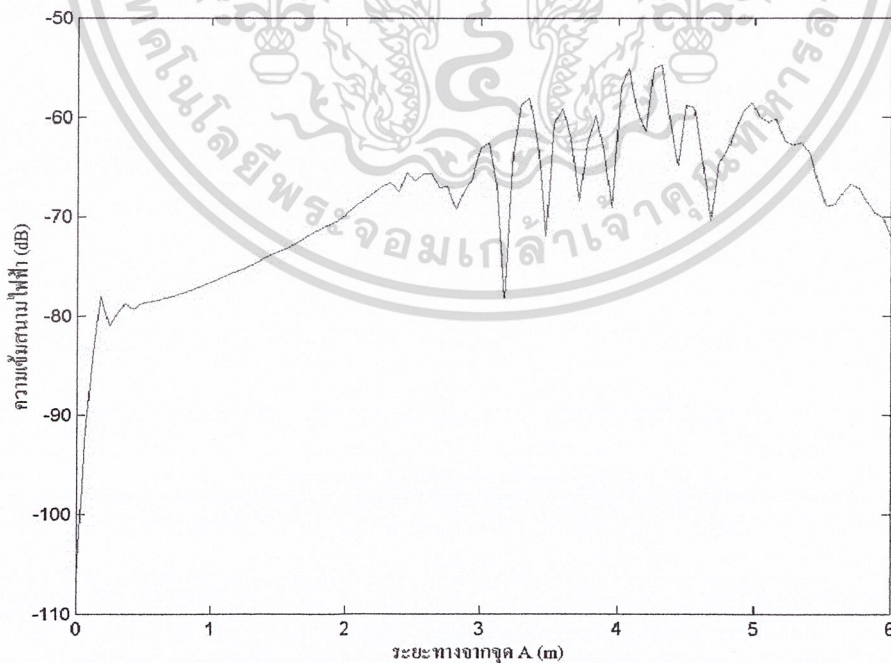


(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

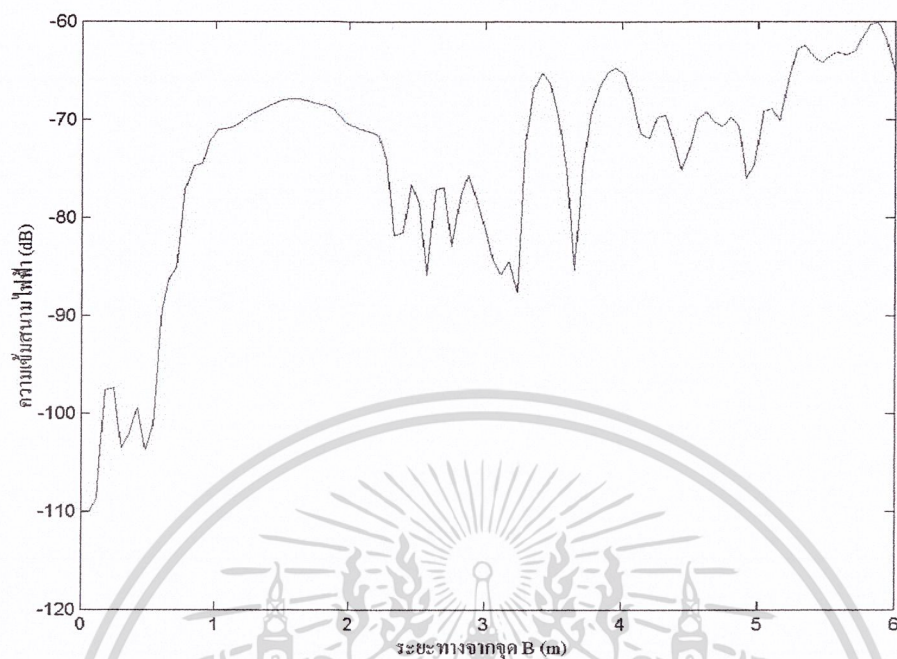


รูปที่ 4.48 การแพร่กระจายของสนาม E_z ที่ระนาบ xy ตามชั้นเวลาที่แสดงตามรูป (a) = 250 (b) = 500 (c) = 750 และ (d) = 1000 ชั้นเวลาตามลำดับ

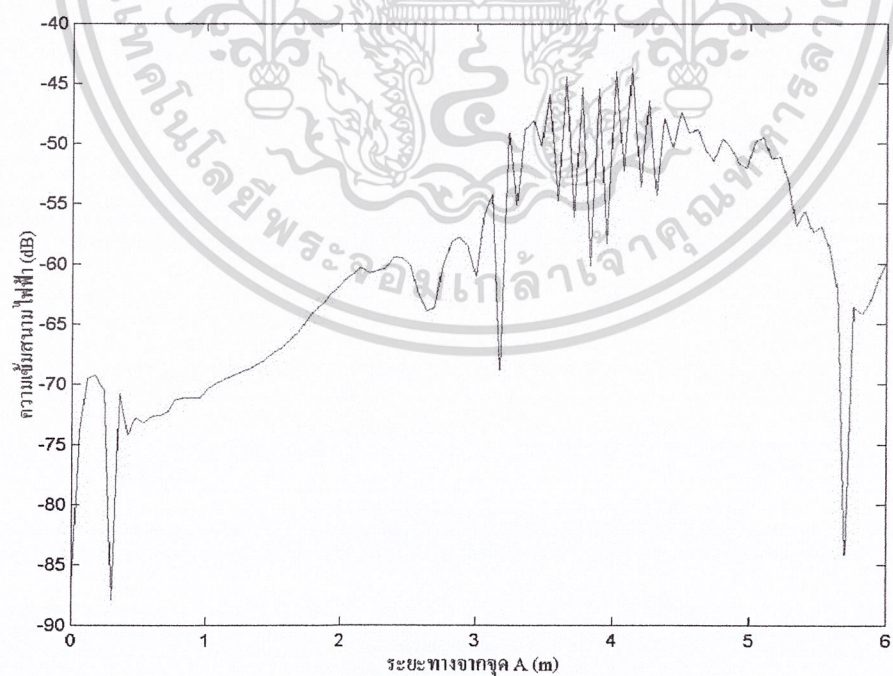


รูปที่ 4.49 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

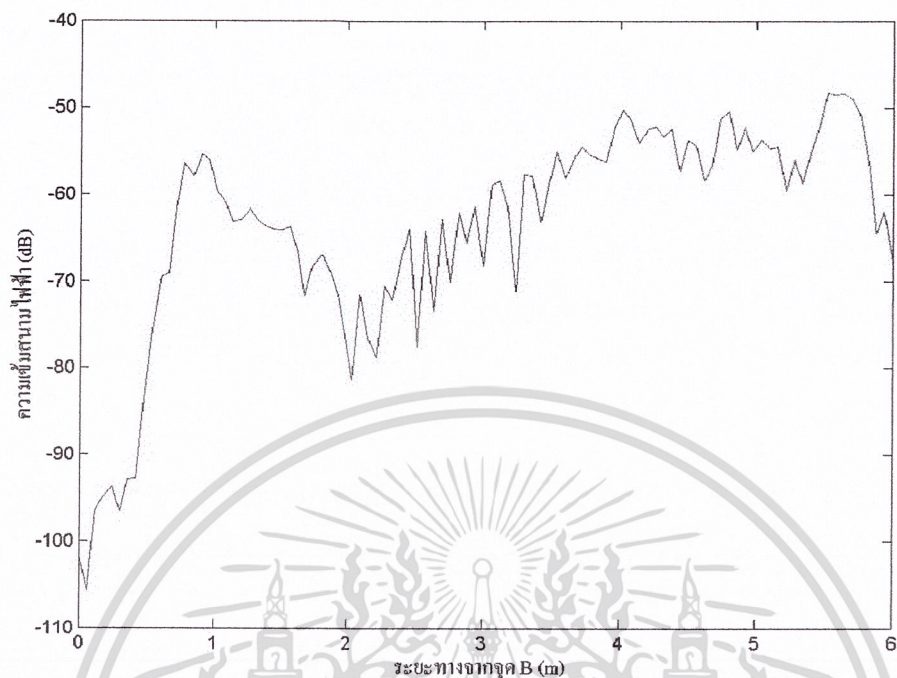


รูปที่ 4.50 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'

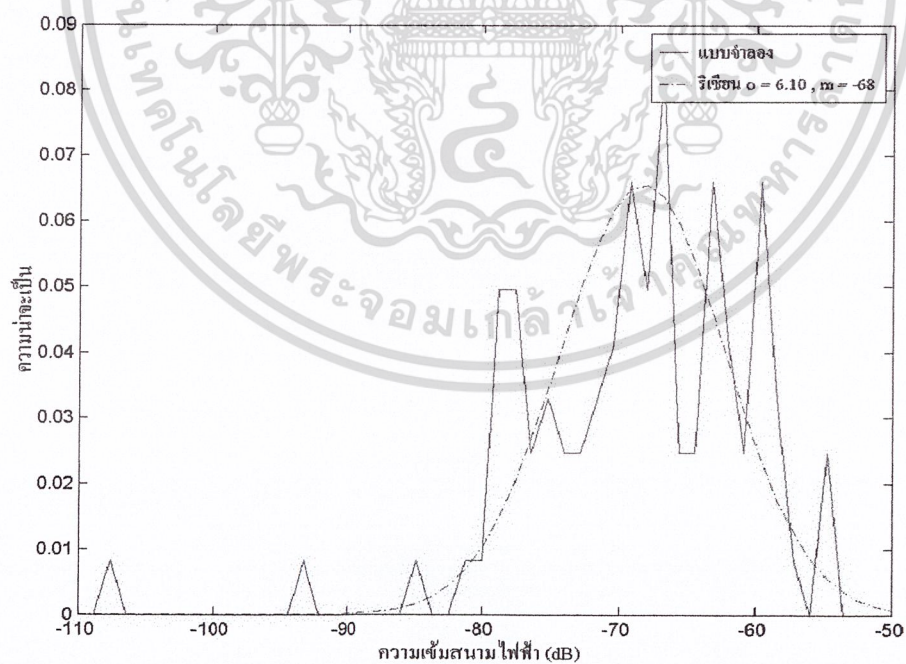


รูปที่ 4.51 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

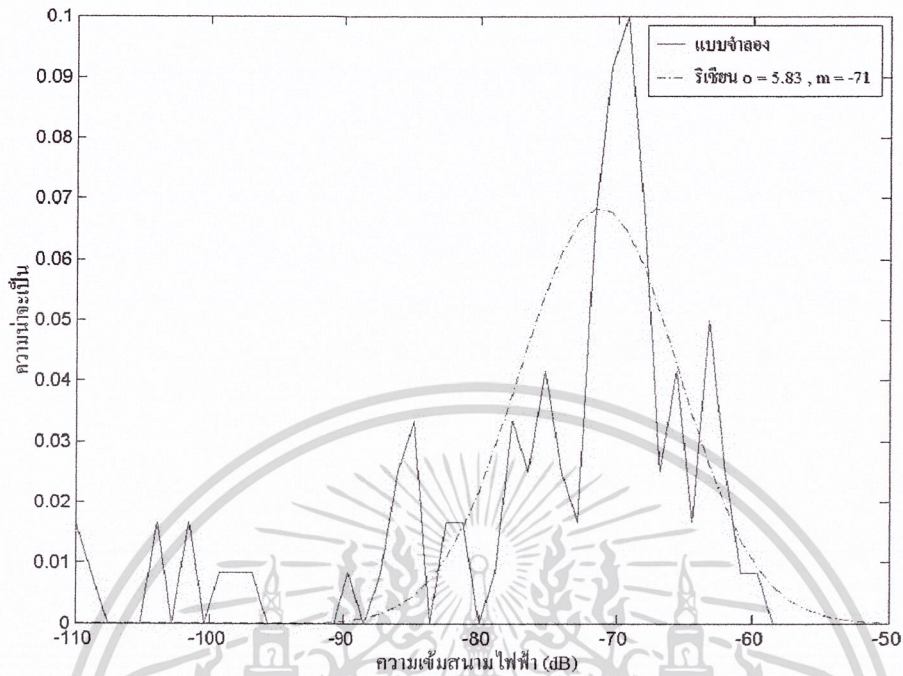


รูปที่ 4.52 สนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'

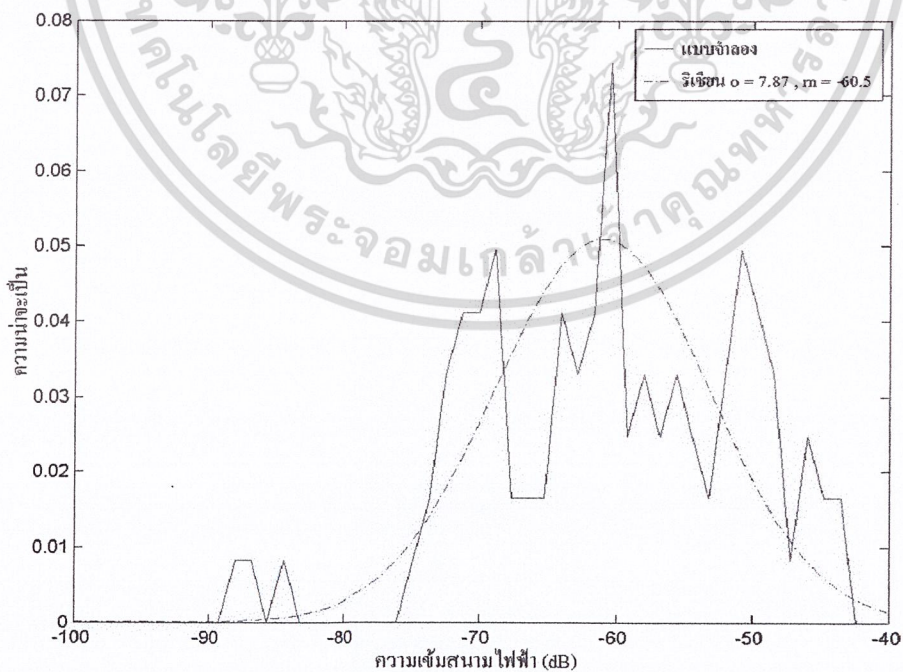


รูปที่ 4.53 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

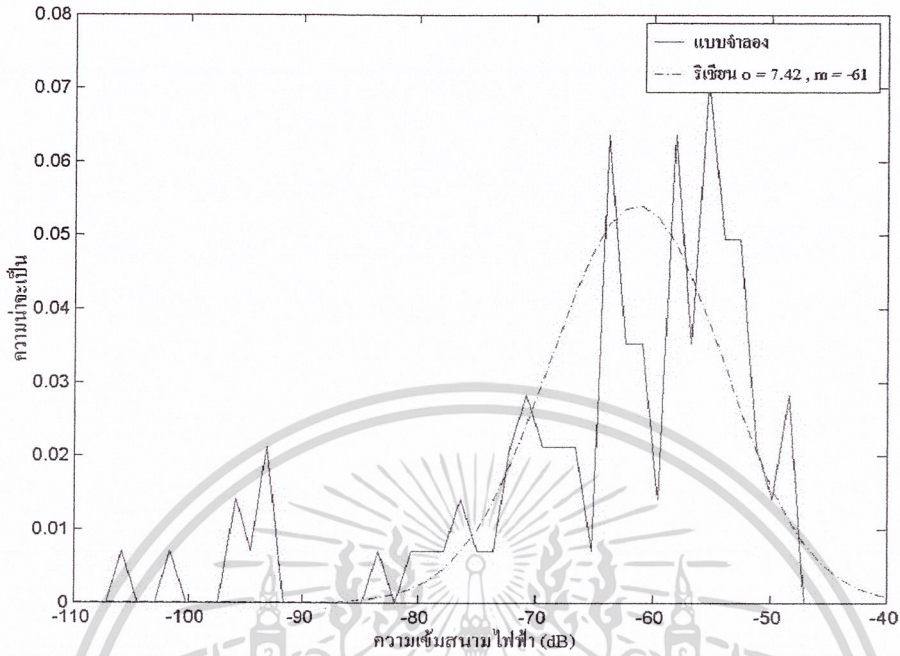


รูปที่ 4.54 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'

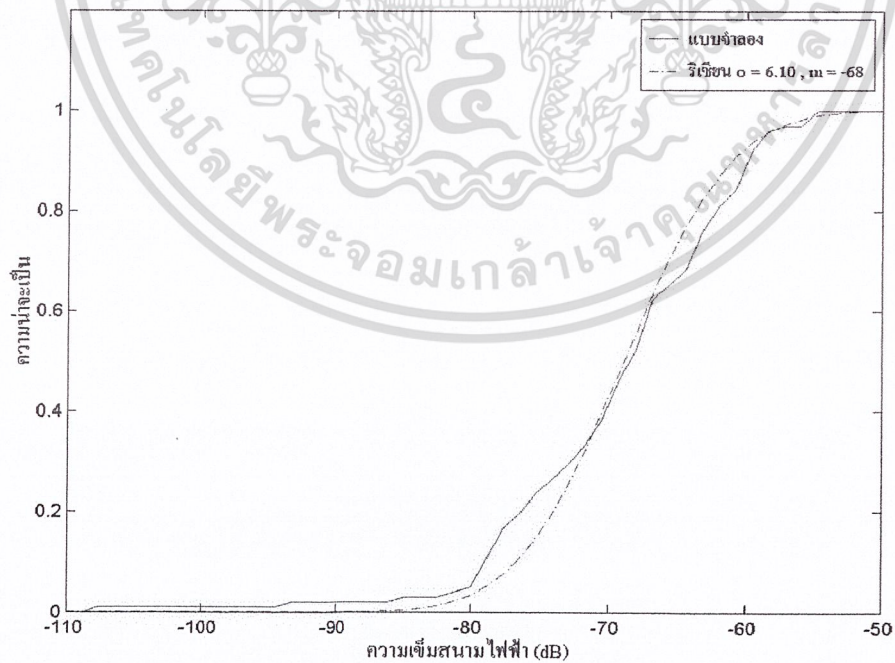


รูปที่ 4.55 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

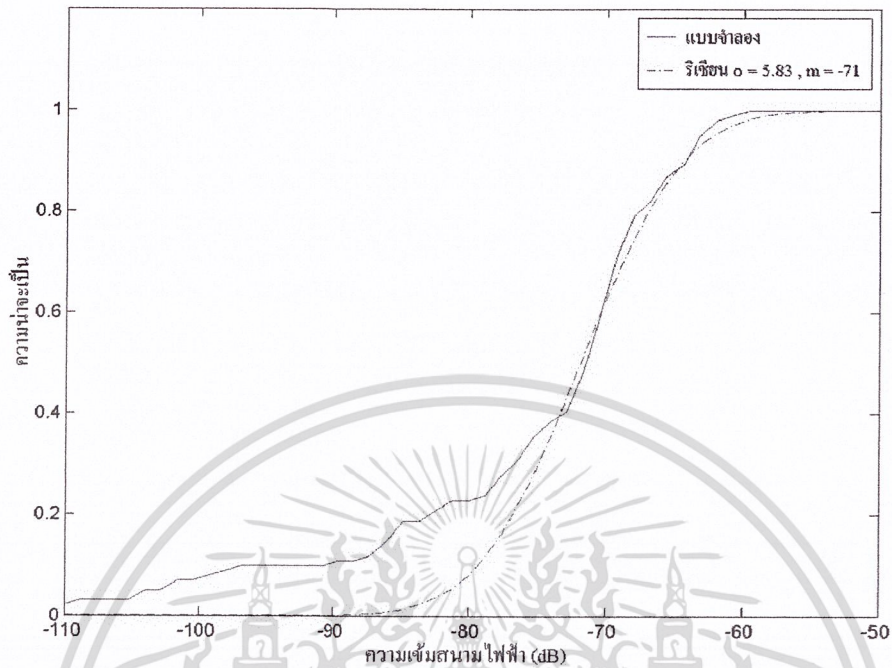


รูปที่ 4.56 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'

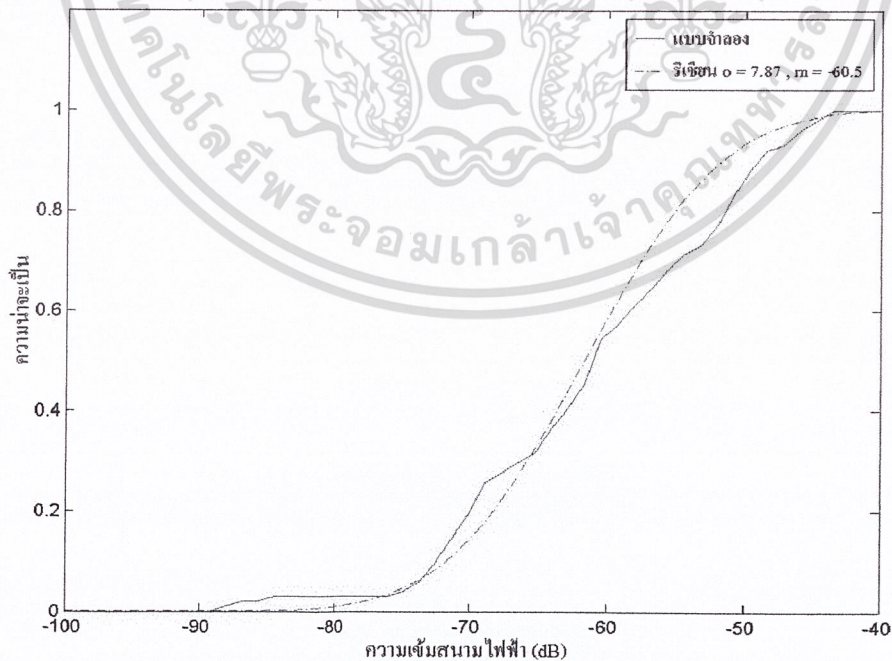


รูปที่ 4.57 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

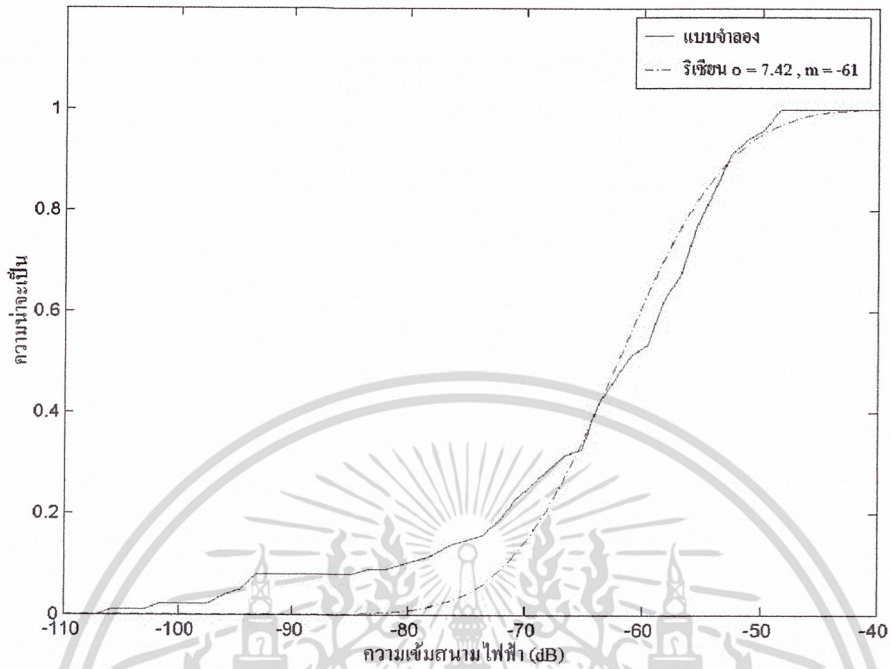


รูปที่ 4.58 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 900 MHz ตามเส้นทาง BB'

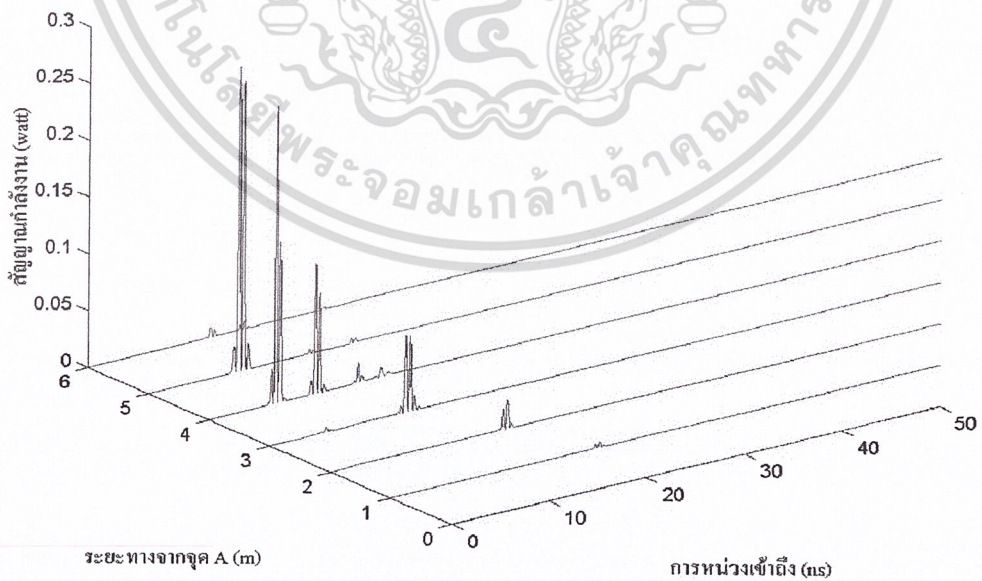


รูปที่ 4.59 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

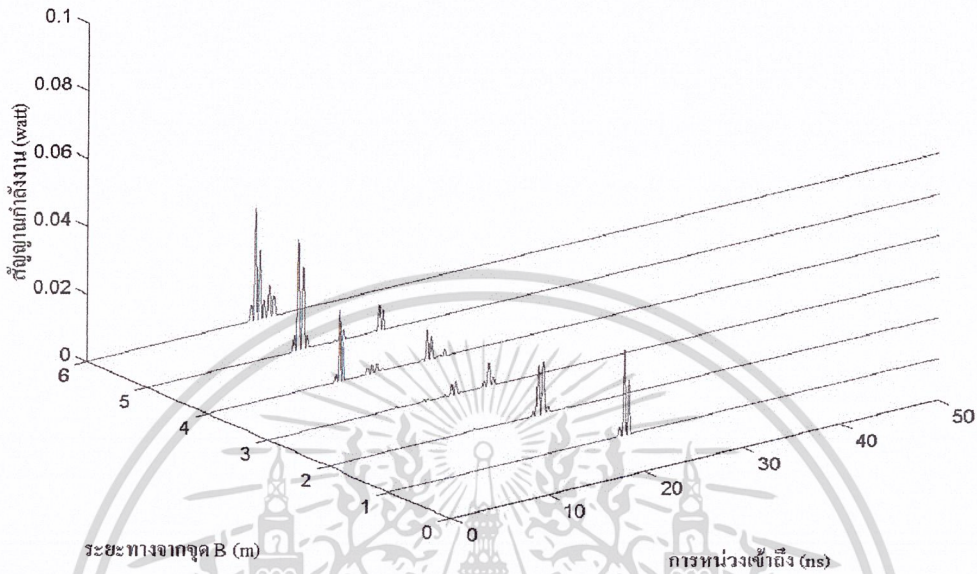


รูปที่ 4.60 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็น ที่ความถี่ 1800 MHz ตามเส้นทาง BB'

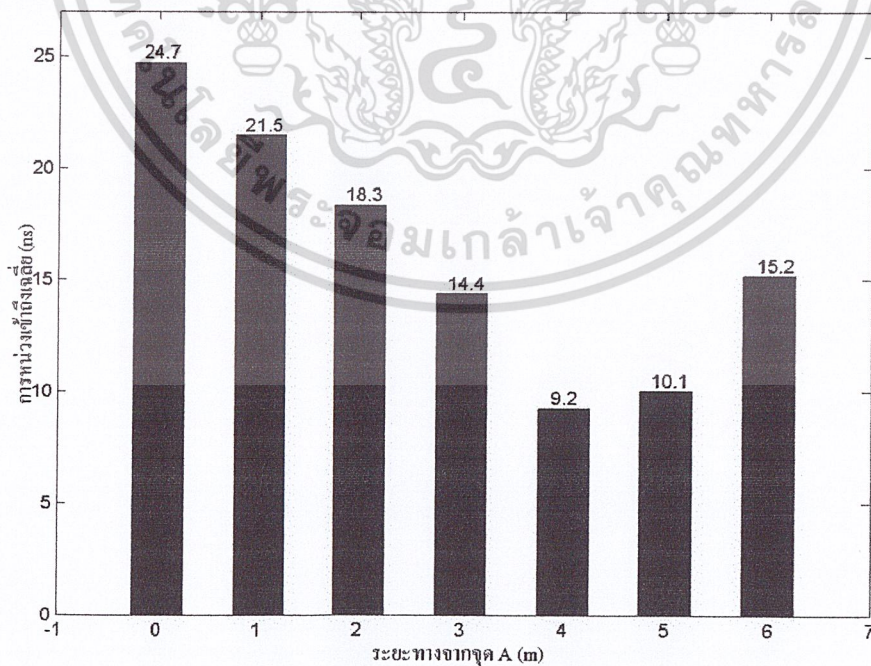


รูปที่ 4.61 โพรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

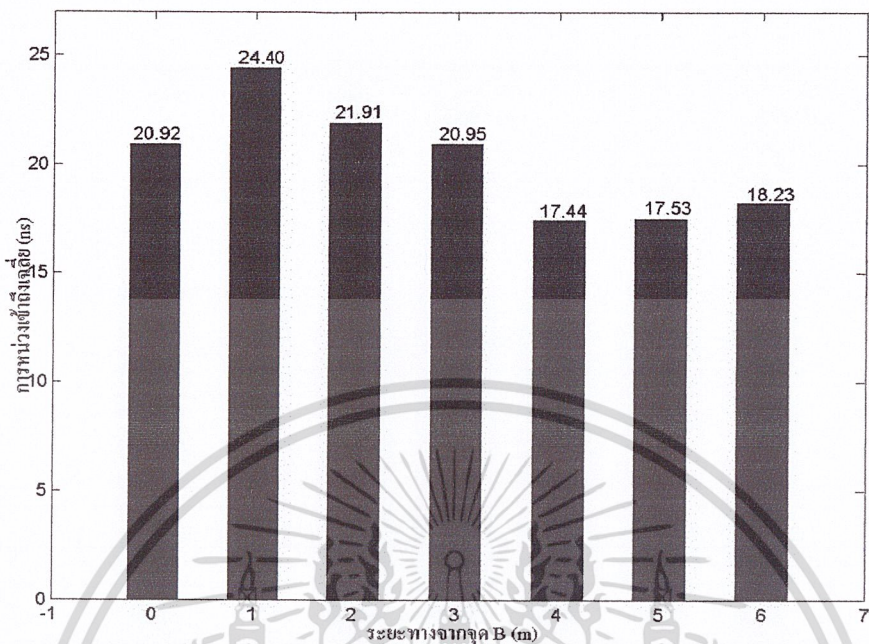


รูปที่ 4.62 โปรไฟล์การหน่วงกำลังตามเส้นทาง BB'

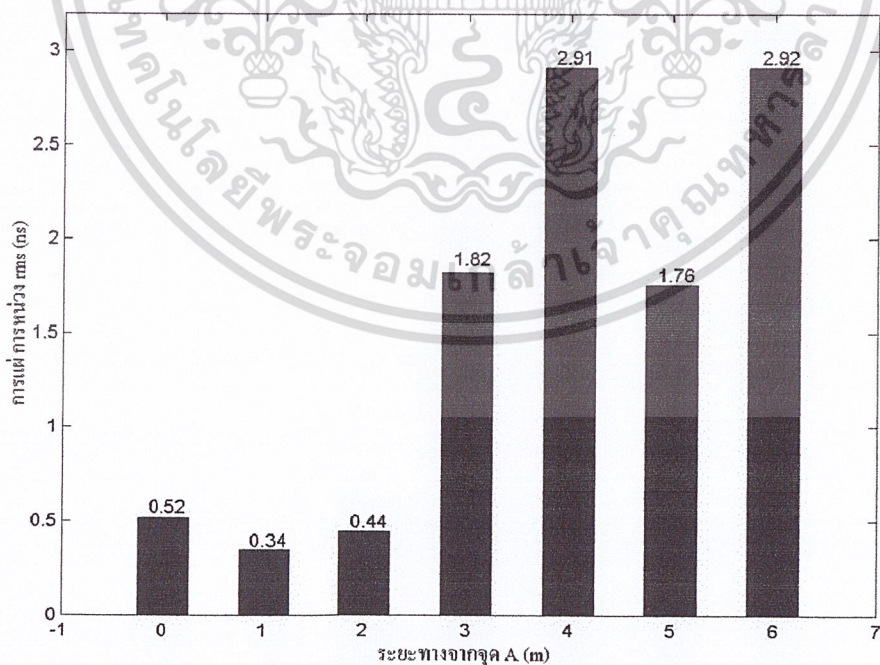


รูปที่ 4.63 พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay, $\bar{\tau}$) ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

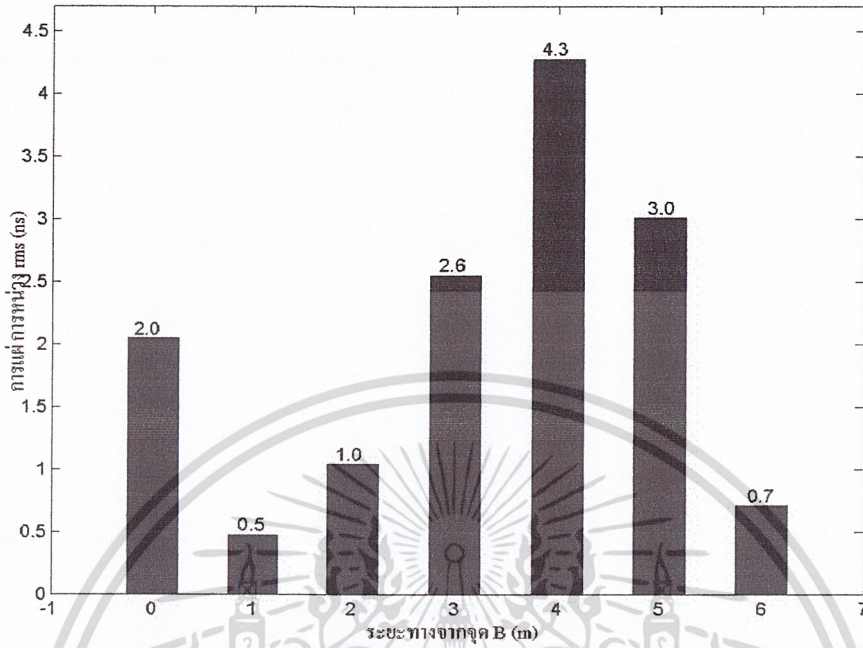


รูปที่ 4.64 พารามิเตอร์การหน่วงเข้าถึงเฉลี่ย (mean excess delay, $\bar{\tau}$) ตามเส้นทาง BB'

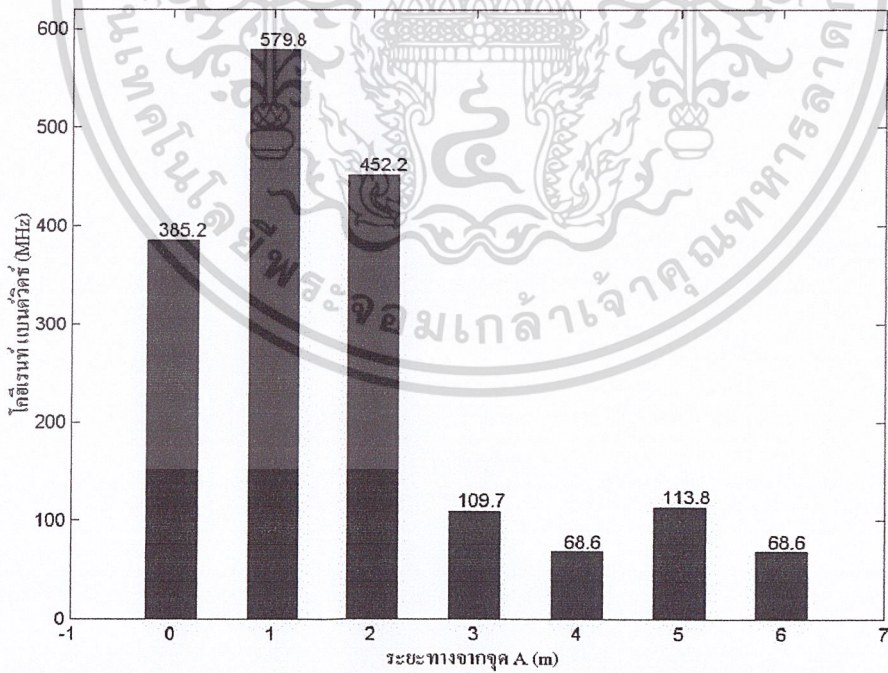


รูปที่ 4.65 พารามิเตอร์การแผ่การหน่วง rms (rms Delay Spread, σ_{τ}) ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

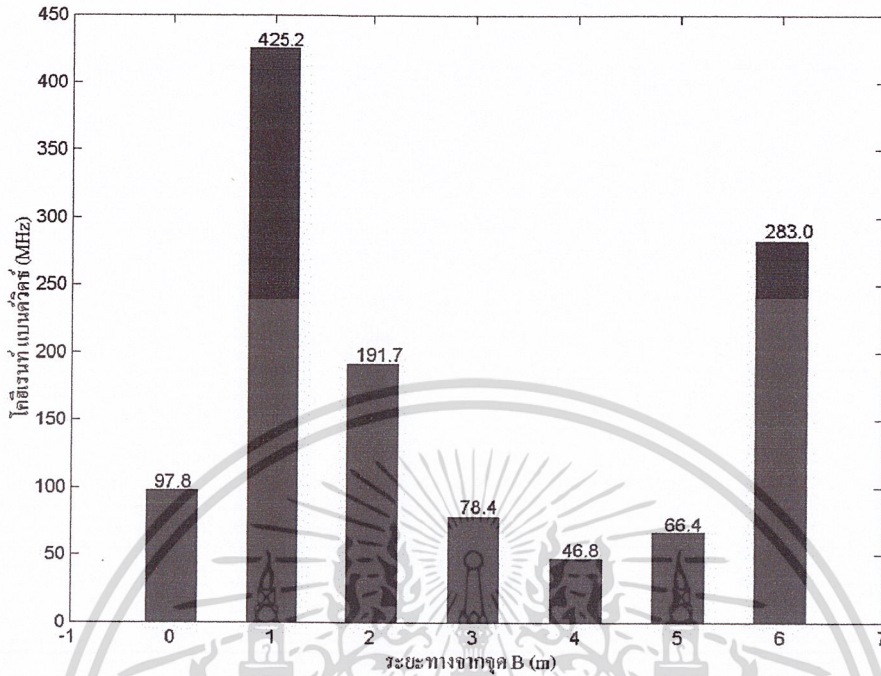


รูปที่ 4.66 พารามิเตอร์การแผ่การหน่วง rms (rms Delay Spread, σ_r) ตามเส้นทาง BB'



รูปที่ 4.67 ค่าโคฮีเรนท์แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง AA'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.68 ค่าโคฮีเรนต์แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทาง BB'

4.6 แบบจำลองทางสถิติของสัญญาณ

สภาพแวดล้อม	ความถี่ 900 MHz				ความถี่ 1800 MHz				Bc เฉลี่ย (MHz)
	รูปแบบการแจกแจง	ตัวแปรสุ่ม (x) (dB)	a σ	b m	รูปแบบการแจกแจง	ตัวแปรสุ่ม (x) (dB)	a σ	b m	
อากาศว่างตามเส้นทาง AA'	ยูนิฟอร์ม	-66.04 ถึง -62.54	-66.04 -	-62.54 -	ยูนิฟอร์ม	-57.53 ถึง -53.37	-57.73 -	-53.37 -	721.82
อากาศว่างตามเส้นทาง BB'	ยูนิฟอร์ม	-67.58 ถึง -66.50	-67.58 -	-66.50 -	ยูนิฟอร์ม	-58.88 ถึง -57.85	-58.88 -	-57.85 -	722.28
ห้องที่ว่างเปล่าตามเส้นทาง AA'	ริเชียน	-90 ถึง -50	-	-	ริเชียน	-70 ถึง -40	-	-	59.94
			3.55	-64			2.45	-55	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพ แวดล้อม	ความถี่ 900 MHz				ความถี่ 1800 MHz				Bc เฉลี่ย (MHz)
	รูปแบบ การแจก แจง	ตัวแปร สุ่ม(x) (dB)	a σ	b m	รูปแบบ การแจก แจง	ตัวแปร สุ่ม (x) (dB)	a σ	b m	
ห้องที่ว่าง เปล่าตามเส้น ทาง BB'	ริเชียน	-100 ถึง -55	- 3.08	- -66	ริเชียน	-80 ถึง -50	- 2.90	- -57	99.91
ห้องที่มีสิ่ง กีดขวางตาม เส้นทาง AA'	ริเชียน	-110 ถึง -50	- 6.10	- -68	ริเชียน	-100 ถึง -40	- 7.87	- -60.5	254.00
ห้องที่มีสิ่ง กีดขวางตาม เส้นทาง BB'	ริเชียน	-110 ถึง -50	- 5.83	- -71	ริเชียน	-110 ถึง -40	- 7.42	- -61	169.89

ตารางที่ 4.1 แบบจำลองทางสถิติของสัญญาณในสภาพแวดล้อม และเส้นทางตามแบบจำลอง
โคเมน

แบบจำลองทางสถิติของสัญญาณในตารางที่ 4.1 จะแสดงค่าของตัวแปรที่ใช้ในการหา
ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น โดยที่ถ้าสัญญาณมีการแจกแจงแบบ ยูนิฟอร์ม จะแทน
ค่าของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (2.50) และถ้าสัญญาณมีการแจกแจงแบบริเชียน จะแทนค่า
ของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (2.52)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นวิทยุโดยใช้วิธี FDTD โดยได้แบ่งการวิเคราะห์คลื่นวิทยุให้มีการแพร่กระจายภายใต้สภาพแวดล้อมที่ต่างกันสามแบบ คือ สภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่าง สภาพแวดล้อมภายในห้องที่ว่างเปล่า และสภาพแวดล้อมภายในห้องที่มีสิ่งกีดขวาง

ผลที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดไปยังตำแหน่งที่ทำการรับสัญญาณตามเส้นทางที่กำหนดไว้ โดยผ่านสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ ก็จะมีค่าแตกต่างกันตามไปด้วยถึงแม้ว่าระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณกับจุดที่ทำการรับสัญญาณ จะเท่ากันก็ตาม ทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณลักษณะการลดทอนของสัญญาณที่แบ่งได้เป็น Path loss, shadowing และ Multipath fading

การแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายใต้สภาพแวดล้อมที่เป็นอากาศว่าง กำลังของสัญญาณที่รับได้ตามเส้นทางมีความราบเรียบและสม่ำเสมอ ลักษณะการแจกแจงของสัญญาณในสภาพแวดล้อมดังกล่าว สามารถจำลองได้ด้วยตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงกำลังของสัญญาณเป็นแบบยูนิฟอร์ม (Uniform distribution) ค่าโคฮีเรนต์ แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทางที่คำนวณจากโปรไฟล์การหน่วงกำลังมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะเท่ากัน

การแพร่กระจายคลื่นวิทยุภายใต้สภาพแวดล้อมภายในห้องที่ว่างเปล่า และภายในห้องที่มีสิ่งกีดขวาง กำลังของสัญญาณที่รับได้ตามเส้นทางมีการเปลี่ยนแปลงแกว่งขึ้นลงอย่างชัดเจน ถึงแม้ตำแหน่งที่ทำการรับสัญญาณจะต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่กำลังของสัญญาณที่รับได้มีความแตกต่างกันเป็นอย่างมากบางช่วงอาจถึง 30 - 40 dB ลักษณะการแปรเปลี่ยนของสัญญาณในสภาวะดังกล่าว สามารถจำลองได้ด้วยตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงเป็นแบบริเซียน (Rician distribution) ค่าโคฮีเรนต์ แบนด์วิดท์ (Coherent Bandwidth) ตามเส้นทางที่คำนวณจากโปรไฟล์การหน่วงกำลังมีค่าไม่เท่ากันเป็นผลมาจากคุณลักษณะการลดทอนของสัญญาณที่กล่าวไว้ข้างต้น

ข้อเสนอแนะ

การทำปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำแบบจำลองช่องสัญญาณ โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางทฤษฎี และสร้างแบบจำลองของสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันขึ้นมา โดยในการทำแบบจำลองนี้ได้กำหนดให้คลื่นวิทยุมีการแพร่กระจายเพียงสองมิติ เพื่อประหยัดหน่วยความจำ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

โปรแกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังนั้นค่าที่ได้จากการทำแบบจำลอง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าในทางปฏิบัติ อาจจะไม่มีความใกล้เคียงกันเลย และสำหรับการทำงานแบบจำลองในที่นี้ก็ได้มีการนำไปเปรียบเทียบหรือทดลองในทางปฏิบัติ ดังนั้นแนวทางการพัฒนาเพื่อให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องมากขึ้นควรจะกำหนดให้คลื่นวิทยุมีการแพร่กระจายสามมิติ และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริงในทางปฏิบัติด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

Allen Taflove., “Computational Electrodynamics, The Finite-Difference Time-Domain Method” Artech House Boston London. pp. 1-200, 1995

บัณฑิต โรจน์อารยานนท์., “หลักการไฟฟ้าสื่อสาร, Principles of Communication Systems” สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ., 2541

ลัญฉกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ., “หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่” สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ., 2542



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้