

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแบบจำลองศีรษะมนุษย์อันเนื่องมาจาก  
โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา

**ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN HUMAN HEAD DUE TO  
MOBILE PHONE BY FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN METHOD**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

  
040404

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแบบจำลองศีรษะมนุษย์อันเนื่องมาจาก  
โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา

**ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN HUMAN HEAD DUE TO  
MOBILE PHONE BY FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN METHOD**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแบบจำลองศีรษะมนุษย์อันเนื่องมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา

**ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN HUMAN HEAD DUE TO MOBILE PHONE BY FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN METHOD**

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกนกอร พัฒน์ช่วย 38014003

2. นายสมนึก จริงรักษ์ 38014527

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแบบจำลองศีรษะ  
มนุษย์อันเนื่องมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยวิธีผลต่าง  
สืบเนื่องเชิงเวลา

**Analysis of Electromagnetic Field in Human Head  
due to Mobile Phone by Finite-Difference Time-  
Domain Method**

โดย นางสาวกนกอร พัฒน์ช่วย 38014003  
นายสมนึก จริงรักวงษ์ 38014527

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ไมโนะ ไกรฤกษ์

#### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์หารูปแบบการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะในศีรษะมนุษย์อันเนื่องมาจากการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลาโดยสร้างแบบจำลองศีรษะมนุษย์ขึ้นมาแล้ววิเคราะห์หาการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีต่อแบบจำลองศีรษะมนุษย์โดยใช้ความถี่ 900 MHz 1500 MHz และ 1800 MHz ที่กำลังงาน 0.6 วัตต์และกำลังงาน 2 วัตต์เมื่อใช้เสาอากาศแบบโมโนโพล แล้วหาอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ระยะห่างระหว่างศีรษะมนุษย์กับโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นที่ระยะทางต่าง ๆ กัน ซึ่งค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะนี้ถ้ามีค่ามากเกินไปก็จะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้ได้

#### ABSTRACT

This project concerns about the evaluation of radiation pattern of electromagnetic field and specific absorption rate(SAR) in human head due to the use of a mobile phone. A human head model has been considered and then analyzed for the radiation pattern of electromagnetic field from the mobile phone to human head model. The operating frequency of 900 MHz 1500 MHz and 1800 MHz with power 0.6 Watt and 2 Watt with a quarterwave monopole antenna is used. After that, evaluate for specific absorption rate at various distances from human head model. The high SAR caused the danger to the user.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (Finite Difference Time Domain Method)	3
2.2 แบบจำลองโทรมัพธ์เคลื่อนที่	14
2.3 แบบจำลองสี่ระยะมนุษย์	18
2.4 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ (SAR)	20
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	22
3.1 แบบจำลองโทรมัพธ์เคลื่อนที่	22
3.2 แบบจำลองสี่ระยะมนุษย์	23
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่น	25
4.1 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นเมื่อใช้เงื่อนไขการกำหนดขอบเขตแบบ PML (Perfectly Matched Layer) ของ Berenger	25
4.2 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรมัพธ์เคลื่อนที่	29
4.3 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นจากโทรมัพธ์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองสี่ระยะมนุษย์ที่มีลักษณะทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากชั้นเดียว	30
4.4 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นจากโทรมัพธ์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองสี่ระยะมนุษย์ที่มีลักษณะทรงกลมชั้นเดียว	33
4.5 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นจากโทรมัพธ์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองสี่ระยะมนุษย์ที่มีลักษณะทรงกลม 2 ชั้นซ้อนกัน	35
4.6 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นจากโทรมัพธ์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองสี่ระยะมนุษย์ที่สมบูรณ์	41
4.7 การทดลองผลการแพร่กระจายคลื่นจากโทรมัพธ์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองสี่ระยะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเทียม	61
บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์	64
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ตำแหน่งของส่วนประกอบสนามของหน่วยเซลล์	4
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของสนาม (ก) 1/4ของหน่วยเซลล์ (ข) ในระนาบ	6
รูปที่ 2.3 พื้นที่การแก้ปัญหาของการกำหนดขอบเขตแบบโครงข่ายตัดปลาย	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ PML ใน 2 มิติ	14
รูปที่ 2.5 ลักษณะของสายอากาศแบบโมโนโพลที่เชื่อมต่อกับกล่องตัวนำ	15
รูปที่ 2.6 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากการเปลี่ยนความกว้างและความหนาของกล่องตัวนำ	16
รูปที่ 2.7 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของกล่องตัวนำ	17
รูปที่ 2.8 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากการเปลี่ยนการวางตำแหน่งของสายอากาศ	18
รูปที่ 2.9 แบบจำลองสี่ขั้วมนุษย์	19
รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ในลักษณะหน่วยเซลล์ของ FD-TD	22
รูปที่ 3.2 โครงสร้างแบบจำลองสี่ขั้วที่สมบูรณ์	24
รูปที่ 4.1 ขนาดของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ณ เวลาที่ 36 ฟิล์มขอบเขตแบบ PML	25
รูปที่ 4.2 ขนาดของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ณ เวลาที่ 36 ฟิล์มขอบเขตอนันต์	26
รูปที่ 4.3 แสดงผลต่างของขนาดสนามไฟฟ้าจากทั้ง 2 ฟิล์ม	27
รูปที่ 4.4 การแพร่กระจายคลื่นไปยังขอบเขตแบบ PML	28
รูปที่ 4.5 แบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่	29
รูปที่ 4.6 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นจากโทรศัพท์เคลื่อนที่	30
รูปที่ 4.7 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่ขั้วทรงสี่เหลี่ยมชั้นเดียว	31
รูปที่ 4.8 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่ขั้วทรงสี่เหลี่ยมชั้นเดียว	32
รูปที่ 4.9 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่ขั้วทรงกลมชั้นเดียว	33
รูปที่ 4.10 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่ขั้วทรงกลมชั้นเดียว	34
รูปที่ 4.11 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่ขั้วทรงกลม 2 ชั้น ในชั้นกระดูก	35
รูปที่ 4.12 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่ขั้วทรงกลม 2 ชั้น ในชั้นไขมัน	36

รูปที่ 4.13 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่ขั้วทรงกลม 2 ชั้น ใช้ประโยชน์จากการคำนวณที่แม่นยำสูงในการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่ขั้วทรงกลม 2 ชั้น ใช้ประโยชน์จากการคำนวณที่แม่นยำสูงในการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่ขั้วทรงกลม 2 ชั้น ใช้ประโยชน์จากการคำนวณที่แม่นยำสูงในการคำนวณสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่ขั้วทรงกลม 2 ชั้น



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของระยะทางที่ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้กำลังส่ง 2 วัตต์	57
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของระยะทางที่ความถี่ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้กำลังส่ง 2 วัตต์	57
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของระยะทางที่ความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้กำลังส่ง 2 วัตต์	58
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของความถี่ที่ กำลังส่ง 0.6 วัตต์ โดยกำหนดให้ระยะทางเท่ากับ 2 เซนติเมตร	58
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของความถี่ที่ กำลังส่ง 2.0 วัตต์ โดยกำหนดให้ระยะทางเท่ากับ 2 เซนติเมตร	59
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของกำลังส่งที่ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้ระยะทางเท่ากับ 2 เซนติเมตร	59
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของกำลังส่งที่ความถี่ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้ระยะทางเท่ากับ 2 เซนติเมตร	60
รูปที่ 4.39 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของกำลังส่งที่ความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้ระยะทางเท่ากับ 2 เซนติเมตร	60
รูปที่ 4.40 แสดงแบบจำลองรูปร่างคล้ายสิริษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเดียว โดยใช้สารเนื้อเทียม	61
รูปที่ 4.41 การทดลองการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ ใช้กำลังส่ง 2 วัตต์ ไปยังแบบจำลองรูปร่างคล้ายสิริษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเทียม	62
รูปที่ 4.42 แสดงผลการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ ใช้กำลังส่ง 2 วัตต์ ไปยังแบบจำลองรูปร่างคล้ายสิริษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเทียม	62
รูปที่ 4.43 การทดลองการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ ใช้กำลังส่ง 1 วัตต์ ไปยังแบบจำลองรูปร่างคล้ายสิริษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเทียม	63
รูปที่ 4.44 แสดงผลการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ ใช้กำลังส่ง 1 วัตต์ ไปยังแบบจำลองรูปร่างคล้ายสิริษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเทียม	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณสายอากาศแบบโมนโพลของโทรศัพท์เคลื่อนที่	15
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเนื้อเยื่อที่ใช้สำหรับแบบจำลองศีรษะมนุษย์	19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ปัจจุบันนี้มีการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่กันอย่างแพร่หลายซึ่งคลื่นที่แพร่กระจายออกจากเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นจะมีการแพร่กระจายออกไปโดยรอบ ลักษณะเนื้อเยื่อของมนุษย์เรา เช่น เนื้อเยื่อในศีรษะจะมีการดูดซับคลื่นที่แพร่กระจายออกจากโทรศัพท์เคลื่อนที่เมื่อมีการใช้งาน สำหรับการดูดซับคลื่นนี้จะมีผลกระทบต่อผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ถ้าหากอัตราส่วนการดูดซับคลื่นของเนื้อเยื่อมีค่ามากเกินไปก็จะเกิดอันตรายต่อผู้ใช้ได้ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายๆอย่างด้วยกัน เช่น ระยะห่างระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่กับศีรษะมนุษย์ ความแรงของสัญญาณ ความถี่ที่ใช้งานของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ลักษณะสายอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เลือกใช้และชนิดเนื้อเยื่อของศีรษะมนุษย์ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับคลื่นที่แตกต่างกัน

ในปริญญาโทฉบับนี้เป็นการวิเคราะห์หาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์โดยใช้วิธีผลต่างสปีเนียงเชิงเวลาในการวิเคราะห์ โดยจะเริ่มจากการนำสมการความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของแมกซ์เวลล์มาแปลงให้อยู่ในลักษณะของวิธีผลต่างสปีเนียงเชิงเวลา ซึ่งแต่ละตำแหน่งของพื้นที่ที่ใช้ในการพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบของวิธีผลต่างสปีเนียงเชิงเวลาจะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งอื่นๆที่อยู่รอบๆและจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ทำให้เกิดความต่อเนื่องของสนามที่แพร่กระจายออกไป ในส่วนการวิเคราะห์จะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณาให้เหมาะสมเช่น ช่วงระยะเวลาที่ใช้เพื่อสังเกตค่าของสนามไฟฟ้าที่แปลงเปลี่ยนไป ช่วงระยะห่างของแต่ละตำแหน่งที่ใช้ในการสังเกตค่าสนามไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องของการแพร่กระจายสนามไฟฟ้า ซึ่งค่าเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ ขนาดของความยาวคลื่น ความเร็วของคลื่นที่เดินทาง ในแต่ละตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านซึ่งในที่นี้ก็คือเนื้อเยื่อต่างๆที่ใช้ในการพิจารณานั้นเอง นั่นคือจะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขให้เหมาะสมกับความถี่ที่ใช้พิจารณาเพื่อให้ได้ค่าที่วิเคราะห์ออกมาเป็นไปอย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ จะต้องมีการปล่อยให้มีการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าไปจนกระทั่งสนามมีการแพร่กระจายอย่างคงตัว สำหรับแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่ทำการสร้างนั้นในตอนแรกจะมีการสร้างแบบจำลองที่มีลักษณะเป็นสารเนื้อเดียวทรงสี่เหลี่ยมและใช้ค่าเนื้อเยื่อเป็นของไขมัน โดยมีแหล่งกำเนิดคลื่นเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ออกแบบโดยใช้สายอากาศแบบโมโนโพลที่มีความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ และใช้ค่ากำลังงานที่ใช้ส่งแตกต่างกันคือ 0.6 วัตต์และ 2 วัตต์โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่กับแบบจำลองศีรษะมนุษย์ จากนั้นก็จะมีการพัฒนาแบบจำลองศีรษะมนุษย์ให้มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น โดยสร้างเป็นลักษณะทรงกลมชั้นเดียวที่ใช้เนื้อเยื่อเป็นไขมันและพัฒนาเป็นทรงกลมสองชั้นซ้อนกัน โดยชั้นนอกจำลองให้เป็นลักษณะของชั้นกระดูกและชั้นในให้เป็นไขมัน หลังจากนั้นได้พัฒนาจนเป็นแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ที่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ 12 ชนิดด้วยกันแล้วทำการวิเคราะห์ โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของลักษณะการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะของเนื้อเยื่ออันเนื่องมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีข้อดีของเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าตงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้เปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่กับแบบจำลองของศีรษะและตามการเปลี่ยนแปลง

ค่ากำลังงานที่ใช้ส่งในโทรศัพท์เคลื่อนที่และตามความถี่ที่ใช้ในการส่งคลื่นของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลักษณะการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะของเนื้อเยื่อ ซึ่งผลที่ได้เหล่านี้สามารถนำมาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์สำหรับการเลือกใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ เช่น กำลังส่งหรือความถี่ของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ควรเป็นเท่าไรจึงจะเหมาะสม และลักษณะการใช้งาน โทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อสุขภาพของผู้ใช้มากที่สุด

รายงานฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยบทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความน่าสนใจและวัตถุประสงค์และรายละเอียดโดยคร่าวๆ

บทที่ 2 กล่าวถึงรายละเอียดของเนื้อหาที่ใช้โดยจะเป็นทฤษฎีต่างๆ ที่กล่าวถึงรายละเอียดของวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา แบบจำลองของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่น แบบจำลองศีรษะมนุษย์ และอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ

บทที่ 3 กล่าวถึงการคำนวณและการออกแบบ แบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่และแบบจำลองศีรษะมนุษย์ ที่จะใช้ในการวิเคราะห์

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ได้ทำการออกแบบไว้ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ในกรณีเงื่อนไขที่แตกต่างกัน เช่น ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่กับแบบจำลองศีรษะมนุษย์ กำลังงานที่ใช้ในการส่งและความถี่ที่ใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าสนามไฟฟ้าและอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะและผลจากการทดสอบโดยการปฏิบัติจริงโดยการปล่อยคลื่นจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสารเนื้อเยื่อที่แทนกล้ามเนื้อของศีรษะมนุษย์ เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุปผล กล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการศึกษาและวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของปริภูมิพันธ์ฉบับนี้ โดยนำผลมาวิเคราะห์เพื่อสรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (Finite Difference Time Domain Method)

วิธีนี้ใช้ในการแก้ปัญหาการแพร่กระจายคลื่นซึ่งเป็นวิธีที่รู้จักกันครั้งแรกโดย Yee ต่อมาได้มีการพัฒนาโดย Taflov และคนอื่นๆ ซึ่งใช้สมการของ Maxwell ที่ขึ้นกับเวลาในการแก้ปัญหานี้ ซึ่งวิธี FD-TD นี้จะครอบคลุมถึงเรื่องต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. วิธีผลต่างสืบเนื่องของ Yee
2. ความถูกต้องแน่นอน
3. เงื่อนไขขอบเขตของตาราง

##### 2.1.1 วิธีผลต่างสืบเนื่องของ Yee

ในตัวกลางที่มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับสมการของ Maxwell แสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.2)$$

โดยทั้งสองสมการนี้สามารถแสดงได้ในรูปสมการ 6 สมการในระบบพิกัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก (x,y,z) ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \quad (2.8)$$

จากสัญลักษณ์สามารถอธิบายจุดตัดในพื้นที่ที่ได้โดย

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (2.9)$$

และฟังก์ชันอื่นของที่ว่างและเวลาจะได้

$$F^n(i, j, k) = F(i\delta, j\delta, k\delta, n\Delta t) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z$  คือระยะห่างระหว่างหน่วยเซลล์

$\Delta t$  คือเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

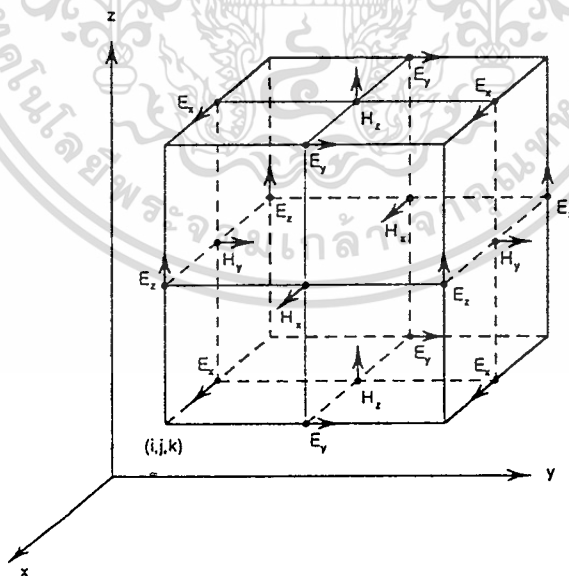
$(i, j, k, n)$  เป็นเลขจำนวนเต็ม

โดยการใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องสามารถประยุกต์ใช้เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสอง ได้ดังนี้

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n}{\delta} (i + 1/2, j, k) - \frac{F^n}{\delta} (i - 1/2, j, k) + O\delta^2 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}}{\Delta t} (i, j, k) - \frac{F^{n-1/2}}{\Delta t} (i, j, k) + O\Delta t^2 \quad (2.12)$$

ซึ่งสมการ (2.11) เป็นสมการอนุพันธ์สำหรับที่ว่างของสมการ (2.3) ถึง (2.8) ซึ่งเป็นส่วนประกอบตำแหน่งของ Yee คือสนาม E และ H ของหน่วยเซลล์ ที่สามารถแสดงได้ดังรูป (2.1)



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งของส่วนประกอบสนามของหน่วยเซลล์

และจากสมการ (2.12) ที่แสดงส่วนประกอบของสนาม E และ H โดยหาค่าที่เปลี่ยนแปลงที่ครึ่งของลำดับเอกสารนี้ เอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับกรรเซงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เวลา ดังนั้นจะสามารถหาการประยุกต์ของสมการผลต่างสืบเนื่องของสมการ (2.3) ถึง (2.8) ได้ดังนี้ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j+1/2,k+1/2) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j+1/2,k+1/2) + \frac{\delta t}{\mu(i,j+1/2,k+1/2)\delta} \times \begin{bmatrix} E_y^n(i,j+1/2,k+1) - E_y^n(i,j+1/2,k) + \\ E_z^n(i,j,k+1/2) - E_z^n(i,j+1,k+1/2) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+1/2,j,k+1/2) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+1/2,j,k+1/2) + \frac{\delta t}{\mu(i+1/2,j,k+1/2)\delta} \times \begin{bmatrix} E_z^n(i+1,j,k+1/2) - E_z^n(i,j,k+1/2) + \\ E_x^n(i+1/2,j,k) - E_x^n(i+1/2,j,k+1) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

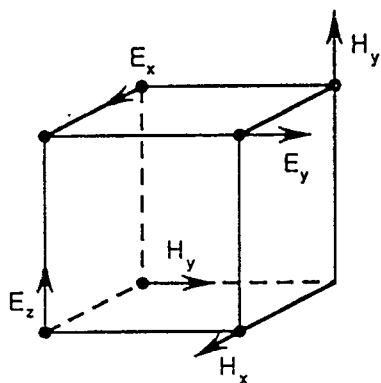
$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+1/2,j+1/2,k) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+1/2,j+1/2,k) + \frac{\delta t}{\mu(i+1/2,j+1/2,k)\delta} \times \begin{bmatrix} E_x^n(i+1/2,j+1,k) - E_x^n(i+1/2,j,k) + \\ E_y^n(i,j+1/2,k) - E_y^n(i+1,j+1/2,k) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$E_x^{n+1}(i+1/2,j,k) = \left(1 - \frac{\sigma(i+1/2,j,k)\delta t}{\varepsilon(i+1/2,j,k)}\right) E_x^n(i+1/2,j,k) + \frac{\delta t}{\varepsilon(i+1/2,j,k)\delta} \times \begin{bmatrix} H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+1/2,j+1/2,k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+1/2,j-1/2,k) + \\ H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+1/2,j,k-1/2) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+1/2,j,k+1/2) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

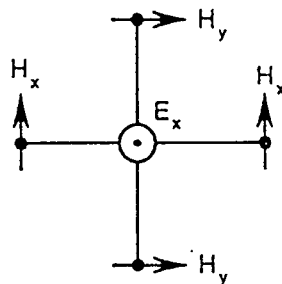
$$E_y^{n+1}(i,j+1/2,k) = \left(1 - \frac{\sigma(i,j+1/2,k)\delta t}{\varepsilon(i,j+1/2,k)}\right) E_y^n(i,j+1/2,k) + \frac{\delta t}{\varepsilon(i,j+1/2,k)\delta} \times \begin{bmatrix} H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j+1/2,k+1/2) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j+1/2,k-1/2) + \\ H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-1/2,j+1/2,k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+1/2,j+1/2,k) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$E_z^{n+1}(i,j,k+1/2) = \left(1 - \frac{\sigma(i,j,k+1/2)\delta t}{\varepsilon(i,j,k+1/2)}\right) E_z^n(i,j,k+1/2) + \frac{\delta t}{\varepsilon(i,j,k+1/2)\delta} \times \begin{bmatrix} H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+1/2,j,k+1/2) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-1/2,j,k+1/2) + \\ H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j-1/2,k+1/2) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j+1/2,k+1/2) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของสนาม (ก) 1/4 ของหน่วยเซลล์ (ข) ในระนาบ

จากสมการ (2.13) ถึง (2.18) และรูปที่ 2.1 นั้น ส่วนประกอบของสนาม E และ H รวมกันอยู่ในหน่วยเซลล์และสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงที่ครึ่งของลำดับเวลาได้โดยส่วนประกอบสนามทั้งหมดสามารถแสดงในลักษณะ 1/4 ของหน่วยเซลล์ตามรูปที่ 2.2 (ก) และ (ข) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของส่วนประกอบสนามในระนาบซึ่งความสัมพันธ์ที่กล่าวมาแล้วนี้สามารถใช้เป็นเงื่อนไขของขอบเขตตารางที่ต้องการกำหนด โดยจากรูป 2.2 นั้นมาจากสมการ (2.6) หรือสมการ (2.16)

### 2.1.2 ความถูกต้องแน่นอน

ความถูกต้องของการคำนวณขนาดความกว้างของหน่วยเซลล์จะต้องน้อยกว่าความยาวคลื่น โดยมักจะใช้เงื่อนไข  $\leq \frac{\lambda}{10}$  หรือมิติที่เล็กที่สุดของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลาจะมีเงื่อนไขของความถูกต้องดังนี้

$$\mu_{\max} \Delta t \leq \left[ \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right]^{-1/2} \quad (2.19)$$

โดย  $\mu_{\max}$  คือ ความเร็วเฟสของคลื่นที่มากที่สุด

$\Delta t$  คือ การเปลี่ยนแปลงทางเวลา

$\delta$  คือ ขนาดของหน่วยเซลล์

เมื่อใช้ขนาดของหน่วยเซลล์  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \delta$  สมการ (2.19) จะกลายมาเป็น

$$\frac{\mu_{\max}}{\delta} \Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (2.20)$$

เมื่อ

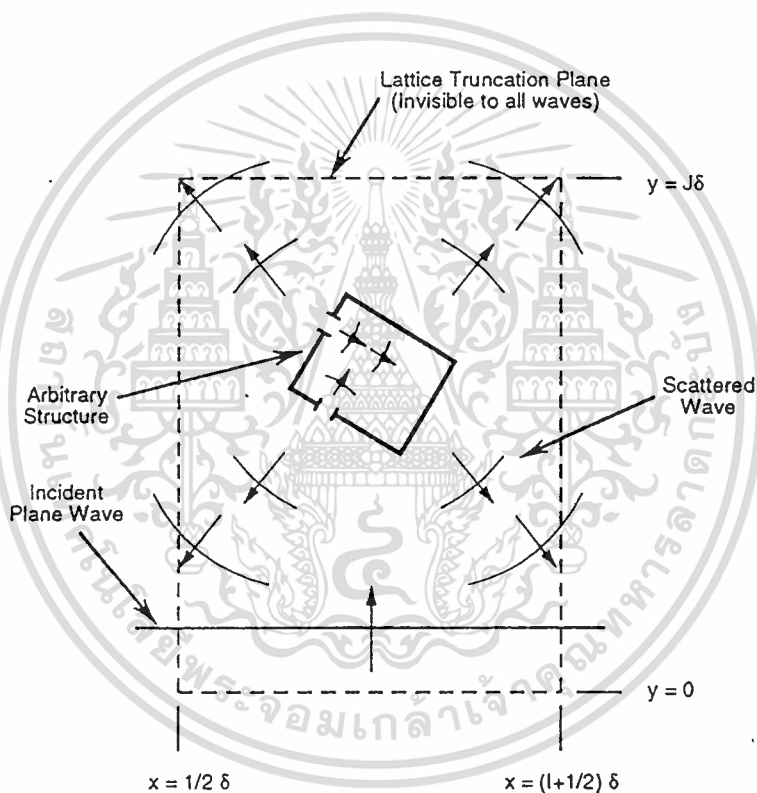
$$\Delta t = \frac{\delta}{2c}$$

$n$  เป็นจำนวนมิติของที่ว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 เงื่อนไขขอบเขตของตาราง

ความยากในการแก้ปัญหาคาร์แพร่กระจายคลื่นโดยการประยุกต์ใช้วิธีผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลา หรือวิธี FD-TD นั้นสนามที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นแบบเปิดหรือไม่ได้มีการกำหนดขอบเขตการพิจารณาเอาไว้จึงทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ไม่สามารถเก็บข้อมูลหรือผลของการแก้ปัญหาที่มีจำนวนไม่จำกัดนี้ได้ ดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดพื้นที่ที่ใช้ในการแก้ปัญหาเอาไว้ ซึ่งจะต้องให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ใช้ในการพิจารณาทั้งหมดเพื่อให้ครอบคลุมการแพร่กระจายคลื่นและมีเงื่อนไขการกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมและสามารถขยายพื้นที่ในการคำนวณออกไปได้ตามต้องการ โดยเงื่อนไขของการกำหนดขอบเขตรอบนอกนี้เรียกว่า เงื่อนไขการแพร่กระจายคลื่นหรือเงื่อนไขขอบเขตที่ดูดซับคลื่นหรือเงื่อนไขโครงข่ายตัดปลาย โดยมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 2.3 พื้นที่การแก้ปัญหของการกำหนดขอบเขตแบบโครงข่ายตัดปลาย

สำหรับเงื่อนไขในการกำหนดขอบเขตการพิจารณาจะนำเสนอวิธีของ Berenger ซึ่งเป็นผู้คิดค้นวิธีนี้ โดยมีลักษณะของขอบเขตที่สามารถดูดซับคลื่นได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีการสะท้อนกลับ วิธีนี้ได้นำเอาเทคนิควิธีผลต่างสลับเนื่องเชิงเวลามาใช้ในการกำหนดขอบเขตการพิจารณา เรียกเงื่อนไขการกำหนดขอบเขตนี้ว่า PML (Perfectly Matched Layer) ซึ่งวิธีนี้ใช้สำหรับการคำนวณ FD-TD ใน 2 มิติที่สามารถแบ่งการพิจารณาลักษณะการแพร่กระจายคลื่นออกได้เป็นโหมด TE และโหมด TM และสามารถพัฒนาการคำนวณเพื่อนำไปใช้ในกรณี 3 มิติได้อย่างอิสระ แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3.1 ทฤษฎี 2 มิติกรณีของคลื่นโหมด TE

การแพร่กระจายของคลื่นในโหมดนี้ สนามที่แพร่กระจายออกไปจะพิจารณาจากสมการของ Maxwell ในกรณีของคลื่นในโหมด TE ที่จะมีส่วนประกอบของสนาม 3 ตัวด้วยกันคือ  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_z$  ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (2.21)$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y = -\frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (2.22)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} + \sigma^0 H_z = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2.23)$$

ซึ่งมีเงื่อนไขเพื่อให้ค่าความต้านทานสมมูลย์กัน ดังสมการ

$$\frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{\sigma^0}{\mu_0} \quad (2.24)$$

เมื่อ

- $\epsilon_0$  :ค่าสภาพยอม
- $\mu_0$  :ค่าความซบซิมได้
- $\sigma$  :ค่าความนำไฟฟ้า
- $\sigma^0$  :ค่าการสูญเสียทางแม่เหล็ก

สำหรับเทคนิคของการกำหนดขอบเขตวิธี PML จะมีการแยกสนาม  $H_z$  ออกเป็น 2 ส่วนในการคือ  $H_{zx}$ ,  $H_{zy}$  ทำให้ได้ส่วนประกอบของสนามทั้งหมด 4 ตัวด้วยกันคือ  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_{zx}$ ,  $H_{zy}$  เพื่อให้สมมูลย์กัน ทำให้ได้สมการในการพิจารณาดังนี้

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma_y E_x = \sigma \frac{(H_{zx} + H_{zy})}{\sigma_y} \quad (2.25)$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma_x E_y = -\sigma \frac{(H_{zx} + H_{zy})}{\sigma_x} \quad (2.26)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_x^0 H_{zx} = -\frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักศึกษาชั้นปริญญาโทและปริญญาตรีเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_0 \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_y^o H_{zy} = \frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (2.28)$$

ถ้า  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_x^o = \sigma_y^o = 0$  จะสามารถลดรูปเป็นสมการของ Maxwell ที่สูญญากาศได้

ถ้า  $\sigma_x = \sigma_y$  และ  $\sigma_x^o = \sigma_y^o = 0$  สามารถลดรูปของสมการอยู่ในตัวกลางที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้

ถ้า  $\sigma_x = \sigma_y$  และ  $\sigma_x^o = \sigma_y^o$  สมการจะลดรูปเป็นตัวกลางที่มีการดูดซับคลื่นที่มีค่าความต้านทานสมมูลกับระนาบของคลื่นตกกระทบ

ถ้า  $\sigma_y = \sigma_y^o = 0$  ตัวกลาง PML จะดูดซับระนาบที่มีส่วนประกอบของสนาม  $E_y$  และ  $H_{zx}$  ที่แพร่กระจายไปตามแกน x แต่จะไม่ดูดซับคลื่นที่แพร่กระจายไปตามแกน y

ถ้า  $\sigma_x = \sigma_x^o = 0$  จะเป็นคุณสมบัติของตัวกลางในวิธีการกำหนดขอบเขตของ PML ที่เป็นแบบเฉพาะที่มีการกำหนดตัวแปร  $(\sigma_x, \sigma_x^o, 0, 0)$  และ  $(0, 0, \sigma_y, \sigma_y^o)$  ที่ครอบคลุมความสัมพันธ์พื้นฐานของวิธีนี้ ทำให้มีการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นศูนย์

### 2.1.3.2 การแพร่กระจายของคลื่นระนาบ TE ในตัวกลาง PML

ขณะนี้กำลังพิจารณาการแพร่กระจายของคลื่นระนาบสูญญากาศในตัวกลาง PML โดยที่สนามไฟฟ้ามีขนาด  $E_0$  และมีมุม  $\phi$  กวาดไปตามแกนแกน Y ส่วน  $H_{zx_0}, H_{zy_0}$  เป็นขนาดของสนามแม่เหล็กที่แยกออกมา ดังนั้นองค์ประกอบของสนาม 4 ตัว สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_x = -E_0 \sin \phi e^{j\omega(t-\alpha_x-\beta_y)} \quad (2.29)$$

$$E_y = E_0 \cos \phi e^{j\omega(t-\alpha_x-\beta_y)} \quad (2.30)$$

$$H_{zx} = H_{zx_0} e^{j\omega(t-\alpha_x-\beta_y)} \quad (2.31)$$

$$H_{zy} = H_{zy_0} e^{j\omega(t-\alpha_x-\beta_y)} \quad (2.32)$$

เมื่อ

$\omega$  : ค่าความถี่เชิงมุม

$t$  : เวลา

$\alpha, \beta$  : ค่าคงที่

นำสมการ (2.29) ถึง (2.32) แทนในสมการ (2.25) ถึง (2.28) จะได้สมการ

$$\epsilon_0 E_0 \sin \phi - j \frac{\sigma_y}{\omega} E_0 \sin \phi = \beta (H_{zx_0} + H_{zy_0}) \quad (2.33)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_0 E_0 \cos \phi - j \frac{\sigma_x}{\omega} E_0 \cos \phi = \alpha (H_{zx0} + H_{zy0}) \quad (2.34)$$

$$\mu_0 H_{zx0} - j \frac{\sigma_x^\circ}{\omega} H_{zx0} = \alpha E_0 \cos \phi \quad (2.35)$$

$$\mu_0 H_{zy0} - j \frac{\sigma_y^\circ}{\omega} H_{zy0} = \beta E_0 \sin \phi \quad (2.36)$$

นำค่า  $H_{zx0}, H_{zy0}$  ในสมการ (2.35) และ (2.36) แทนในสมการ (2.33) และ (2.34) จะได้สมการ

$$\mu_0 \varepsilon_0 (1 - j \frac{\sigma_y}{\omega \varepsilon_0}) \sin \phi = \beta \left[ \frac{\alpha \cos \phi}{1 - j \sigma_x^\circ / \omega \mu_0} + \frac{\beta \sin \phi}{1 - j \sigma_y^\circ / \omega \mu_0} \right] \quad (2.37)$$

$$\mu_0 \varepsilon_0 (1 - j \frac{\sigma_x}{\omega \varepsilon_0}) \cos \phi = \alpha \left[ \frac{\alpha \cos \phi}{1 - j \sigma_x^\circ / \omega \mu_0} + \frac{\beta \sin \phi}{1 - j \sigma_y^\circ / \omega \mu_0} \right] \quad (2.38)$$

นำสมการ (2.37) ทหารด้วยสมการ (2.38) จะได้สมการ

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\sin \phi}{\cos \phi} \times \frac{(1 - j \sigma_y / \omega \varepsilon_0)}{(1 - j \sigma_x / \omega \varepsilon_0)} \quad (2.39)$$

จากสมการ (2.37),(2.38),(2.39) สามารถหาค่า  $\alpha$  และ  $\beta$  ได้ดังนี้

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon_0}{G} \left(1 - j \frac{\sigma_x}{\omega \varepsilon_0}\right) \cos \phi} \quad (2.40)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon_0}{G} \left(1 - j \frac{\sigma_y}{\omega \varepsilon_0}\right) \sin \phi} \quad (2.41)$$

เมื่อ

$$G = \sqrt{w_x \cos^2 \phi + w_y \sin^2 \phi} \quad (2.42)$$

$$w_x = \frac{1 - j \sigma_x / \omega \varepsilon_0}{1 - j \sigma_x^\circ / \omega \mu_0} ; \quad w_y = \frac{1 - j \sigma_y / \omega \varepsilon_0}{1 - j \sigma_y^\circ / \omega \mu_0} \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการประชาสัมพันธ์ให้ทราบถึงนโยบายและแผนการดำเนินงานของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะนี้ได้กำหนด  $\psi$  ซึ่งเป็นส่วนประกอบของทุกสนาม ส่วน  $\psi_0$  เป็นขนาด คำนึงจากสมการ (2.29) ถึง (2.32) และ (2.42),(2.43) จะได้สมการ

$$\psi = \psi_0 e^{j\omega \left( t - \frac{x \cos \phi + y \sin \phi}{cG} \right)} \times e^{\frac{-\sigma_x \cos \phi}{\epsilon_0 c G} x} e^{\frac{-\sigma_y \sin \phi}{\epsilon_0 c G} y} \quad (2.44)$$

จากเงื่อนไขที่ไม่มีกระแสย้อนกลับซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.24) และจะกำหนดให้ค่าของ  $w_x, w_y, G$  เป็น 1 ที่ความถี่ใดๆ ดังนั้นส่วนประกอบของสนามจากสมการ (2.44) จะได้

$$\psi = \psi_0 e^{j\omega \left( t - \frac{x \cos \phi + y \sin \phi}{G} \right)} \times e^{\frac{-\sigma_x \cos \phi}{\epsilon_0 c} x} e^{\frac{-\sigma_y \sin \phi}{\epsilon_0 c} y} \quad (2.45)$$

และสามารถหาค่าความต้านของคลื่นในตัวกลาง PML ได้จากสมการ

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2.46)$$

เทอมเอ็กโปเนนเชียลแรกในสมการ (2.45) แสดงคลื่นที่แพร่กระจายในตัวกลาง PML ส่วนเทอมเอ็กโปเนนเชียลที่สอง แสดงการลดลงของขนาดคลื่นตามแกน x และ y

พิจารณากรณี 2 มิติของโหมด TE ในหน่วยเซลล์ของ FD-TD โดยใช้ผนังที่เป็น PEC (Perfectly conductor) ซึ่งเป็นผนังที่เป็นตัวนำอย่างสมบูรณ์ของหน่วยเซลล์ซึ่งทางด้านซ้ายและด้านขวา ( $X_{\min}$  และ  $X_{\max}$ ) ของแต่ละ PML ที่มีค่า  $\sigma_x, \sigma_x^\circ$  ตาม  $\sigma_y, \sigma_y^\circ = 0$  ซึ่งจะไม่มีส่วนสะท้อนกลับข้ามจุดเชื่อมต่อของ PML และทางด้านบนและล่างของหน่วยเซลล์ ( $Y_{\min}$  และ  $Y_{\max}$ ) ที่มีค่า  $\sigma_y, \sigma_y^\circ$  และ  $\sigma_x = \sigma_x^\circ = 0$  ที่มุมทั้งสี่ของหน่วยเซลล์มีการซ้อนทับกันของ PML สองชั้น มีการสูญเสียสี่ตัวที่มีการปรับให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยยิ่งลึกลงไปการสูญเสียจะยิ่งเพิ่มขึ้น

$$R(\theta) = e^{-2\sigma_{\max} \delta \cos \theta / (n+1)\epsilon_0 c} \quad (2.47)$$

ในกรณีที่ค่า  $\theta$  เป็นศูนย์จะได้สมการ (2.47) เป็น  $R(0) = e^{-2\sigma_{\max} \delta / (n+1)\epsilon_0 c}$  ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการสะท้อนกลับสำหรับการตกกระทบแบบปกติของ PML มากกว่า PEC ขณะที่เมื่อ  $R \approx 1$  สำหรับการตกกระทบที่เฉียงทำมุมกับทิศทางการเคลื่อนที่ ในกรณีที่คลื่นเฉียงทำมุมนี้ถือว่าไม่มีปัญหาสำหรับการวิเคราะห์วิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3.3 ทฤษฎี 2 มิติกรณีของคลื่นโหมด TM

ในกรณีของคลื่นในโหมดนี้จะครอบคลุมส่วนประกอบของสนามทั้งหมด 3 ตัวด้วยกันคือสนาม  $E_z, H_x, H_y$  โดยในตัวกลาง PML จะแยกสนาม  $E_z$  ออกเป็น 2 ส่วนคือ  $E_{zx}, E_{zy}$  ดังนั้นส่วนประกอบของสนามจะมี 4 ตัวเช่นเดียวกันกับในกรณีโหมด TE โดยมีส่วนประกอบของสนามทั้งหมดคือ  $E_{zx}, E_{zy}, H_x, H_y$  ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนสมการได้ดังนี้

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (2.48)$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} = -\frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (2.49)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_y^\circ H_x = -\frac{\partial (E_{zx} + E_{zy})}{\partial y} \quad (2.50)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_x^\circ H_y = \frac{\partial (E_{zx} + E_{zy})}{\partial x} \quad (2.51)$$

การหาค่าต่างๆในกรณีของคลื่นในโหมด TM นี้ก็คิดคำนวณในทำนองเดียวกันกับกรณีในโหมด TE แต่จะมีการเปลี่ยนค่า  $\epsilon_0, \mu_0, \sigma$  นอกจากนั้นค่า  $\frac{1}{G}$  จะเปลี่ยนเป็น  $G$  แต่อย่างไรก็ตามเงื่อนไขอื่นๆยังคงเดิม

สำหรับการลดทอนของคลื่นที่แพร่กระจายออกไปในตัวกลางของ PML โดยปราศจากการสะท้อนกลับจะมีการเปลี่ยนแปลงของลำดับเวลาแบบเอ็กโปเนนเชียล สำหรับลักษณะโครงสร้างใน 2 มิติของหน่วยเซลล์ FD-TD โดยใช้ PML ของ Berenger สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4

### 2.1.3.4 ทฤษฎี เวกเตอร์ทั้งหมดพิจารณาในกรณี 3 มิติ

ในการพิจารณากรณี 3 มิติจะใช้เวกเตอร์ของสนามทั้งหมด 6 ส่วนด้วยกันและผลจากการกำหนดเงื่อนไขของวิธี PML ที่ได้จากการปรับปรุงสมการของ Maxwell จะได้สมการ 12 สมการด้วยกัน คือ

$$\mu_0 \frac{\partial H_{xy}}{\partial t} + \sigma_y^\circ H_{xy} = -\partial \frac{(E_{zx} + \sigma_{zy})}{\sigma_y} \quad (2.52)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{xz}}{\partial t} + \sigma_z^\circ H_{xz} = \partial \frac{(E_{yx} + E_{yz})}{\sigma_z} \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี (2.54) ไปใช้

$$\mu_0 \frac{\partial H_{yx}}{\partial t} + \sigma_x^\circ H_{yx} = \partial \frac{(E_{zx} + E_{zy})}{\sigma_x} \quad (2.55)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_x^\circ H_{zx} = -\partial \frac{(E_{yx} + E_{yz})}{\sigma_x} \quad (2.56)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_y^\circ H_{zy} = \partial \frac{(E_{xy} + E_{xz})}{\sigma_y} \quad (2.57)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{xy}}{\partial t} + \sigma_y E_{xy} = \partial \frac{(H_{zx} + H_{zy})}{\sigma_y} \quad (2.58)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{xz}}{\partial t} + \sigma_z E_{xz} = -\partial \frac{(H_{yx} + H_{yz})}{\sigma_z} \quad (2.59)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{yz}}{\partial t} + \sigma_z E_{yz} = \partial \frac{(H_{xy} + H_{xz})}{\sigma_z} \quad (2.60)$$

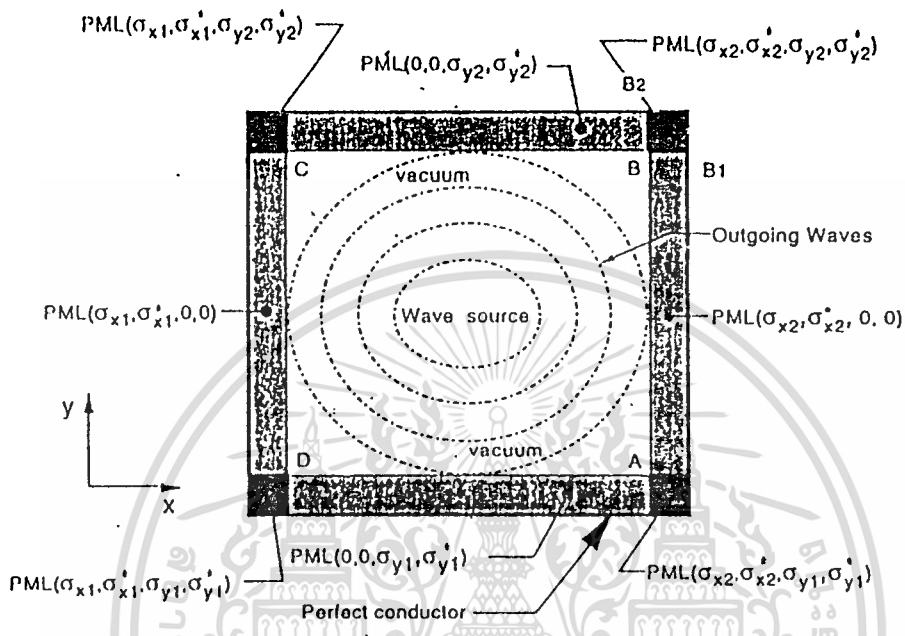
$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{yx}}{\partial t} + \sigma_x E_{yx} = -\partial \frac{(H_{zx} + H_{zy})}{\sigma_x} \quad (2.61)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{zx}}{\partial t} + \sigma_x E_{zx} = \partial \frac{(H_{yx} + H_{yz})}{\sigma_x} \quad (2.62)$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{zy}}{\partial t} + \sigma_y E_{zy} = -\partial \frac{(H_{xy} + H_{xz})}{\sigma_y} \quad (2.63)$$

ซึ่งเงื่อนไขของการกำหนดขอบเขตในการพิจารณาลักษณะการแพร่กระจายคลื่นโดยวิธี PML นี้ ในการทำให้เกิดการสมมูลกันในการพิจารณาในลักษณะ 3 มิติก็สามารถทำได้ โดยการนำเอาพื้นฐานการพิจารณาเงื่อนไขของการกำหนดขอบเขตมาจากกรณี 2 มิติทั้งในโหมด TE และโหมด TM โดยการนำเวกเตอร์การแพร่กระจายของสนามทั้งหมดมาใช้ในการคำนวณ

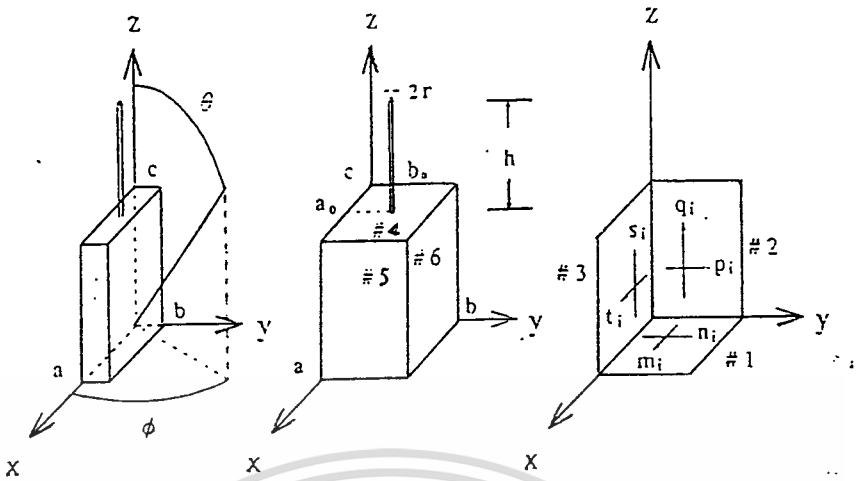
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ PML ใน 2 มิติ

## 2.2 แบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่

แบบจำลองของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ง่ายจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักที่สำคัญคือ สายอากาศกับตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เชื่อมต่อกัน โดยสายอากาศที่นำมาใช้นั้นจะเป็นสายอากาศแบบไดโพลที่มีความยาวเป็น  $\lambda/2$  และสายอากาศแบบโมโนโพล ที่มีความยาวเป็น  $\lambda/4$  แล้วแต่การเลือกใช้ ส่วนตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นจะมีลักษณะเป็นกล่องตัวนำ โดยจุดเชื่อมต่อบetween สายอากาศกับกล่องตัวนำจะเป็นจุดที่ป้อนสัญญาณออกมาหรือจุดที่มีการแพร่กระจายคลื่นซึ่งโครงสร้างของแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ง่าย ๆ มีลักษณะดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของสายอากาศแบบโมโนโพลที่เชื่อมต่อกับกล่องตัวนำ

ในการกำหนดขนาดความยาวสายอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่ จากรูปคือค่าของตัว  $h$  นั้น พิจารณาจากความยาวคลื่นซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์กับความถี่ที่ต้องการและเงื่อนไขของสายอากาศที่เลือกใช้ ส่วนการกำหนดขนาดของโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือกล่องตัวนำนั้นจะมีเงื่อนไขในการกำหนดค่าขนาด ความกว้าง ความหนา และความสูง ตามรูปคือค่า  $a, b$  และ  $c$  ตามลำดับและนอกจากนั้นยังมีการกำหนดตำแหน่งการวางสายอากาศที่แสดงด้วยค่า  $a_0, b_0$

ในกรณีนี้จะแสดงการหาค่าตัวแปรต่างๆของสายอากาศแบบโมโนโพลที่ใช้ในการคำนวณ โดยแสดงดังตารางที่ 2.1

ความยาวของสายอากาศโมโนโพล	$h$	$0.25 \lambda$
รัศมีของโมโนโพล	$r$	$0.00125 \lambda$
ความถี่	$f$	Hz

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณสายอากาศแบบโมโนโพลของโทรศัพท์เคลื่อนที่

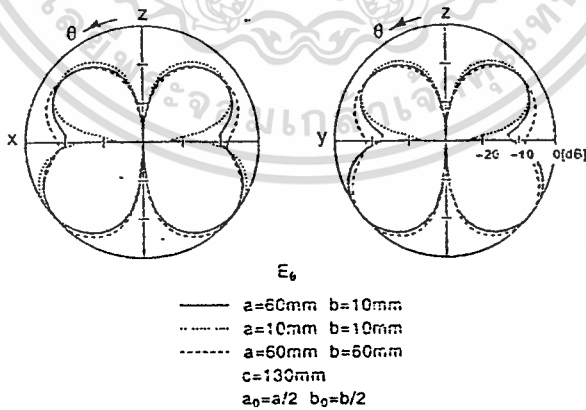
สัญญาณที่แพร่กระจายออกมาจากจุดที่ปล่อยคลื่นนั้นจะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์โดยสนามไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$E_z^n(i_f, j_f, k_f) = \frac{V^n}{\delta} \quad (2.64)$$

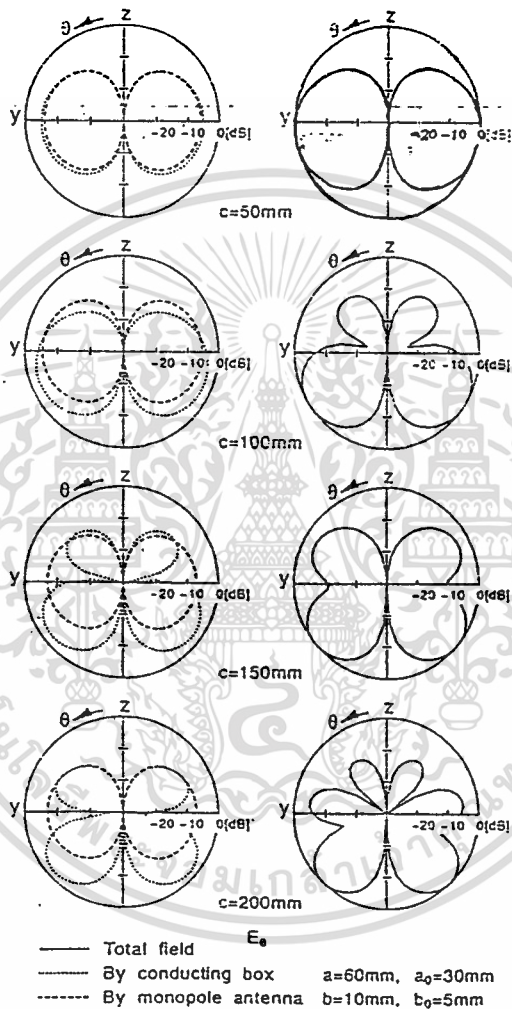
เมื่อ  $V^n$  เป็นแรงดันที่เวลา  $n$  ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีของการกำหนดขนาดกล่องตัวนำของโทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีการพิจารณาการหาค่าตัวแปรต่างๆดังนี้

- ◆ ผลของความกว้างและความหนาของกล่องตัวนำ สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดของความกว้าง  $a$  และความหนา  $b$  นั้นถ้าค่า  $a, b$  มีการเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเปลี่ยนไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ความถี่ 1.5 GHz ซึ่งจะมีค่าความยาวคลื่นเป็น 200 mm จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นดังรูปที่ 2.6 ซึ่งในการกำหนดขนาดของความกว้าง  $a$  โดยทั่วไปควรจะมากกว่า  $\lambda/4$
- ◆ ผลของความสูงของกล่องตัวนำ เมื่อความสูง  $c$  เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการแกว่งมากขึ้นและบีมหลักจะชี้ไปในทิศทางที่ต่ำกว่า เมื่อ  $c$  มีค่าน้อยกว่า  $\lambda/4$  ทิศทางของบีมหลักจะชี้ไปทางด้านแนวนอนและขนาดความกว้างของบีมก็จะยิ่งกว้างมากขึ้นด้วย ยกตัวอย่างในกรณีความถี่ 1.5 GHz เช่นเดียวกันเมื่อความสูง  $c$  เปลี่ยนจะสามารถแสดงผลได้ดังรูป 2.7 โดยค่าความสูง  $c$  นี้ควรกำหนดให้มีขนาดมากกว่า  $\lambda/2$  แต่ไม่ควรเกิน  $\lambda$  จึงจะทำให้การชี้ทิศทางดี
- ◆ ผลของการวางตำแหน่งสายอากาศ จากรูปที่ 2.5 ค่า  $a_0, b_0$  จะแสดงค่าตำแหน่งของสายอากาศที่วางเชื่อมต่อกับกล่องตัวนำ สำหรับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของค่าดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับค่า  $a, b$  ยกตัวอย่างเมื่อใช้ความถี่ 1.5 GHz จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นดังรูปที่ 2.8 ถ้าค่า  $a_0$  เคลื่อนตำแหน่งจากบริเวณจุดศูนย์กลางออกไป รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย เมื่อ  $a_0$  มีค่าน้อยกว่า  $\lambda/4$  แต่ถ้า  $a_0$  มากกว่า  $\lambda/4$  จะไม่ค่อยมีผลเสียมากนัก

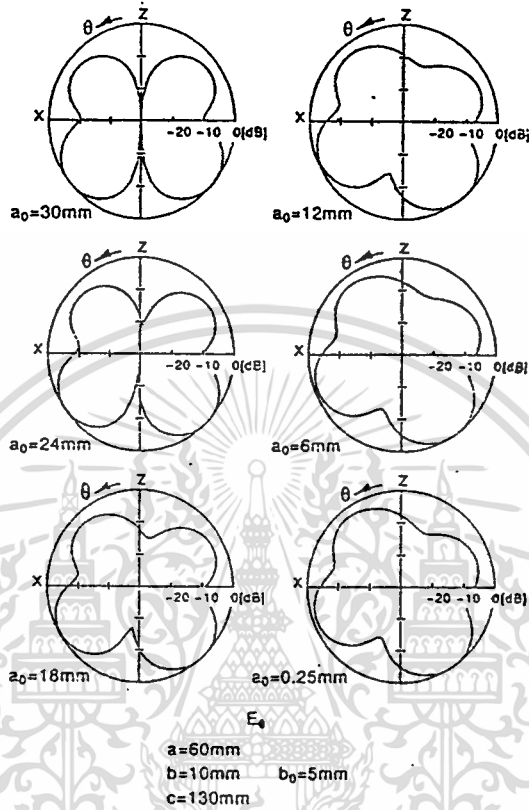


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
 รูปที่ 2.6 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากการเปลี่ยนความกว้างและความหนาของกล่องตัวนำ  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของกล่องตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

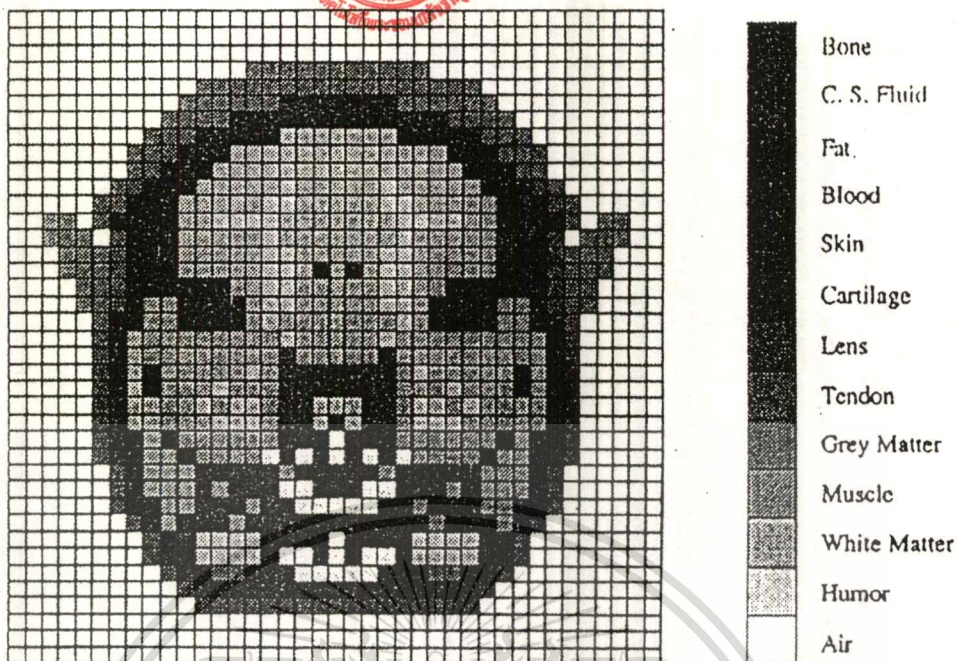


รูปที่ 2.8 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจากการเปลี่ยนการวางตำแหน่งของสายอากาศ

ดังนั้นในการกำหนดขนาดของกล่องตัวนำของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่จะต้องพิจารณาเงื่อนไขต่างๆเหล่านี้ด้วย

### 2.3 แบบจำลองสี่ระยะมนุษย์

สำหรับแบบจำลองสี่ระยะมนุษย์นั้นเป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อชนิดต่างๆหลายชนิดด้วยกันซึ่งมีลักษณะแบบจำลองดังรูปที่ 2.9 โดยแบบจำลองนี้จะมีการแบ่งลักษณะของเนื้อเยื่อออกเป็นหน่วยเซลล์เล็กๆที่มีขนาดเท่ากันซึ่งแต่ละหน่วยเซลล์จะมีขนาด 0.5 เซนติเมตรเพื่อทำการวิเคราะห์หาลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่มาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่จากรูปแบบจำลองนี้จะประกอบด้วยจำนวนเซลล์ทั้งหมด 26,480 เซลล์ และประกอบด้วยเนื้อเยื่อชนิดต่างๆทั้งหมด 12 ชนิดด้วยกัน โดยเนื้อเยื่อแต่ละชนิดจะมีค่าตัวแปรต่างๆที่ไม่เหมือนกันตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.9 แบบจำลองศีรษะมนุษย์

ลักษณะของเนื้อเยื่อทั้ง 12 รูปแบบที่มีค่าตัวแปรที่แตกต่างกันตามแต่ละชนิดดังตารางที่ 2.2

TISSUE	$\delta(S / m)$	$\epsilon_r$	$\rho(g / cm^3)$
SKIN	0.82	43.70	1.00
FAT	0.11	6.20	1.00
MUSCLE	1.38	53.50	1.05
BONE	0.10	7.30	1.20
TENDON	0.10	7.30	1.03
CARTILAGE	0.10	7.30	1.00
BLOOD	1.32	63.30	1.00
C.S.FLUID	1.67	62.50	1.02
GREY MATTER	0.67	47.40	1.05
WHITE MATTER	0.48	39.40	1.00
HUMOR	1.90	70.00	1.00
LENS	0.75	45.00	1.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเนื้อเยื่อที่ใช้สำหรับแบบจำลองศีรษะมนุษย์ [2]  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามลักษณะของสนามไฟฟ้าของเนื้อเยื่อศีรษะมนุษย์ก็ยังไม่ถูกต้องมากนักและความแม่นยำของการประมาณค่าลักษณะการแพร่กระจายยังคงเกี่ยวข้องกับเวลาปัจจุบันอีกด้วย ตัวอย่างเช่น C.Grabriel ได้ทำการการวัดลักษณะสนามไฟฟ้าของกระดูกและเส้นเอ็นหาค่าถึงเวลาที่ 3 ซึ่งมากกว่ารายละเอียดในตารางที่ 2.2 แต่ผลที่ออกมายังไม่ถูกต้องแม่นยำอย่างที่ต้องการ

#### 2.4 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ(SAR)

การวิเคราะห์โดยใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเชิงเวลาหรือ(FD-TD)นั้นคือ การหาลักษณะการแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าจะเกี่ยวเนื่องกับเวลา ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าดังกล่าวนี้สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะของอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะได้ โดยค่านี้จะเป็นค่าที่แสดงว่าคลื่นที่แพร่กระจายออกไปมีการดูดซับในเนื้อเยื่อมากน้อยเท่าไร ในกรณีนี้พิจารณาคลื่นที่แพร่กระจายมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังศีรษะมนุษย์ โดยจากแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่ประกอบด้วยจำนวนเซลล์เป็นจำนวนมากที่มีลักษณะทางไฟฟ้าที่สมมูลกันทางกายวิภาค อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่มากที่สุดในการศีรษะมนุษย์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆเหล่านี้

- ◆ ระยะห่างระหว่างศีรษะมนุษย์กับโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยจะทำให้อัตราการดูดซับคลื่นจะแพร่กระจายที่ตำแหน่งต่างกัน เช่น ที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร(900 MHz)อัตราส่วนการดูดซับคลื่นเฉพาะจะแพร่กระจายบริเวณแก้มแต่ที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตรจะแพร่เข้าไปบริเวณแก้มใกล้เข้าไปถึงกระดูกรอบๆช่องปาก ซึ่งระยะห่างมากที่สุดที่ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นเฉพาะจะปรากฏบริเวณแก้ม
- ◆ ชนิดของสายอากาศระหว่างสายอากาศไดโพลกับสายอากาศโมโนโพล กรณีที่ใช้สายอากาศไดโพลการแพร่กระจายของกระแสที่ออกไปจะปรากฏรอบๆจุดศูนย์กลางของสายอากาศซึ่งกระแสนี้จะมีผลทำให้ค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นเฉพาะเกิดมากบริเวณศีรษะ ส่วนกรณีที่ใช้สายอากาศโมโนโพลกระแสจะแพร่บริเวณด้านล่างของจุดที่ปล่อยกระแสออกไปซึ่งเป็นจุดต่อระหว่างกล่องตัวนำกับสายอากาศมีผลทำให้กระแสไหลบริเวณผิวหนังของกล่องตัวนำค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นเฉพาะจะปรากฏบริเวณแก้ม
- ◆ ความถี่ที่ใช้โดยยิ่งใช้ความถี่สูงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นเฉพาะจะยิ่งมาก
- ◆ ชนิดของเนื้อเยื่อ ซึ่งเนื้อเยื่อแต่ละชนิดจะมีค่าความนำและค่าความหนาแน่นมวลของเนื้อเยื่อที่แตกต่างกันโดยเนื้อเยื่อที่มีค่าความนำสูงกระแสจะแพร่กระจายในเนื้อเยื่อมากกว่าสำหรับการหาค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ สามารถหาได้ตามสมการต่อไปนี้

$$SAR = \sigma E^2 / \rho \quad \text{W/Kg} \quad (2.65)$$

$\rho$  :ค่าความหนาแน่นมวลของเนื้อเยื่อ

$E$  :ค่าสนามไฟฟ้าภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานวิจัยที่ออกมามีค่าเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆตามที่กล่าวมาแล้วและตามแต่

ลักษณะการใช้งานของแต่ละบุคคล โดยค่าอัตราส่วนการดูฉบับคลื่นจำเพาะนี้ถ้ายังมีค่ามากก็จะมีโอกาส  
เสี่ยงสูงในการที่จะเป็นอันตรายต่อผู้ใช้

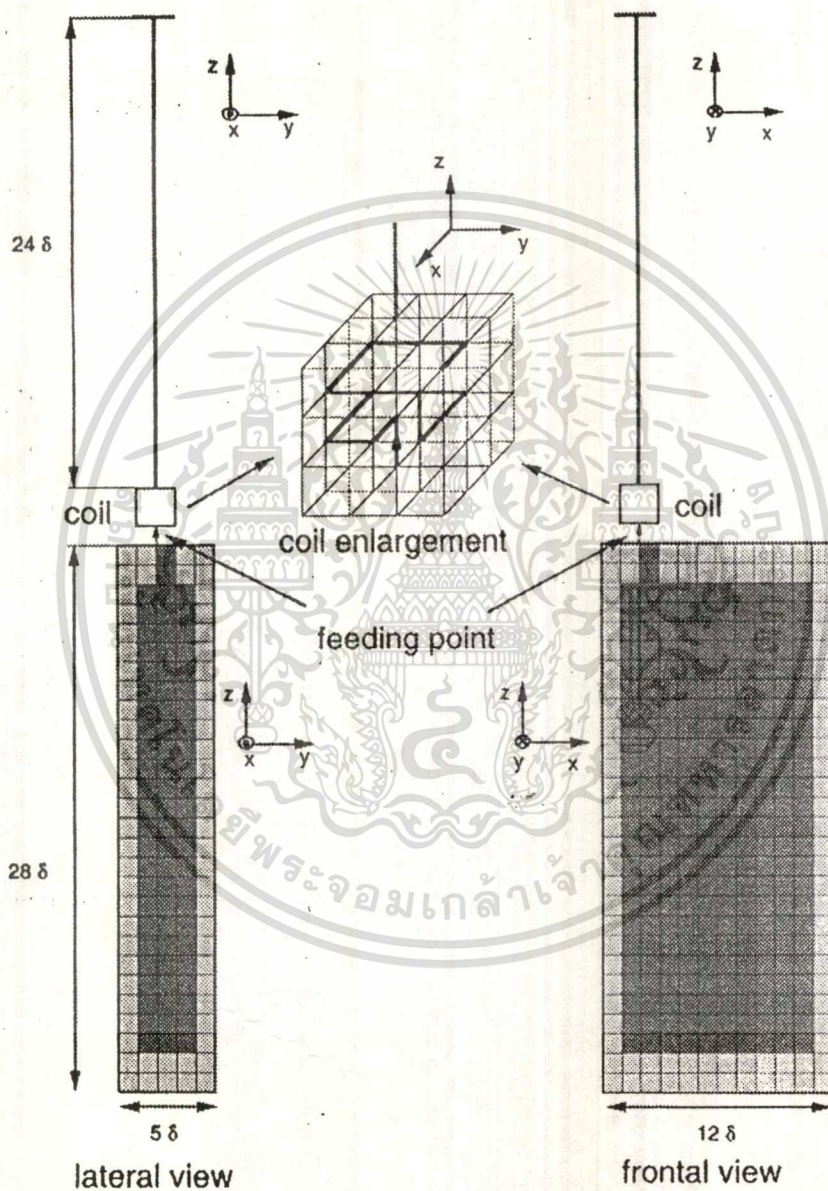


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

## การคำนวณและการออกแบบ

## 3.1 การคำนวณและการออกแบบ แบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่



รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ในลักษณะหน่วยเซลล์ของ FD-TD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นลักษณะแบบจำลองของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในลักษณะหน่วยเซลล์ของ FD-TD สามารถออกแบบได้โดยกำหนด ดังนี้

- ◆ ส่วนของสายอากาศเลือกใช้สายอากาศแบบโมโนโพลที่มีความสูงของสายอากาศเท่ากับ  $\lambda/4$  และ ความถี่ที่ใช้สำหรับปล่อยคลื่นของสายอากาศจะใช้ความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์และ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ จะได้  $\lambda = 16.66$  เซนติเมตรดังนั้นจะได้ความสูงของสายอากาศ  $\lambda/4 \approx 4.1$  เซนติเมตร ส่วนความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ จะได้  $\lambda = 33.33$  เซนติเมตรดังนั้นจะได้ความสูงของสายอากาศ  $\lambda/4 \approx 8.3$  เซนติเมตร
- ◆ ตัวกล่องโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือกล่องตัวนำที่ใช้เชื่อมต่อกับสายอากาศ จะใช้กล่องที่มีขนาดความกว้าง  $9\delta$  (หน่วยเซลล์) ความหนา  $5\delta$  และความสูง  $17\delta$  ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎี สำหรับขนาดของหน่วยเซลล์ที่เป็นไปตามเงื่อนไข  $\delta \leq \lambda/10$  จะเลือกใช้  $\delta = 0.5$  เซนติเมตรซึ่งสอดคล้องตามเงื่อนไข ทำให้ได้ขนาดของความกว้าง  $a = 9\delta = 45$  มิลลิเมตร ส่วนความหนา  $b = 5\delta = 25$  มิลลิเมตรและความสูง  $c = 17\delta = 85$  มิลลิเมตร และเมื่อใช้ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะได้  $\lambda = 33.33$  เซนติเมตร ตามเงื่อนไขของการกำหนดขนาดของหน่วยเซลล์สามารถที่จะเลือกใช้ขนาดของ  $\delta = 0.5$  เซนติเมตรได้เช่นกัน สำหรับการวางตำแหน่งของสายอากาศสามารถเลื่อนไปจากจุดกึ่งกลางได้โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไข  $a_0 < \text{หรือ} = a/4$  ในที่นี้ใช้  $a_0 = 2\delta = 10$  มิลลิเมตร

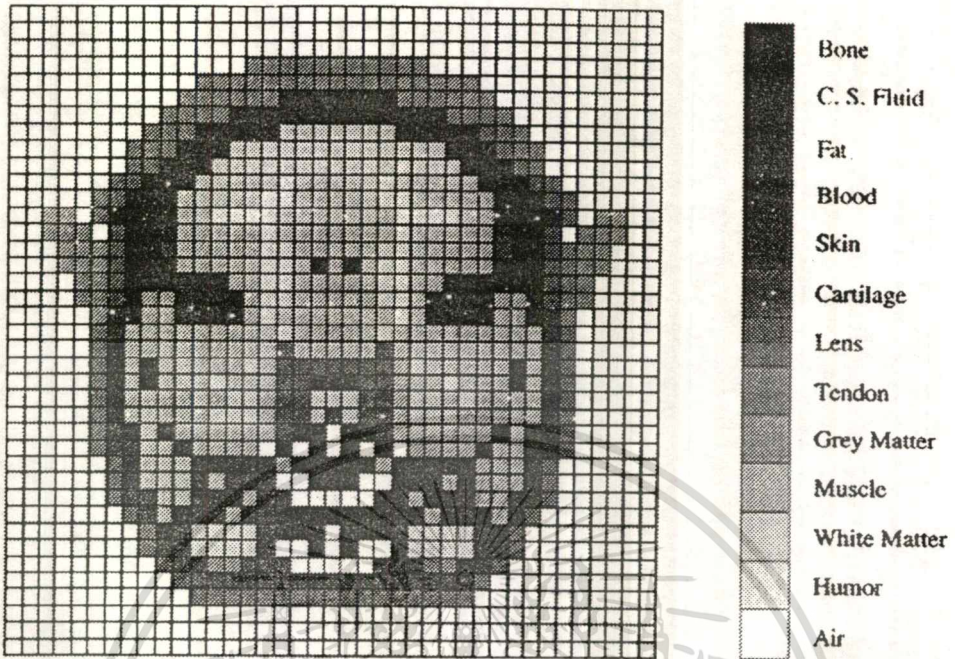
### 3.2 การคำนวณและการออกแบบ แบบจำลองสี่ระนาบ

สำหรับแบบจำลองสี่ระนาบที่ต้องการสร้างนั้นมีหลายลักษณะด้วยกันโดยมีการสร้างและพัฒนาตามลำดับ ดังนี้

- ◆ ในขั้นต้นจะสร้างแบบจำลองสี่ระนาบในลักษณะกล่องสี่เหลี่ยม โดยกำหนดขนาดของแบบจำลองให้มีความกว้างเท่ากับ  $11\delta$  ความยาวเท่ากับ  $21\delta$  และความสูงเท่ากับ  $26\delta$  เมื่อขนาดของหน่วยเซลล์  $\delta = 0.5$  เซนติเมตรเพื่อให้สอดคล้องกับขนาดของหน่วยเซลล์ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยมีลักษณะของแบบจำลองเป็นสารเนื้อเดียวกันตลอดทั้งแบบจำลองซึ่งลักษณะเนื้อเยื่อของแบบจำลองที่เลือกใช้จะเป็นไขมันที่มีค่า  $\epsilon_r = 6.2$  และค่าของตัวแปรต่างๆตามตารางที่ 2.2
- ◆ จากนั้นพัฒนาแบบจำลองโดยการสร้างแบบจำลองสี่ระนาบเป็นลักษณะทรงกลมที่เป็นสารเนื้อเดียวกันตลอดซึ่งขนาดของแบบจำลองที่ทำการสร้างมีขนาดรัศมีของทรงกลมเท่ากับ  $8\delta$  โดยใช้ลักษณะของเนื้อเยื่อเป็นไขมัน
- ◆ หลังจากนั้นได้พัฒนาแบบจำลองโดยการสร้างแบบจำลองเป็นลักษณะทรงกลม 2 ชั้น โดยชั้นนอกมีลักษณะเนื้อเยื่อเป็นกระดูกที่มีค่า  $\epsilon_r = 7.3$  รัศมี  $8\delta$  ส่วนเนื้อเยื่อชั้นในเป็นไขมัน รัศมี  $6\delta$
- ◆ หลังจากนั้นได้ปรับปรุงเป็นแบบจำลองสี่ระนาบที่สมบูรณ์ โดยประกอบด้วยเนื้อเยื่อชนิดต่างๆทั้งหมด 10 ชนิดดังตารางที่ 2.2 ซึ่งแบบจำลองที่ทำการสร้างจะมีลักษณะใกล้เคียงกับสี่ระนาบมากที่สุดซึ่งขนาดของแบบจำลองสี่ระนาบที่สมบูรณ์ที่ทำการสร้างจะมีขนาด กว้าง  $35\delta$  ยาว  $33\delta$  สูง  $27\delta$  โดยโครงสร้างของแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โครงสร้างแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์

จากโครงสร้างของแบบจำลองศีรษะมนุษย์ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\epsilon_r$  กับความเร็วของคลื่นที่เดินทางในตัวกลางใดๆ ซึ่งการแพร่กระจายคลื่นในโครงสร้างของแบบจำลองศีรษะมนุษย์นั้นความเร็วของคลื่นจะไม่เท่ากันในเนื้อเยื่อแต่ละชนิด โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามค่า  $\epsilon_r$  ของเนื้อเยื่อชนิดนั้นๆ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\mu_d = c / \epsilon_r \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\mu_d$  คือ ความเร็วของคลื่นในตัวกลางใดๆ

ดังนั้นจะได้ ค่า  $\mu_d$  เมื่อ  $\epsilon_r = 6.2$

$$\mu_d = 3 \times 10^8 / \sqrt{6.2} = 1.2048 \times 10^8 \text{ m/s}$$

จะเห็นว่าความเร็วของคลื่นในไขมันนั้นลดลงมากกว่าครึ่งหนึ่งของความเร็วคลื่นในอากาศ โดยถ้าค่า  $\epsilon_r$  ยังมีค่ามากขึ้นค่าความเร็วของคลื่นก็ยิ่งลดลง ซึ่งค่านี้จะนำไปใช้ในการพิจารณาในการกำหนดขนาดของหน่วยเซลล์ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งไปสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่น

#### 4.1 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นเมื่อใช้เงื่อนไขการกำหนดขอบเขตแบบ PML (Perfectly Matched Layer) ของ Berenger

##### ขั้นตอนการวิเคราะห์

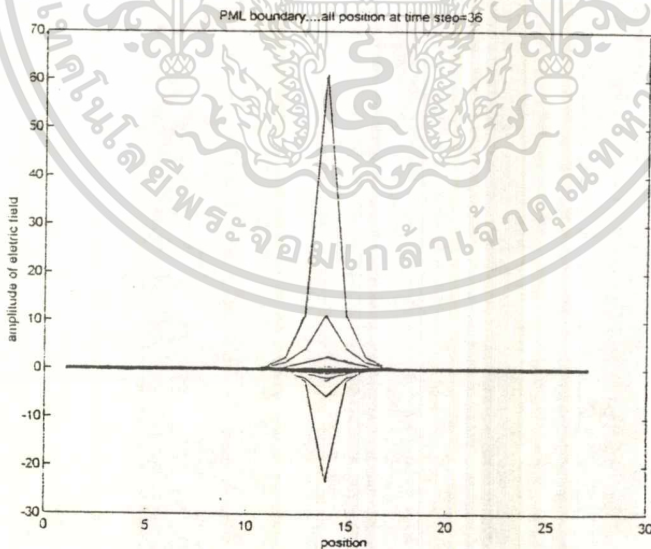
1. กำหนดให้ตัวปล่อยคลื่นสัญญาณไซน์เป็นแบบจุด โดยปล่อยสัญญาณต่อเนื่องที่มีความถี่ 900 MHz ปล่อยให้คลื่นมีการแพร่กระจายออกไปเรื่อยๆ โดยไม่กำหนดขอบเขตการพิจารณา แล้วเก็บค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆแล้วนำมาวาดกราฟ

2. กำหนดให้ตัวปล่อยคลื่นสัญญาณไซน์เป็นแบบจุด โดยปล่อยสัญญาณต่อเนื่องที่มีความถี่ 900 MHz ปล่อยให้คลื่นมีการแพร่กระจายออกไปเรื่อยๆจนถึงขอบเขตการพิจารณาตามเงื่อนไขแบบ PML แล้วเก็บค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆแล้วนำมาวาดกราฟ

3. เปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้าในกรณีของการแพร่กระจายคลื่นไปถึงระยะอนันต์ในข้อ 1 กับกรณีของการกำหนดขอบเขตแบบ PML ในข้อ 2 แล้ววาดกราฟ

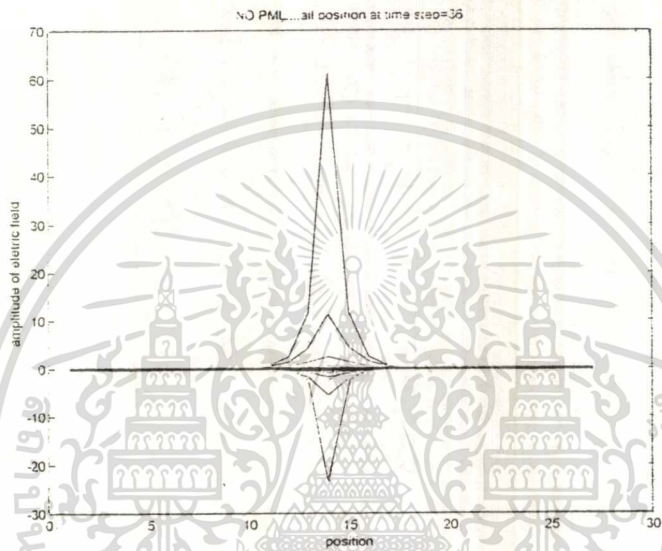
4. แสดงผลของลักษณะการแพร่กระจายคลื่นไปยังขอบเขตที่กำหนดตามเงื่อนไขแบบ PML

##### ผลการวิเคราะห์



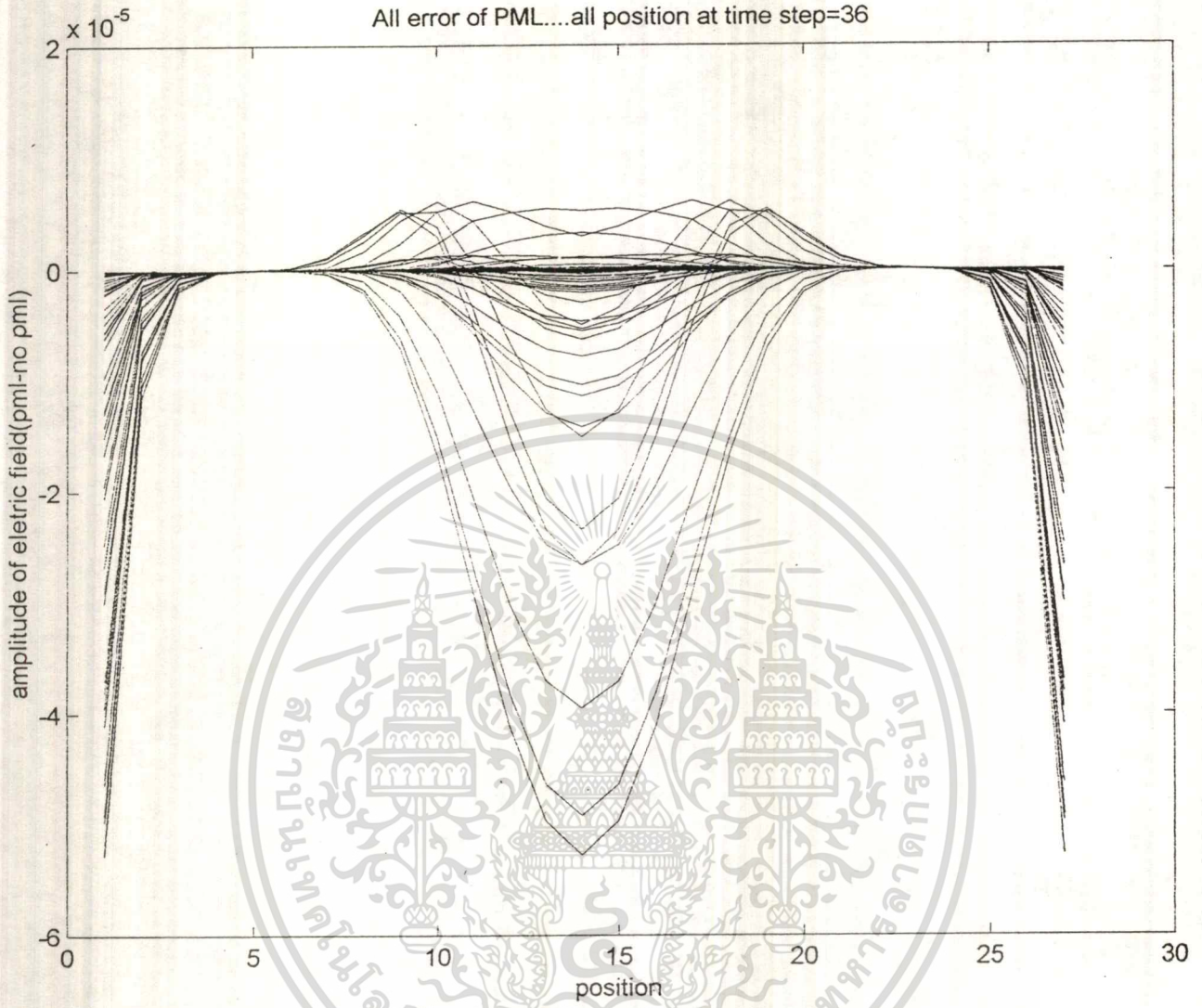
รูปที่ 4.1 ขนาดของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ณ เวลาที่ 36 กรณีขอบเขตแบบ PML

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



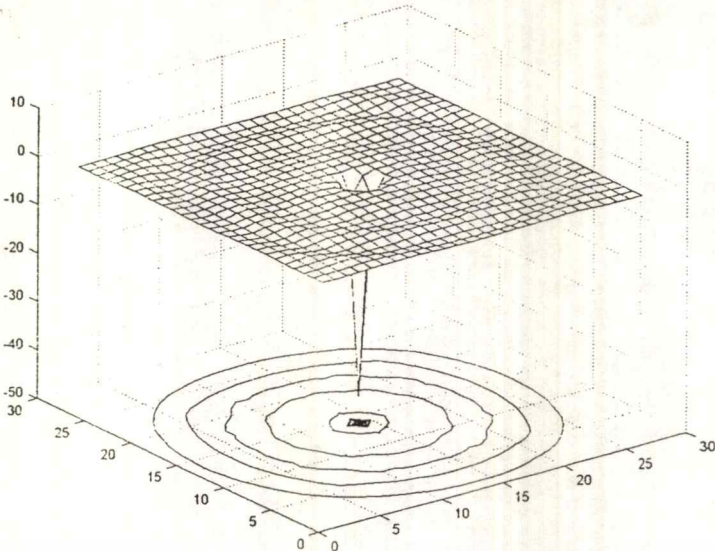
รูปที่ 4.2 ขนาดของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ณ เวลาที่ 36 กรณีขอบเขตอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

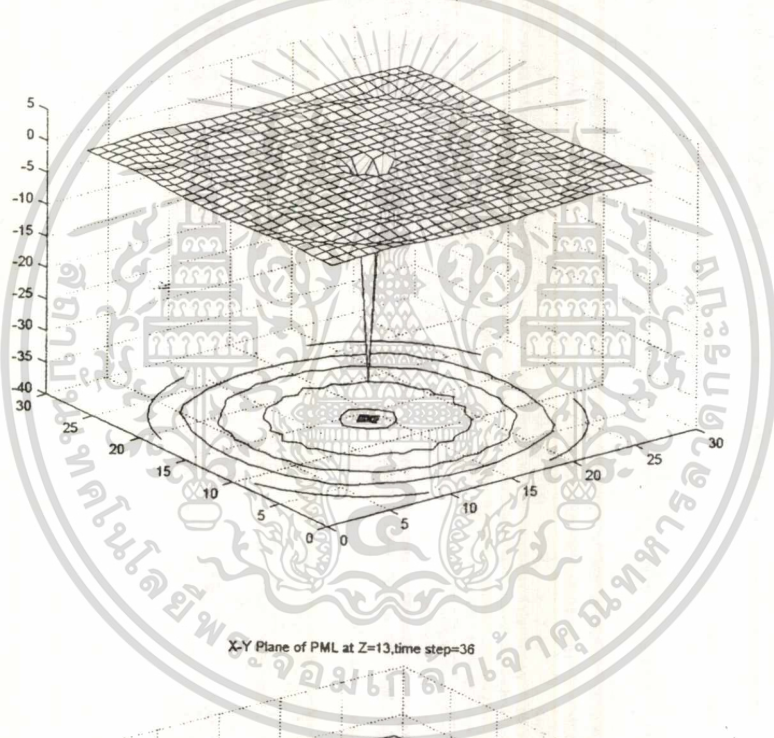


รูปที่ 4.3 แสดงผลต่างของขนาดสนามไฟฟ้าจากทั้ง 2 กรณี

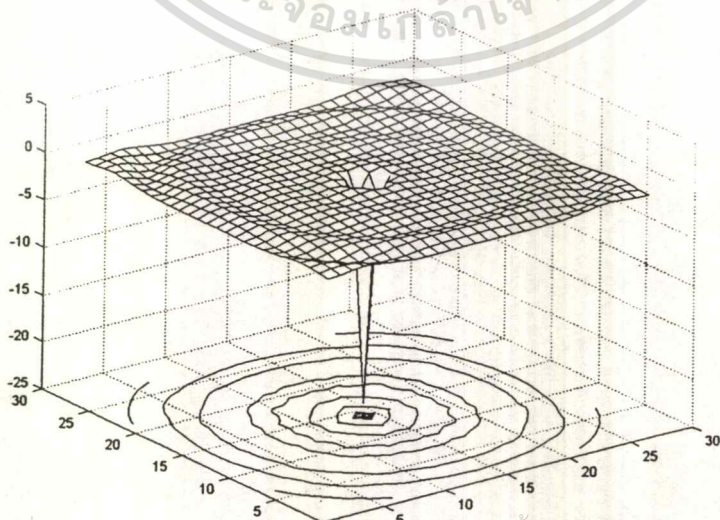
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



X-Y Plane of PML at Z=13,time step=34



X-Y Plane of PML at Z=13,time step=36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 4.4 การแพร่กระจายคลื่นไปยังขอบเขตแบบ PML สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สรุปผลการวิเคราะห์

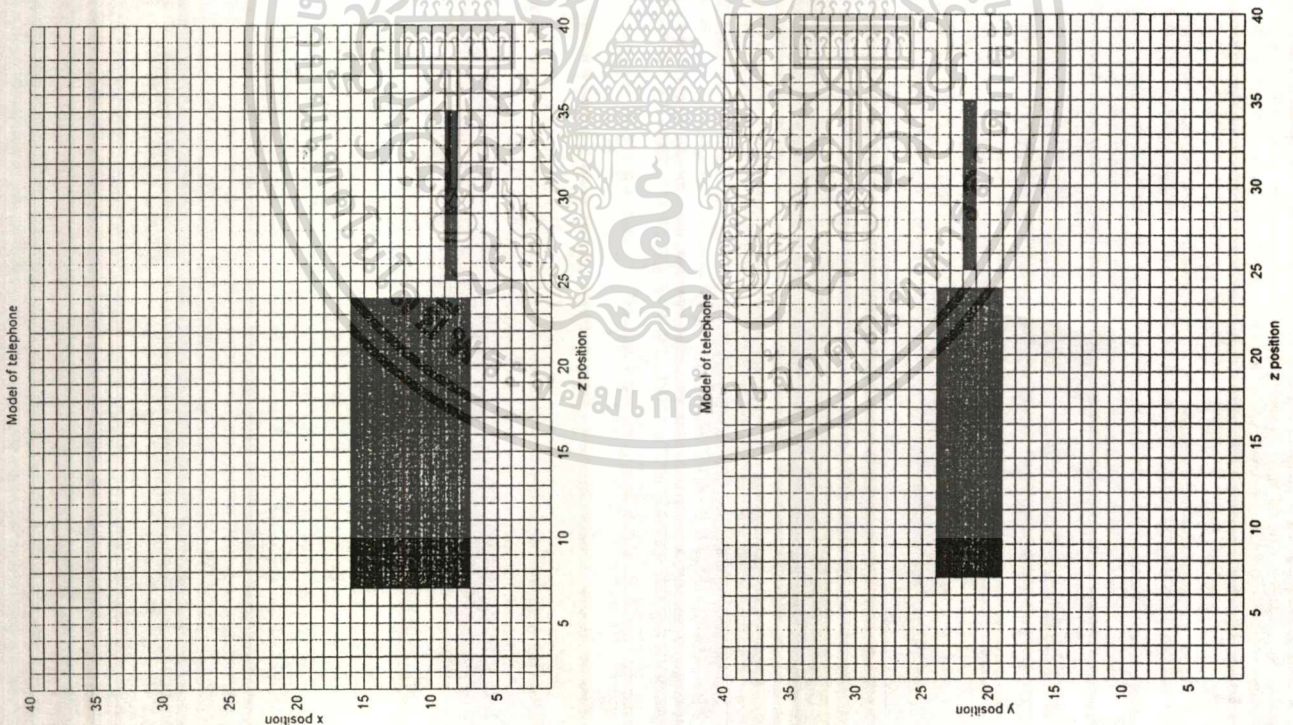
จากผลการวิเคราะห์ คลื่นที่แพร่กระจายไปกระทบขอบเขตที่กำหนดโดยใช้เงื่อนไขแบบ PML จะแพร่กระจายไปเหมือนกับว่าคลื่นแพร่กระจายไปไม่มีที่สิ้นสุดโดยไม่มีการสะท้อนกลับออกมา จากการศึกษาผลต่างของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆกรณีที่ใช้ขอบเขตการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบอนันต์กับกรณีขอบเขตแบบ PML จะเห็นว่ามีความน้อยมาก ๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าการกำหนดขอบเขตโดยใช้เงื่อนไขแบบ PML ที่จำลองขึ้นมาสามารถใช้งานได้ดี

### 4.2 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่

#### ขั้นตอนการวิเคราะห์

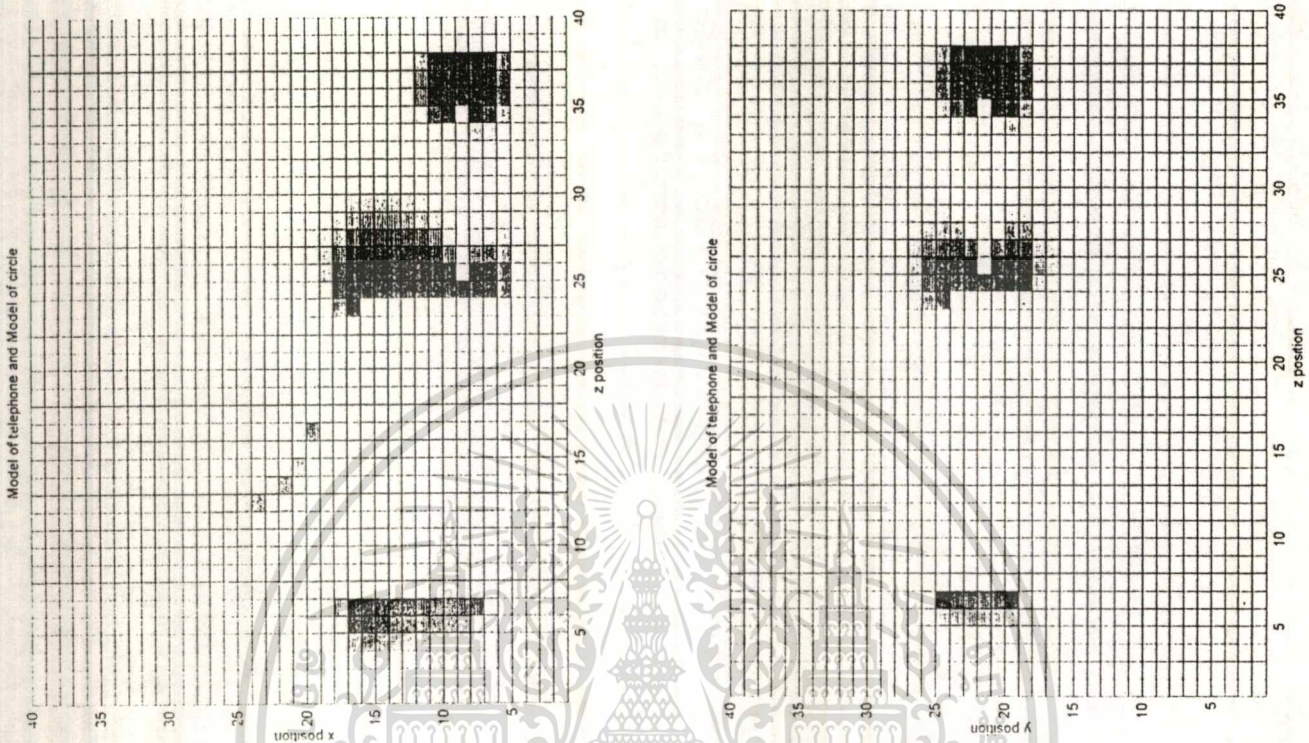
1. สร้างแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใส่เข้าไปปล่อยคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 900 MHz ภายใต้การกำหนดขอบเขตการพิจารณาแบบ PML
2. สังเกตดูลักษณะการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่แล้วแสดงผลการแพร่กระจายคลื่นดังกล่าว

#### ผลการวิเคราะห์



รูปที่ 4.5 แบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นจากโทรศัพท์เคลื่อนที่

#### สรุปผลการวิเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าคลื่นสามารถแพร่ออกมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้สายอากาศแบบโมโนโพลได้ โดยมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นดังรูป ความแรงของสัญญาณจะอยู่บริเวณใกล้จุดปล่อยสัญญาณคือรอยต่อระหว่างสายอากาศกับตัวกล่องโทรศัพท์แต่ก็มีบางส่วนอยู่ที่ปลายของสายอากาศและส่วนล่างของกล่องแก้วนำ

#### 4.3 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่มีลักษณะทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากชั้นเดียว

##### ขั้นตอนการวิเคราะห์

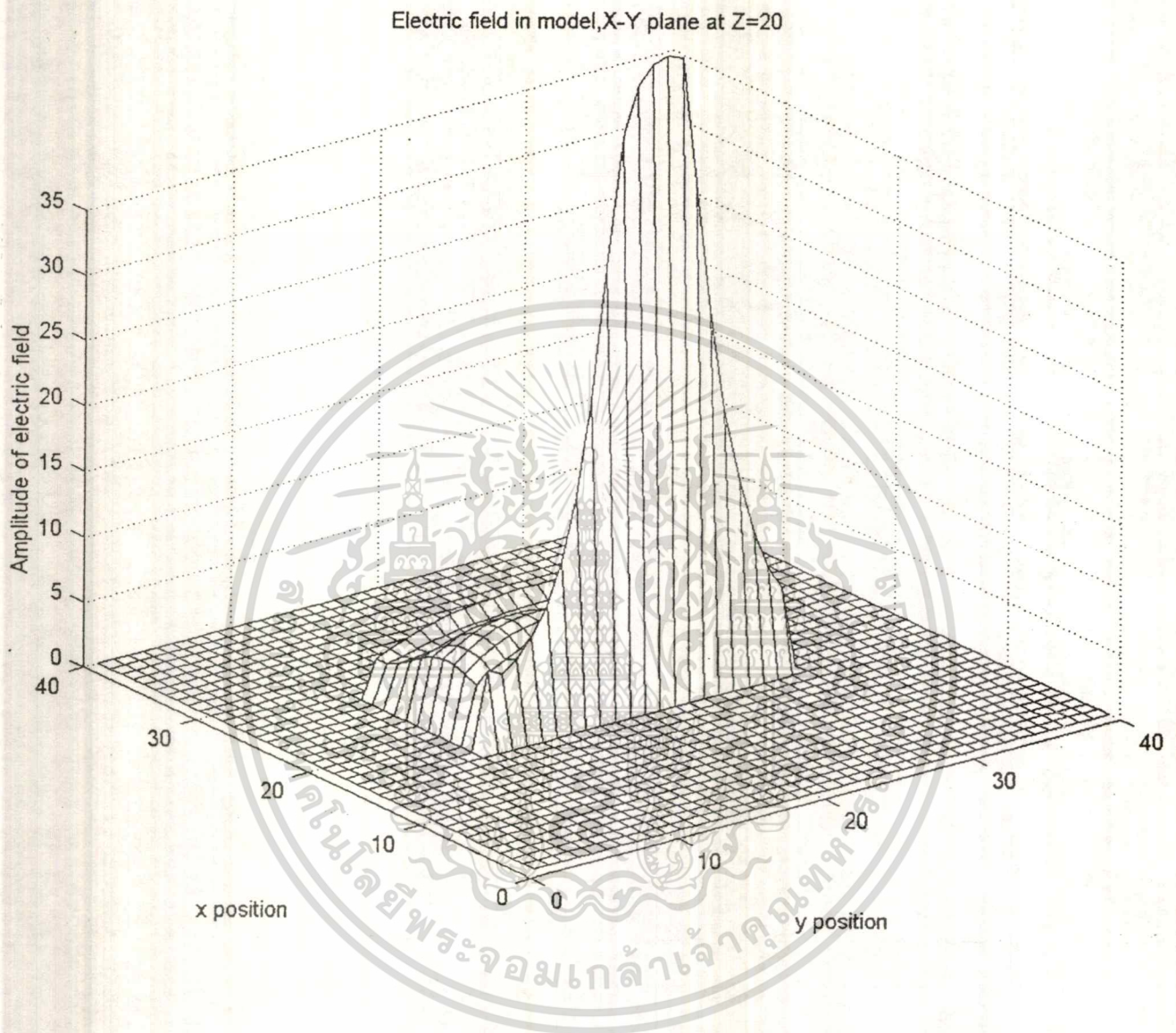
1. ทำการปล่อยสัญญาณที่มีความถี่ 900 MHz จากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่มีลักษณะทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากชั้นเดียว โดยเลือกใช้ค่าเนื้อเยื่อเป็นไขมัน

2. เก็บค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์แล้ววาด กราฟ

3. นำค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากข้อ 2 แทนในสมการ(2.65)ในบทที่ 2 เพื่อหาค่าอัตราการดูดซับคลื่นแล้วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

วาดกราฟแสดงผล  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

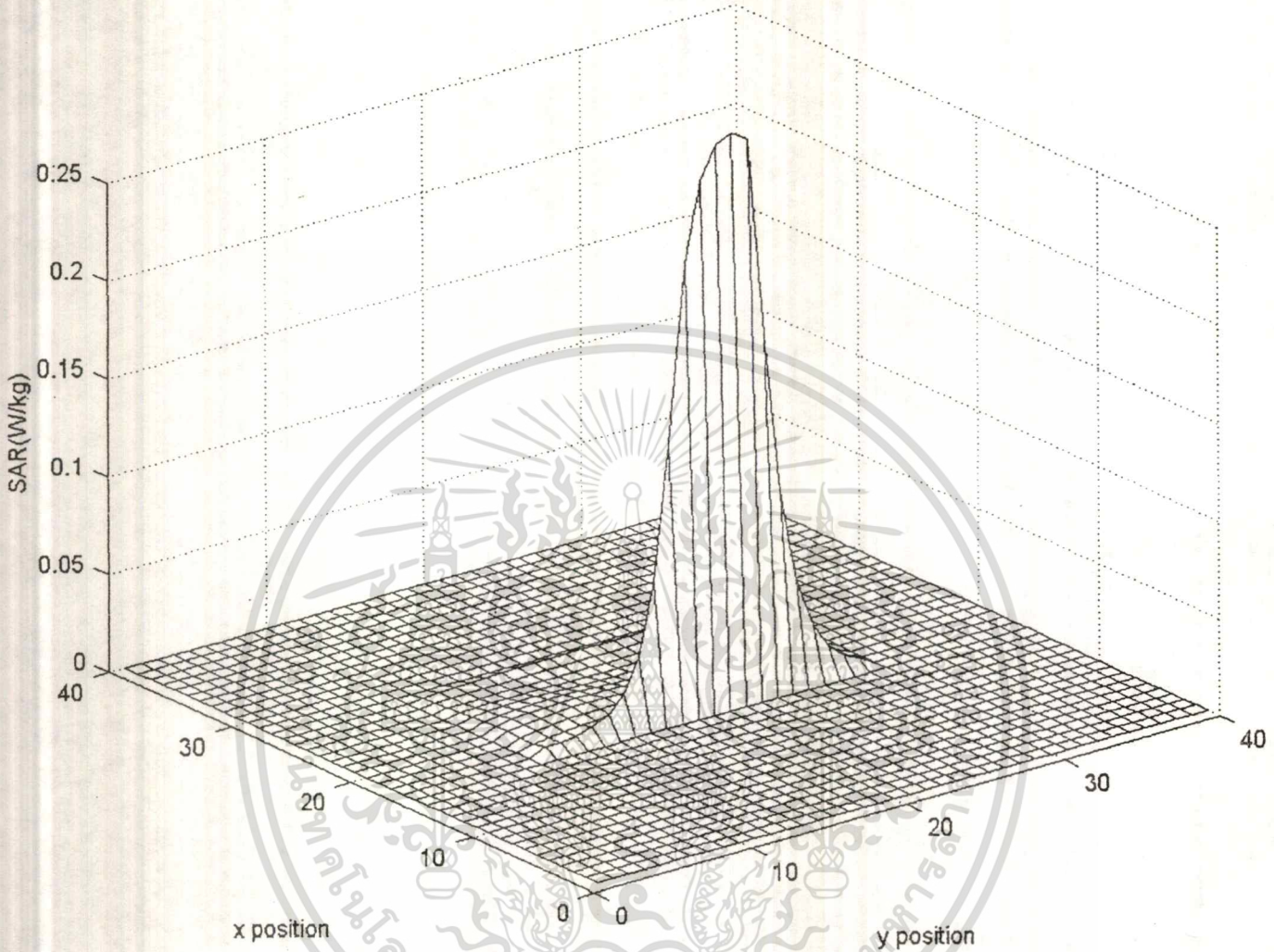
## ผลการวิเคราะห์



รูปที่ 4.7 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ทรงสี่เหลี่ยมชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAR X-Y plane at Z=20



รูปที่ 4.8 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ทรงสี่เหลี่ยมชั้นเดียว

สรุปผลการวิเคราะห์

เมื่อพิจารณาจากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าจะมีการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าเข้าไปในแบบจำลองศีรษะมนุษย์โดยคลื่นแพร่กระจายเข้าไปในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ด้านที่ติดกับโทรศัพท์นั้นจะมีค่าของสนามไฟฟ้ากับอัตราส่วนการดูดซับคลื่นมากแต่ส่วนของเนื้อเยื่อถัดเข้าไปข้างในจะเกิดการลดทอนของสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว แสดงว่ามีการดูดซับคลื่นมากตรงบริเวณด้านที่ติดกับโทรศัพท์ที่เคลื่อนที่ซึ่งก็คือคลื่นที่แพร่เข้าไปในช่วงแรกของเนื้อเยื่อ

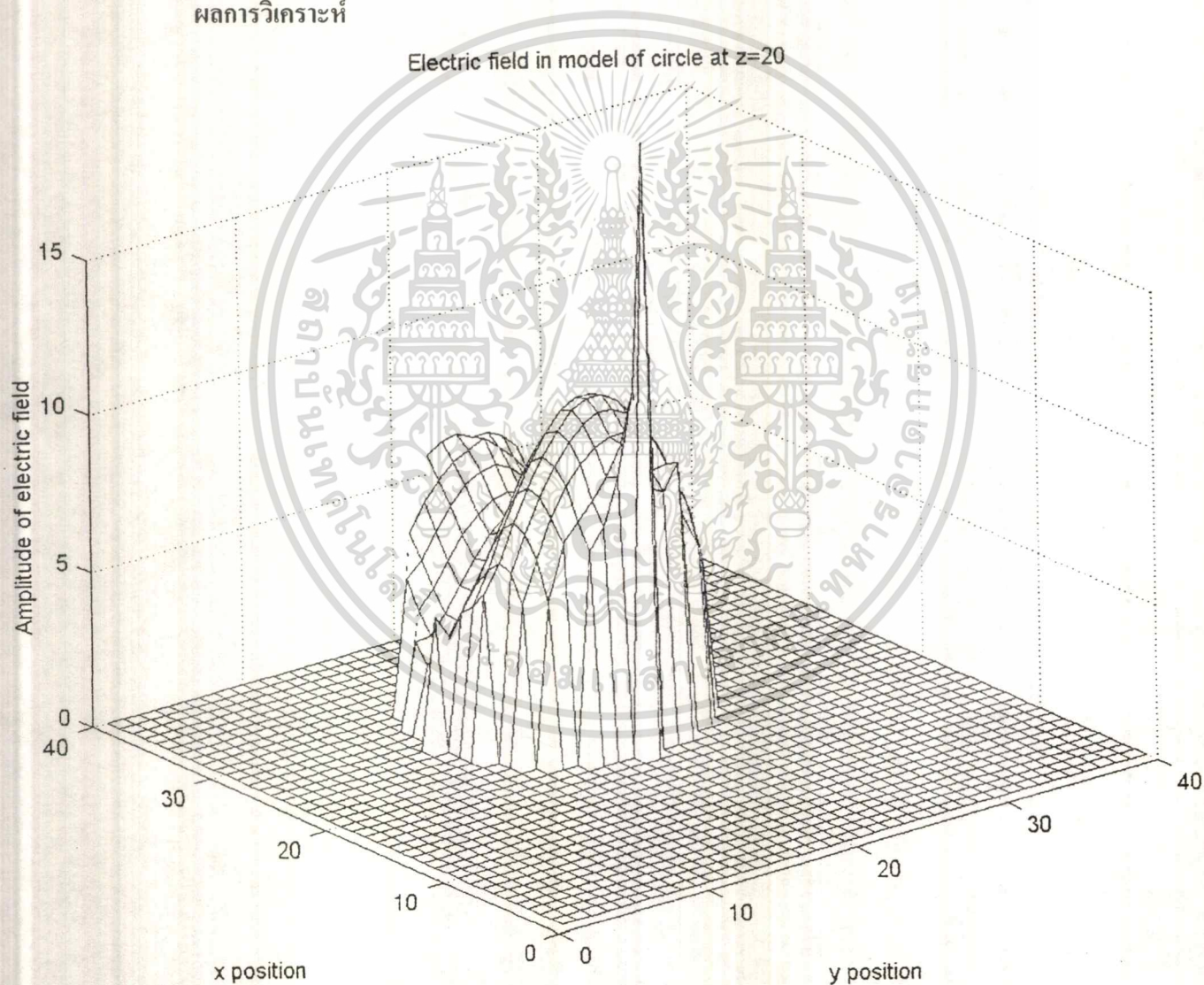
เอกสารนี้เป็นเอกสารของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่มีลักษณะทรงกลมชั้นเดียว

##### ขั้นตอนการวิเคราะห์

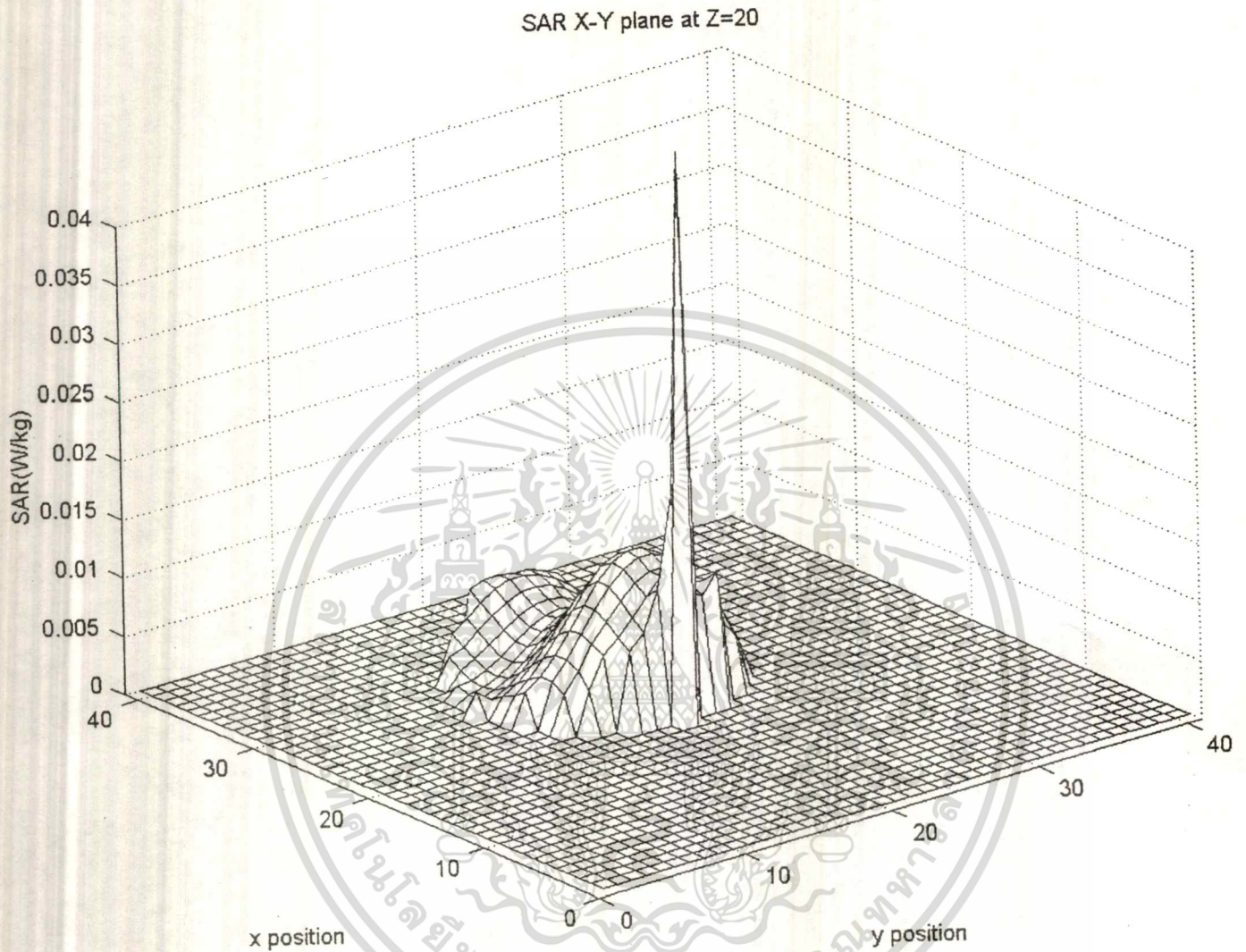
1. ทำการปล่อยสัญญาณที่มีความถี่ 900 MHz จากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่มีลักษณะทรงกลมชั้นเดียว โดยเลือกใช้ค่าเนื้อเยื่อเป็นไขมัน
2. เก็บค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์แล้ววาด กราฟ
3. นำค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากข้อ 2 แทนในสมการ(2.65) ในบทที่ 2 เพื่อหาค่าอัตราการดูดซับคลื่นแล้ววาดกราฟแสดงผล

##### ผลการวิเคราะห์



รูปที่ 4.9 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ในแบบจำลองศีรษะมนุษย์แบบทรงกลมชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์แบบทรงกลมชั้นเดียว

### สรุปผลการวิเคราะห์

เมื่อพิจารณาจากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าจะมีการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าเข้าไปในแบบจำลองศีรษะมนุษย์โดยคลื่นแพร่กระจายเข้าไปในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ด้านที่ติดกับโทรศัพท์นั้นจะมีค่าของสนามไฟฟ้ากับอัตราส่วนการดูดซับคลื่นมากแต่ส่วนของเนื้อเยื่อที่เข้าไปข้างในจะเกิดการลดทอนของสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับกรณีแบบจำลองศีรษะมนุษย์แบบทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากชั้นเดียว แต่กรณีนี้ค่าสนาม

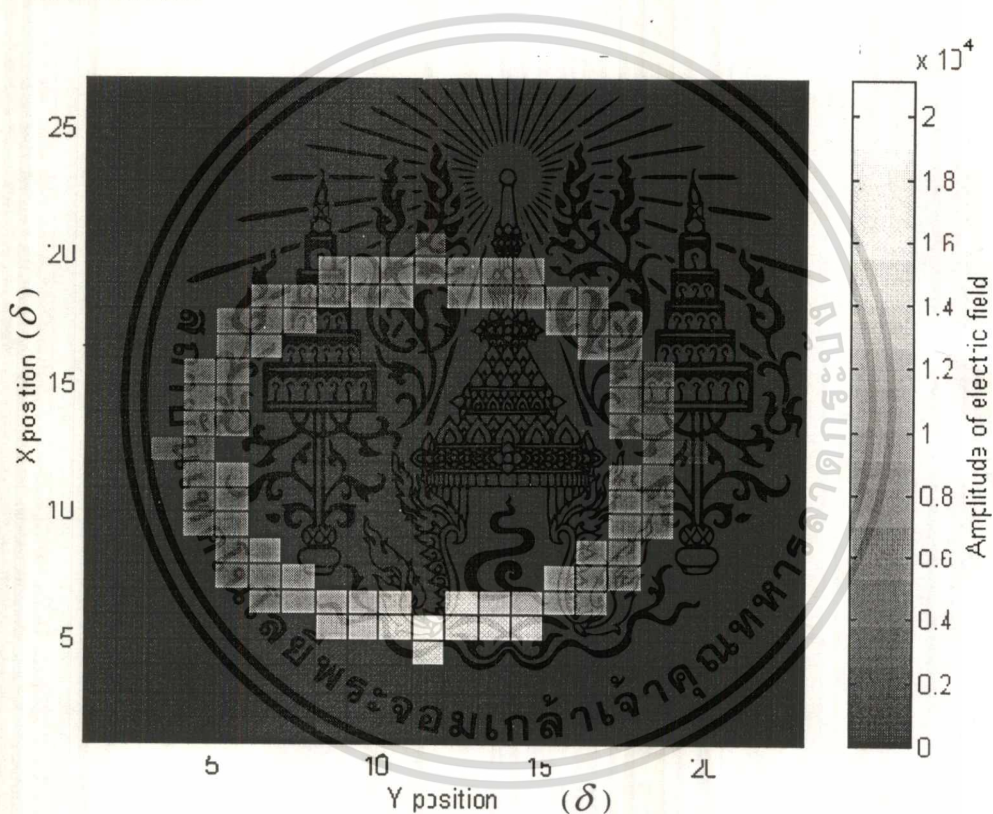
ไฟฟ้าและอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะในส่วนของเนื้อเยื่อที่ถัดไปข้างในจะลดทอนน้อยกว่า  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์เชิงพาณิชย์ในด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่มีลักษณะทรงกลม 2 ชั้นซ้อนกัน

##### ขั้นตอนการวิเคราะห์

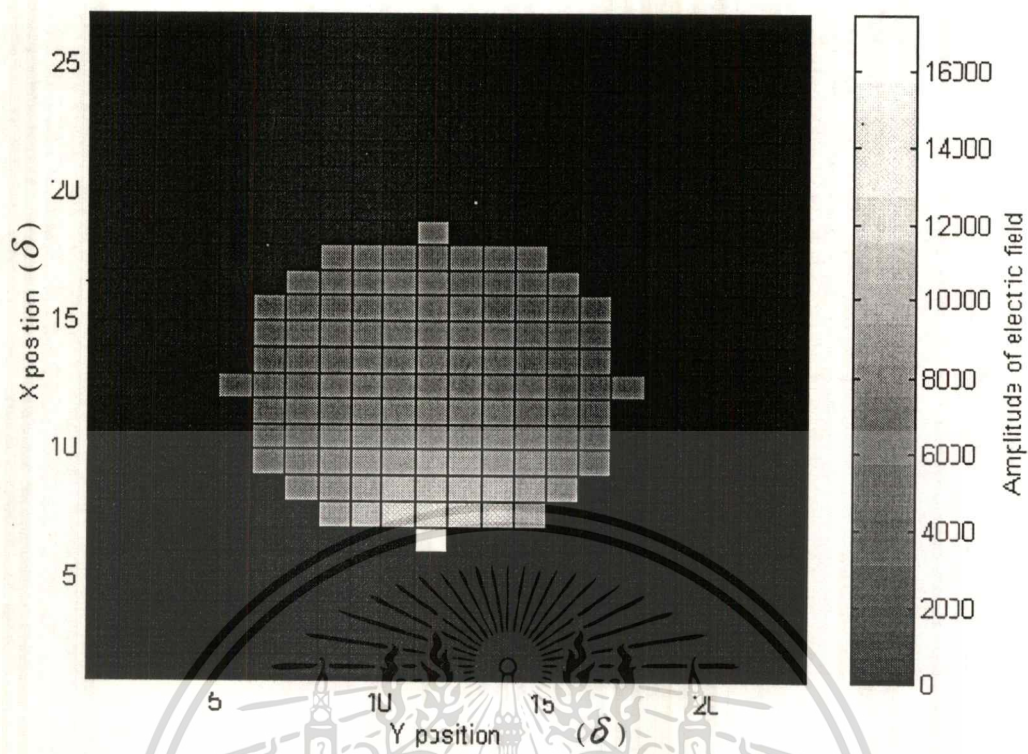
1. ทำการปล่อยสัญญาณที่มีความถี่ 900 MHz จากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่มีลักษณะทรงกลม 2 ชั้นซ้อนกัน โดยชั้นนอกเลือกใช้ค่าเนื้อเยื่อเป็นกระดูกส่วนชั้นในเป็นไขมัน
2. เก็บค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์แล้ววาด กราฟ
3. นำค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากข้อ 2 แทนในสมการ(2.65)ในบทที่ 2 เพื่อหาค่าอัตราการดูดซับคลื่นแล้ววาดกราฟแสดงผล

##### ผลการวิเคราะห์



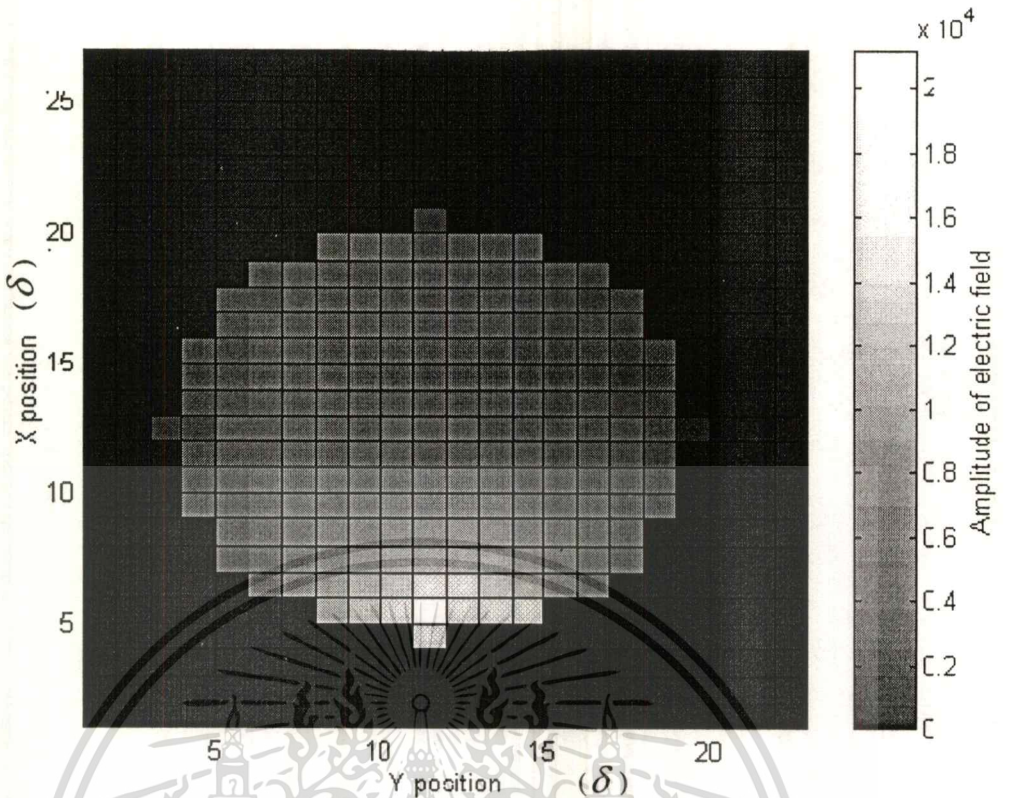
รูปที่ 4.11 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์แบบทรงกลม 2 ชั้นในชั้นกระดูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



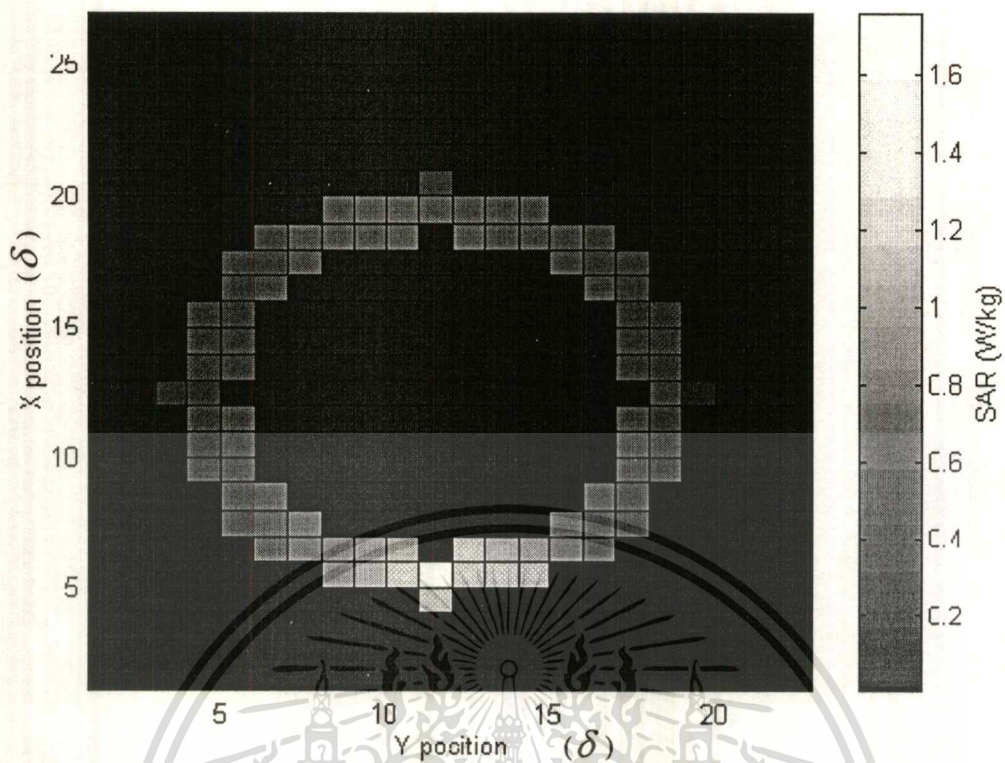
รูปที่ 4.12 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ในแบบจำลองสี่ระยะบนหน่วยแบบทรงกลม 2 ชั้นในชั้นไข่ม้วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



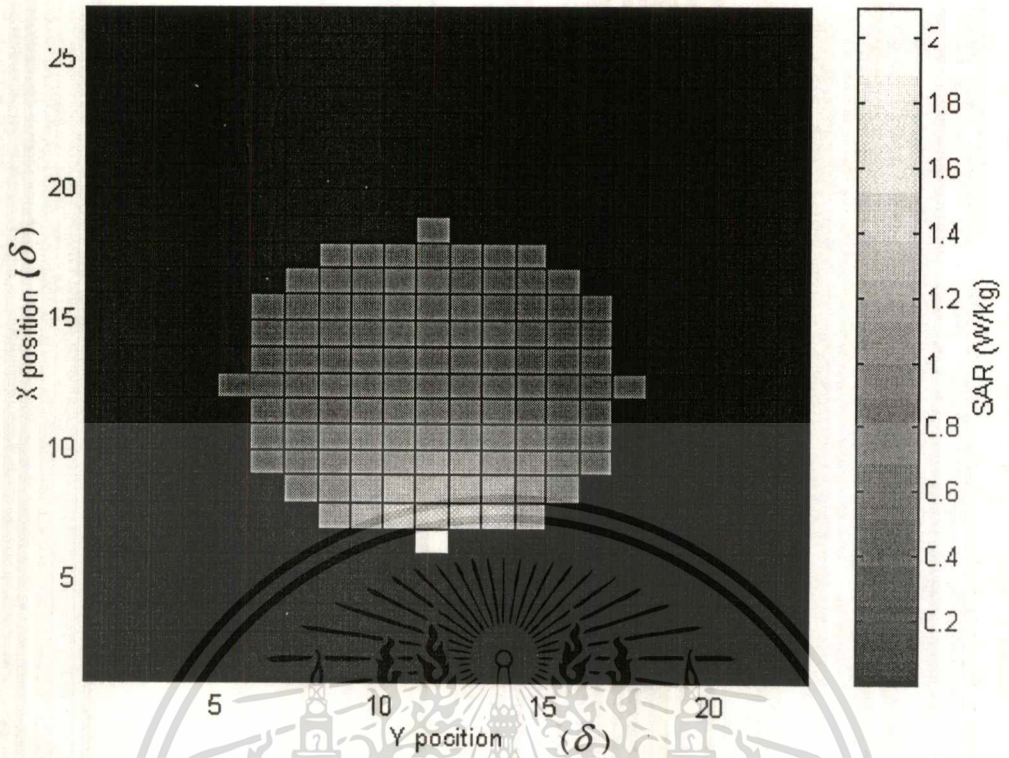
รูปที่ 4.13 สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองสี่เหลี่ยมมุมฉากแบบทรงกลม 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



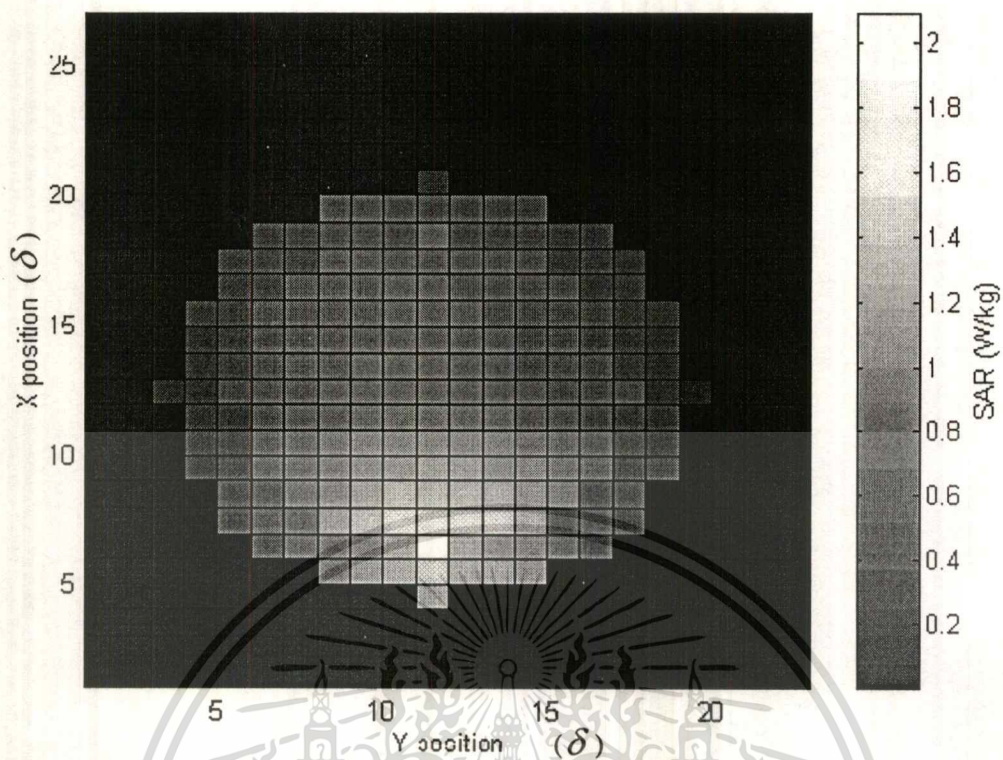
รูปที่ 4.14 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์แบบ ทรงกลม 2 ชั้นในชั้นกระดูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



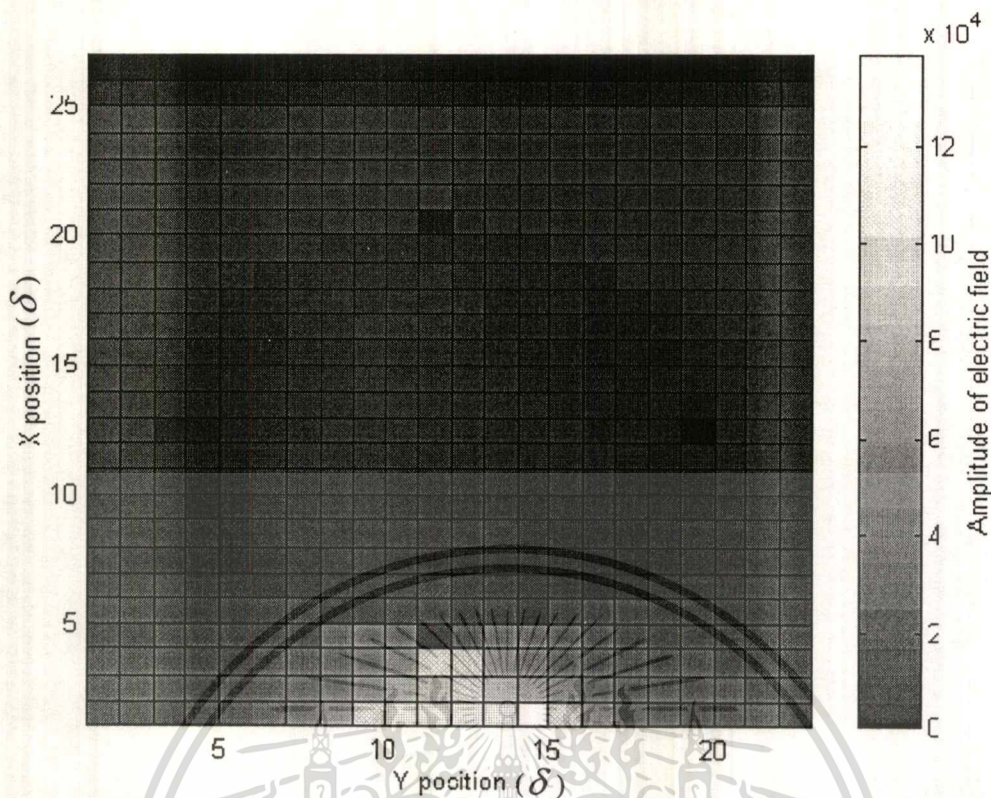
รูปที่ 4.15 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์แบบ ทรงกลม 2 ชั้นในชั้นไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์แบบทรงกลม 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากแบบจำลองโทรศัพท์ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์แบบทรงกลม 2 ชั้น

### สรุปผลการวิเคราะห์

เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่าจะมีการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและอัตราส่วนการดูดซับคลื่นเข้าไปในแบบจำลองศีรษะมนุษย์โดยคลื่นแพร่กระจายเข้าไปในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ด้านที่ติดกับโทรศัพท์นั้นจะมีค่าของสนามไฟฟ้าก็อัตรส่วนการดูดซับคลื่นมาก แต่ส่วนของเนื้อเยื่อถัดเข้าไปข้างใน จะเกิดการลดทอนของสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับกรณีแบบจำลองศีรษะมนุษย์แบบทรงกลมชั้นเดียว

### 4.6 การวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายคลื่นจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ทำการสร้างแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์โดยประกอบด้วยเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ 10 ชนิดด้วยกันตามตารางที่ 2.2 ในบทที่ 2 แล้วแสดงผล

2. ทำการปล่อยคลื่นสัญญาณไซน์จากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ในข้อ 1 ด้วยความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์ที่กำลังส่ง 0.6 วัตต์และ 2.0 วัตต์ที่ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์กับแบบจำลองศีรษะมนุษย์เป็น 0 เซนติเมตรและ 2 เซนติเมตร ตามลำดับ

3. เก็บค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์เพื่อหาค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะสูงสุดในเนื้อเยื่อ แล้วแสดงผลเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการปล่อยคลื่นสัญญาณไซน์จากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ในข้อ 1 ด้วยความถี่ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์ที่กำลังส่ง 0.6 วัตต์และ 2.0 วัตต์ที่ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์กับแบบจำลองศีรษะมนุษย์เป็น 0 เซนติเมตรและ 2 เซนติเมตร ตามลำดับ

5. เก็บค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์เพื่อหาค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะสูงสุดในเนื้อเยื่อ แล้วแสดงผล

6. ทำการปล่อยคลื่นสัญญาณไซน์จากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ในข้อ 1 ด้วยความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ที่กำลังส่ง 0.6 วัตต์และ 2.0 วัตต์ที่ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์กับแบบจำลองศีรษะมนุษย์เป็น 0 เซนติเมตรและ 2 เซนติเมตร ตามลำดับ

7. เก็บค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์เพื่อหาค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะสูงสุดในเนื้อเยื่อ แล้วแสดงผล

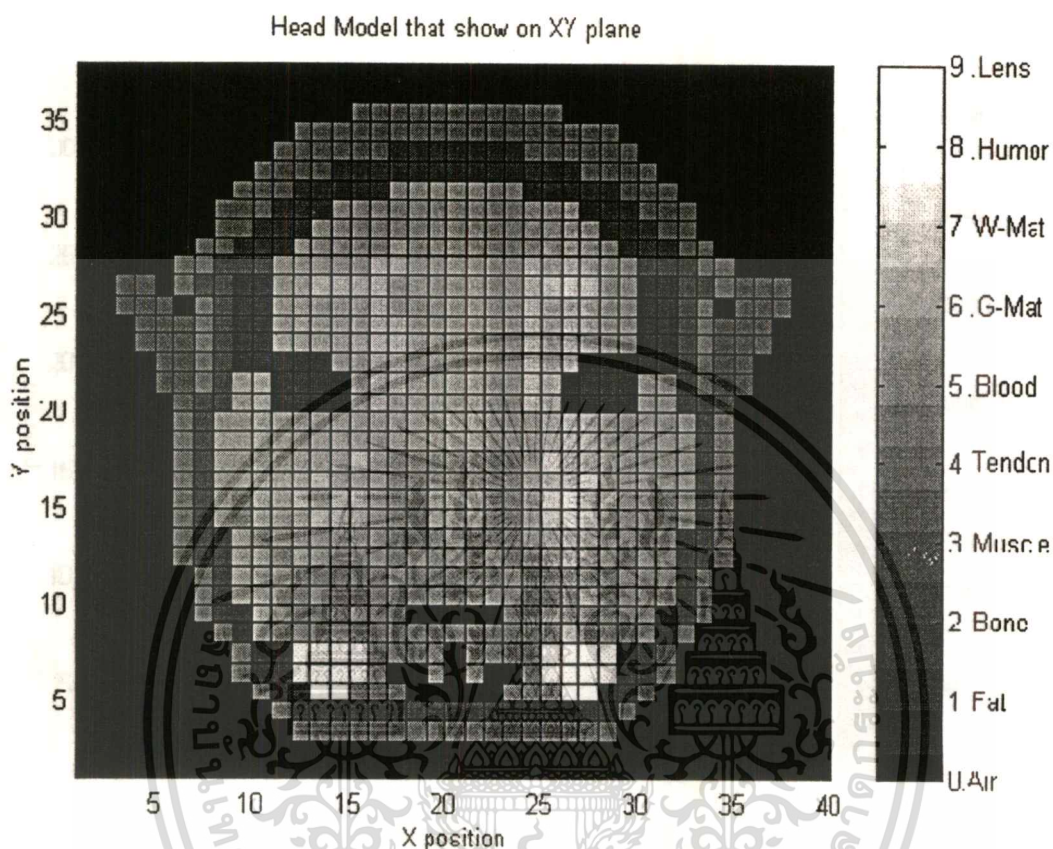
8. วาดกราฟผลของอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะเพื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่าง 0 เซนติเมตรกับ 2 เซนติเมตรที่ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์และ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์โดยให้กำลังส่ง 2.0 วัตต์

9. วาดกราฟผลของอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะเพื่อเปรียบเทียบความถี่ระหว่าง 900 เมกะเฮิร์ตซ์ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์และ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ที่กำลังส่ง 0.6 วัตต์และ 2.0 วัตต์โดยให้ระยะห่างเท่ากับ 0 เซนติเมตร

10. วาดกราฟผลของอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะเพื่อเปรียบเทียบกำลังส่งระหว่าง 0.6 วัตต์กับ 2.0 วัตต์ที่ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์และ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์โดยให้ระยะห่างเท่ากับ 2 เซนติเมตร

ผลการวิเคราะห์

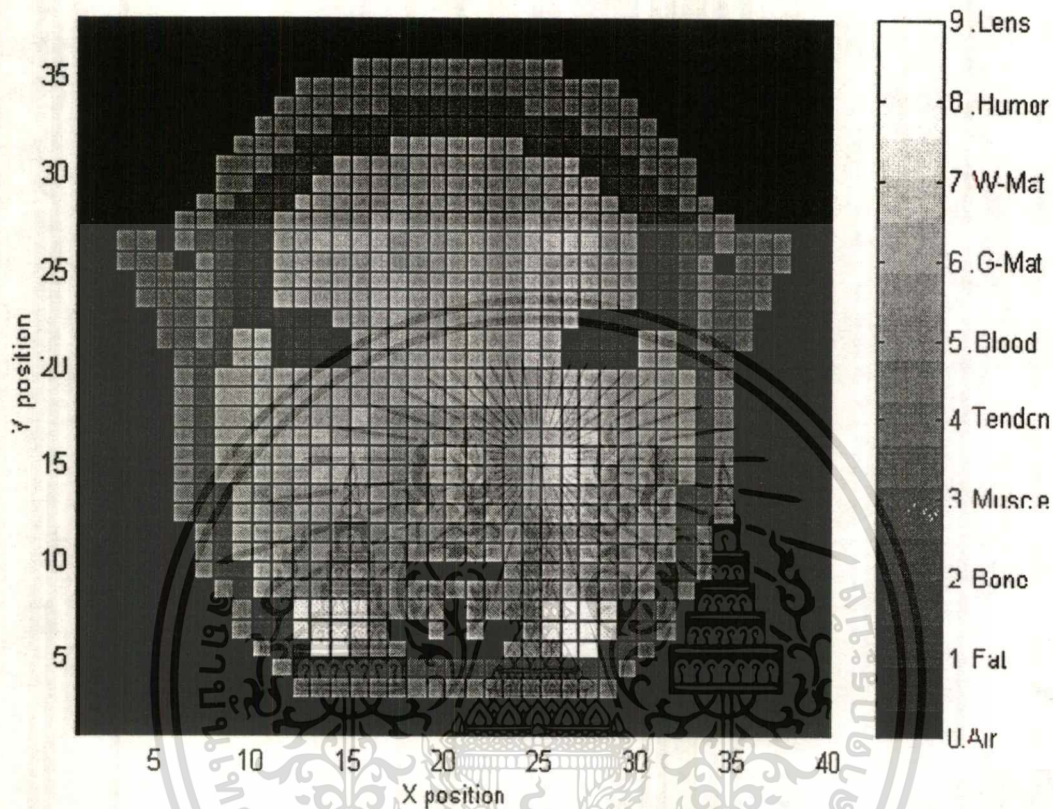
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ในระนาบ xy

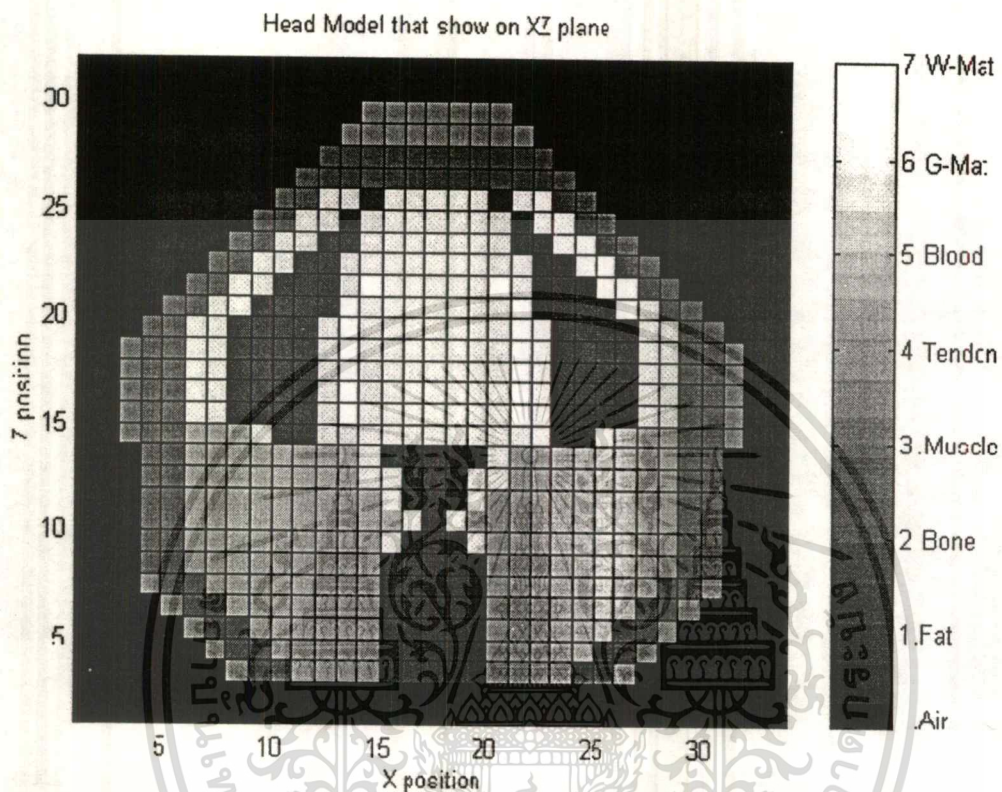
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Head Model that show on XY plane



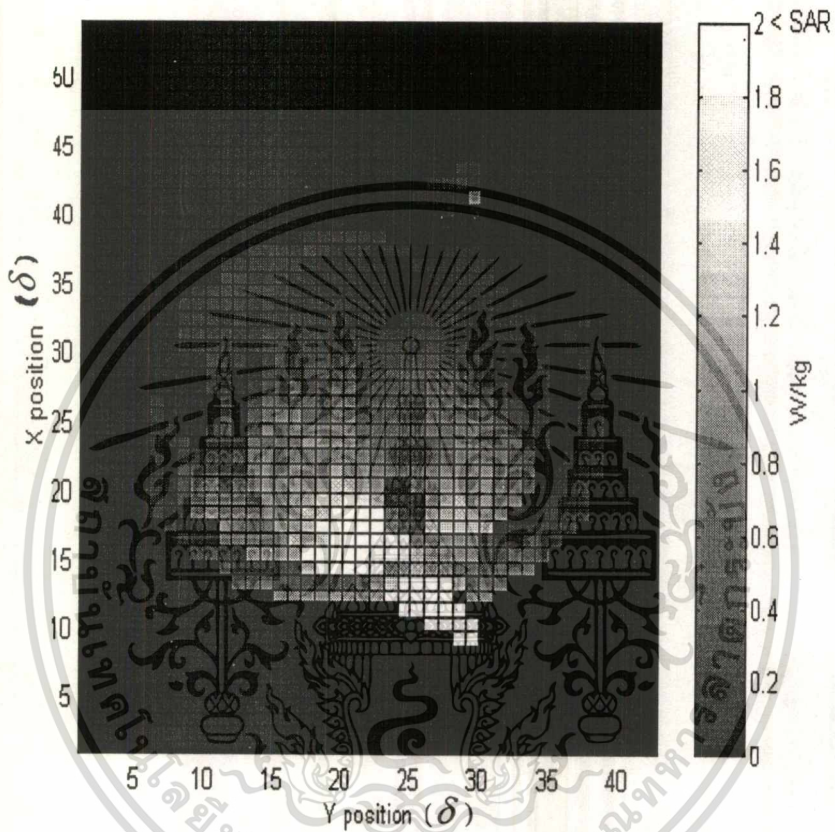
รูปที่ 4.18 แบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ในระนาบ xy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



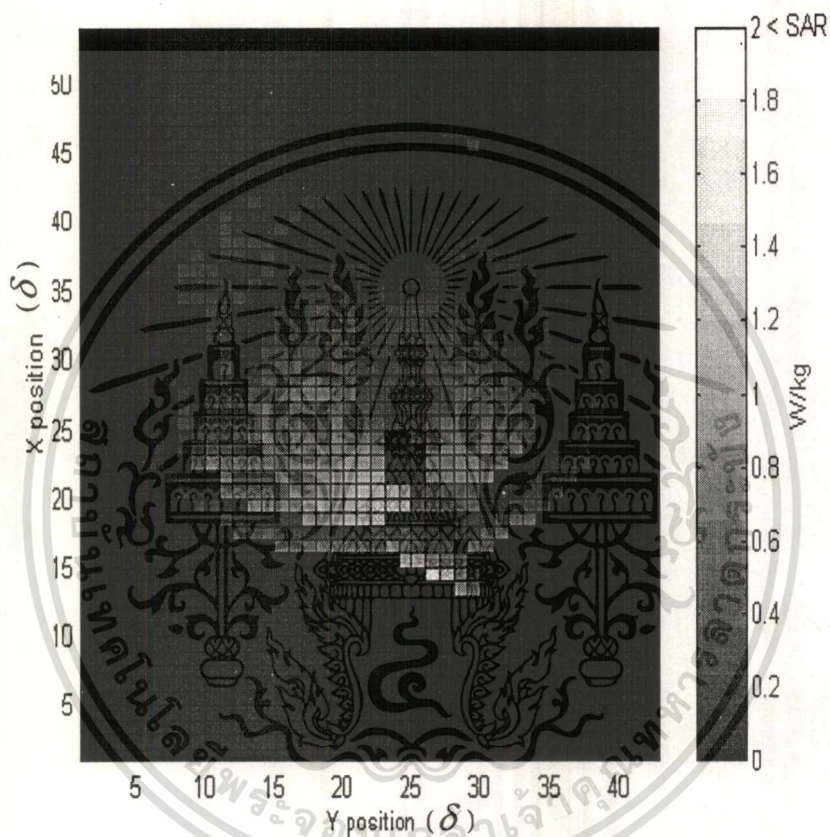
รูปที่ 4.19 แบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ในระนาบ xz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



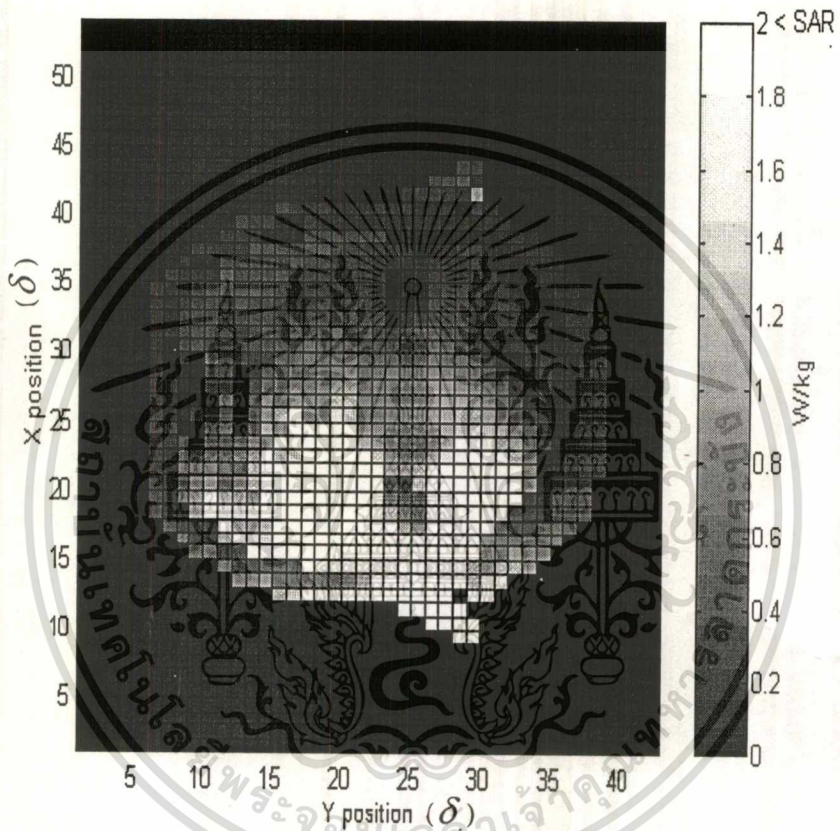
รูปที่ 4.20 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณื้ที่ความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์กำลังส่ง 0.6 วัตต์และระยะห่าง 0 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



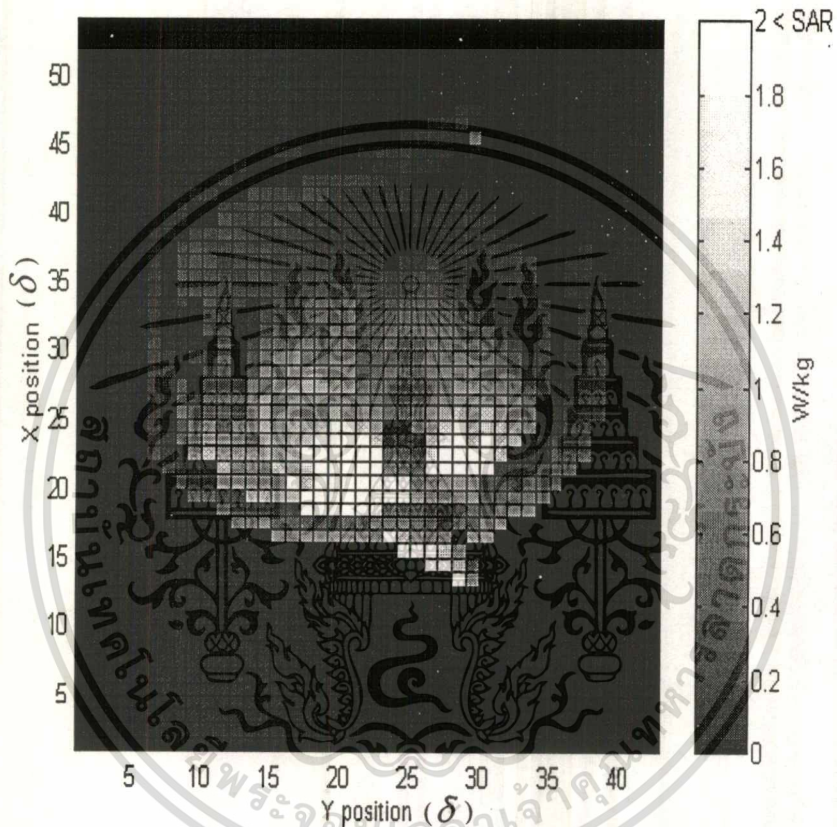
รูปที่ 4.21 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ที่มีความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์กำลังส่ง 0.6 วัตต์และระยะห่าง 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



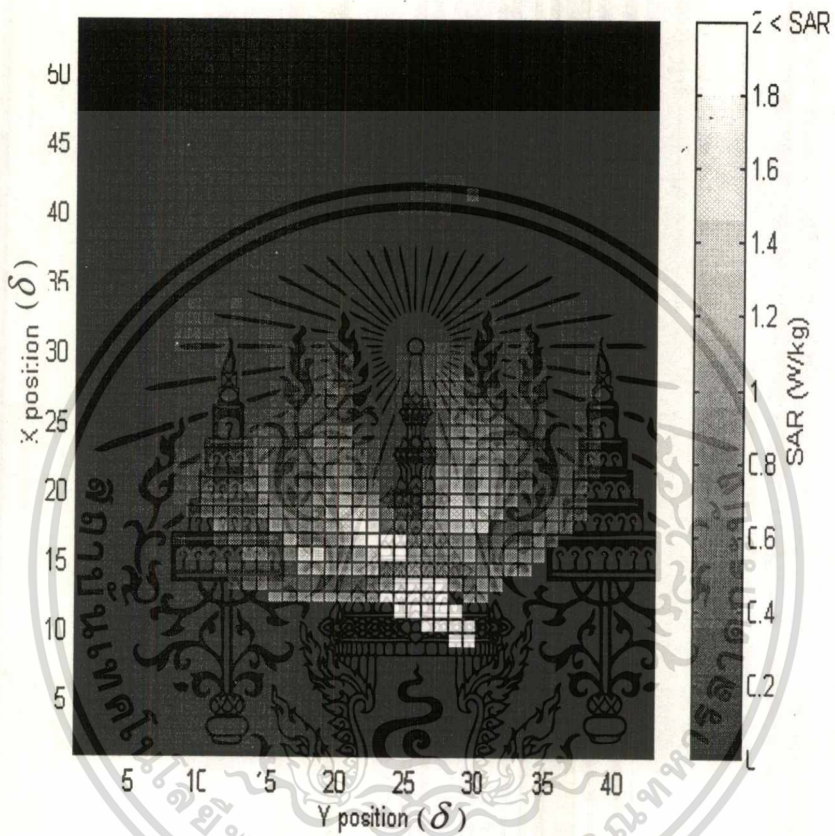
รูปที่ 4.22 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ที่ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์กำลังส่ง 2.0 วัตต์และระยะห่าง 0 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



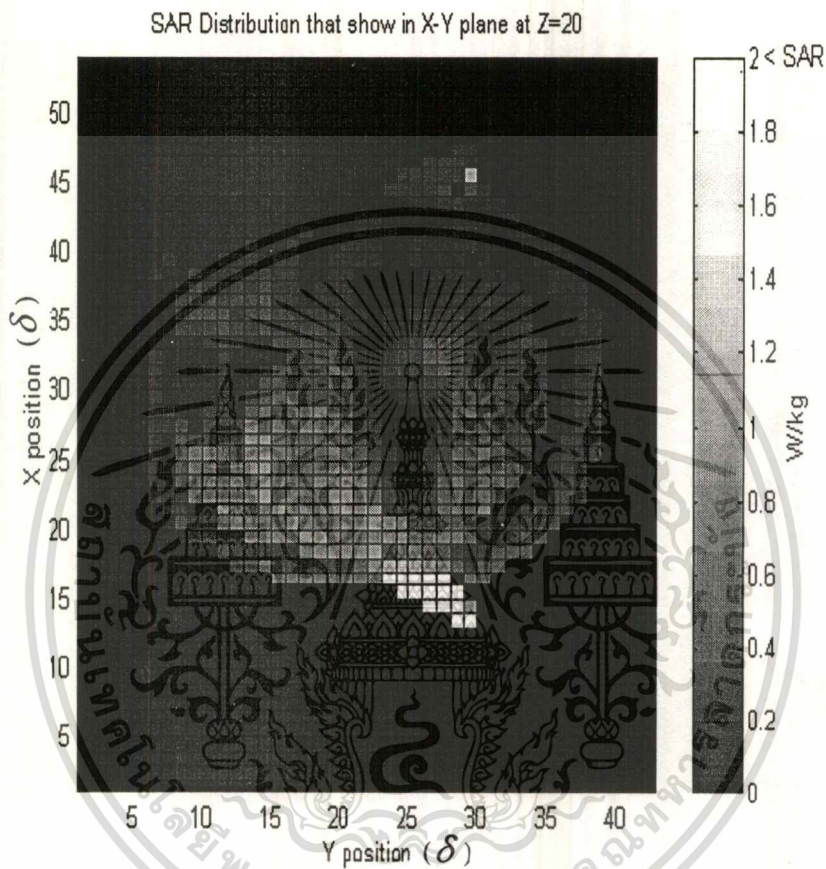
รูปที่ 4.23 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณื์ที่ความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์กำลังส่ง 2.0 วัตต์และระยะห่าง 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



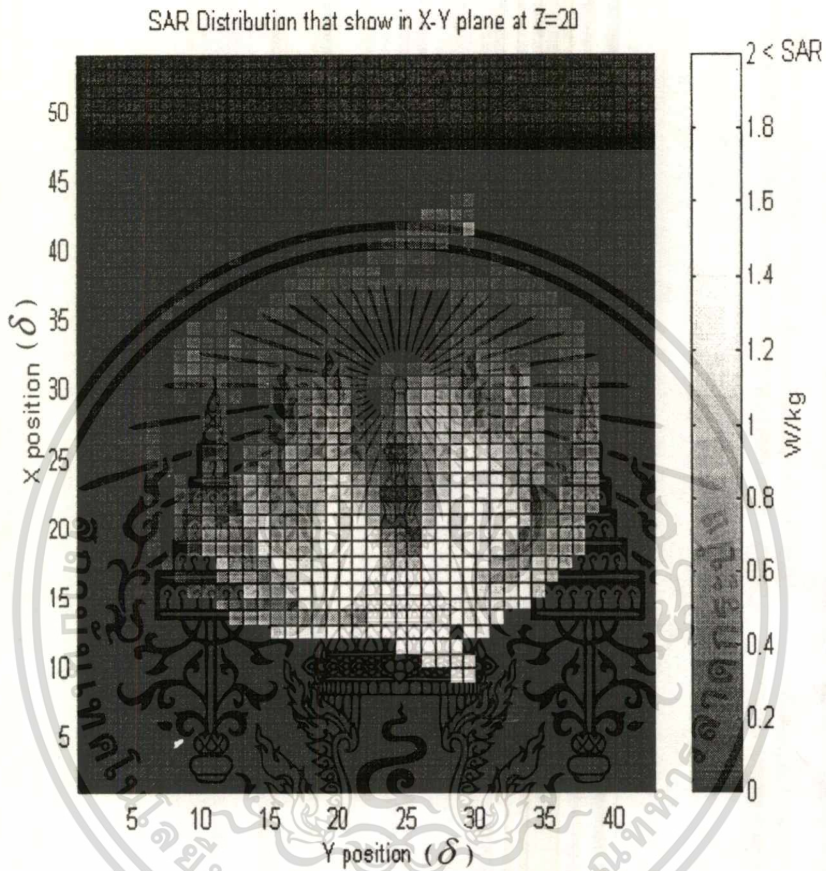
รูปที่ 4.24 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณที่ความถี่ 1500 เมกะเฮิรตซ์กำลังส่ง 0.6 วัตต์และระยะห่าง 0 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



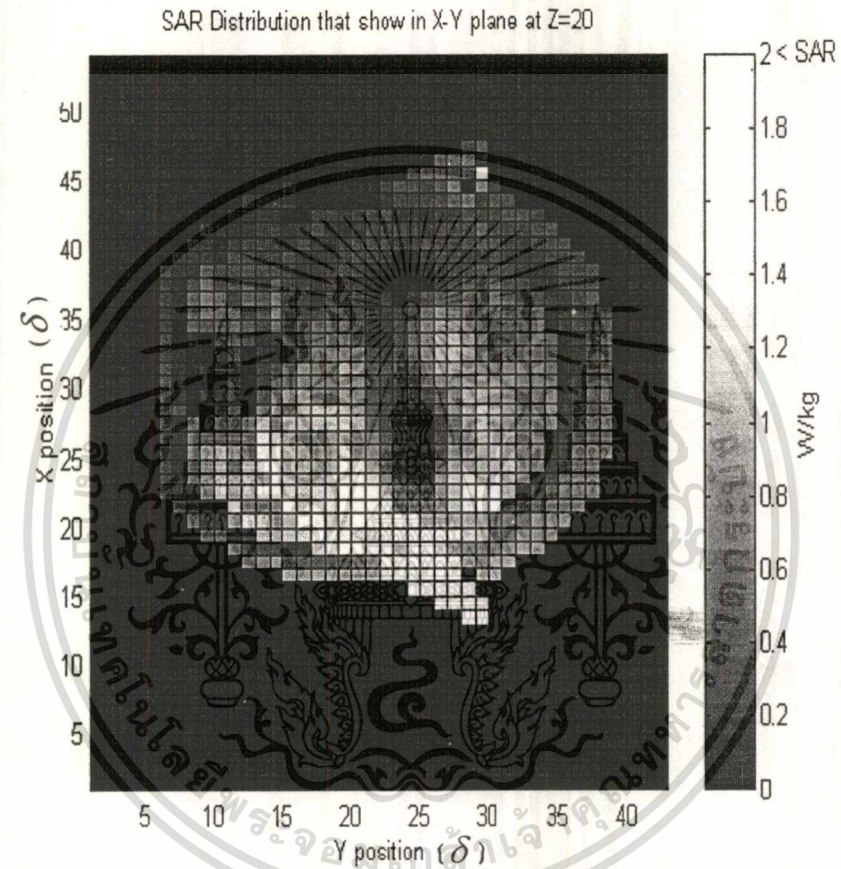
รูปที่ 4.25 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่ สมบูรณ์ที่ความถี่ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์กำลังส่ง 0.6 วัตต์และระยะห่าง 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



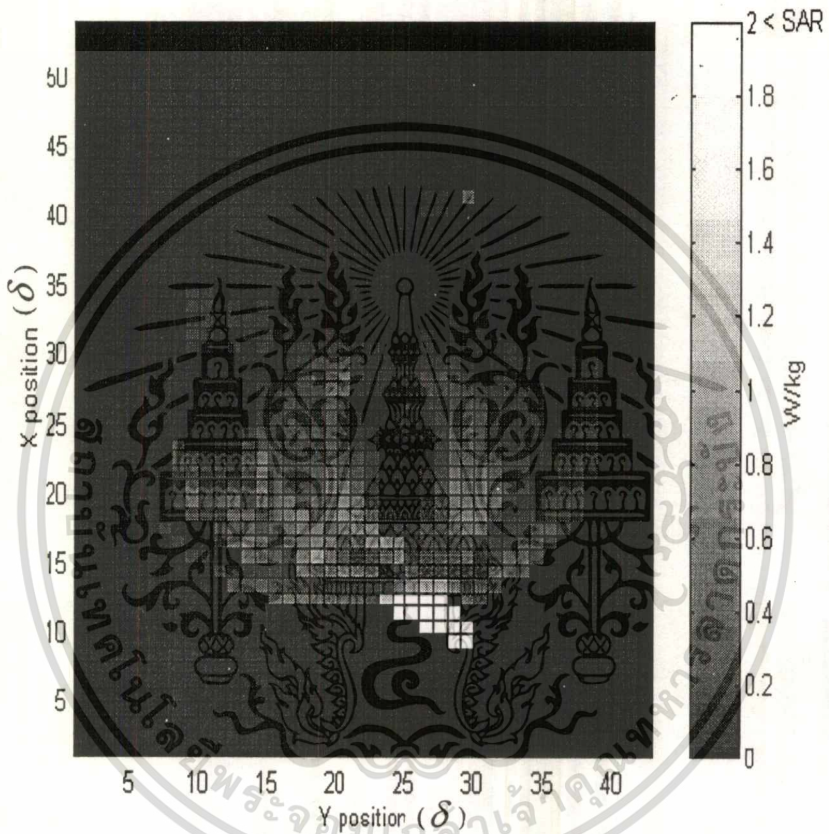
รูปที่ 4.26 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ที่มีความถี่ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์กำลังส่ง 2.0 วัตต์และระยะห่าง 0 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



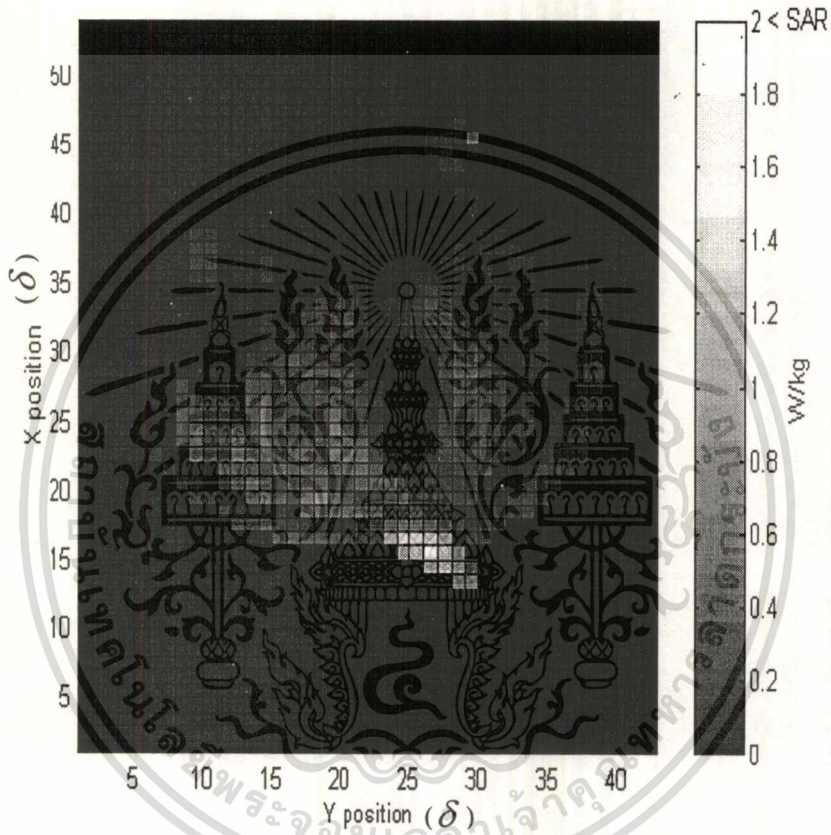
รูปที่ 4.27 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ที่มีความถี่ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์กำลังส่ง 2.0 วัตต์และระยะห่าง 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



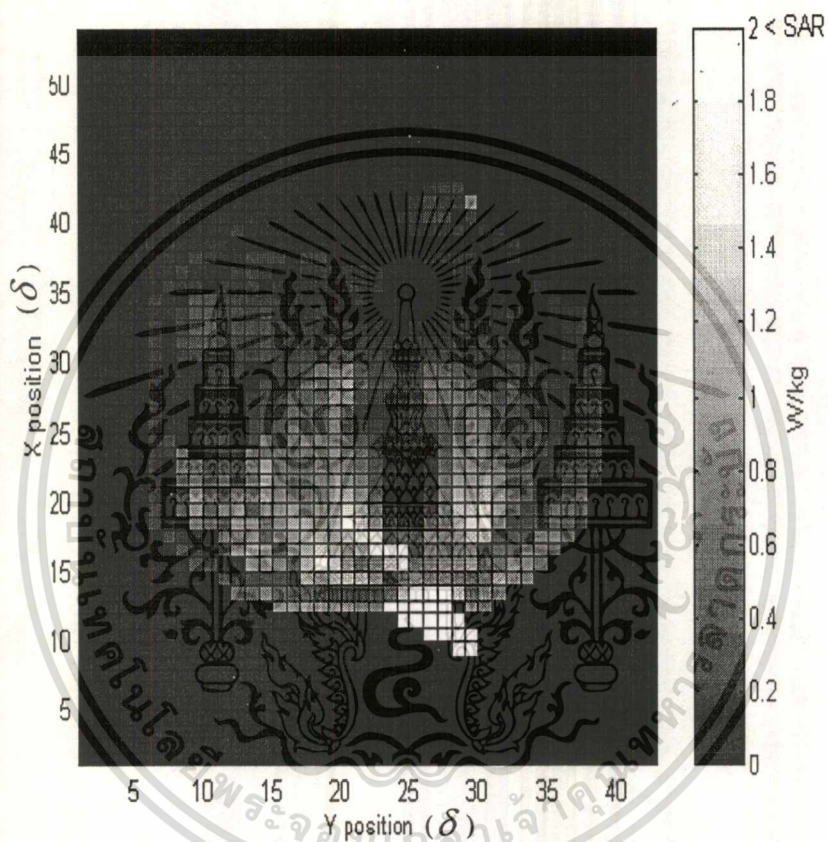
รูปที่ 4.28 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ที่มีความถี่ 1800 เมกะเฮิรตซ์กำลังส่ง 0.6 วัตต์และระยะห่าง 0 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



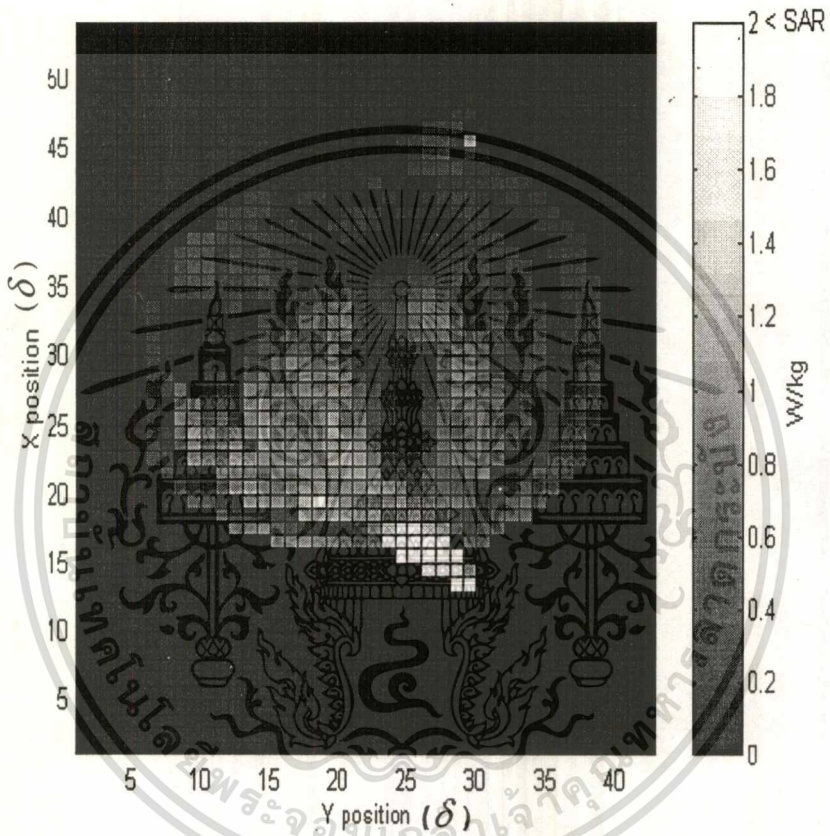
รูปที่ 4.29 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่ สมบูรณ์ที่ความถี่ 1800 เมกะเฮิรตซ์กำลังส่ง 0.6 วัตต์และระยะห่าง 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



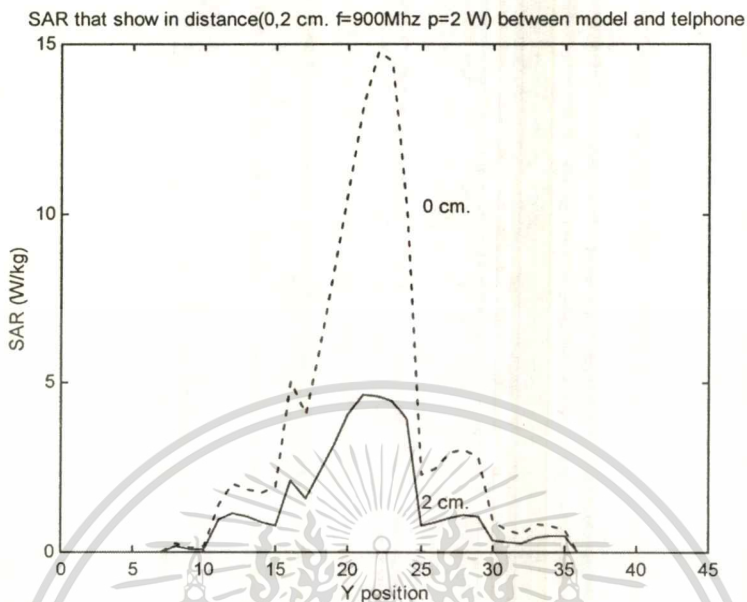
รูปที่ 4.30 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่สมบูรณ์ที่มีความถี่ 1800 เมกะเฮิรตซ์กำลังส่ง 2.0 วัตต์และระยะห่าง 0 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

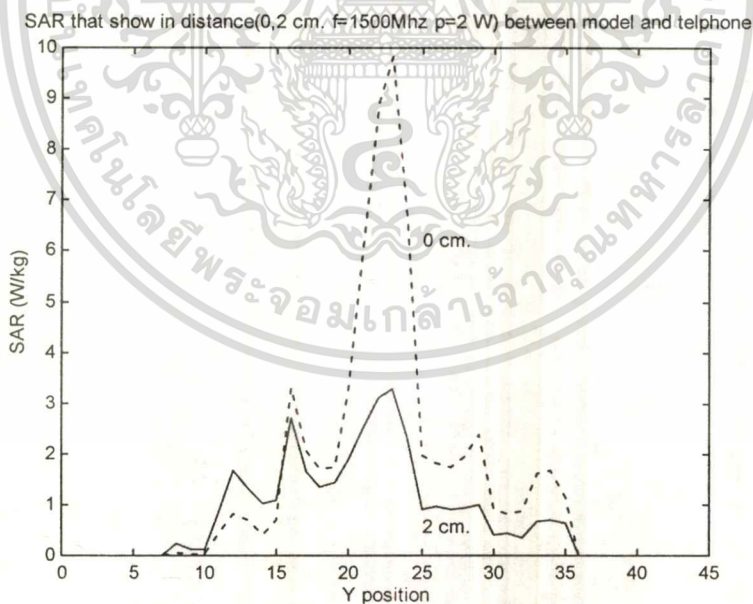


รูปที่ 4.31 อัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะที่ตำแหน่งต่างๆภายในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่  
สมบูรณ์ที่ความถี่ 1800 เมกะเฮิรตซ์กำลังส่ง 2.0 วัตต์และระยะห่าง 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

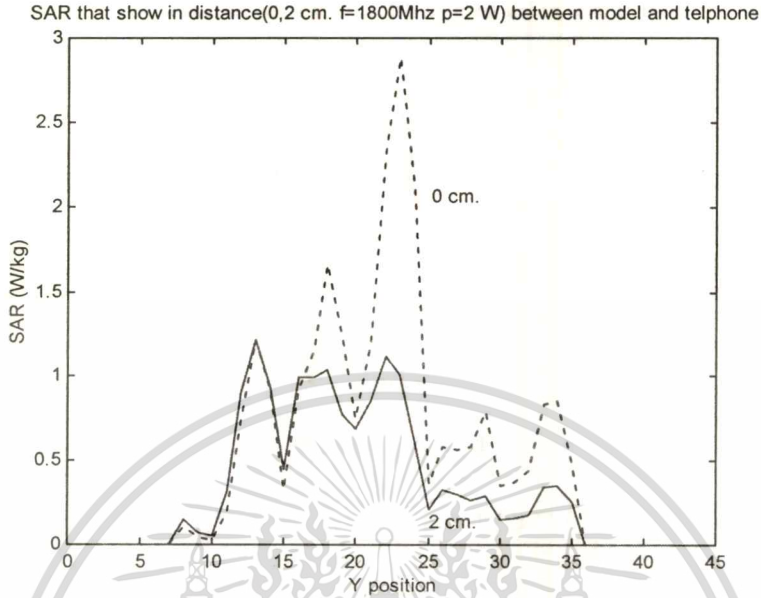


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของระยะทางที่ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้กำลังส่ง 2 วัตต์

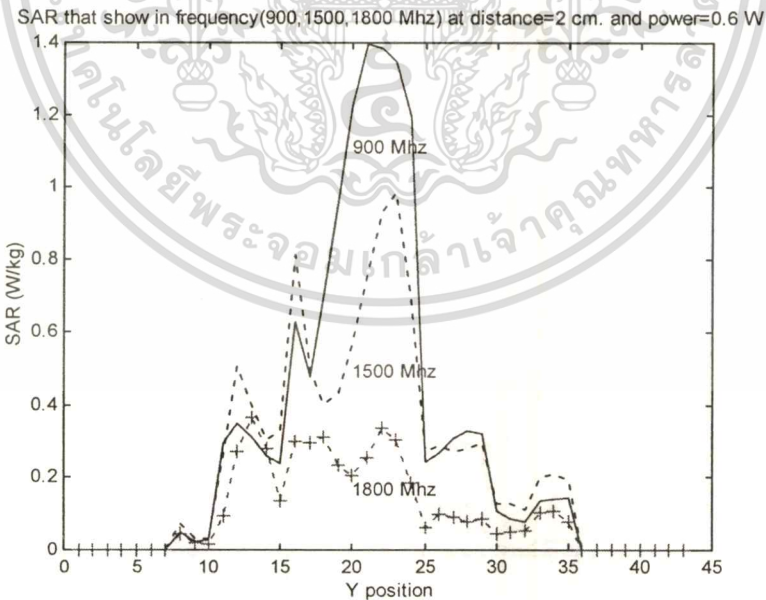


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของระยะทางที่ความถี่ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้กำลังส่ง 2 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

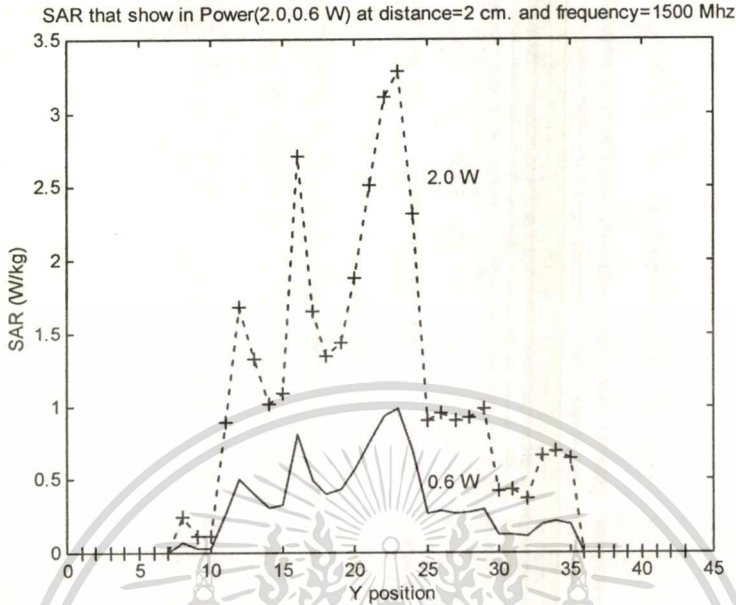


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของระยะทางที่ความถี่ 1800 เมกะเฮิรตซ์ โดยกำหนดให้กำลังส่ง 2 วัตต์

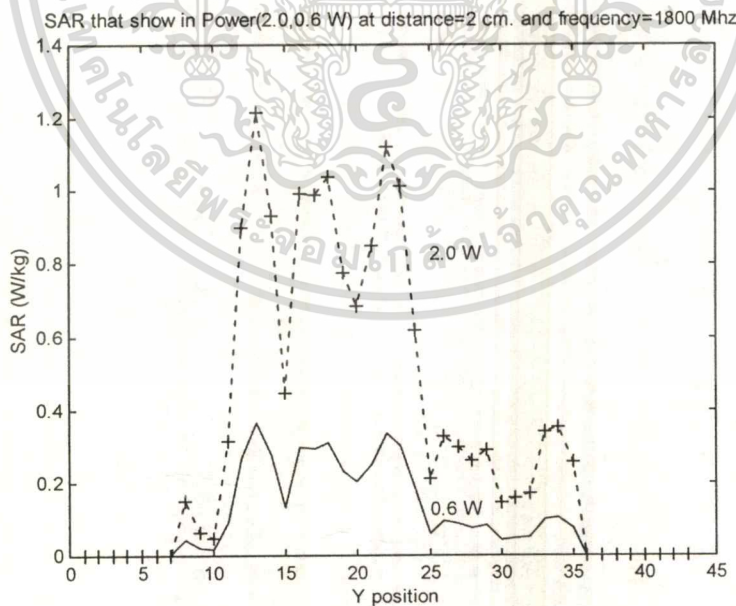


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของความถี่ที่กำลังส่ง 0.6 วัตต์ โดยกำหนดให้ระยะทางเท่ากับ 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของกำลังส่งที่  
ความถี่ 1500 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้ระยะทางเท่ากับ 2 เซนติเมตร



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ โดยการเปรียบเทียบผลของกำลังส่งที่  
ความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดให้ระยะทางเท่ากับ 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การทดลองผลการแพร่กระจายคลื่นจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังแบบจำลองศีรษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเทียม

##### ขั้นตอนการทดลอง

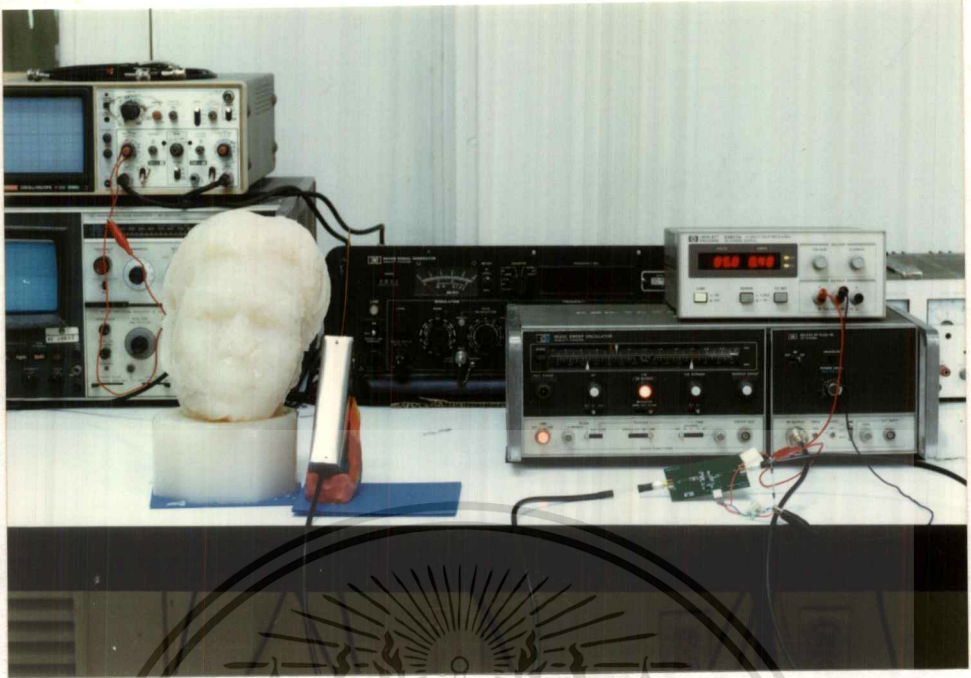
1. สร้างแบบจำลองรูปร่างคล้ายศีรษะมนุษย์โดยเป็นสารเนื้อเดียวซึ่งใช้สารเนื้อเทียมซึ่งมีค่าสภาพยอมใกล้เคียงกับกล้ามเนื้อ
2. สร้างแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อให้เป็นตัวปล่อยสัญญาณที่ความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์ใช้กำลังส่ง 2 วัตต์ และที่ความถี่ 1800 เมกะเฮิรตซ์ใช้กำลังส่ง 1 วัตต์
3. ปล่อยสัญญาณจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังสารเนื้อเทียม สังเกตลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น แล้วแสดงผล

##### ผลการทดลอง

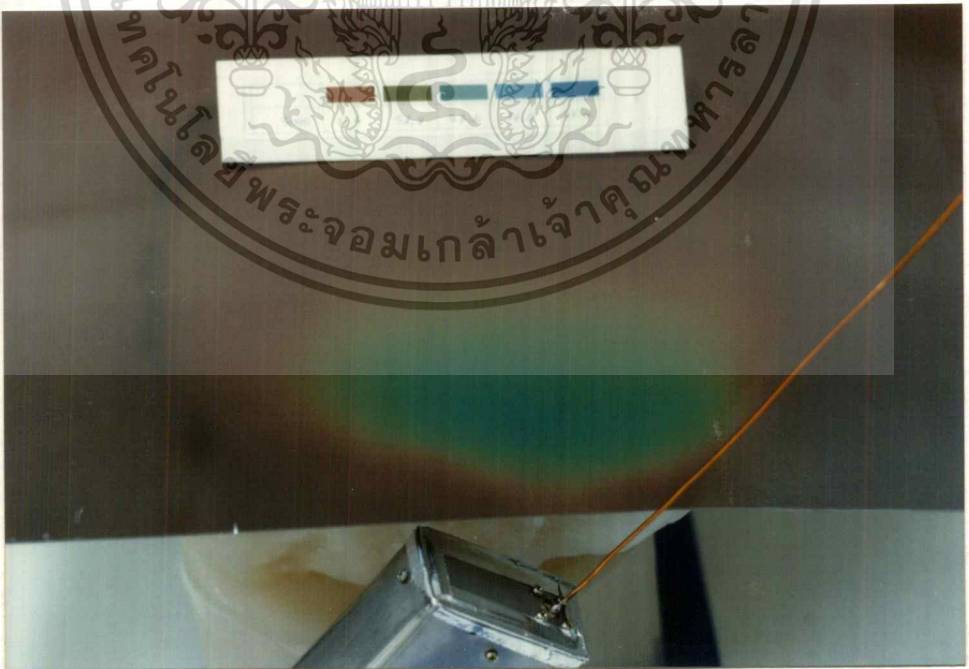


รูปที่ 4.40 แสดงแบบจำลองรูปร่างคล้ายศีรษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเดียว โดยใช้สารเนื้อเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

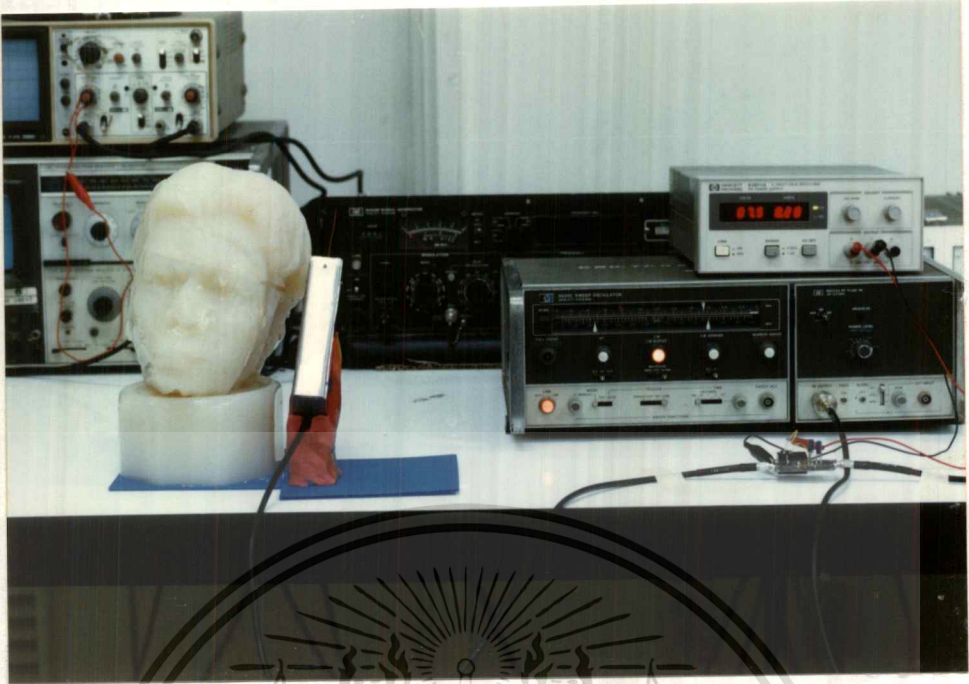


รูปที่ 4.41 การทดลองการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรมัลท์เคลื่อนที่ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ใช้กำลังส่ง 2 วัตต์ ไปยังแบบจำลองรูปร่างคล้ายศีรษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเทียม

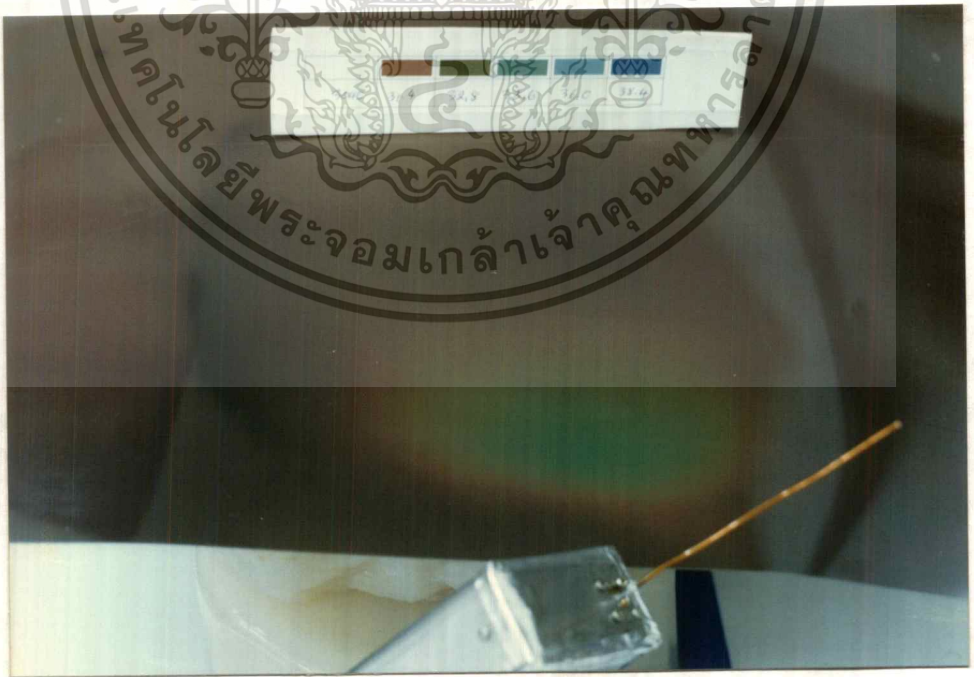


รูปที่ 4.42 แสดงผลการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรมัลท์เคลื่อนที่ความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ใช้กำลังส่ง 2 วัตต์ ไปยังแบบจำลองรูปร่างคล้ายศีรษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 การทดลองการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ใช้กำลังส่ง 1 วัตต์ ไปยังแบบจำลองรูปร่างคล้ายศีรษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเทียม



รูปที่ 4.44 แสดงผลการแพร่กระจายคลื่นจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ใช้กำลังส่ง 1 วัตต์ ไปยังแบบจำลองรูปร่างคล้ายศีรษะมนุษย์ที่เป็นสารเนื้อเทียม  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์

ปัจจุบันการติดต่อสื่อสารได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว มีการให้บริการติดต่อสื่อสารใหม่ๆ เกิดขึ้นตลอดเวลา เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ในการแลกเปลี่ยนข่าวสาร ในส่วนของการบริการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย เช่นการใช้บริการของโทรศัพท์เคลื่อนที่ก็มีการพัฒนาการให้บริการในระบบต่างๆ ที่หลากหลายเพื่อความเหมาะสมในตามแต่ละพื้นที่และเพื่อให้การติดต่อสื่อสารเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ไม่เกิดการขาดตอนระหว่างการสนทนา จนในปัจจุบันนี้ได้เกิดระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ขึ้นมามากมายหลายระบบ ในแต่ละระบบก็จะมีคุณสมบัติในด้านต่างๆ เช่นความถี่ที่ใช้ งาน กำลังของเครื่องรับและเครื่องส่ง ขนาดของเครื่องรับและเครื่องส่ง จะเห็นได้ว่าการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีความสะดวกสบายในการติดต่อใช้งานไม่ว่าจะติดต่อพูดคุยเวลาใดในสถานที่ใดก็แทบจะใช้งานได้หมด ในส่วนของผู้ใช้บริการก็มีการพัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ของตนเองเพื่อดึงดูดผู้บริโภคไม่ว่าจะเป็นในด้านการให้บริการ รูปลักษณะความทันสมัยนำใช้งาน จนในปัจจุบันจะเห็นได้ว่ามีการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่กันอย่างแพร่หลาย ถึงแม้โทรศัพท์เคลื่อนที่นี้จะได้รับความอำนวยความสะดวกต่อผู้ใช้อย่างมาก แต่ก็อาจมีผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ใช้ได้จากการใช้งานโดยไม่ทันได้คาดคิด โทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นมีการใช้งานในย่านความถี่สูงสำหรับการส่งและรับซึ่งถ้าเปรียบให้เข้าใจได้ง่ายเข้าก็คล้ายๆ กับเครื่องเตาอบไมโครเวฟที่เคลื่อนที่ได้เพียงแต่แตกต่างกันที่กำลังงานที่ใช้ในการส่งและรับนั้นมีค่าต่ำกว่ามากและเมื่อมีการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณออกไปกำลังงานของคลื่นที่แพร่กระจายออกไปก็จะมีการลดทอนไป แต่ในการใช้งานจริงของผู้ใช้ นั้น ส่วนใหญ่จะต้องมีการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในลักษณะที่วางใกล้ๆ กับศีรษะของผู้ใช้ เพื่อให้ได้รับการสนทนาที่ชัดเจน แม้ว่าเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีกำลังงานที่ใช้ส่งและรับไม่มากนักก็ตามแต่เมื่อมีการใช้งานในการสนทนาเกิดขึ้น เป็นที่แน่นอนว่าระยะทางที่คลื่นแพร่กระจายออกไปถึงศีรษะเรานั้นมีระยะทางสั้นมาก และจากการที่เนื้อเยื่อของร่างกายมนุษย์จะมีการดูดซับคลื่นที่แพร่กระจายเข้ามานั้น ก็จะทำให้เนื้อเยื่อที่ดูดซับคลื่นนั้นมีความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลมาน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานและองค์ประกอบต่างๆ เช่น ระยะเวลาที่ใช้ในการสนทนา ความถี่ที่ใช้งานของเครื่องโทรศัพท์เครื่องนั้นๆ กำลังงานที่ใช้ส่ง จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการจำลองแบบจำลองโทรศัพท์และแบบจำลองศีรษะมนุษย์ในลักษณะรูปทรงต่างๆ เช่น รูปทรงกลมและใช้ค่าเนื้อเยื่อเช่นไขมันมาทำการทดสอบ จะเห็นได้ว่าจะมีการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่เข้าไปในแบบจำลองศีรษะมนุษย์ ซึ่งสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายเข้าไปในนั้นจะมีการลดทอนอย่างรวดเร็วหลังจากที่แพร่เข้าไปในแบบจำลองได้เล็กน้อย หลังจากพิจารณาในลักษณะของสนามไฟฟ้าแล้วก็จะนำค่าสนามไฟฟ้านี้มาคิดในรูปแบบของค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นจำเพาะ ซึ่งเป็นค่าที่นิยมในการพิจารณาเพราะเป็นค่าที่แสดงอยู่ในรูปของกำลังงานต่อความหนาแน่นของเนื้อเยื่อแต่ละชนิด ซึ่งจะมีความแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของเนื้อเยื่อ จากนั้นเราได้ทำการพัฒนาแบบจำลองศีรษะให้มีความซับซ้อนมากขึ้นจากรูปทรงกลมที่ใช้ค่าเนื้อเยื่อของไขมันเพียงชั้นเดียวให้เป็นรูปทรงกลม 2 ชั้น โดยชั้นนอกเราเลือกใช้ค่าของกระดูกส่วนชั้นในเราเลือกใช้ค่าของไขมันจะเห็นได้ว่าเนื้อเยื่อทั้งสองมีการดูดซับคลื่นที่แตกต่างกัน ต่อมาเราได้พัฒนา

แบบจำลองให้มีความใกล้เคียงศีรษะมนุษย์โดยเลือกใช้เนื้อเยื่อที่แตกต่างกัน 10 ชนิดมาจำลองให้มีรูปร่างที่ซับซ้อนและมีลักษณะรูปทรงที่คล้ายกับศีรษะของมนุษย์ ซึ่งมีการเปลี่ยนองค์ประกอบที่ใช้ในการวิเคราะห์ต่างๆกันโดยความถี่ที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์เป็น 900 เมกกะเฮิร์ตซ์ 1500 เมกกะเฮิร์ตซ์ และ 1800 เมกกะเฮิร์ตซ์ ส่วนกำลังงานที่เลือกใช้ในการส่งเป็น 0.6 วัตต์ และ 2.0 วัตต์ และเลือกระยะห่างระหว่างเครื่องโทรศัพท์กับศีรษะมนุษย์เป็นที่ระยะ 0 เซนติเมตร กับ 2 เซนติเมตร จากผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟที่เปรียบเทียบให้เห็นในบทที่ 4 จะได้ว่าเมื่อกำลังงานมีค่ามากขึ้น ค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ในด้านของความถี่ที่ใช้งานได้พบว่าที่ความถี่ต่ำจะมีค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นสูงกว่าความถี่ที่ใช้งานในความถี่สูง และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่กับแบบจำลองศีรษะมนุษย์ จะเห็นว่าที่ระยะห่างมากขึ้น ค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นก็จะมีค่าน้อยลงไป จากนั้นเพื่อพิสูจน์ว่าผลการวิเคราะห์นั้นมีความถูกต้องจึงได้มีการจัดการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลของการวิเคราะห์ขึ้นมาแต่ด้วยข้อจำกัดในด้านการทดลองมีอาจจัดให้มีการซับซ้อนมากได้ จึงทำการจัดการทดลองที่จะทำการทดลองได้โดยเลือกทำสารเนื้อเทียมที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายศีรษะมนุษย์ และสร้างแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ทำหน้าที่ปล่อยคลื่นสัญญาณที่ความถี่ 900 เมกกะเฮิร์ตซ์ กำลังงานที่ใช้ส่งเป็น 2.0 วัตต์ และที่ความถี่ 1800 เมกกะเฮิร์ตซ์ กำลังงานที่ใช้ส่งเป็น 1.0 วัตต์ โดยระยะห่างระหว่างแบบจำลองโทรศัพท์กับสารเนื้อเทียมเป็น 0 เซนติเมตร จากนั้นสังเกตผลของการดูดซับคลื่นของสารเนื้อเทียมอันเนื่องมาจากคลื่นที่ปล่อยจากแบบจำลองโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์และผลจากการทดลองจะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่คล้ายกันทำให้สรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์ในลักษณะแบบจำลองศีรษะที่ซับซ้อนที่ไม่อาจทำการทดลองเปรียบเทียบได้นั้นมีความถูกต้อง ซึ่งนอกจากองค์ประกอบในด้านความถี่ที่ใช้งานที่แตกต่างกัน กำลังงานของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระยะห่างระหว่างตัวโทรศัพท์เคลื่อนที่กับตัวผู้ใช้แล้ว การแพร่กระจายของคลื่นไปยังตัวผู้ใช้งาน และค่าอัตราส่วนการดูดซับคลื่นยังขึ้นกับองค์ประกอบอื่นๆอีกมาก เช่นในการใช้งานจริงบางครั้งอาจมีการใช้งานอยู่ใกล้กับสิ่งที่สามารถสะท้อนคลื่นได้ ทำให้คลื่นมีการสะท้อนกลับมายังผู้ใช้ได้มากขึ้น หรือจากการที่มีผู้ใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่อื่นอยู่ในบริเวณใกล้ๆกันทำให้ผู้ใช้ได้รับคลื่นในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้งานในสภาพปกติเพียงคนเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%*****
%
%   FDTD Analysis of Electromagnetic Interaction between Portable
%   Telephone and Human Head
%
%*****

clear

%*****
%   Initialize some constants
%*****

npmls=4;                % Depth of PML region in # of cells

nmax=450;              % Number of time steps

ie=26;
ib=ie+1;
ic=6;
ip=ie-npmls;
is=9;                  % d=0 cm

je=43;
jb=je+1;
jc=21;
jp=je-npmls;
js=5;

ke=60;
kb=ke+1;
kc=ke/2+1;
kp=ke-npmls;
ks=20;

pi=4.0*atan(1.0);
muo=4.0*pi*1.0e-7;    % Permeability of free space
epso=8.854e-12;      % Permittivity of free space
co=1.0/sqrt(muo*epso); % Speed of light in free space
aimp=sqrt(muo/epso); % Wave impedance in free space
%   freq=900 Ghz;
%   lambda=co/freq;
dx=0.005;            % FDTD cell size
dt=dx/co/2.0;       % Time step size
r=dt/epso;          % Model Head
ra=(dt*co/dx)^2;    % Model Head
rb=dt/(muo*dx);     % Model head
muscle=1.0-((r*1.38)/53.5); % Muscle
cbrmuscle=ra/53.5;  %
muscle1=cbrmuscle/rb; %
air=1.0;            % Free space
airl=dt/epso/dx;   % Free space
%*****
%   .... Set up the Berenger PML ABC material constants ....
%*****

sigmax=-3.0*epso*co*log(1e-5)/(2.0*dx*npmls);
rhomax=sigmax*(aimp^2);
for m=1:npmls;
    sig(m)=sigmax*((m-0.5)/(npmls+0.5))^2; %เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าการฉ้อโกง (sig(m)=sigmax\*((m-0.5)/(npmls+0.5))^2) เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

rho(m)=rhomax*(m/(npmls+0.5))^2;
end;

```

```

%*****
%      .... Set up constants needed in the FDTD equations for the ....
%      .... Berenger PML ABCs (exponential difference expressions)....
%*****

```

```

for m=1:npmls;
    re=sig(m)*dt/epso;
    rm=rho(m)*dt/muo;
    ca(m)=exp(-re);
    cb(m)=- (exp(-re)-1.0)/sig(m)/dx;
    da(m)=exp(-rm);
    db(m)=- (exp(-rm)-1.0)/rho(m)/dx;
end;

```

```

%*****
%      Initialize all of the matrices for the field components HX, HY,
%      EZX, EZY, DAHX, DAHY, CAEZX, CAEZY, DBHX, DBHY, CBEZX, and
%      CBEZY.
%*****

```

```

for i=1:ib;
    for j=1:jb;
        for k=1:kb;
            ex1(i,j,k)=0.0;           % absolute result
            ey1(i,j,k)=0.0;           % absolute result
            ez1(i,j,k)=0.0;           % absolute result

            ez(i,j,k)=0.0;
            exz(i,j,k)=0.0;
            ezy(i,j,k)=0.0;

            ey(i,j,k)=0.0;
            eyx(i,j,k)=0.0;
            eyz(i,j,k)=0.0;

            ex(i,j,k)=0.0;
            exz(i,j,k)=0.0;
            exy(i,j,k)=0.0;

            can(i,j,k)=1.0;           % Free space
            cbn(i,j,k)=dt/epso/dx;   % Free space

            hx(i,j,k)=0.0;
            hxz(i,j,k)=0.0;
            dahxz(i,j,k)=1.0;        % Free space
            dbhxz(i,j,k)=dt/muo/dx;  % Free space
            hxy(i,j,k)=0.0;
            dahxy(i,j,k)=1.0;        % Free space
            dbhxy(i,j,k)=dt/muo/dx;  % Free space

            hy(i,j,k)=0.0;
            hyz(i,j,k)=0.0;
            dahyz(i,j,k)=1.0;        % Free space
            dbhyz(i,j,k)=dt/muo/dx;  % Free space
            hyx(i,j,k)=0.0;
            dahyx(i,j,k)=1.0;        % Free space
            dbhyx(i,j,k)=dt/muo/dx;  % Free space

```







```
*****
% .....Set up time derivative Gaussian pulse excitation voltage.....
*****
```

```
vm = 27.93; %Power=2.0W
voltage = vm*sin(2*pi*(450e+06)*n*dt); %Freq=450 MHz
```

```
*****
% .....EZ FIELD UPDATE.....
*****
```

```
%.....PML.....EZ FIELD UPDATE....
ezx(2:npmls+1,2:je,2:ke)=cax(2:npmls+1,2:je,2:ke).*ezx
(2:npmls+1,2:je,2:ke)+...
cbx(2:npmls+1,2:je,2:ke).*(hy(2:npmls+1,2:je,2:ke)-hy
(1:npmls,2:je,2:ke));
```

```
ezy(2:ie,2:npmls+1,2:ke)=cay(2:ie,2:npmls+1,2:ke).*ezy
(2:ie,2:npmls+1,2:ke)+...
cby(2:ie,2:npmls+1,2:ke).*(hx(2:ie,1:npmls,2:ke)-hx
(2:ie,2:npmls+1,2:ke));
```

```
ezx(ip+1:ie,2:je,2:ke)=cax(npmls+2:2*npmls+1,2:je,2:ke).*ezx
(ip+1:ie,2:je,2:ke)+...
cbx(npmls+2:2*npmls+1,2:je,2:ke).*(hy(ip+1:ie,2:je,2:ke)-hy
(ip:ie-1,2:je,2:ke));
```

```
ezy(2:ie,jp+1:je,2:ke)=cay(2:ie,npmls+2:2*npmls+1,2:ke).*ezy
(2:ie,jp+1:je,2:ke)+...
cby(2:ie,npmls+2:2*npmls+1,2:ke).*(hx(2:ie,jp:je-1,2:ke)-hx
(2:ie,jp+1:je,2:ke));
```

```
%.....Ez Normal Fields Update.....
```

```
ezx(npmls+2:ip,2:je,2:ke)=can(npmls+2:ip,2:je,2:ke).*ezx
(npmls+2:ip,2:je,2:ke)+...
cbn(npmls+2:ip,2:je,2:ke).*(hy(npmls+2:ip,2:je,2:ke)-hy
(npmls+1:ip-1,2:je,2:ke));
```

```
ezy(2:ie,npmls+2:jp,2:ke)=can(2:ie,npmls+2:jp,2:ke).*ezy
(2:ie,npmls+2:jp,2:ke)+...
cbn(2:ie,npmls+2:jp,2:ke).*(hx(2:ie,npmls+1:jp-1,2:ke)-hx
(2:ie,npmls+2:jp,2:ke));
```

```
ez(2:ie,2:je,2:ke)=ezx(2:ie,2:je,2:ke)+ezy(2:ie,2:je,2:ke);
```

```
*****
% .....EY FIELD UPDATE.....
*****
```

```
%.....PML.....EY FIELD UPDATE....
eyz(2:ie,2:je,2:npmls+1)=caz(2:ie,2:je,2:npmls+1).*eyz
(2:ie,2:je,2:npmls+1)+...
cbz(2:ie,2:je,2:npmls+1).*(hx(2:ie,2:je,2:npmls+1)-hx
(2:ie,2:je,1:npmls));
```

```
eyz(2:ie,2:je,kp+1:ke)=caz(2:ie,2:je,npmls+2:2*npmls+1).*eyz
(2:ie,2:je,kp+1:ke)+...
cbz(2:ie,2:je,npmls+2:2*npmls+1).*(hx(2:ie,2:je,kp+1:ke)-hx
(2:ie,2:je,kp:ke-1));
```

```

    eyz(2:ie,2:je,kp+1:ke)=caz(2:ie,2:je,npmls+2:2*npmls+1).*eyz
(2:ie,2:je,kp+1:ke)+...
    cbz(2:ie,2:je,npmls+2:2*npmls+1).*(hx(2:ie,2:je,kp+1:ke)-hx
(2:ie,2:je,kp:ke-1));

```

```

    eyx(2:npmls+1,2:je,2:ke)=cax(2:npmls+1,2:je,2:ke).*eyx
(2:npmls+1,2:je,2:ke)+...
    cbx(2:npmls+1,2:je,2:ke).*(hz(1:npmls,2:je,2:ke)-hz
(2:npmls+1,2:je,2:ke));

```

```

    eyx(ip+1:ie,2:je,2:ke)=cax(npmls+2:2*npmls+1,2:je,2:ke).*eyx
(ip+1:ie,2:je,2:ke)+...
    cbx(npmls+2:2*npmls+1,2:je,2:ke).*(hz(ip:ie-1,2:je,2:ke)-hz
(ip+1:ie,2:je,2:ke));

```

```

%.....Ey Normal Fields Update.....

```

```

    eyz(2:ie,2:je,npmls+2:kp)=can(2:ie,2:je,npmls+2:kp).*eyz
(2:ie,2:je,npmls+2:kp)+...
    cbn(2:ie,2:je,npmls+2:kp).*(hx(2:ie,2:je,npmls+2:kp)-hx
(2:ie,2:je,npmls+1:kp-1));

```

```

    eyx(npmls+2:ip,2:je,2:ke)=can(npmls+2:ip,2:je,2:ke).*eyx
(npmls+2:ip,2:je,2:ke)+...
    cbn(npmls+2:ip,2:je,2:ke).*(hz(npmls+1:ip-1,2:je,2:ke)-hz
(npmls+2:ip,2:je,2:ke));

```

```

    ey(2:ie,2:je,2:ke)=eyz(2:ie,2:je,2:ke)+eyx(2:ie,2:je,2:ke);

```

```

%*****
%
%.....EX FIELD UPDATE.....
%*****

```

```

%.....PML....EX FIELD UPDATE....

```

```

    exz(2:ie,2:je,2:npmls+1)=caz(2:ie,2:je,2:npmls+1).*exz
(2:ie,2:je,2:npmls+1)+...
    cbz(2:ie,2:je,2:npmls+1).*(hy(2:ie,2:je,1:npmls)-hy
(2:ie,2:je,2:npmls+1));

```

```

    exz(2:ie,2:je,kp+1:ke)=caz(2:ie,2:je,npmls+2:2*npmls+1).*exz
(2:ie,2:je,kp+1:ke)+...
    cbz(2:ie,2:je,npmls+2:2*npmls+1).*(hy(2:ie,2:je,kp:ke-1)-hy
(2:ie,2:je,kp+1:ke));

```

```

    exy(2:ie,2:npmls+1,2:ke)=cay(2:ie,2:npmls+1,2:ke).*exy
(2:ie,2:npmls+1,2:ke)+...
    cby(2:ie,2:npmls+1,2:ke).*(hz(2:ie,2:npmls+1,2:ke)-hz
(2:ie,1:npmls,2:ke));

```

```

    exy(2:ie,jp+1:je,2:ke)=cay(2:ie,npmls+2:2*npmls+1,2:ke).*exy
(2:ie,jp+1:je,2:ke)+...
    cby(2:ie,npmls+2:2*npmls+1,2:ke).*(hz(2:ie,jp+1:je,2:ke)-hz
(2:ie,jp:je-1,2:ke));

```

```

%.....Ex Normal Fields Update.....

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

exz(2:ie,2:je,npmls+2:kp)=can(2:ie,2:je,npmls+2:kp).*exz
(2:ie,2:je,npmls+2:kp)+...
cbn(2:ie,2:je,npmls+2:kp).*(hy(2:ie,2:je,npmls+1:kp-1)-hy
(2:ie,2:je,npmls+2:kp));

exy(2:ie,npmls+2:jp,2:ke)=can(2:ie,npmls+2:jp,2:ke).*exy
(2:ie,npmls+2:jp,2:ke)+...
cbn(2:ie,npmls+2:jp,2:ke).*(hz(2:ie,npmls+2:jp,2:ke)-hz
(2:ie,npmls+1:jp-1,2:ke));

ex(2:ie,2:je,2:ke)=exz(2:ie,2:je,2:ke)+exy(2:ie,2:je,2:ke);

```

```

%*****
% ..... Hard Source excitation .....
%*****

```

```

ez(ic,jc,24)=voltage/dx; % feeding point
ez(ic,jc,25:54)=0.0; % quater monopole

ez(ic-2:ic+2,jc-4:jc+4,7:23)=0.0; % conducting box
ey(ic-2:ic+2,jc-4:jc+4,7:23)=0.0; % conducting box
ex(ic-2:ic+2,jc-4:jc+4,7:23)=0.0; % conducting box

```

```

%*****
% .....HX FIELD UPDATE.....
%*****

```

```

hxz(1:ie,1:je,1:ke)=dahxz(1:ie,1:je,1:ke).*hxz(1:ie,1:je,1:ke)+...
dbhxz(1:ie,1:je,1:ke).*(ey(1:ie,1:je,2:kb)-
ey(1:ie,1:je,1:ke));

```

```

hxy(1:ie,1:je,1:ke)=dahxy(1:ie,1:je,1:ke).*hxy(1:ie,1:je,1:ke)+...
dbhxy(1:ie,1:je,1:ke).*(ez(1:ie,1:je,1:ke)-
ez(1:ie,2:jb,1:ke));

```

```

hx(1:ie,1:je,1:ke)=hxz(1:ie,1:je,1:ke)+hxy(1:ie,1:je,1:ke);

```

```

%*****
% .....HY FIELD UPDATE.....
%*****

```

```

hyx(1:ie,1:je,1:ke)=dahyx(1:ie,1:je,1:ke).*hyx(1:ie,1:je,1:ke)+...
dbhyx(1:ie,1:je,1:ke).*(ez(2:ib,1:je,1:ke)-
ez(1:ie,1:je,1:ke));

```

```

hyz(1:ie,1:je,1:ke)=dahyz(1:ie,1:je,1:ke).*hyz(1:ie,1:je,1:ke)+...
dbhyz(1:ie,1:je,1:ke).*(ex(1:ie,1:je,1:ke)-
ex(1:ie,1:je,2:kb));

```

```

hy(1:ie,1:je,1:ke)=hyx(1:ie,1:je,1:ke)+hyz(1:ie,1:je,1:ke);

```

%\*\*\*\*\*
% \*\*\*\*\*ใช้\*\*\*\*\*ที่\*\*\*\*\*ไม่\*\*\*\*\*ให้\*\*\*\*\*ใช้\*\*\*\*\*การค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% .....HZ FIELD UPDATE.....
%*****
hzx(1:ie,1:je,1:ke)=dahzx(1:ie,1:je,1:ke).*hvx(1:ie,1:je,1:ke)+...
    dbhvx(1:ie,1:je,1:ke).*(ey(1:ie,1:je,1:ke)-
ey(2:ib,1:je,1:ke));

hzy(1:ie,1:je,1:ke)=dahzy(1:ie,1:je,1:ke).*hzy(1:ie,1:je,1:ke)+...
    dbhzy(1:ie,1:je,1:ke).*(ex(1:ie,2:jb,1:ke)-
ex(1:ie,1:je,1:ke));

    hz(1:ie,1:je,1:ke)=hvx(1:ie,1:je,1:ke)+hzy(1:ie,1:je,1:ke);
%*****
% .....Create the movie frame by frame.....
% .....Take a frame every 3rd time step.....
%*****
    if n>=400;
        temp(1:ie,1:je,1:ke)=abs(ez(1:ie,1:je,1:ke));
        tempy(1:ie,1:je,1:ke)=abs(ey(1:ie,1:je,1:ke));
        tempx(1:ie,1:je,1:ke)=abs(ex(1:ie,1:je,1:ke));
        for i=1:ie;
            for j=1:je;
                for k=1:ke;
                    if temp(i,j,k)>ezl(i,j,k);
                        ezl(i,j,k)=temp(i,j,k);
                    end;
                    if tempy(i,j,k)>eyl(i,j,k);
                        eyl(i,j,k)=tempy(i,j,k);
                    end;
                    if tempx(i,j,k)>exl(i,j,k);
                        exl(i,j,k)=tempx(i,j,k);
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
    end;
end;          %end time step loop
save lastsiml exl eyl ezl

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Start

Initialize some constants

Set up the Berenger PML ABC material constants, Set up constant needed in the FDTD equation for the Berenger PML ABCs, Set up all constant that use for dielectric object in model of human

Initialize all of the matrices for the Berenger

Time stepping loop

Ez, Ey, Ex field update

Hard source excitation

Stored electric field for result

End time step loop  
n=nmax ?

Time increase

End

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม Flow Chart Of FDTD Analysis อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารเนื้อเทียม (Agar Phantom)

### ส่วนประกอบ

สารเนื้อเทียมขนาด 1 ลิตร ประกอบด้วย

1. น้ำกลั่น 956.6 ซีซี
2. Agar Powder 40 กรัม
3. NaCl 2.4 กรัม
4.  $\text{NaN}_3$  1 กรัม

### ขั้นตอนการทำ

1. ต้มน้ำกลั่นให้มีอุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียสแล้วเติม NaCl คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 70-80 องศาเซลเซียส
2. เติม  $\text{NaN}_3$  ลงไปคนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้คงที่
3. ค่อยๆเติม Agar Powder ลงไปที่ละน้อย คนให้ทั่วอย่าให้เกิดฟองอากาศ ระวังอย่าให้จับเป็นก้อนหรือเกิดฟอง คนให้ละลายตลอดเวลา
4. เติมน้ำกลั่นลงไปให้ได้สารละลายขนาด 1 ลิตร เพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 95 องศาเซลเซียส
5. ทำความสะอาดภาชนะด้วยน้ำกลั่น เทสารละลายที่ได้ลงไปภาชนะที่เตรียมไว้ เก็บไว้ 1-2 วันแล้วจึงนำมาใช้งานได้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับคำแนะนำและได้รับความช่วยเหลือจากหลายท่าน ดังนี้

รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

คุณชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์

คุณเอกจิต คู่ม่วงส์

คุณคมศักดิ์ เมฆสมุทร

คุณชาญชัย ทอง โสภา

คุณดวงอาทิตย์ ศรีมูล

จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Q. Balzano, O.Garay, and T.J.Manning, "Electromagnetic Energy Exposure of Simulated Users of Portable Cellular Telephones," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol.44, no.3, Aug. 1996.
- [2] P. Bernardi, M. Cavagnaro, and S. Pisa, "Evaluation of the SAR Distribution in the Human Head for Cellular Phone. Used in a Partially Closed Environment," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol.38, no.3, Aug. 1996.
- [3] G. Lazzi and O. P.Gandhi, "Realistically Tilted and Truncated Anatomically Based Models of the Human Head for Dosimetry of Mobile Telephone," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol.39, no.1, Feb. 1997.
- [4] R. Luebbers, L.Chen, T.Uno, and S. Adachi, "FDTD Calculation of Radiation Patterns, Impedance, and Gain for a Monopole Antenna on a Conducting Box," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.40, no.12, Dec. 1992.
- [5] K. S.Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-14, no.3, Sep.1968.
- [6] M. Taki, S. Watanabe, and T. Nojima, "FDTD Analysis of Electromagnetic Interaction between Portable Telephone and Human Head," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E79-C, no.10, Oct. 1996.
- [7] R. Yamaguchi, K. Sawaya, Y. Fujino, and S. Adachi, "Effect of Dimension of Conducting Box on Radiation Pattern of a Monopole Antenna for Portable Telephone", *IEICE Trans. Commun.*, vol.E76-B, no.12, Dec. 1993.
- [8] M.N.O.Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, CRC Press, 1996.