

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจดจำและจำแนกชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์จากสัญญาณรบกวน
แม่เหล็กไฟฟ้า

RADIATED EMI RECOGNITION AND IDENTIFICATION
FOR PCB CONFIGURATION



ไกรสร อัญชลีวรพันธุ์

KRAISON AUNCHALEEVARAPAN

๕
๗ ๗
๕๕๕

เลขหมึก.....
เลขทะเบียน..... 47669
วัน, เดือน, ปี..... 21 ส.ค. 2546

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

พ.ศ.2546

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974-324-239-2

**RADIATED EMI RECOGNITION AND IDENTIFICATION
FOR PCB CONFIGURATION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-239-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เอ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจดจำและจำแนกชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์จากสัญญาณ รบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
นักศึกษา	นายไกรสร อัญชลีวรพันธุ์
รหัสประจำตัว	41060005
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในการจดจำจำแนกและ
ทำนายลักษณะของวงจรมพิมพ์พื้นฐาน โดยอาศัยการแพร่สนามแม่เหล็กกระยะใกล้และ
สนามไฟฟ้าระยะไกลจากการวัด การประยุกต์ใช้ทำโดยการนำสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่
แพร่ออกจากแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันหลายแบบมาเป็นส่วนกำเนิด
สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า การคำนวณทางสถิติจะถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดจำนวน โหนดและเวลา
ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านกระบวนการเรียนรู้แล้วสามารถจำแนกชนิดของวงจรมพิมพ์ได้
โดยการใช้สนามแม่เหล็กกระยะใกล้และสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ และ
สามารถจำแนกลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์เมื่อการวัดถูกรบกวนด้วยสัญญาณอิมพัลส์ได้

นอกจากนี้โครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล
ซึ่งการวัดในแบบมาตรฐานจะต้องใช้ห้องปิดกันไว้คลื่นสะท้อน ซึ่งยุ่งยาก เสียเวลาและเสีย
ค่าใช้จ่ายสูง โดยการใช้สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่วัดจากวงจรมพิมพ์แต่ละชนิดซึ่งจะเป็นประโยชน์
อย่างยิ่งกับวิศวกรผู้ออกแบบและเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่ายกว่าการทดสอบในพื้นที่ทดสอบ
มาตรฐาน

ผลของการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมา
เปรียบเทียบกับ ผลการคำนวณ โดยอัลกอริทึมที่นิยม เช่น MOM CEM ผลการวัดจริงบนพื้นที่
ทดสอบมาตรฐาน จากการทดลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถให้ค่าการทำนายใกล้เคียงกับค่าที่
วัดได้จริง

Thesis Title Radiated EMI Recognition and Identification for PCB Configuration
Student Mr. Kraison Aunchaleevarapan
Student ID. 41060005
Degree Doctorial of Engineering
Program Electrical Engineering
Year 2003
Thesis Advisor Assoc. Prof.Dr. Kitti Paithoonwatanakij

ABSTRACT

In this thesis, the Neural Network (NN) is applied to recognize, identify and predict basic Printed Circuit Boards (PCB) configurations using its near-field and far-field radiated Electromagnetic Interference (EMI). The learning process is accomplished by giving the NN different radiated emission spectra of several basic PCB configuration. The statistical calculation is applied to reduce the NN input data to reduce the learning time of the NN. The NN are trained and tested using the different training and checking set of input and output patterns. The NN successful in identify type of PCBs configuration by using measured magnetic near-field spectra and electric far-filed spectra. In addition, the artificially impulse noise are generated to the measured near-field spectra and far-field spectra, and then the NN is applied for identifying the PCB configuration. The trained NN can recognize and identify the PCB configuration included artificial noise.

In addition, the NN used for predicting far-field emission spectra from the near-field measurement is presented. For the experimental results, the NN can predict the electric far-field from the magnetic near-field radiated. Then the predicted results from the NN are compared with the populars algorithm (MOM, CEM) and actual far-field measurements for evaluation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตา และคำแนะนำการทำงานวิจัยทางด้าน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จาก Prof. Dr. Shuichi Nitta แห่งมหาวิทยาลัย Tokyo Agriculture Technology Institute ประเทศญี่ปุ่น ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ กิตติ ไพฑูรย์วัฒนกิจ ที่ได้ให้คำแนะนำการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการจำและจำแนกสัญญาณ แม่เหล็กไฟฟ้า ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ วีระเชษฐุ์ ชันเงิน ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องการคำนวณทางซอฟต์แวร์ แนวความคิดในการทำงานวิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์โยธิน เปรมปราณีรัชต์ ที่ได้ให้ความเมตตาแนะนำการวัดทางแม่เหล็กไฟฟ้า ขอขอบคุณ คุณมนตรี พรรณรัตน์ ซึ่งให้ความช่วยเหลือด้านการวัดเป็นอย่างดีขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของศูนย์ทดสอบฯ ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือในการวัดทางแม่เหล็กไฟฟ้า ขอขอบคุณโครงการ RECCIT และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ให้ความสนับสนุนในการทำการวิจัยทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า และทุนการศึกษาในการนำเสนอผลงาน

ไกรสร อัญชลีวรินทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
คำอธิบายสัญลักษณ์/คำย่อ.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 ขอบข่ายของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.1 ทฤษฎีฟิสิกส์และสมการแมกซ์เวลล์.....	6
2.2 สมการการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของแมกซ์เวลล์.....	6
2.3 การแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
2.4 การหาสนามโดยการใช้ศักย์.....	10
2.5 สมการแมกซ์เวลล์ในโดเมนความถี่.....	12
บทที่ 3 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้และระยะไกล.....	14
3.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้และระยะไกล.....	14
3.2 อิมพีแดนซ์คลื่น.....	15
3.3 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้.....	16
3.4 การแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรถนาคเล็ก.....	22
3.5 การศึกษาการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่ง.....	27
3.6 รูปแบบของแรงดันอินพุตพื้นฐาน.....	31
3.7 การแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรจติจิตอล.....	35
3.8 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ออกจากวงจรจติจิตอล.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.9	สมการที่ใช้ในการคำนวณการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากวงจรดิจิทัลที่ ด้วยสายสัญญาณ.....	44
บทที่ 4	การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล.....	47
4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	47
4.2	แนวการรับของสายอากาศตามมาตรฐานการทดสอบทาง EMC.....	48
บทที่ 5	โครงข่ายประสาทเทียม.....	50
5.1	บทนำ.....	50
5.2	ระบบเซลล์ประสาททางชีววิทยา.....	50
5.3	การสื่อสารข้อมูลในระบบประสาท.....	51
5.4	แบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทและการส่งสัญญาณกระแสประสาท.....	51
5.5	แบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาท.....	53
5.6	แบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม.....	54
5.7	การเรียนรู้ของโครงข่าย.....	56
5.8	การแพร่กระจายกลับ.....	57
5.9	วิธีการของกฎเดลต้าเอนกประสงค์.....	60
5.10	ปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการสอนโครงข่ายเพิ่มมากขึ้น.....	63
5.11	ขั้นตอนการสอนโครงข่ายประสาทเทียม.....	64
5.12	การสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยการใช้อัลกอริทึมของ Marquardt-Levenberf	69
บทที่ 6	การทดลอง.....	75
6.1	โครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์.....	75
6.2	การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในสนามระยะใกล้.....	77
6.3	การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในสนามระยะไกล.....	96
6.4	การนำข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม.....	108

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.5 การใช้โครงข่ายประสาทดัดเสริมสำหรับการจำหน่ายแม่เหล็กกระยะไกล และสนามไฟฟ้าระยะไกล.....	113
6.6 สรุปผลของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของโครงข่าย.....	120
6.7 การทดสอบโครงข่ายประสาทดัดเสริมให้ทำการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าเมื่อถูกรบกวน..	120
6.8 ผลการจำหน่ายพลังงานทดแทนเมื่อถูกรบกวน โดยสัญญาณอิมพัลส์.....	124
บทที่ 7 การทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายประสาทดัดเสริม.....	128
7.1 การทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลจากการใช้สนามแม่เหล็กกระยะไกล.....	128
7.2 วิธีการวัดสนามแม่เหล็กกระยะไกลเพื่อใช้ทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล.....	129
7.3 การนำข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทดัดเสริม.....	133
7.4 การปรับโครงข่ายประสาทดัดเสริมให้มีความแม่นยำในการทำนาย.....	136
7.5 การทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อถูกรบกวน.....	138
7.6 การเปรียบเทียบการทำนายของโครงข่ายประสาทดัดเสริมกับอัลกอริทึมอื่น.....	140
7.7 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณจากโครงข่ายประสาทดัดเสริมกับอัลกอริทึมอื่นๆ.....	148
บทที่ 8 สรุป.....	154
8.1 การจดจำและจำหน่ายแม่เหล็กกระยะไกลและสนามแม่เหล็กกระยะไกล.....	154
8.2 ประยุกต์ใช้ในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล.....	155
8.3 ข้อเสนอแนะ.....	155
บรรณานุกรม.....	156
ภาคผนวก ก. ผลการจำลองทางโปรแกรม.....	159
ข. ผลงานวิจัย.....	196
ประวัติผู้เขียน.....	240

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 แสดงการปรับค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับกฎการสอนแบบต่าง ๆ	58
6.1 แสดงโครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์.....	76
6.2 แสดงการแบ่งช่วงสัญญาณความถี่โดยการสุ่มคาบ 8 ช่วง.....	110
6.3 แสดงความสัมพันธ์และการป้อนค่าอินพุตและค่าเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียม.....	112
6.4 แสดงผลการคำนวณจากโครงข่ายประสาทเทียมเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย.....	114
6.5 แสดงผลการจำแนกของ โครงข่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอินพุต และฮิดเดน โหนด.....	116
6.6 แสดงผลของการเปรียบเทียบการปรับแต่งช่วงของการสุ่มข้อมูล.....	118
6.7 แสดงโครงสร้างของส่วน Activation Function ที่ใช้ในการปรับแต่ง โครงข่ายประสาทเทียม.....	119
6.8 แสดงตัวอย่างข้อมูลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งถูกรบกวนโดย สัญญาณอิมพัลส์.....	123
6.9 แสดงผลการจำแนกสายทองแดงเมื่อถูกรบกวนโดยสัญญาณอิมพัลส์.....	126
7.1 แสดงตัวอย่างในการคำนวณส่วนอินพุตและเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียม.....	134
7.2 แสดงผลการเปรียบเทียบการใช้อัลกอริทึม MOM CEM และ NN ในการทำนาย การแพร่สนามไฟฟ้าจากสายอากาศไดโพลและรูป.....	153

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการทดสอบทาง EMC ของอุปกรณ์ทางการทหาร.....	2
1.2 แสดงการวัดทาง EMC ในพื้นที่ทดสอบตามมาตรฐาน.....	2
1.3 แสดงกลไกในการเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	2
2.1 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กทำให้เกิดสนามไฟฟ้า.....	8
2.2 กระแสในพื้นที่ลูปปิดจำกัด.....	8
2.3 ตัวเก็บประจุบนพื้นที่ลูปปิดจำกัด.....	8
2.4 แสดงการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะ R.....	10
2.5 แสดงการหาศักย์สนามไฟฟ้าที่ระยะ r.....	11
3.1 การกำหนดสนามระยะไกลและระยะใกล้ของคอมพิวเตอรื.....	15
3.2 แสดง อิมพีแดนซ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระยะทาง.....	15
3.3 กระแสนลายทองแดงของPCB.....	16
3.4 แสดงการแพร่สนามแม่เหล็กระยะใกล้จากแผ่นวงจรพิมพ์.....	17
3.5 แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กของ PCB ตัว “T”.....	18
3.6 แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กของ PCB ตัว “T”.....	18
3.7 แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กของ PCBตัว “U”.....	19
3.8 แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กของ PCBตัว “X”.....	19
3.9 แสดงผลการวัดสนามระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “T”.....	20
3.10 แสดงผลการวัดสนามระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “T”.....	20
3.11 แสดงผลการวัดสนามระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “U”.....	21
3.12 แสดงสายอากาศแบบลูปและวงจรมินิเจอร์.....	22
3.13 แสดงการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY ของชิ้นส่วนของกระแสแนวอน.....	23
3.14 แสดงการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XY ของ ชิ้นส่วนของกระแสแนวอน.....	23
3.15 ชิ้นส่วนกระแสแนวตั้ง (vertical current element) ในระนาบ XY.....	24
3.16 แสดงการแพร่คลื่นในระนาบ XY ของ ชิ้นส่วนกระแสแนวตั้ง.....	25
3.17 $ E_{xy}(\phi)(-) $ และ $ E_{xy}(\phi)(\dots) $	25
3.18 แสดงการแพร่คลื่นในระนาบ XZ ของชิ้นส่วนกระแส ความยาว λ	26
3.19 $ E_{xz}(\epsilon) (-)$, และ $ E_{xz}(\epsilon)(\dots) $	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20 แสดงสนามการแพร่จาก differential mode จากสายตัวนำ 2 เส้น.....	28
3.21 แสดงสนามใน common mode บนสายตัวนำ 2 เส้น.....	29
3.22 แสดงสนามจากสายตัวนำเส้นเดียวเหนือพื้นกราวด์เพลน.....	30
3.23 แสดงรูปแบบพื้นฐานของสัญญาณอินพุต.....	31
3.24 เวลาขาขึ้นและขาลงแบบเชิงเส้นและในแกนเวลาและแกนความถี่.....	34
3.25 แสดงวงจร Rectangular และวงจรที่ถูกปรับเปลี่ยน.....	38
3.26 แสดงผลการคำนวณการแพร่คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสนามระยะไกล เมื่อปรับเวลาขึ้น/ลงและความยาวของลายทองแดง.....	40
3.27 แสดงผลการคำนวณการแพร่คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสนามระยะไกล เมื่อปรับเวลาขึ้น/ลงและความยาวของลายทองแดง.....	42
3.28 แสดงการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากวงจรดิจิทัล.....	43
3.29 แสดงฮาร์โมนิกของคลื่นสมมาตร.....	44
3.30 แสดงการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสัมพันธ์กับความถี่.....	45
3.31 แสดงการแพร่คลื่นจากวงจรดิจิทัลและสายเคเบิลที่นำมาต่อแบบละเอียด.....	46
3.32 สนามไฟฟ้าระยะไกลจากวงจรดิจิทัลซึ่งปรับความยาวและความกว้างของรูป.....	46
4.1 การแสดงโครงสร้างของ Semi anechoic chamber.....	47
4.2 แสดงแนวการรับของสายอากาศในแนวนอน.....	48
4.3 แสดงแนวการรับของสายอากาศแนวตั้ง.....	49
5.1 การสื่อสารข้อมูลในระบบประสาท.....	51
5.2 โครงสร้างของเซลล์ประสาทและการส่งสัญญาณกระแสประสาท.....	51
5.3 แสดงลักษณะการเกิดศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน.....	52
5.4 แสดงศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานที่เกิดจากการรวมกันของซินแนปส์.....	52
5.5 แบบจำลองเซลล์ประสาทของ McCulloch-Pitts และโครงข่ายลอจิกพื้นฐาน.....	53
5.6 แบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม.....	54
5.7 Activation Function แบบชนิดต่าง ๆ.....	56
5.8 แสดงโครงข่าย Multilayer Perceptron ที่มี 3 ชั้น.....	59
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X และ Y.....	59
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X กับ Y โดยมีชั้นฮิดเดนเป็นตัวเชื่อม.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 แผนภูมิการสอบแบบ Error Back-propagation ที่มี I ชั้น.....	65
5.12 โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Back-propagation.....	71
6.1 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	75
6.2 แสดง PCB Configurations ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	76
6.3 แสดงโครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	76
6.4 แสดง Digital Circuits	77
6.5 แสดงการวัดสัญญาณแม่เหล็กกระยะใกล้.....	78
6.6 สายอากาศรูปและวงจรสมมูล.....	78
6.7 แสดงค่าเฟกเตอร์ของสายอากาศรูป.....	79
6.8 สัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าสู่วงจร.....	80
6.9 แสดงการวัดสนามแม่เหล็กบนแผ่นวงจรพิมพ์.....	82
6.10 แสดงการเคลื่อนที่ของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์.....	82
6.11 แสดงผลการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในสนามระยะใกล้และการคำนวณ.....	84
6.12 แสดงผลการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ เมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวของลายทองแดง.....	85
6.13 แสดงผลการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้เมื่อเปลี่ยนแปลงมุมของลายทองแดง.....	86
6.14 แสดงผลการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้เมื่อเปลี่ยนแปลงวงจรดิจิทัล.....	87
6.15 แสดงผลการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้เมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้าง.....	88
6.16 แสดงผลการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้เมื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลายทองแดง.....	89
6.17 แสดงผลการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้เมื่อเปลี่ยนแปลงรัศมีของลายทองแดง.....	90
6.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงความยาวของลายทองแดง.....	91
6.19 แสดงการปรับมุมของลายทองแดง.....	91
6.20 แสดงโครงสร้างของการรับและส่งสัญญาณของวงจรดิจิทัล.....	92
6.21 แสดงการปรับความกว้างของลายทองแดง.....	93
6.22 แสดงการปรับรูปร่างของลายทองแดง.....	94
6.23 แสดงโครงสร้างของการปรับรัศมีของวงจรพิมพ์.....	95
6.24 แสดงการเปรียบเทียบของ PCB ที่มีลักษณะแตกต่างกัน.....	96
6.25 แสดงการวัดสนามไฟฟ้าระยะใกล้ตามมาตรฐาน CISPR 22.....	97

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.26 แสดงสนามไฟฟ้าแพร่จากสายทองแดงซึ่งเปลี่ยนแปลงความยาว.....	98
6.27 แสดงสนามไฟฟ้าแพร่จากสายทองแดงซึ่งเปลี่ยนแปลงวงจรคิติกอล.....	99
6.28 แสดงสนามไฟฟ้าแพร่จากสายทองแดงซึ่งเปลี่ยนแปลงมุม.....	100
6.29 แสดงสนามไฟฟ้าแพร่จากสายทองแดงซึ่งเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะ.....	101
6.30 แสดงสนามไฟฟ้าแพร่จากสายทองแดงซึ่งเปลี่ยนแปลงรัศมี.....	102
6.31 แสดงสนามไฟฟ้าแพร่จากสายทองแดงซึ่งเปลี่ยนแปลงความกว้าง.....	103
6.32 แสดงสนามไฟฟ้าระยะไกลจากแผ่นวงจรพิมพ์.....	107
6.33 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม.....	108
6.34 แสดงเส้นขอบของการแพร่จากวงจรพิมพ์.....	109
6.35 แสดงขอบของสัญญาณจากการ interpolation และการแบ่งช่วงความถี่.....	110
6.36 แสดงการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมในการจำแนกแผ่นวงจรพิมพ์.....	113
6.37 แสดงการลดค่าผิดพลาดสูงสุดของโครงข่ายประสาทเทียมขณะทำการสอน เมื่อมีจำนวนของฮิดเดนเป็น 10 และ 20 โหนด.....	117
6.38 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายที่ใช้ในการเรียนรู้สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า.....	118
6.39 แสดงโครงสร้างของActivation Function ที่ใช้ในการปรับแต่งโครงข่ายประสาทเทียม.....	119
6.40 แสดงสายทองแดงซึ่งใช้ในการทดลอง.....	120
6.41 แสดงการรวมสัญญาณการวัดสัญญาณอิมพัลส์.....	121
6.42 แสดงการรบกวนโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้สัญญาณอิมพัลส์.....	121
6.43 แสดงสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งถูกปรับมุม.....	122
6.44 แสดงสนามไฟฟ้าจากสายทองแดงรูปตัว “I”.....	125
6.45 แสดงสนามไฟฟ้าจากสายทองแดงซึ่งถูกปรับมุม.....	125
7.1 แสดงกระบวนการในการออกแบบผลิตภัณฑ์.....	128
7.2 แสดงวิธีการในการลดเวลาในการออกแบบผลิตภัณฑ์.....	129
7.3 แสดงตำแหน่งการวัดของสนามระยะใกล้.....	130
7.4 แสดงการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะไกล.....	130
7.5 แสดงสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวัด.....	132
7.6 แสดงการสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกล.....	133
7.7 แสดงการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ XI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.8 แสดงการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล.....	136
7.9 แสดงผลการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	137
7.10 แสดงการรบกวน โครงข่ายประสาทเทียม.....	138
7.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโครงข่าย.....	139
7.12 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโครงข่ายเมื่อปรับจำนวนฮิดเดนเป็น 120	139
7.13 แสดงโครงสร้างของแผนวงจรพิมพ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการวัดและการคำนวณจาก CEM MOM และ NN.....	140
7.14 แสดงวิธีการเปรียบเทียบผลการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม MOM CEM.....	141
7.15 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าของ สายอากาศไดโพลหรือแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว "T" ($E_\theta, H_r, H_\phi = 0$).....	142
7.16 แสดงการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล.....	143
7.17 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าของสาย อากาศไดโพลหรือแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว "T" ($E_\theta, E_r, H_\phi = 0$).....	144
7.18 แสดงการแพร่คลื่นของลูปโดยการใช้ Moment Method และโครงข่ายประสาทเทียม	145
7.19 แสดงการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล โดยการใช้ Moment Method.....	147
7.20 แสดงการใช้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศไดโพล.....	148
7.21 แสดงการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศลูป.....	149
7.22 แสดงการทำนายการแพร่คลื่น โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (o: MOM, -: NN) ของลวดทองแดงรูปตัว "T" ที่ความถี่ 300 MHz.....	150
7.23 แสดงการทำนายการแพร่คลื่น โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (o:MOM, -:NN) ของลวดทองแดงรูปสี่เหลี่ยมหรือลูป.....	151
7.24 แสดงผลการคำนวณโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับการใช้ MOM CEM และการวัดจริง ของสายอากาศไดโพล หรือ "I"	152
7.25 แสดงผลการคำนวณสนามไฟฟ้าจากสายอากาศลูปรัศมี 3 cm โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม MOM CEM และการวัดจริง.....	153

คำอธิบายสัญลักษณ์/คำย่อ

I	กระแส (แอมแปร์)
t	เวลา(วินาที)
f	ความถี่(เฮิรตซ์)
v	แรงดัน(โวลต์)
E	สนามไฟฟ้า(โวลต์/เมตร)
H	สนามแม่เหล็ก(แอมแปร์/เมตร)
ϵ	เพอร์มิติบิลิตี
μ	เพอร์มิอিবิลิตี
J	ความเข้มของกระแสนำหน้า(แอมแปร์/เมตร)
σ	ค่าความนำไฟฟ้า
S	พื้นที่ของลูป(ตารางเมตร)
L	ความยาวของลวดตัวนำ
ρ	ความเข้มประจุ
ϕ	ปริมาณสเกลลาร์
R	ระยะทางจากจุดกำเนิดถึงจุดสังเกต
Re	จำนวนจินตภาพ
A	ศักร์เวกเตอร์
T	คาบเวลา(วินาที)
A_{bn}	สัมประสิทธิ์ฟูเรียร์
α_n	สัมประสิทธิ์ แอลฟา
ω	ความเร็วเชิงมุม
β	ค่าคงที่เฟส
t_r	เวลาขาขึ้น
t_d	เวลาพัลส์
t_f	เวลาขาลง
D	แฟกเตอร์ส่งผ่าน
L	ความยาวของวงจร
W	ความกว้างของวงจร
d	ความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์/คำย่อ (ต่อ)

Z	อิมพีแดนซ์
D	ระยะทางจากวงจรถึงจุดสังเกต
ZI	อิมพีแดนซ์ของโหลด
a	รัศมี
h	ความสูงของสายส่งเหนือกราวด์เพลน
ϕ	ฟลักซ์แม่เหล็ก
M	ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก
A_x	ศักระยะเวกเตอร์ตามแนวแกน X
A_z	ศักระยะเวกเตอร์ตามแนวแกน Z
k	เลขคลื่นในอวกาศอิสระ
σ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



บทที่ 1

บทนำ

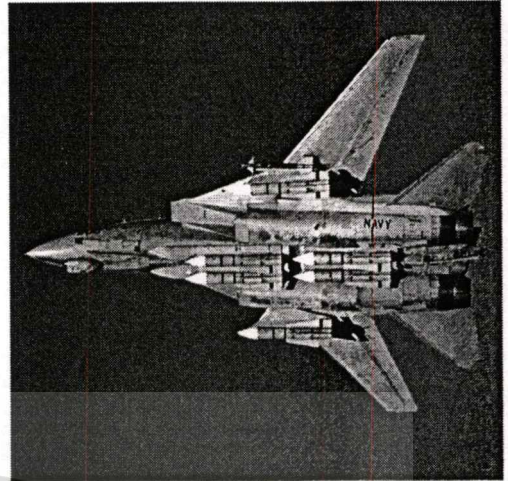
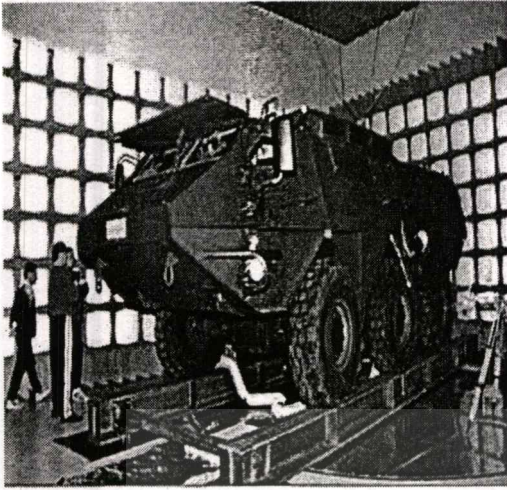
1.1 บทนำ

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ Electromagnetic Compatibility (EMI/EMC) ถูกกล่าวถึงเป็นครั้งแรกระหว่างปี 1940 และ 1950 โดยมีสาเหตุมาจากการทำงานของมอเตอร์ที่กำเนิดสัญญาณรบกวนเข้าไปในสายส่งกำลัง (Power Line) และก่อให้เกิดรบกวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความอ่อนไหวต่อการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากจุดเริ่มต้นนี้จนถึงปี 1960 EMI/EMC ได้กลายเป็นจุดสนใจของทางการค้าและทางทหาร ในการป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้พ้นจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นกรณีของสัญญาณจากเรดาร์รับ การทำงานของส่วนควบคุมขีปนาวุธหรือ สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ระบบนำร่องอัตโนมัติของเครื่องบินและเรือทำงานผิดพลาด ดังแสดงในรูปที่ 1.1

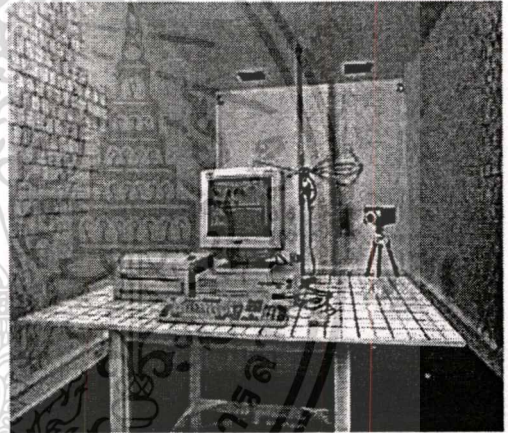
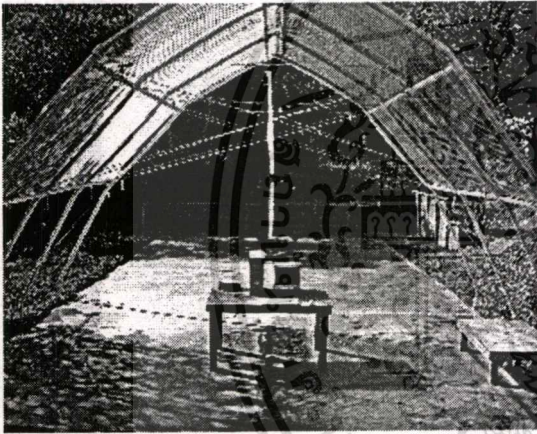
ในระหว่างปี 1970 และ 1980 การแผ่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากคอมพิวเตอร์กลายเป็นปัญหาใหญ่ของการกระจายเสียง (broadcast) รัฐบาลสหรัฐอเมริกา ตัดสินใจออกข้อบังคับทางแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ในทางอุตสาหกรรม หน่วยงานที่ว่านี้เรียกว่า FCC โดยมีหน้าที่เขียนข้อบังคับเกี่ยวกับอุปกรณ์และวิธีการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันกลุ่มสหภาพยุโรปก็จัดตั้งองค์กรออกกฎข้อบังคับเพื่อควบคุมการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ไปยังอุปกรณ์ข้างเคียง รูปที่ 1.2 แสดงการทดสอบทาง EMC ในทางการค้า

ในปี 1990 EMI/EMC ได้กลายเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างมากในทางการค้า หลายประเทศได้ตั้งข้อกำหนดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่จะนำเข้ามาขายในประเทศจะต้องผ่านการทดสอบทาง EMI/EMC โดยจะต้องผ่านการทดสอบใน 2 หัวข้อใหญ่ ๆ คือ การแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (Emission) และ ความคงทนต่อสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (Susceptibility) ในขณะเดียวกันอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์ทางการค้าก็ถูกบังคับด้วย แต่เงื่อนไขของการทดสอบในระดับที่อ่อนกว่า อุปกรณ์ทางการทหาร ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ทางการทหารมีระดับการทำงานที่สูงกว่า คือมีความเร็ว และความถี่ในการทำงานมากกว่าอุปกรณ์ทางการค้า

อุปกรณ์ทางการทหาร อวกาศ และ อุปกรณ์อื่น ๆ จะต้องอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของการแพร่สัญญาณของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อความปลอดภัยต่อการทำงานของอาวุธหรือการสื่อสารสัญญาณ โดยข้อกำหนดของการทดสอบดังกล่าวมีระดับที่ทดสอบเข้มกว่าทางการค้า การพิจารณาปัญหาทาง EMI/EMC ในขั้นตอนของการออกแบบจะเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลากว่าการทดสอบในระยะสุดท้ายของการประกอบอุปกรณ์



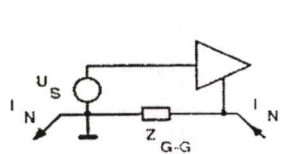
รูปที่ 1.1 แสดงการทดสอบทาง EMC ของอุปกรณ์ทางการทหาร



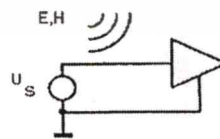
(ก) Open Area Test Site(OATS)

(ข) Semi-Anechoic Chamber

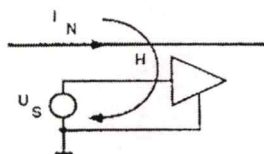
รูปที่ 1.2 แสดงการวัดทาง EMC ในพื้นที่ทดสอบตามมาตรฐาน



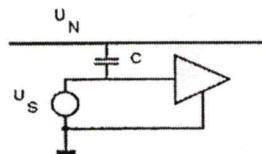
Common ground impedance coupling



Radiated field coupling



Inductive coupling



Capacitive coupling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 1.3 แสดงกลไกในการเกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า
 เมื่อการณี่ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI/EMC) มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในแต่ละเวลาบนตัวนำของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ หรือที่รู้จักกันว่าเป็นสัญญาณรบกวน $\frac{di}{dt}$ การเปลี่ยนแปลงของกระแสตามเวลานี้ทำให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือในอีกกรณีหนึ่งคือ พลังงานทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวน เข้าสู่วงจร ซึ่งจะทำให้เกิดการทำงานผิดพลาดของลอจิก (logic) หรือในภาคขยายของวงจร (amplifier) ตัวแปรอื่นๆ ที่ทำให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันเวลาขาขึ้น (rise-time) และขาลง (fall-time) มากก็จะมีปัญหาทาง EMI/EMC มากขึ้นด้วย นอกจากนี้สายของตัวนำหรือสายสัญญาณที่อยู่บนวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะประพฤติตัวเหมือนกับสายอากาศที่แพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาโดยที่ผู้ออกแบบมิได้มีเจตนา

การศึกษาการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดต่างชนิดกันและมีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น ลายทองแดง วงจรดิจิทัลอย่างง่าย ชิ้นส่วนของกระแสนาเล็ก จะทำให้เข้าใจพฤติกรรมการแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าของแต่ละชิ้นส่วนได้ และจะนำมาซึ่งการแก้ไขปัญหาการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดสาเหตุ

เมื่อประสบปัญหา EMC ผู้ออกแบบจะต้องทำการแก้ไข ตั้งแต่การวางอุปกรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ออกแบบวิธีการซิงค์ ใส่ตัวกรองสัญญาณ(Filter) หรือหากแก้ไขตามวิธีต่างๆแล้ว ยังไม่สามารถลดระดับสัญญาณรบกวนได้ การออกแบบลายทองแดงและวางเส้นของทองแดงใหม่บนแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกนำมาพิจารณา เมื่อถึงขั้นตอนนี้จะต้องเสียเวลาอย่างมากในการแก้ไข และจะยากอย่างยิ่งในกรณีที่แผ่นวงจรพิมพ์แบบหลายชั้น (multi layer PCB) การแก้ไขจะทำที่ละจุดจนกระทั่งสามารถลดระดับของสัญญาณรบกวนลงได้ จากนั้นจะต้องนำวงจรมานั้นมาทดสอบซ้ำเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ซึ่งจะต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายมาก

แต่เนื่องจากส่วนประกอบต่างๆที่อยู่บนแผ่น วงจรพิมพ์ มีจำนวนมากมาย หลายชนิด และมีพฤติกรรมในการแพร่คลื่นต่างกัน ขึ้นกับความถี่ของสัญญาณอินพุต ความยาวของเส้นทองแดง มุม จำนวนเส้นทองแดง เป็นต้น ทำให้ผู้ทดสอบไม่สามารถจำแนกหรือชี้บ่ง ชนิดหรือรูปแบบของแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยการพิจารณาจากลักษณะการแพร่คลื่น ดังนั้นเมื่อระดับสัญญาณเกินมาตรฐานก็จะทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายอย่างมากในการแก้ไขปัญหา หากสามารถรู้ว่าจะจุดใดหรือลายทองแดงชนิดใดแพร่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าออกมาจนเกินเส้นจำกัดตามมาตรฐาน [24] [25] ก็จะสามารถแก้ไขปัญหาได้ตรงจุดและประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

การจำแนกลักษณะของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยใช้โปรแกรมหรืออัลกอริทึมอื่นๆ หรือโดยมนุษย์ไม่สามารถทำได้ เพราะไม่สามารถจดจำข้อมูลความสัมพันธ์ของความถี่กับแอมพลิจูดเป็นจำนวนมากได้ นอกจากนี้ปัจจัยทางด้านการวัด เช่น ความไม่แน่นอนของการวัด (measurement uncertainty) สภาวะแวดล้อมทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Ambient noise) ก็ส่งผลให้ค่า

ในการวัดและการคำนวณผิดพลาด

อัลกอริทึมอื่นๆ [4][8]จะให้ค่าการคำนวณเป็นแบบค่าแอมพลิจูดคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ณ จุดความถี่นั้นๆ และไม่สามารถรองรับค่าขอบของการคำนวณ(boundary) ซึ่งเกิดจากความไม่แน่นอนในการวัดได้ ปัญหาดังกล่าวเป็นจุดด้อยหนึ่งในวงการ EMC ในปัจจุบัน

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นอัลกอริทึมที่นิยมใช้ในการจดจำและจำแนกรูปแบบของสัญญาณต่างๆ เช่น เสียง ภาพ ลายนิ้วมือ เป็นต้น มีความสามารถในการแก้ไขปัญหาซึ่งคลุมเครือ และสามารถกำจัดค่าความไม่แน่นอนในการวัดของระบบได้ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจดจำสนามแม่เหล็กจากการวัดระยะใกล้และสนามไฟฟ้าจากการวัดระยะไกล ซึ่งแพร่ออกมาจากสายทองแดงหรือวงจรดิจิทัลแต่ละแบบ โดยการสอนให้โครงข่ายเรียนรู้รูปร่างลักษณะของลายวงจรพิมพ์ทั้งหมด หลังจากสามารถจดจำลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ได้แล้วจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ให้จำแนกรูปแบบของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ โครงข่ายในวิทยานิพนธ์นี้สามารถจำแนกลายทองแดงได้หลายแบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ใช้โครงข่ายประสาทเทียมช่วยในการแก้ไขปัญหาการวัดและการคำนวณที่อัลกอริทึมแบบเก่าไม่สามารถทำได้
2. นำข้อมูลที่ได้จากการสอนหรือจดจำของโครงข่ายประสาทเทียม ไว้ใช้ในการแก้ไขปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้า
3. ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายการแพร่คลื่นระยะไกล โดยการใช้การแพร่คลื่นในระยะใกล้

1.3 ขอบข่ายของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการแพร่สนามแม่เหล็กระยะใกล้(Magnetic Near Field) และสนามไฟฟ้าระยะไกล (Electric Far Field) ของวงจรพิมพ์ซึ่งมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกัน จัดกลุ่มและจำแนกลายวงจรพิมพ์ โดยใช้การแพร่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

2. ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการจดจำและจำแนกชนิดของลายทองแดง โดยอาศัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแพร่ผ่านทางอากาศ (Radiated Emission) ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกัน เช่น แผ่น PCB ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความยาว ความกว้าง มุม รูปร่าง วงจรดิจิทัลอย่างง่าย

3. ประยุกต์โครงข่ายประสาทเทียมในการแปลงผลการวัดจากสนามแม่เหล็กระยะใกล้

(Near-Field) การซึ่งโดยทั่วไปจะสามารถทำในพื้นที่ทดสอบอย่างง่าย (shield room) และใช้อุปกรณ์ค่าไม่ต่ำกว่าครึ่งโหลทั้งหมด อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบซึ่งมีราคาไม่แพงมากนัก ไปเป็นผลการวัดสนามไฟฟ้าในสนามระยะไกล (Far-Field) ซึ่งเป็นอูรณ์ที่มีราคาแพง (Semi-Anechoic Chamber) และต้องใช้เวลาในการทดสอบนาน เพื่อเป็นประโยชน์ในการแก้ไขปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่อไป

4. เปรียบเทียบผลการทำนายการแพร่คลื่น โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียบกับอัลกอริธึมอื่นๆ

1.4 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

- บทที่ 1 บทนำ จะอธิบายถึงที่มาของการทำวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและความเป็นมาของการแพร่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า
- บทที่ 3 การจำลองการแพร่สนามแม่เหล็กระยะไกลของสายทองแดง การแพร่สนามไฟฟ้าในส่วนกระแสนขนาดเล็ก การใช้
- บทที่ 4 การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า จะอธิบายถึงโครงสร้างของห้องทดสอบและการวางโพลาไรซ์ของสายอากาศ
- บทที่ 5 อธิบายถึงโครงสร้างและการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม
- บทที่ 6 การทดลองและการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการจดจำและจำแนกสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า
- บทที่ 7 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลจากสนามแม่เหล็กระยะไกลและการเปรียบเทียบกับอัลกอริธึมอื่นๆ
- บทที่ 8 สรุป

บทที่ 2

ทฤษฎีทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1 ทฤษฎีทางฟิสิกส์และสมการของ แมกซ์เวลล์

ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้ามาจากทฤษฎีทางฟิสิกส์ โดยมีจุดกำเนิดมาจากสมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential) ของแมกซ์เวล (Maxwell) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ในตัวกลางต่างชนิดกัน การศึกษาปริมาณของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงได้ใน เทอม แรงดัน (V) และกระแส (I) [32]

2.2 สมการการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของแมกซ์เวล (Time Varying Maxwell's Equations)

สมการของแมกซ์เวล สามารถแสดงในเทอมของสมการดิฟเฟอเรนเชียล ได้ 4 รูปแบบตาม ความสัมพันธ์ของเวลา กับ สนามไฟฟ้า $E(t, x, y, z)$ และสนามแม่เหล็ก $H(t, x, y, z)$ ดังนี้

$$\nabla \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + J \quad (2.1)$$

แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.2)$$

แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าตามเวลาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก

$$\nabla \cdot \epsilon E = P \quad (2.3)$$

แสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์แม่เหล็ก ϵE ทำให้ความเข้มของประจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง

$$\nabla \cdot \mu H = 0 \quad (2.4)$$

เกรเดียนต์ ของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ J คือ ความเข้มของกระแสบนตัวนำ สมการที่ (2.1) ถึง (2.4) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง E และ H บนตัวกลางค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 คือ

$$\epsilon : \text{Permittivity} \quad \mu : \text{Permeability} \quad \sigma : \text{Conductivity}$$

อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะแสดง ความสัมพันธ์ของ E และ H จากสมการของ Maxwell ในรูปดิฟเฟอเรนเชียล (2.1) - (2.4) แต่เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ของสมการแมกซ์เวลล์ ในเทอมของสมการอินทิกรัล ซึ่งอ้างอิงกฎของฟาราเดย์ และ แอมแปร์ตามลำดับโดยใช้สมการ (2.5) - (2.8)

$$\oint E \cdot dL = \int_s \mu \frac{\delta H}{\delta t} \cdot dS \quad (2.5)$$

$$\oint H \cdot dL = I + \int_s \epsilon \frac{\delta E}{\delta t} \cdot dS \quad (2.6)$$

เมื่อ I คือ กระแสในเทอมอินทิกรัลของสมการ (2.5) และ (2.6) พิจารณาจากกฎของเกาส์ โดย

$$\int_s \epsilon E \cdot ds = \int_v \rho dv \quad (2.7)$$

$$\int_s \mu H \cdot ds = 0 \quad (2.8)$$

จากสมการอินทิกรัลข้างบนเทอม \oint หมายถึงการอินทิเกรตในวงรอบผิวปิด C

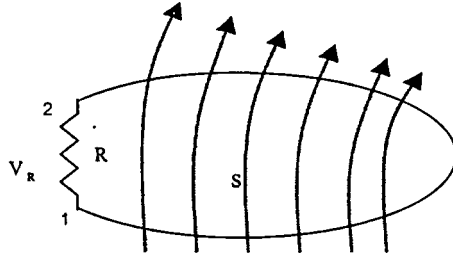
กฎของฟาราเดย์ แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กบนพื้นผิวของวงปิด จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นโดยรอบของตัวนำ จากรูปที่ 2.1 สายตัวนำวงปิด ต่อด้วยตัวต้านทาน R การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามเวลาบนพื้นผิว S จะกำเนิดกระแสขึ้นบนลวดตัวนำและทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมระหว่างตัวต้านทาน R ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\int_1^2 E \cdot dL + \int_2^1 E \cdot dL = \mu \int \frac{\delta H}{\delta t} \cdot ds \quad (2.9)$$

เมื่อการอินทิกรัลทำในทิศทวนเข็มนาฬิกา ค่าสนามไฟฟ้าเทอมแรกจะเป็น ศูนย์ และเมื่อความยาวของสายตัวนำมีค่าน้อยๆ เทอมอินทิกรัลที่ 2 จะแสดงแรงดันที่ตกคร่อมบนตัวต้านทาน

$$V_R = \int \mu \frac{\delta H}{\delta t} \cdot ds \quad (2.10)$$

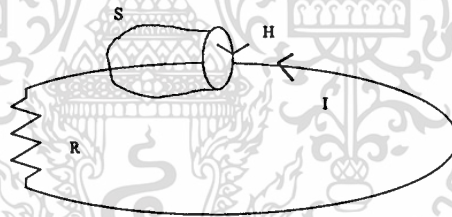
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กทำให้เกิดสนามไฟฟ้า

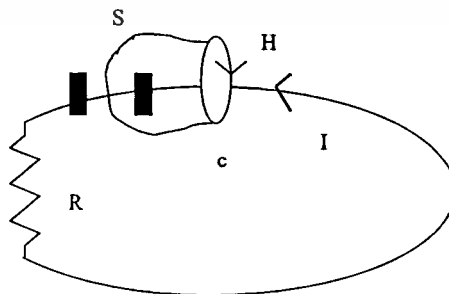
สมการ(10) แสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและแรงดันตกคร่อม V_R โดยการใช้กฎของแอมแปร์(Ampere) ผลรวมของสนามแม่เหล็กตามวงปิดมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลรอบวงปิด ซึ่งแสดงวงจรรูปที่ 2.2 พื้นผิวของวงปิดเป็น S การอินทิกรัลเชิงเส้นของสนามแม่เหล็ก รอบวงปิดมีค่าคงที่ การอินทิกรัลสนามแม่เหล็กรอบวงปิด C ทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำ I แสดงในสมการที่ (2.12)

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I = \frac{V_R}{R} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.2 กระแสในพื้นที่ลูปปิดจำกัด

หากนำตัวเก็บประจุ วางอย่างต่อเนื่องบนขดลวดตัวนำ ซึ่ง แสดงในรูป (2.3)



รูปที่ 2.3 ตัวเก็บประจุบนพื้นที่ลูปปิดจำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอมขวามือของสมการที่ (2.12) เป็นเทอมอินทริกัลของ $\epsilon \left(\frac{\delta E}{\delta t} \right)$ ซึ่งถูกเรียกว่า กระแสขจัด

เมื่อวงจรมีขนาดเล็ก การเปลี่ยนค่าของสนามแม่เหล็กบนวงจรจะส่งผลกระทบต่อส่วนอื่น ๆ ของวงจร จากนิยามนี้แสดงว่า สนามเดินทางหรือแพร่จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของวงจรคล้ายกับว่าถูก เชื่อมต่ออยู่ด้วยตัวเก็บประจุ และเป็นสาเหตุของการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3 การแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiating Fields)

สมการของแมกซ์เวลล์ ในอวกาศว่าง สามารถจัดรูปได้เป็น

$$\nabla \times H = \epsilon_0 \frac{\delta E}{\delta t} \quad (2.13)$$

$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\delta H}{\delta t} \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \epsilon_0 E = 0, \quad \nabla \cdot \mu_0 H = 0 \quad (2.15)$$

สมการของแหล่งกำเนิดอิสระ (independence source) สามารถแสดงโดยปริมาณเวกเตอร์ ซึ่งแปลงตามพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังในสมการ(2.16)

$$\nabla^2 E = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\delta^2 E}{\delta t^2} \quad (2.16)$$

$$\nabla^2 H = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\delta^2 H}{\delta t^2} \quad (2.17)$$

เมื่อ ϵ_0 และ μ_0 คือ ค่า permittivity และ permeability ในอวกาศอิสระ สมการทั้ง 2 นี้รู้จัก กันในชื่อของสมการคลื่น (wave equations) การกระตุ้นหรือการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุด หนึ่ง ทำให้เกิดคลื่นแพร่ออกไปยังบริเวณอื่นๆ

$$\frac{\delta^2 E}{\delta z^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\delta^2 E_z}{\delta t^2} \quad (2.18)$$

หรือ อีกรูปหนึ่ง คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} = 0 \quad (2.19)$$

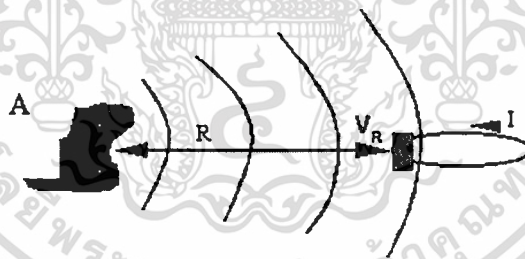
เมื่อ $C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ คือ ความเร็วของแสงในอวกาศ

สมการของสนามโดยทั่วไปมีความยุ่งยากมากและขึ้นกับ แหล่งกำเนิดและรูปร่างของสนามไฟฟ้า E_z จะต้องเกิดจากการรวมของฟังก์ชันในสมการที่ (2.20)

$$E_z = f(z - ct) + g(z + ct) \quad (2.20)$$

สมการ (2.20) แสดงแม่เหล็กที่ตำแหน่ง A แพร่หรือเดินทางไปยังจุด B ด้วยความเร็วเท่ากับแสง C สมมุติว่าจุด A และ B อยู่ห่างจากบริเวณที่กำเนิดสนามไฟฟ้า R ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ถ้าบริเวณนี้มีสนามไฟฟ้าเล็กน้อย ผลของการหมุนตัวกำเนิด J จะสร้างแรงดันตกคร่อม V_R ขึ้นเล็กน้อย ซึ่งหมายความว่า การแพร่คลื่นมาไม่ถึงบริเวณที่ขดลวดวางอยู่ ดังนั้นจะไม่มีแรงดันตกคร่อม V_R

ในขณะเดียวกันถ้าระยะ R มีค่ามากพอ (ขึ้นอยู่กับ ความแรงของตัวกำเนิด) ผลของแหล่งกำเนิดจะส่งผลไปยังขดลวด โดยจะส่งพลังงานเข้าไปยังขดลวดทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม R บริเวณในย่านนี้เรียกว่า อยู่ในสนามการแพร่



รูปที่ 2.4 แสดงการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะ R

2.4 การหาสนาม โดยการใช้ศักย์ (Field Solution Using Potentials)

สมการของแมกซ์เวลล์ถูกแสดงโดยสมการพาเซิล ดิฟเฟอเรนเชียล ลำดับที่ 1 ซึ่งสามารถแก้ได้โดยพิจารณา สนามจากแหล่งกำเนิดกระแส ณ จุดใดๆ ในอวกาศ ซึ่งสามารถแสดงค่าในเทอมของศักย์แบบสเกลาร์ และ ศักย์แบบเวกเตอร์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ที่ขึ้นกับกระแส

กำหนดให้ P ความเข้มประจุ J_e ความเข้มกระแส ϕ ปริมาณสเกลาร์ ศักย์เวกเตอร์ A แสดงได้ใน สมการ ดิฟเฟอเรนเชียลดังนี้

$$\nabla^2 A - \mu\epsilon \frac{\delta^2 A}{\delta t^2} = -\mu J_e \quad (2.21)$$

$$\nabla^2 \phi - \mu\epsilon \frac{\delta^2 \phi}{\delta t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.22)$$

ความสัมพันธ์ของ E, H, A และ ϕ คือ

$$E = -\nabla\phi - \frac{\delta A}{\delta t} \quad (2.23)$$

$$H = \frac{1}{\mu} \nabla \times A \quad (2.24)$$

$$\nabla \cdot A = -\mu\epsilon \frac{\delta \phi}{\delta t} \quad (2.25)$$

สมการ (2.26) และ (2.27) ถูกบังคับใช้ ณ จุดหนึ่งในอวกาศของแหล่งกำเนิดกระแส J_e ถ้ากระแส J สามารถแสดงให้เห็นว่าศักย์สามารถกระจายอย่างต่อเนื่องหรือโดยการอินทิกรัลเทอมของประจุ และการกระจายของกระแส

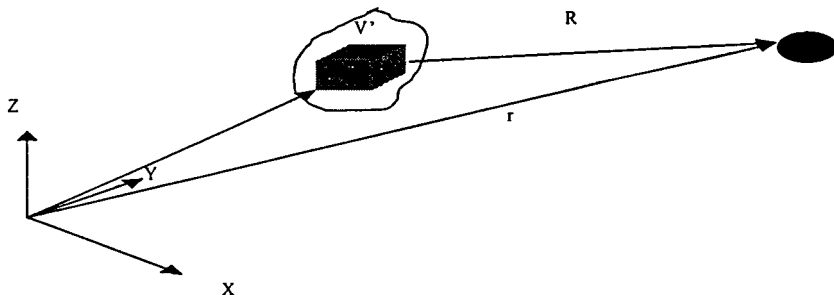
$$\phi = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{P_{ret}}{R} dv \quad (2.26)$$

$$A = \frac{4}{4\pi} \int \frac{J_{ret}}{R} dv \quad (2.27)$$

เมื่อ R คือระยะทางจากตัวกำเนิดกระแส ถึงจุดสังเกต

ret คือ การเปลี่ยนแปลงของประจุและกระแสลดตามเวลา $t - \frac{R}{C}$

C คือ ความเร็วแสงในตัวกลาง



รูปที่ 2.5 แสดงการหาศักย์สนามไฟฟ้าที่ระยะ r ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สมการแมกซ์เวลล์ในโดเมนความถี่ (Maxwell's Equations in Frequency Domain)

สมการแมกซ์เวลล์ในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของ E และ H สำหรับแหล่งกำเนิดที่มีการเปลี่ยนแปลง รูปแบบของคลื่นขึ้นอยู่กับรูปร่างและยังคงอธิบายได้ โดยสมการแมกซ์เวลล์ และแสดงอยู่ในเทอมของสถานะคงที่ (steady-stady) ของระบบซึ่งมีสัญญาณรูปแบบไซน์ $\sin(\omega t)$ เมื่อ ω คือ ความถี่ของ ออสซิลเลเตอร์โดยพฤติกรรมของตัวออสซิลเลเตอร์จะสัมพันธ์กับเวลาฮาร์มอนิก (time-harmonic) หรือโดเมนความถี่ (frequency-domain) สามารถแทนได้โดยสมการ(2.28)

$$E(t, x, y, z) = \tilde{E}(x, y, z) \cos \omega(t) \quad (2.28)$$

โดยการใช้ เทคนิค เฟสเซอร์ จะได้

$$E(t, x, y, z) = \tilde{E}(x, y, z) \cos(\omega t) = R_e \left\{ \tilde{E}(x, y, z) e^{j\omega t} \right\} \quad (2.29)$$

$$H(t, x, y, z) = \tilde{H}(x, y, z) \cos(\omega t) = R_e \left\{ \tilde{H}(x, y, z) e^{j\omega t} \right\} \quad (2.30)$$

สมการ ของแมกซ์เวลล์ แสดงโดย

$$\nabla \times \tilde{H} = j\omega \epsilon \tilde{E} + \tilde{J} \quad (2.31)$$

$$\nabla \times \tilde{E} = -j\omega \mu \tilde{H} \quad (2.32)$$

สนามฮาร์มอนิกเชิงเวลา (time-harmonic) มีประโยชน์ในการแก้ไขปัญหาทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น สาขาอากาศตัวออสซิลเลเตอร์ความถี่เดียว ในขณะที่เดียวกันรูปแบบของสัญญาณสามารถใช้ ทฤษฎีฟูเรียร์ ในรูปของไซน์ได้

เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ เวลาฮาร์มอนิก (time-harmonic) สเกลลาร์ ϕ และศักย์เวกเตอร์ A จะได้สมการ (2.33) (2.34) และ (2.35) ดังนี้

$$\nabla^2 \tilde{A} + \mu \epsilon \omega^2 \tilde{A} = -\mu \tilde{J}_c \quad (3.33)$$

$$\nabla^2 \tilde{\phi} + \mu\epsilon\omega^2 \tilde{\phi} = \frac{-\rho}{\epsilon} \quad (3.34)$$

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{A}} = -j\omega\mu\epsilon \tilde{\phi} \quad (3.35)$$

สนาม $\tilde{\mathbf{E}}$ หาได้จากสมการ

$$\tilde{\mathbf{E}} = \frac{-j}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \tilde{\mathbf{A}}) - j\omega\tilde{\mathbf{A}} \quad (3.36)$$

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_{v'} J_z \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (3.37)$$

ส่วนของสนาม $\tilde{\mathbf{E}}$ สามารถหาได้จากการทำอินทิกรัลของสมการกระแส

$$E_z = \frac{-j}{4\pi} \int_{v'} k^2 \frac{e^{-jkR}}{R} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (3.38)$$

บทที่ 3

การจำลองการแพร่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

โดยการใช้โปรแกรม

3.1 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้และระยะไกล

การศึกษาพฤติกรรมของการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแบ่งกรณีศึกษาออกได้ตามลักษณะของแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยทั่วไปจะใช้ทฤษฎี ของสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบรูป [11] [12] บริเวณรอบๆ ของสายอากาศ หรือ แหล่งกำเนิดอื่นๆ ถูกแบ่งออกเป็น 3 บริเวณคือ ย่านสนามระยะใกล้ (reactive near-field) ย่านการแพร่สนามระยะใกล้ (radiating near-field) และ ย่านสนามระยะไกล (far-field)

บริเวณสนามระยะใกล้ (reactive near-field)

- สนามลดลงตามค่า $E \propto \frac{1}{r^n}$ และ $H \propto \frac{1}{r^m}$ เมื่อ $n, m > 1$
- ด้านนอกของ reactive near-field เป็น $r = \frac{\lambda}{2\pi}$ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น

บริเวณสนามระยะใกล้ (radiating near-field)

- การทำนายสนามในระยะนี้ไม่สามารถทำได้ เพราะสนามจะแกว่งแบบไม่คงที่ โดยมีขอบด้านนอกอยู่ที่ $\frac{D^2}{4\lambda}$ ตามสมการของ Adams
- ระยะนี้อยู่ระหว่าง reactive near-field และ far-field
- บริเวณนี้จะไม่เกินระยะ $D \ll \lambda$ เมื่อ D เป็นค่ามากที่สุดของมิติ ของแหล่งกำเนิด

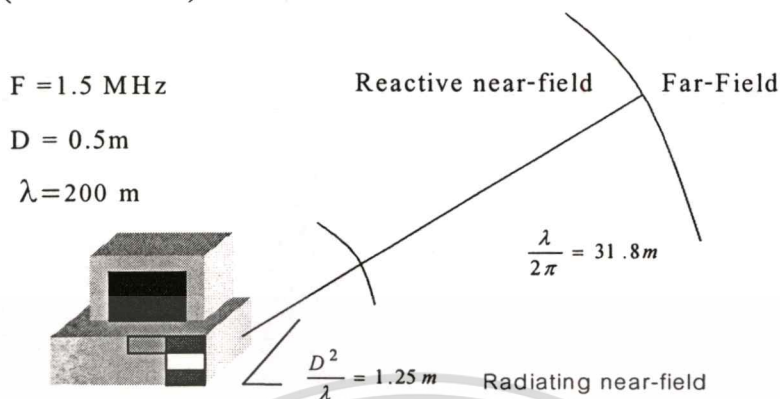
บริเวณสนามระยะไกล (far-field)

- สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่น และตั้งฉากต่อกันตามระนาบคลื่น
- สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กลดลงตามระยะ $\frac{1}{r}$
- สนามการแพร่กระจายเชิงมุมไม่ขึ้นกับระยะทาง
- การแปลงจากย่าน radiating และ far-field สามารถหาได้จาก $r = \frac{D^2}{\lambda}$

แต่ระยะทางจะอยู่ระหว่าง $\frac{D^2}{2\lambda}$ และ $\frac{2D^2}{\lambda}$ ขึ้นอยู่กับการ deviation จาก $\frac{1}{r}$

คอมพิวเตอร์ในรูปที่ 3.1 ค่าการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ความถี่ $f = 1.5 \text{ MHz}$ จากสวิทซ์เพาเวอร์ซัพพลาย ในตัวอย่าง บริเวณ reactive near-

field ที่ระยะมากกว่า บริเวณ radiating near-field จะต้องมิมิติ ของแหล่งกำเนิดจะต้องเล็กกว่า ความยาวคลื่น $\left(\frac{D^2}{\lambda} = 1.25m \right)$



รูปที่ 3.1 การกำหนดสนามระยะไกลและระยะใกล้ของคอมพิวเตอร์

3.2 อิมพีแดนซ์คลื่น (WAVE IMPEDANCE)

อิมพีแดนซ์คลื่น ถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของสนามไฟฟ้า ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

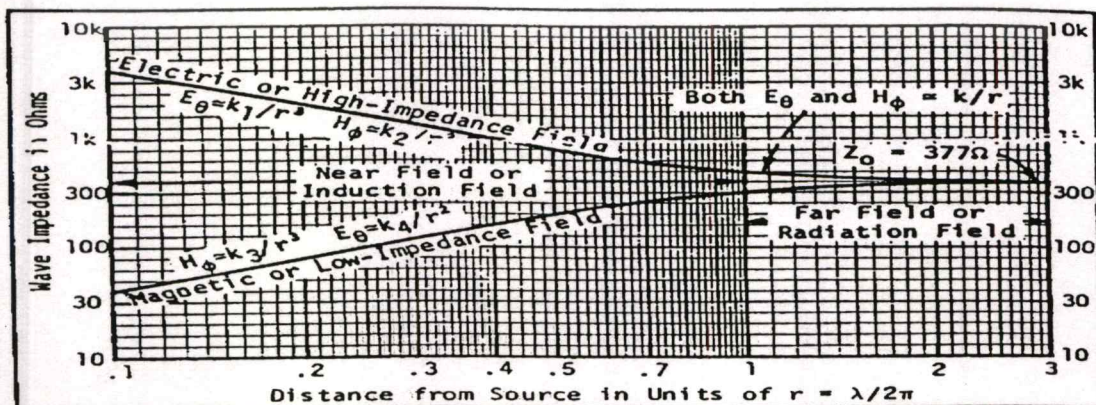
$$Z_\omega = \frac{E_t}{H_t} \tag{3.1}$$

อิมพีแดนซ์คลื่น ระนาบ หรือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง ถูกกำหนดให้เป็น

$$Z_\omega = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tag{3.2}$$

เมื่อ μ และ ϵ คือ permeability และ permittivity ของตัวกลางตามลำดับ อิมพีแดนซ์คลื่น ระนาบถูกกำหนดให้เป็น Z_0 และมีค่าเป็น

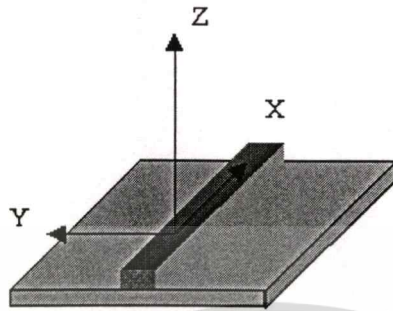
$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega \tag{3.3}$$



รูปที่ 3.2 แสดงอิมพีแดนซ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับระยะทาง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 นามแม่เหล็กระยะใกล้(Near-Field)

นามแม่เหล็กที่กำหนดโดยกระแสเคลื่อนที่บนสายส่งความยาว λ บนตัวนำบนพื้นที่จำกัด หาได้จากสมการ(3.4),(3.5) [3] [9] [28][29][30][31][32]



รูปที่ 3.3 กระแสบนสายทองแดงของ PCB

$$H_y = \frac{1}{\mu_o} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \quad (3.4)$$

$$H_x = \frac{1}{\mu_o} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อ A_x คือ ศักย์เวกเตอร์ตามทิศ X ของกระแสที่เคลื่อนที่บนสายส่งและกระแสเสมือน

$$A_x = \frac{\mu_o}{4\pi} \left\{ \int_0^\lambda I(x') \frac{\exp(-jkr_{x1})}{r_{x1}} dx' - \int_0^\lambda I(x') \frac{\exp(-jkr_{x2})}{r_{x2}} dx' \right\} \quad (3.6)$$

และ

$$r_{x1} = \sqrt{(x - x')^2 + y^2 + (z - h)^2} \quad (3.7)$$

$$r_{x2} = \sqrt{(x - x')^2 + y^2 + (z + h)^2} \quad (3.8)$$

A_z คือ ศักย์เวกเตอร์ตามทิศทางแกน Z เมื่อกระแสเคลื่อนที่บนสายตัวนำ

$$A_z = \frac{\mu_o}{4\pi} \left\{ \int_{-h}^h I(o) \frac{\exp(-jkr_{z1})}{r_{z1}} dz' - \int_{-h}^h I(\lambda) \frac{\exp(-jkr_{z2})}{r_{z2}} dz' \right\} \quad (3.9)$$

และ

$$r_{z1} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - z')^2} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_{z2} = \sqrt{x^2 + (y - \lambda)^2 + (z - z')^2} \quad (3.11)$$

กำหนดให้กระแสเริ่มต้นที่จุด x' เป็น

$$I(x') = \frac{V_g}{\Delta} \left\{ \cos \beta(\lambda - x') + j \frac{R\lambda}{Z_o} \sin \beta(\lambda - x') \right\} \quad (3.12)$$

เมื่อ

$$\Delta = (R_g + R_\lambda) \cos \beta\lambda + j (Z_o + R_g R\lambda / Z_o) \sin \beta\lambda \quad (3.13)$$

เมื่อ

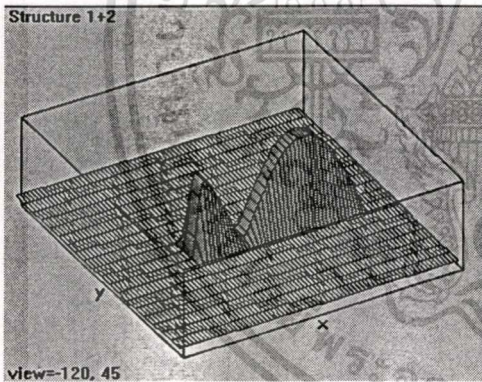
v_g คือ แรงดันเอาต์พุตที่ทุกตกรวมตัวด้านทาน R_g

R_λ คือ ตัวต้านทานโหลด

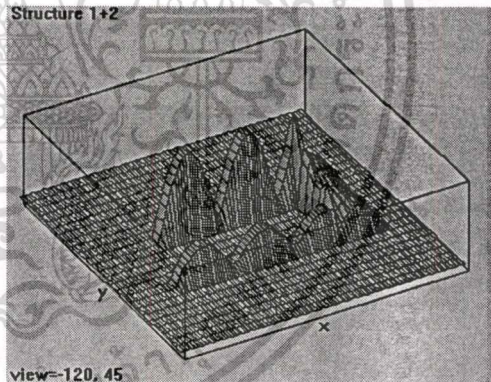
Z_o คือ อิมพีแดนซ์ของไมโครสตริป

β คือ ค่าคงที่เฟสของไมโครสตริป

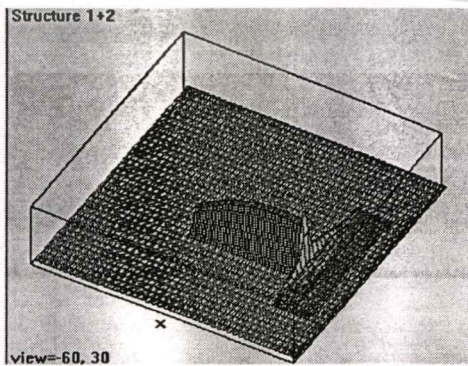
รูปที่ 3.4 ถึง 3.11 แสดงการแพร่คลื่นแม่เหล็กออกจากแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ซึ่งคำนวณได้จากการใช้สมการที่ (3.4) ถึง (3.5) ที่ความถี่ 90 MHz



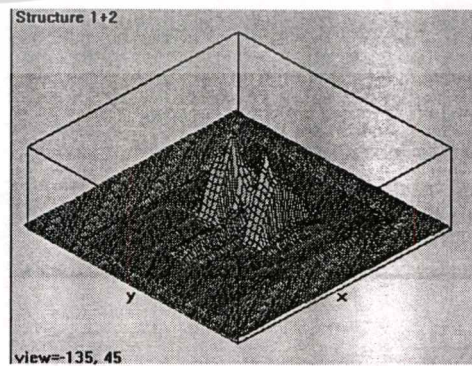
(ก) PCB รูปตัว "I"



(ข) PCB รูปตัว "U"

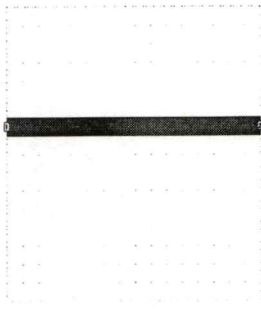


(ค) PCB รูปตัว "T"

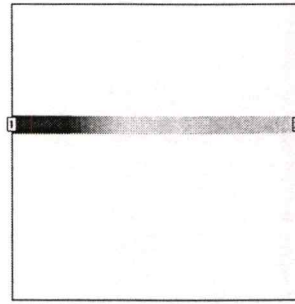
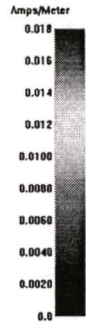


(ง) PCB รูปตัว "T" บนกราวด์เพลน

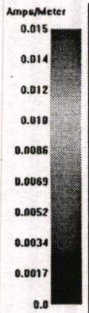
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.4 แสดงการแพร่สนามแม่เหล็กกระยะใกล้จากแผ่นวงจรพิมพ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทางสน. อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



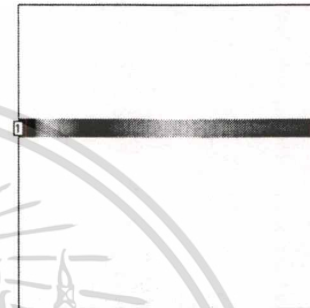
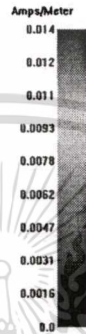
(ก) PCB รูปตัว "I"



(ข) $t = 1\text{ns}$

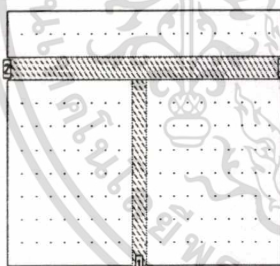


(ค) $t = 3\text{ns}$

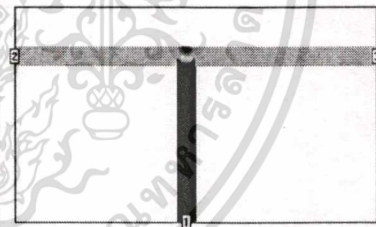


(ง) $t = 5\text{ns}$

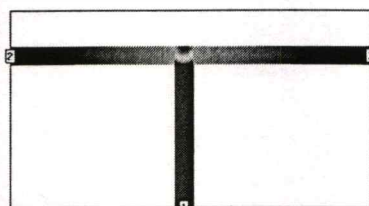
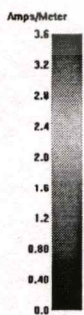
รูปที่ 3.5 แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กของ PCB ตัว I



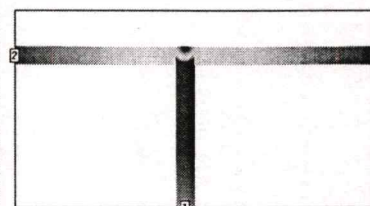
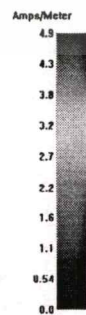
(ก) PCB รูปตัว "T"



(ข) $t = 1\text{ns}$



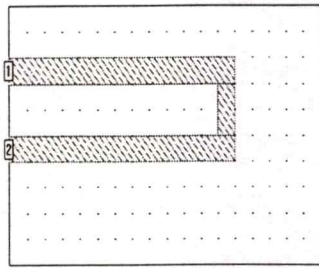
(ค) $t = 3\text{ns}$



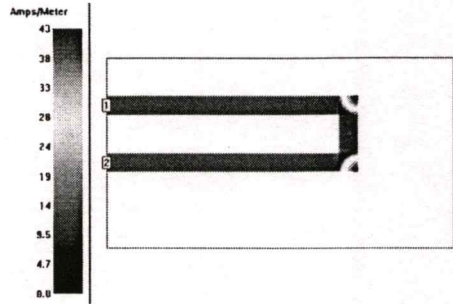
(ง) $t = 5\text{ns}$

รูปที่ 3.6 แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กของ PCB ตัว T

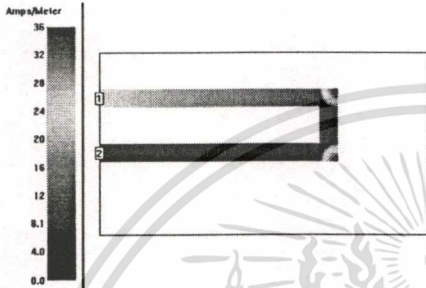
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



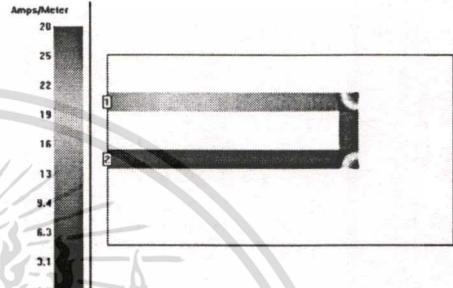
(ก) PCB รูปตัว "U"



(ข) $t = 1ns$

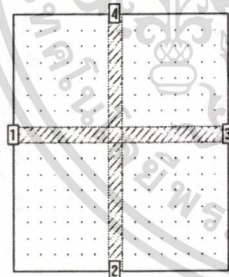


(ค) $t = 3ns$

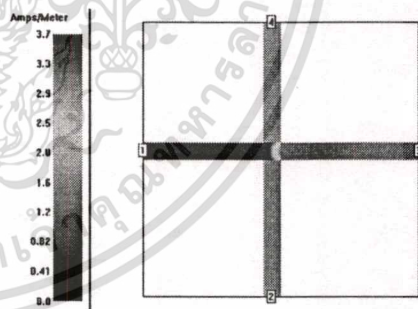


(ง) $t = 5ns$

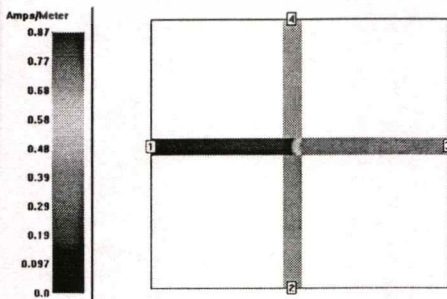
รูปที่ 3.7 แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กของ PCB ตัว U



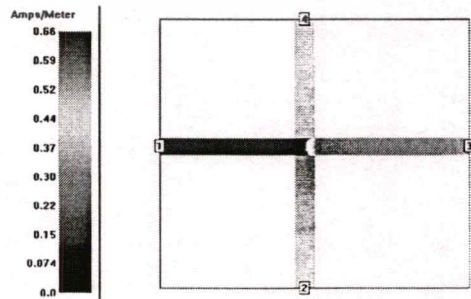
(ก) PCB รูปตัว "X"



(ข) $t = 1ns$

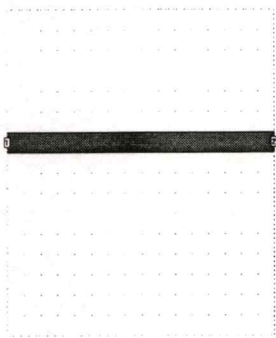


(ค) $t = 3ns$

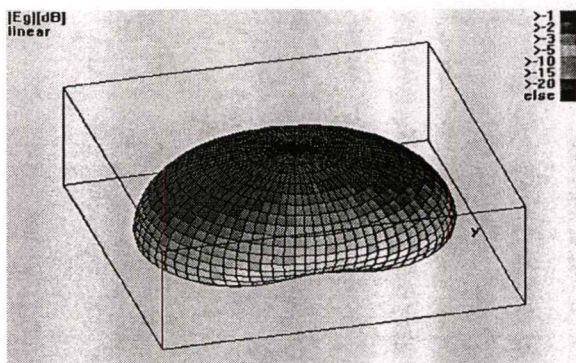


(ง) $t = 5ns$

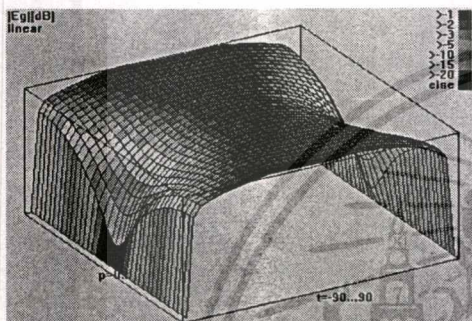
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.8 แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กของ PCB ตัว X
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



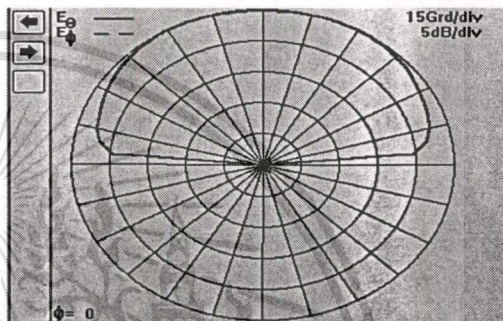
(ก) PCB รูปตัว "T"



(ข) สนามไฟฟ้าระยะไกล(spherical coordinate)

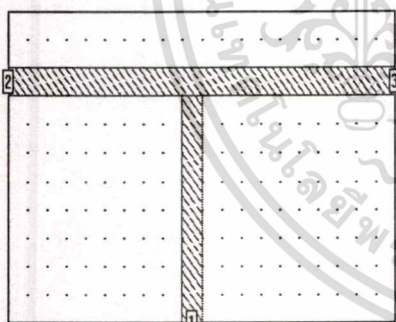


(ค) สนามไฟฟ้าระยะไกล(rectangular coordinate)

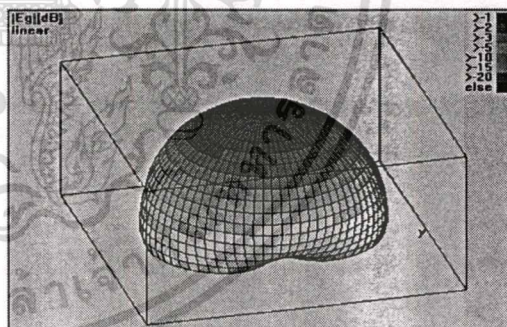


(ง) Polar Plot

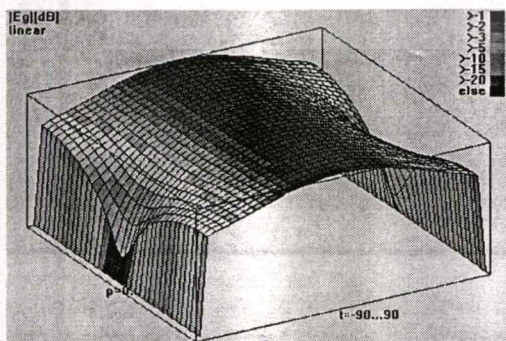
รูปที่ 3.9 แสดงผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว "T"



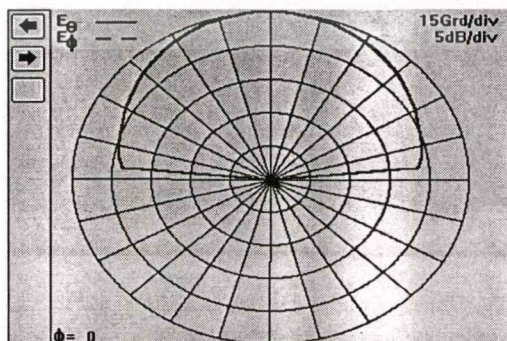
(ก) PCB รูปตัว "T"



(ข) สนามไฟฟ้าระยะไกล(spherical coordinate)



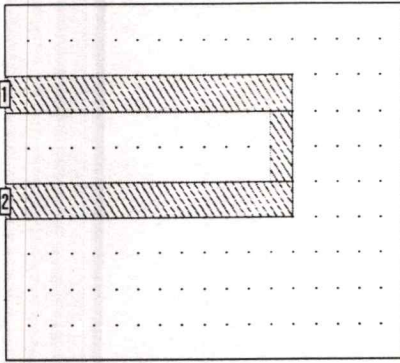
(ค) สนามไฟฟ้าระยะไกล(rectangular coordinate)



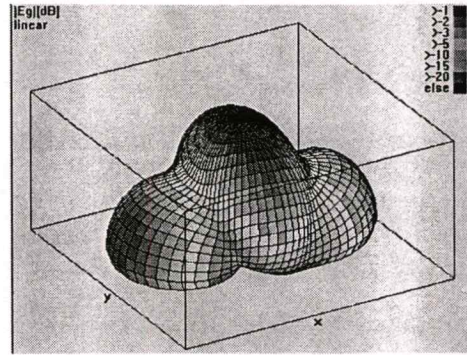
(ง) Polar Plot

รูปที่ 3.10 แสดงผลการวัดสนามระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว "T"

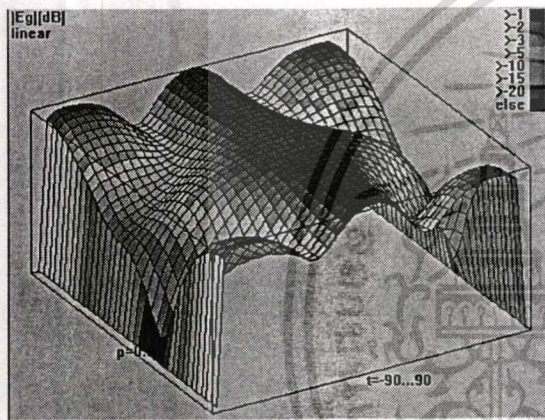
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



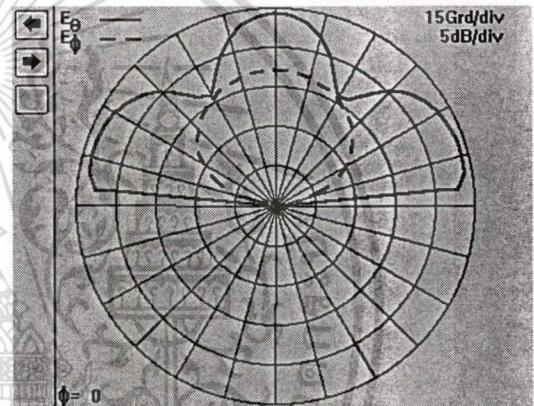
(ก) PCB รูปตัว “T”



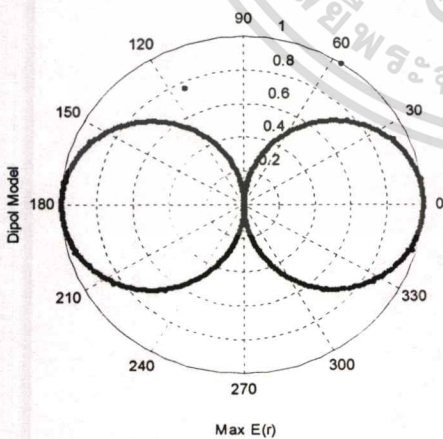
(ข) สนามไฟฟ้าระยะไกล(spherical coordinate)



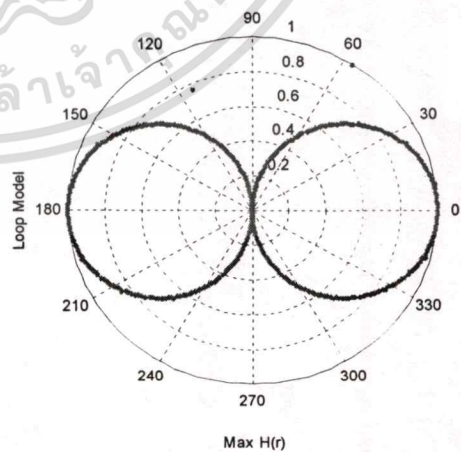
(ค) สนามไฟฟ้าระยะไกล(rectangular coordinate)



(ง) Polar Plot



(จ) สนามไฟฟ้าจากไดโพล (E_r)



(ฉ) สนามไฟฟ้าจากลูป (H_r)

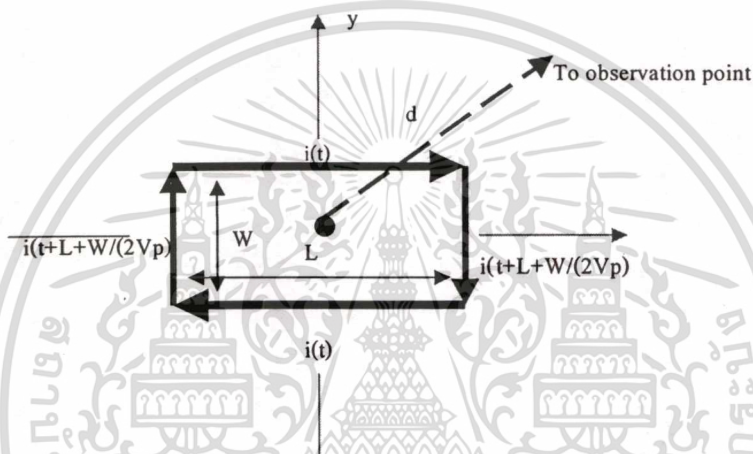
รูปที่ 3.11 แสดงผลการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “U” และสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การแพร่สนามไฟฟ้าของวงจรถนขนาดเล็ก

การแพร่ของสนามไฟฟ้ามีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสตามเวลา ระยะทางที่กระแสเดินทาง รูปร่างลักษณะของเส้นทางเดินกระแสความถี่ และแอมพลิจูดของสัญญาณขาเข้า [11] [20] [27]

วงจรถนแบบ rectangular หรือ รูปขนาดเล็กในแต่ละอันจะประกอบด้วย ความยาว L และความกว้าง W ซึ่งแต่ละส่วนมีความยาวไม่เกิน $\frac{1}{16}(c/f)$ ซึ่งก็หมายความว่ามีความถี่ต่ำกว่าหรือเท่ากับ $\frac{1}{4}(c/f)$ รูปแบบโมเดลของวงจรถนหรือรูปขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 3.12



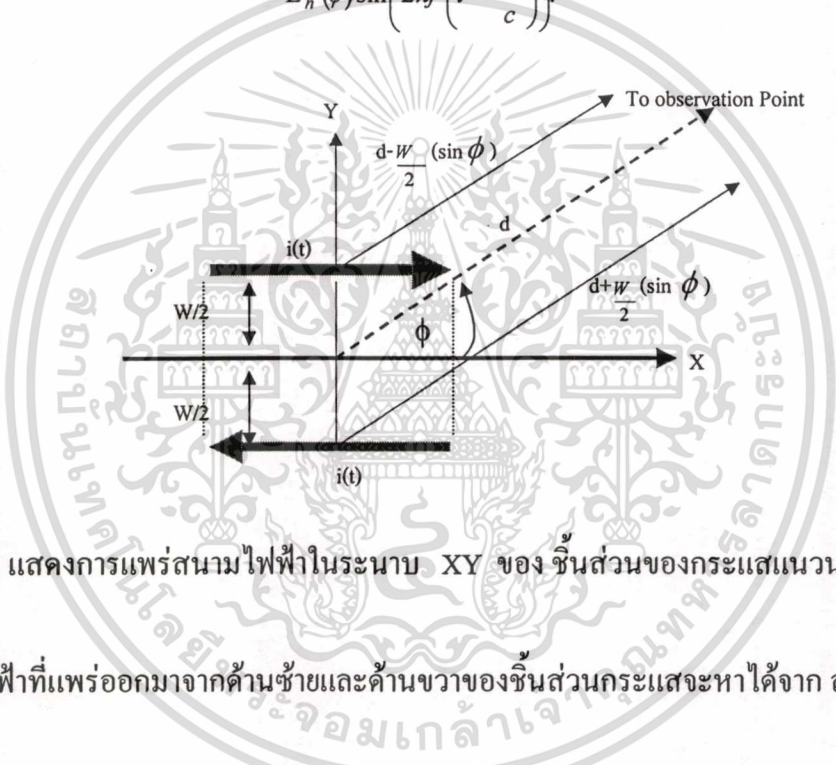
รูปที่ 3.12 แสดง ส่วนประกอบของชิ้นส่วนกระแส ของวงจรถนขนาดเล็ก

ถ้ากระแสที่กึ่งกลางของชิ้นส่วนกระแสในแนวนอนคือ $i(t)$, กระแสที่ส่วนซ้ายมือของวงจรถนในรูปที่ 3.12 จะเป็น $i\left(t + \frac{L+W}{2v_p}\right)$ เมื่อ v_p คือ ความเร็วเฟส ในอีกนัยหนึ่ง $\frac{L+W}{2v_p}$ คือเวลาของการแพร่คลื่น สำหรับเฟสของกระแสซึ่งเดินทางจากแหล่งกำเนิดถึงกึ่งกลางของแนวนอน (horizontal) วงจรถนกระแส (current element) และกระแสที่กึ่งกลางของวงจรถนด้านขวาของ ชิ้นส่วนของกระแสแนวตั้ง (vertical current element) จะเป็น $i\left(t - \frac{L+W}{2v_p}\right)$ เพราะว่า $\frac{L+W}{2v_p}$ คือ เวลาเฟสของกระแสซึ่งเดินทางจากกึ่งกลางชิ้นส่วนกระแสแนวนอน (horizontal current element) ถึงกึ่งกลางด้านขวาของชิ้นส่วนกระแสแนวตั้ง (vertical current element) เมื่อ d คือระยะทางจากจุดสังเกตถึงจุดศูนย์กลางของวงจรถน rectangular

3.4.1 การแพร่สนามไฟฟ้าในระนาบ XY

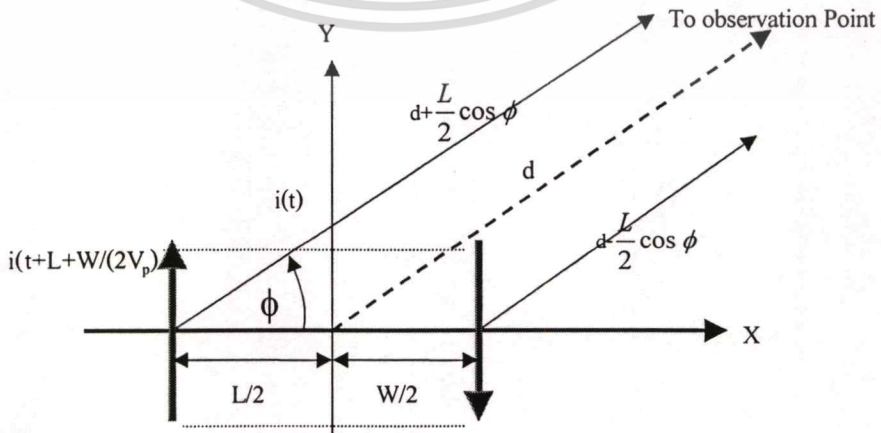
สมมติว่าวงจรมอดูเลเตอร์หรือรูปทรงแท่งที่จุดกึ่งกลางของระนาบ XY ดังแสดงในรูปที่ 3.13 กระแส $i(t) = |I| \sin(2\pi ft)$ สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากด้านบนและด้านล่างของชิ้นส่วน กระแสจะหาได้จาก สมการที่ 3.14 [20]

$$\begin{aligned}
 E_{\mu}(t) + E_{\lambda}(t) &= E_e(\phi) \cos\left(2\pi f\left(t - \frac{d}{c}\right) + \pi W_{\lambda} \sin \phi\right) \\
 &\quad - E_e(\phi) \cos\left(2\pi f\left(t - \frac{d}{c}\right) - \pi W_{\lambda} \sin \phi\right) \\
 &= -2E_e(\phi) \sin(\pi W_{\lambda} \sin \phi) \sin\left(2\pi f\left(t - \frac{d}{c}\right)\right) \\
 &= E_h(\phi) \sin\left(2\pi f\left(t - \frac{d}{c}\right)\right)
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$



รูปที่ 3.13 แสดงการแพร่สนามไฟฟ้าในระนาบ XY ของ ชิ้นส่วนของกระแสแนวอน

สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากด้านซ้ายและด้านขวาของชิ้นส่วนกระแสจะหาได้จาก สมการที่ 3.15



รูปที่ 3.14 แสดงการแพร่สนามไฟฟ้าในระนาบ XY ของ ชิ้นส่วนกระแสแนวตั้ง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นผลรวมของการแพร่คลื่นจากวงจรขึ้นส่วนกระแสแนวตั้ง เป็น

$$\begin{aligned}
 E_h(t) &= E_\lambda(t) + E_r(t) \\
 &= E_\lambda(\phi) \cos\left(2\pi f\left(t - \frac{d}{c}\right) + \pi(L_\lambda' + W_\lambda' - L_\lambda \cos \phi)\right) \\
 &\quad - E_\lambda(\phi) \cos\left(2\pi f\left(t - \frac{d}{c}\right) - \pi(L_\lambda' + W_\lambda' - L_\lambda \cos \phi)\right) \\
 &= -2E_\lambda(\phi) \sin(\pi(L_\lambda' + W_\lambda' - L_\lambda \cos \phi)) \sin\left(2\pi f\left(t - \frac{d}{c}\right)\right) \\
 &= E_v(\phi) \sin\left(2\pi f\left(t - \frac{d}{c}\right)\right). \tag{3.15}
 \end{aligned}$$

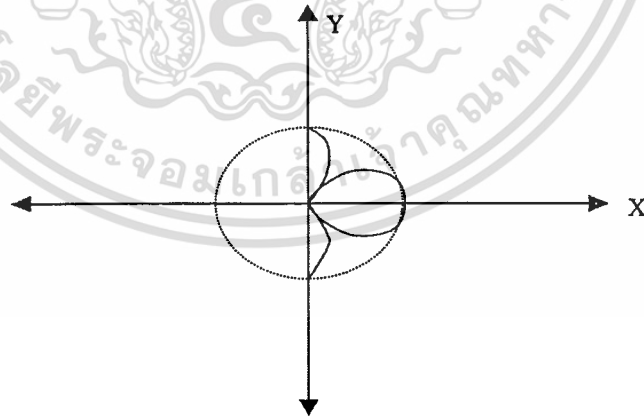
จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) ผลรวมของการแพร่สัญญาณ ในระนาบจะเป็น

$$E_{xy}(t) = (E_y(\phi) + E_h(\phi)) \sin\left(2\pi f\left(t - \frac{dc}{c}\right)\right) \tag{3.16}$$

$$|E_{xy}(\phi)| = \frac{\pi Z_o |I| W_\lambda L_\lambda}{d}, \tag{3.17}$$

อย่างไรก็ตาม เมื่อความกว้างและความยาวของลูปมีขนาดเล็กมากๆ โดยค่าน้อยที่สุดซึ่ง L_λ' สามารถเป็นได้คือ L_λ และ ค่าน้อยที่สุดของ W_λ' สามารถเป็นได้คือ W_λ และค่าทั้ง 2 มากกว่า 0

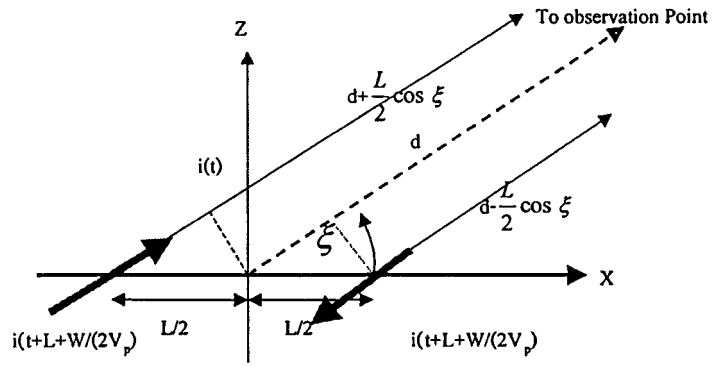
ค่าแตกต่างระหว่าง $|E_{xy}(\phi)|$ และ เมื่อคำนวณความเร็วเฟส ($|E'_{xy}(\phi)|$) และ $L = W, L_\lambda' = L_\lambda$ และ $W' = W_\lambda$ ถูกแสดงในรูปที่ (3.15)



รูปที่ 3.15 $|E_{xy}(\phi)(-)|$ และ $|E_{xy}(\phi)(..)|$

3.4.2 การแพร่สนามไฟฟ้าในทิศทางอื่น

สมมติให้วงจรถูกวางในระนาบ XZ ดังส่วนข้างบน รูปแบบของสัญญาณแพร่กระจายในระนาบ XZ หาได้จากตำแหน่งของขึ้นส่วนกระแส ซึ่งมีความยาว L_λ ในระนาบ ถึงจุดสังเกต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แสดงการแพร่สนามไฟฟ้าในระนาบ XZ ของชิ้นส่วนกระแส ความยาว W_λ และ ส่วนชิ้นส่วนกระแสด้านขวามือ ซึ่งแพร่สัญญาณสนามไฟฟ้า

ผลรวมของสนามไฟฟ้าจากวงจร rectangular ขนาดเล็กในระนาบ XZ หาได้จาก

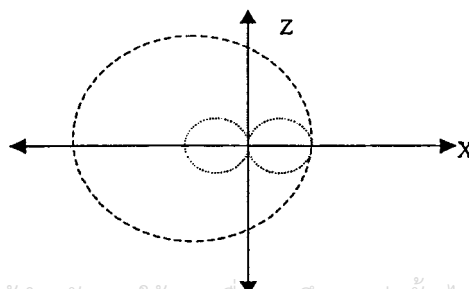
$$\begin{aligned}
 E_{xz}(t) &= E_x(t) + E_r(t) \\
 &= \frac{Z_o |I| W_\lambda}{2d} \cos \left(2\pi f \left(t - \frac{d}{c} \right) - \pi (L_\lambda \cos \xi - L_\lambda' - W_\lambda') \right) \\
 &= E_{xz}(\xi) \sin \left(2\pi f \left(t - \frac{d}{c} \right) \right).
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

$$|E_{xz}(\xi)| = \frac{\pi Z_o |I| W_\lambda}{d} |L_\lambda \cos \xi - (L_\lambda' + W_\lambda')| \tag{3.19}$$

ถ้าไม่นำค่าความต่างเฟสมาคำนวณ ดังนั้น $(L_\lambda' + W_\lambda') \rightarrow 0$ และรูปแบบการแพร่คลื่นสามารถทำนายได้จาก

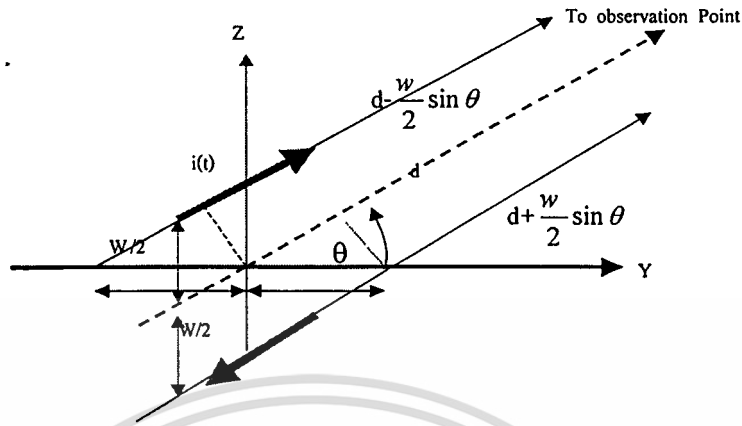
$$|E_{xz}'(\xi)| = \frac{\pi Z_o |I| W_\lambda L_\lambda}{d} |\cos \xi|. \tag{3.20}$$

ความแตกต่างระหว่าง $|E_{xz}(\xi)|$ และ $|E_{xz}'(\xi)|$ เมื่อ $L = W, L_\lambda' = L_\lambda$ และ $W_\lambda' = W_\lambda$ ถูกแสดงดังรูป 3.17



รูปที่ 3.17 $|E_{xz}(\xi)|$ (-), และ $|E_{xz}'(\xi)|$ (....) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าวงจรขึ้นส่วนกระแสต้านบน แพร่คลื่นแม่เหล็กต้านบนวก สนามไฟฟ้าในระนาบ YZ จะเป็น



รูปที่ 3.18 แสดงการแพร่คลื่นในระนาบ yz ของขึ้นส่วนกระแสความยาว L_λ

$$\begin{aligned}
 E_\mu(t) + E_\lambda(t) &= \frac{Z_o |I| L_\lambda}{2d} \cos \left(2\pi f \left(t - \frac{d}{c} \right) + \pi W_\lambda \sin \theta \right) \\
 &\quad - \frac{Z_o |I| L_\lambda}{2d} \cos \left(2\pi f \left(t - \frac{d}{c} \right) - \pi W_\lambda \sin \theta \right) \\
 &= \frac{-Z_o |I| L_\lambda}{d} \sin(\pi W_\lambda \sin \theta) \sin \left(2\pi f \left(t - \frac{d}{c} \right) \right) \\
 &= E_h(\phi) \sin \left(2\pi f \left(t - \frac{d}{c} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

สนามไฟฟ้ารวมของขึ้นส่วนกระแสแนวตั้งในระนาบ yz

$$\begin{aligned}
 E_f(t) + E_r(t) &= \frac{Z_o |I| L_\lambda}{2d} \sin \theta \cos \left(2\pi f \left(t - \frac{d}{c} \right) + \pi(L_\lambda' + W_\lambda') \right) \\
 &\quad - \frac{Z_o |I| L_\lambda}{2d} \sin \theta \cos \left(2\pi f \left(t - \frac{d}{c} \right) + \pi(L_\lambda' + W_\lambda') \right) \\
 &= \frac{-Z_o |I| L_\lambda}{d} \sin \theta \sin(\pi(L_\lambda' + W_\lambda')) \sin \left(2\pi f \left(t - \frac{d}{c} \right) \right) \\
 &= E_v(\theta) \sin \left(2\pi f \left(t - \frac{d}{c} \right) \right).
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

ดังนั้นแมกนิจูดของสนามไฟฟ้ารวมซึ่งถูกกำเนิดโดยขึ้นส่วนกระแส จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|E_{yz}(\phi)| = \sqrt{E_g^2(\theta) + E_h^2(\theta)}$$

$$\cong \frac{\pi Z_o |I| W_\lambda}{d} \sqrt{(L_\lambda' + W_\lambda')^2 \cos^2 \theta + L_\lambda^2 \sin^2 \theta} \quad (3.23)$$

ถ้าเฟสแตกต่าง ของชิ้นส่วนกระแส ถูกตัดทิ้งได้ ดังนั้น $L_\lambda' + W_\lambda' \rightarrow 0$ และแพทเทิร์นเป็น

$$|E_{yz}'(\theta)| = \frac{\pi Z_o |I| W_\lambda L_\lambda}{d} |\sin \theta| \quad (3.24)$$

รูปแบบของการแพร่คลื่นของสมการที่ (61) และ (62) แสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 $|E_{yz}(\theta)|(-)$, และ $|E_{yz}'(\theta)|(\dots)$.

3.5 การแพร่สัญญาณคลื่นจากสายส่ง (RADIATION FROM TRANSMISSION LINE)

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกสามารถเหนี่ยวนำกระแสบนสายตัวนำ โดยทั่วไป กระแสบนโหมด differential และ common - mode สามารถแพร่ออกจากสายตัวนำอิสระทั้ง 2 เส้นหรือแบบสายตัวนำรวม [4] ในกรณีของสายตัวนำเส้นเดียวเหนือกราวด์เพลน จะไม่มีกระแส common - mode การแพร่สัญญาณขึ้นกับกระแสใน differential - mode

3.5.1 สายตัวนำ 2 เส้น(TWO - CONDUCTOR LINE)

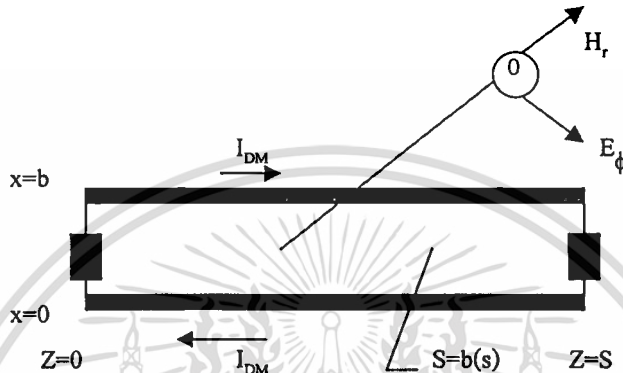
การแพร่กระจายของสนามจากกระแสใน differential - mode บนสายตัวนำสั้น 2 เส้น ซึ่งมีรูปแบบเหมือนกับสายอากาศ แบบรูปขนาดเล็ก ดังแสดงในรูป 28

$$S \text{ พื้นที่ของสายส่ง (รูป), } S = bs \text{ m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b คือระยะห่างของสายตัวนำ

I_{DM} คือ กระแสบนสายตัวนำจากแหล่งกำเนิด บนปลายด้านใดด้านหนึ่งของสาย และสามารถทำนายได้จากทฤษฎีสายส่ง กระแสใน differential mode สามารถวัดได้โดยการใช้โพรบกระแส การวัดนี้จะเน้นที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งของโหลด เมื่อกระแสใน common-mode เป็นศูนย์สายตัวนำจะลัดวงจร เมื่อ $\left(\frac{s}{\lambda} \ll 1\right)$ แอมพลิจูด และ เฟสของกระแสใน differential mode จะคงที่ตลอดสาย



รูปที่ 3.20 แสดงสนามการแพร่จาก differential mode จากสายตัวนำ 2 เส้น

เมื่อ r คือ ระยะทางจากกึ่งกลางของสายส่งถึง จุดสังเกต ซึ่งมีค่ามากกว่าความยาวของสาย ($r \gg s$) FAR FIELDS สนามไฟฟ้าระยะไกลตามขวาง หาได้จาก (3.25)

$$E_{\phi} = \frac{30 I_{DM} S \beta^2}{r} \epsilon^{-j\beta r} \quad V / m \quad (3.25)$$

หรือ

$$E_{\phi} = 1.316 \times 10^{-2} \frac{I_{DM} S f M^2}{r} \epsilon^{-j\beta r} \quad V / m \quad (3.26)$$

สนามแม่เหล็กตามขวางระยะไกล หาได้จาก

$$H_{\theta} = \frac{I_{DM} S \beta^2}{4\pi r} \epsilon^{-j\beta r} \quad A / m \quad (3.27)$$

หรือ

$$H_{\theta} = 3.5 \times 10^{-5} \frac{I_{DM} S f M^2}{r} \epsilon^{-j\beta r} \quad A / m \quad (3.28)$$

RECTIVE NEAR-FIELDS หาได้จาก กระแสใน differential mode จากสมการ (3.29) ถึง (3.31)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

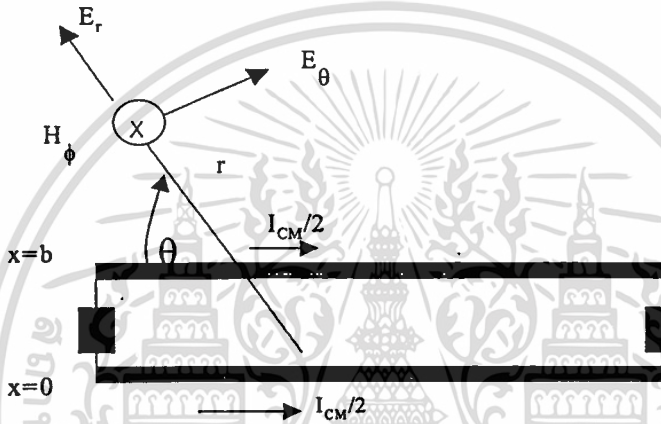
$$E_\phi = -j 0.628 \frac{I_{DM} S f_M}{r^2} \varepsilon^{-j\beta r} \quad V/m \quad (3.29)$$

$$H_\theta = \frac{I_{DM} S}{4\pi r^3} \varepsilon^{-j\beta r} \quad A/m \quad (3.30)$$

และ

$$H_r = \frac{I_{DM} S}{2\pi r^3} \varepsilon^{-j\beta r} \quad A/m \quad (3.31)$$

การแพร่คลื่นใน Common-Mode แสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงสนามใน common mode บนสายตัวนำ 2 เส้น

การแพร่กระแสนโดโพลาไรซ์ พิจารณาในเทอมของกระแส common - mode จะเป็น ศูนย์ที่ปลายสายตัวนำ กระแสที่จุดกึ่งกลางของตัวนำจะเป็น $\frac{I_{CM}}{2}$ สามารถวัดกระแสที่กึ่งกลางของสายโดยใช้โพรบกระแสที่จุดกึ่งกลางของสายตัวนำทั้ง 2 ในรูปที่ 3.21

FAR - FIELDS สนามไฟฟ้า ตามขวางระยะไกล จากสมการ (70) คือ

$$E(\theta) = j 0.3125 \frac{I_{CM} S f_M \sin \theta}{r} \varepsilon^{-j\beta r} \quad V/m \quad (3.32)$$

สนามแม่เหล็กตามขวางระยะไกล จากสมการ (71) คือ

$$H_\phi = j 8.35 \times 10^{-4} \frac{I_{CM} S f_M \sin \theta}{r} \varepsilon^{-j\beta r} \quad A/m \quad (3.33)$$

REACTIVE NEAR FIELDS สนามไฟฟ้าใน Reactive near-field หาได้จากกระแส

common mode จากสมการ (3.34) ถึง (3.36) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

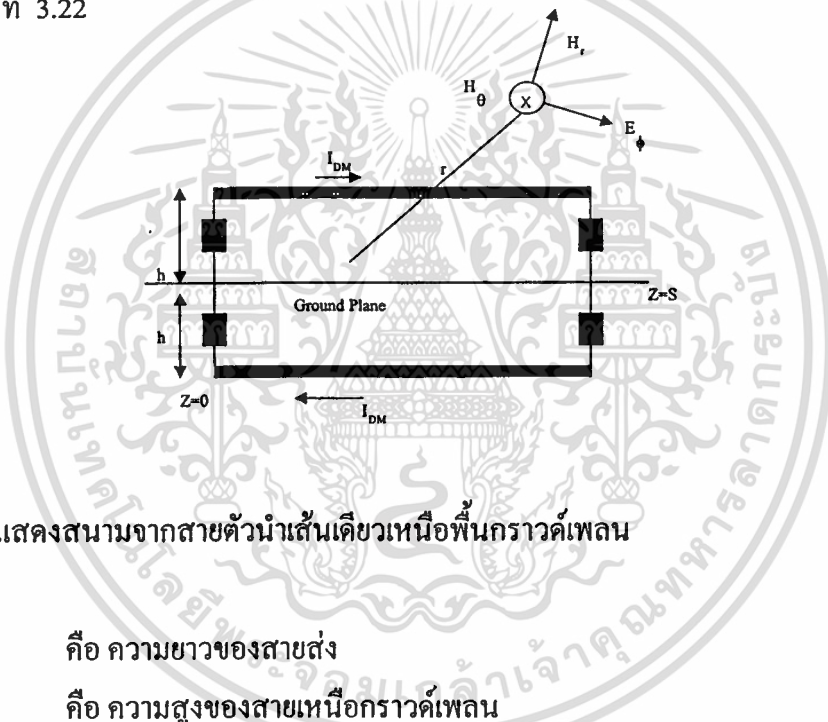
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\theta} = -j 716 \frac{I_{CM} s \sin \theta}{f_M r^3} \varepsilon^{-j\beta r} \quad V / m \quad (3.34)$$

$$E_r = -j 1432 \frac{I_{CM} s \cos \theta}{f_M r^3} \varepsilon^{-j\beta r} \quad V / m \quad (3.35)$$

$$H_{\phi} = 0.0393 \frac{I_{CM} s \sin \theta}{r^2} \varepsilon^{-j\beta r} \quad A / m \quad (3.36)$$

3.5.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่จากสายตัวนำเหนือพื้นกราวด์เพลน
สายส่งเส้นเดียววางอยู่เหนือกราวด์เพลน และถูกต่อตัว ตัวต้านทานที่ปลายทั้ง 2 ของสาย
แสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงสนามจากสายตัวนำเส้นเดียวเหนือพื้นกราวด์เพลน

เมื่อ S คือ ความยาวของสายส่ง
 h คือ ความสูงของสายเหนือกราวด์เพลน
 I_{DM} คือ กระแสบนสายตัวนำ และ กระแสมีการกระจายคงที่
(สมมุติว่า เป็นตัวนำไฟฟ้าสั้น ๆ)

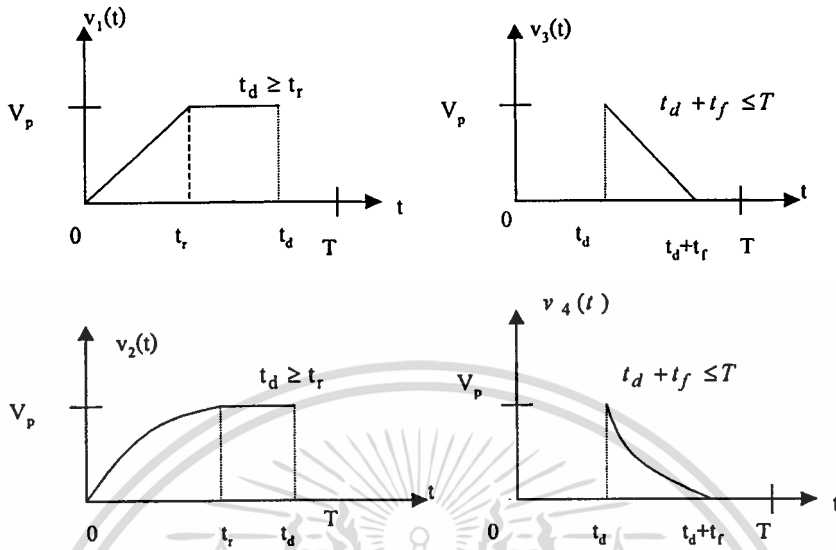
ระยะทางระหว่างสายตัวนำและอิมเมจเป็น $2h$ และมีรูปแบบคล้ายรูป สนามการแพร่จาก differential-mode บนสายตัวนำ ทั้ง 2 ซึ่งวางห่างกัน b ดังรูป (3.22) สามารถหาได้จากสมการ (3.37) ถึง (3.38) โดยการแทนค่า

$$S = bs \quad m^2 \quad (3.37)$$

ด้วย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $S^* = 2hs \quad m^2 \quad (3.38)$
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 รูปแบบของแรงดันอินพุตพื้นฐาน (BASIC VOLTAGE WAVEFORMS)

รูปแบบของสัญญาณทางไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงรูปแบบพื้นฐานของสัญญาณอินพุต

รูปแบบของสัญญาณทั้ง 4 แบบ สามารถจะเขียนเป็นฟังก์ชันของเวลา ในคาบ $t = 0$ ถึง $t = T$

$$V_1(t) = \frac{v_p}{t_r} t \quad \text{for } 0 \leq t \leq t_r$$

$$V_1(t) = v_p \quad \text{for } t_r \leq t \leq t_d$$

$$V_1(t) = 0 \quad \text{for } t_d \leq t \leq T$$

$$V_2(t) = v_p \left(1 - e^{-2et / t_r} \right) \quad \text{for } 0 \leq t \leq t_r$$

$$V_2(t) = v_p \quad \text{for } t_r \leq t \leq t_d$$

$$V_2(t) = 0 \quad \text{for } t_d \leq t \leq T$$

$$V_3(t) = 0 \quad \text{for } 0 \leq t < t_d$$

$$V_3(t) = \frac{v_p}{t_f} (t_d + t_f - t) \quad \text{for } t_d \leq t \leq t_d + t_f$$

$$V_3(t) = 0 \quad \text{for } t_d + t_f \leq t \leq T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 v_4(t) &= 0 & \text{for } 0 \leq t < t_d \\
 v_4(t) &= v_p e^{-2e\left(\frac{t-t_d}{t_f}\right)} & \text{for } t_d \leq t \leq t_d + t_f \\
 v_4(t) &= 0 & \text{for } t_d + t_f \leq t \leq T
 \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ ของ สัญญาณ $v_1(t)$ หรือ เวลาขึ้นแบบเชิงเส้น (linear rises) คือ

$$a_{n1} = -\frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \frac{\sin^2(\pi f_n t_r)}{t_r} + \frac{V_p}{n\pi} \sin(\omega_n t_d) \quad (3.39)$$

และ

$$b_{n1} = \frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \frac{\sin(\pi f_n t_r) \cos(\pi f_n t_r)}{t_r} - \frac{V_p}{n\pi} \cos(\omega_n t_d) \quad (3.40)$$

สัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ของสัญญาณ $v_2(t)$ แบบ เอ็กโปเนนเชียล

$$a_{n2} = -\frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \frac{\sin^2(\alpha_n)}{t_R} + \frac{V_p}{n\pi} \sin(\omega_n t_d) \quad (3.41)$$

และ

$$b_{n2} = \frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \frac{\sin(\alpha_n) \cos(\alpha_n)}{t_R} - \frac{V_p}{n\pi} \cos(\omega_n t_d) \quad (3.42)$$

เมื่อ

$$\alpha_n = \arctan(\pi f_n t_R) \quad (3.43)$$

$$\sin(\alpha_n) = \frac{\pi f_n t_R}{\sqrt{1 + (\pi f_n t_R)^2}} \quad (3.44)$$

$$\cos(\alpha_n) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\pi f_n t_R)^2}} \quad (3.45)$$

สัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ของ $v_3(t)$ แบบ เวลาตกเชิงเส้น(fall time)

$$a_{n3} = \frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \frac{\sin(\pi f_n t_f) \sin(\omega_n t_d + \pi f_n t_f)}{t_f} - \frac{V_p}{n\pi} \sin(\omega_n t_d) \quad (3.46)$$

และ

$$b_{n3} = -\frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \frac{\sin(\pi f_n t_f) \cos(\omega_n t_d + \pi f_n t_f)}{t_f} + \frac{V_p}{n\pi} \cos(\omega_n t_d) \quad (3.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ของ $v_4(t)$ เวลาตกแบบ เอ็กโปเนนเชียล

$$a_{n4} = -\frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \frac{\sin(\beta_n) \sin(\omega_n t_d + \beta_n)}{t_F} - \frac{V_p}{n\pi} \sin(\omega_n t_d) \quad (3.48)$$

$$b_{n4} = -\frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \frac{\sin(\beta_n) \cos(\omega_n t_d + \beta_n)}{t_F} + \frac{V_p}{n\pi} \cos(\omega_n t_d) \quad (3.49)$$

เมื่อ

$$\beta_n = \arctan(\pi f_n t_F) \quad (3.50)$$

$$\sin(\beta_n) = \frac{\pi f_n t_F}{\sqrt{1 + (\pi f_n t_F)^2}} \quad (3.51)$$

และ

$$\cos(\beta_n) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\pi f_n t_F)^2}} \quad (3.52)$$

ค่าเฉลี่ยของรูปแบบแรงดันพื้นฐาน สำหรับเวลาขึ้นเชิงเส้น

$$v_1^-(t) = \frac{V_p}{2T} (2t_d - t_r) \quad (3.53)$$

$$v_2^-(t) = \frac{V_p}{2T} (2t_d - t_R) \quad (3.54)$$

3.6.1 แรงดันขาขึ้น และขาลงแบบเชิงเส้น

รูปแบบแรงดันทั้งแบบขาขึ้น และขาลง แบบเชิงเส้นซึ่งประกอบด้วยรูปแบบของคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3.23 รูปแบบของแรงดันที่แตกต่างกันขึ้นกับความสัมพันธ์ของ $t_r \leq t_d$ และ $t_d + t_f \leq T$ อย่างไรก็ตาม แม้รูปแบบของรูปคลื่นที่ประกอบกันเป็นคลื่นมาตรฐานจะต่างกัน แต่ตัวแปรต่างๆ ที่ต้องพิจารณาก็เหมือนกันคือ t_r, t_d, t_f, T และ v_p รูปแบบของแรงดันในรูปที่ 3.24 สามารถเขียนได้เป็น $v(t) = v_1(t) + v_3(t)$ เมื่อ $v_1(t)$ คือรูปแบบคลื่นพื้นฐานแบบขาขึ้นเชิงเส้น และ $v_3(t)$ คือรูปแบบคลื่นพื้นฐานแบบขาลงเชิงเส้น จาก $v(t) = v_1(t) + v_3(t)$ ค่าสัมประสิทธิ์ ฟูเรียร์ $v(t)$ คือ $a_n = a_{n1} + a_{n3}$ และ $b_n = b_{n1} + b_{n3}$

$$a_n = \frac{-V_p T}{n^2 \pi^2} \left[\frac{\sin^2(\pi f_n t_r)}{t_r} - \frac{\sin(\pi f_n t_f) \sin(\omega_n t_d + \pi f_n t_f)}{t_f} \right] \quad (3.55)$$

และ

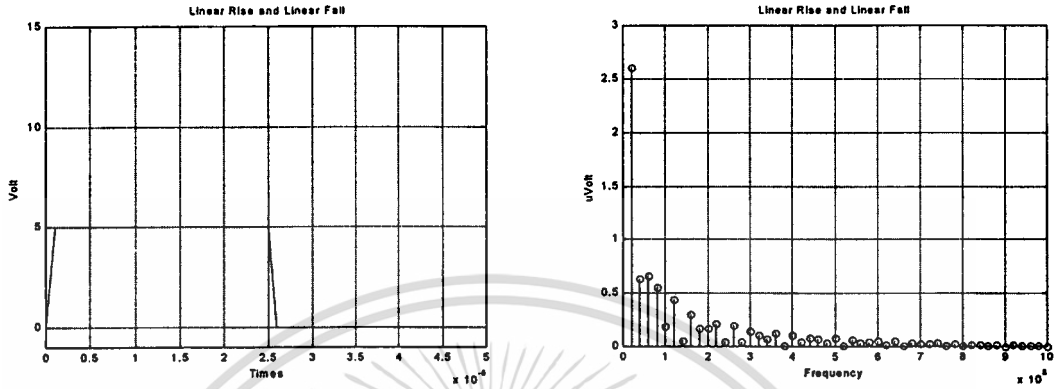
$$b_n = \frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \left[\frac{\sin(\pi f_n t_r) \cos(\pi f_n t_r)}{t_r} - \frac{\sin(\pi f_n t_f) \cos(\omega_n t_d + \pi f_n t_f)}{t_f} \right] \quad (3.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

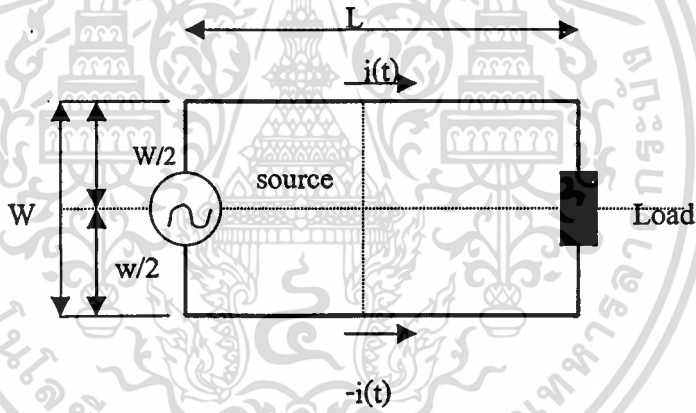
$$|V_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{3.57}$$

$$|V_n| = \frac{V_p T}{n^2 \pi^2} D_n \tag{3.58}$$



(ก) แกนเวลา

(ข) แกนความถี่



(ค) แสดงวงจร Rectangular

รูปที่ 3.24 เวลาขาขึ้นและขาลงแบบเชิงเส้นและในแกนเวลาและแกนความถี่

$$D_n = \sqrt{\frac{\sin^2(\pi f_n t_r) - 2 \sin(\pi f_n t_r) \sin(\pi f_n t_f)}{t_r^2} \cos[\pi f_n (2t_d - t_r + t_f)] + \frac{\sin^2(\pi f_n t_f)}{t_f^2}} \tag{3.59}$$

D_n คือ ค่าแฟกเตอร์ส่งผ่าน (transition factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 รูปแบบแรงดันขาขึ้นและขาลงแบบเอ็กโปเนนเชียล

รูปแบบแรงดันของเวลาขาขึ้นและขาลงแบบเอ็กโปเนนเชียล ซึ่งเป็นหนึ่งในสี่รูปแบบของรูปที่ 3.23 รูปแบบของแรงดันนี้แสดงนี้คือ $V(t) = V_2(t) + V_4(t)$ สัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ของรูปแบบคลื่นนี้คือ $a_n = a_{n2} + a_{n4}$ และ $b_n = b_{n2} + b_{n4}$

$$a_n = \frac{-V_p T}{n^2 \pi^2} \left[\frac{\sin^2(\alpha_n)}{t_R} - \frac{\sin(\beta_n) \sin(\omega_n t_d + \beta_n)}{t_F} \right] \quad (3.60)$$

และ

$$b_n = \frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \left[\frac{\sin(\alpha_n) \cos(\alpha_n)}{t_R} - \frac{\sin(\beta_n) \cos(\omega_n t_d + \beta_n)}{t_F} \right] \quad (3.61)$$

เมื่อแทนค่า t_R และ t_f ด้วย t_r และ t_f และ $\alpha_n = \arctan(\pi f_n t_R)$ และ $\beta_n = \arctan(\pi f_n t_F)$ แทนด้วย $\pi f_n t_r$ และ $\pi f_n t_f$

$$|V_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (3.62)$$

$$|V_n| = \frac{V_p T}{n^2 \pi^2} D_n \quad (3.63)$$

เมื่อ

$$D_n = \sqrt{\frac{\sin^2(\alpha_n) - 2 \sin(\alpha_n) \sin(\beta) \cos(\omega_n t_d - \alpha_n + \beta_n) + \sin^2(\beta_n)}{t_R^2} + \frac{\sin^2(\beta_n)}{t_f^2}} \quad (3.64)$$

3.7 การแพร่สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรระแส

สนามไฟฟ้าของวงจรรีแอกแตงูลาร์ เมื่อกระแสรูปไซน์เคลื่อนผ่าน จำแนกตามความยาวของสายอากาศของวงจรมองได้เป็น วงจรรีแอกแตงูลาร์แบบสั้น และ รีแอกแตงูลาร์แบบความยาวกลาง เมื่อกระแสเป็น $i(t) = |I| \sin(\omega t)$ ดังนั้นสนามไฟฟ้าแผ่กระจายสูงสุด [4] คือ

$$\begin{aligned} \max |E| &= \frac{Z_0 |I| W}{cd} \cdot \frac{\sin[\pi(2L + W)]}{c} \\ &= \frac{Z_0 |I| W \lambda}{d} \cdot \sin[\pi f (2L + W \lambda)] \end{aligned} \quad (3.65)$$

และวงจรรีแอกแตงูลาร์แบบยาว สนามไฟฟ้าแผ่กระจายสูงสุดคือ

$$\max |E| = \frac{Z_0 |I| W}{cd}$$

$$= \frac{Z_0 |V_n| W \lambda}{d} \quad (3.66)$$

จากสมการข้างต้น

$Z_0 = 120 \pi \Omega$ คือค่าอิมพีแดนซ์ใน อวกาศว่าง

$|I|$ คือ แอมพลิจูดของกระแส $I(t)$

f คือ ความถี่ของกระแส $i(t)$

L และ w คือ ความกว้างและความยาวของวงจร rectangular

d คือ ระยะทางจากวงจรถึงจุดสังเกต

การจำแนกว่าวงจรชนิดใดเป็นแบบ rectangular แบบสั้น กลาง หรือยาว จะใช้ความยาวของสายอากาศเป็นหลักสำหรับวงจรแบบสั้นค่าของ $L_\lambda \leq \frac{1}{6}$ และ $\frac{1}{6} < L \leq \frac{1}{4} - W \frac{\lambda}{2}$ เป็นวงจร

rectangular แบบกลาง และ $L_\lambda > \left(\frac{1}{4} - W \frac{\lambda}{2}\right)$ สำหรับวงจร rectangular แบบยาววงจร

rectangular นี้แสดงดังรูป 3.24 (ค)

3.7.1 การแพร่สนามไฟฟ้าของวงจร Rectangular

สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกจากวงจร ของคลื่นรูปไซน์

$$E_n(t) = |E_n| \cos \left[2\pi f_n \left(t - \frac{d}{c} \right) \right] \quad (3.67)$$

ในการวัดจะพิจารณาถึง

- แอมพลิจูด $|E_n|$ ที่ถูกวัดในแต่ละความถี่
- ค่าการแผ่สูงสุดของ $|E_n|$ ในทุกทิศทาง
- ค่าสภาพแวดล้อมของการวัด ซึ่งมีสาเหตุมาจากค่าการแพร่คลื่นมากที่สุดของวงจรกระแสในแต่ละความถี่สามารถหาได้จาก

$$meas |E_n| = 2(\max |E_n|)$$

$$= \frac{2Z_0 |V_n| W \sin[\pi f_n (2L + W)]}{cd} \quad (3.68)$$

สำหรับวงจรความยาวสั้น และ กลาง(short and medium length circuit)

$$\begin{aligned} mean |E_n| &= 2(\max |E_n|) \\ &= \frac{2Z_0 |V_n| W_n}{cd} \end{aligned} \quad (3.69)$$

สำหรับวงจรมิยาว (long rectangular circuit) กระแสของวงจรซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงค้นหาได้จาก

$$|I_n| = \frac{|V_n|}{|Z_n|} = \frac{V_p T}{n^2 \pi^2} \frac{D_n}{|Z_n|} \quad (3.70)$$

$f_n = nf$ และ $f = \frac{1}{T}$ แทนค่าลงในสมการ(3.70) สำหรับวงจรแบบความยาวสั้นและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$meas |E_n| = \frac{2Z_0W}{n\pi^2cd} \cdot \frac{V_p D_n}{|Z_n|} \cdot \sin\left[\frac{n\pi f(2L+W)}{c}\right] \quad (3.71)$$

และสำหรับวงจรแบบยาว

$$meas |E_n| = \frac{2Z_0W}{n\pi^2cd} \frac{V_p D_n}{|Z_n|} \quad (3.72)$$

จากสมการข้างบน แสดงให้เห็นว่าการลดการแพร่คลื่นและการควบคุมสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับค่าของกระแสในวงจร

3.7.2 ผลของแฟกเตอร์ส่งผ่าน (Transition Factor)

ผลของ $meas |E_n|$ ต่อค่าของแฟกเตอร์ส่งผ่าน

$$D_n = \sqrt{\frac{\sin^2(A_n) - \sin(\pi f t_r) \sin(\pi f t_f)}{t_n^2} \frac{1}{t_r t_f} \left[\cos[\pi f_n(2t_d t_r + t_f)] + \frac{\sin^2(\pi n t_f)}{t_r t_f} \right] + \frac{\sin^2(\pi f_n t_f)}{t_f^2}} \quad (3.73)$$

เมื่อ $t_R = t_r$ และ $A_n = \pi f_n t_r$ สำหรับเวลาขึ้นแบบเชิงเส้น

$t_R = \frac{t_r}{e}$ และ $A_n = \arctan\left(\pi f_n \frac{t_r}{e}\right)$ สำหรับเวลาขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียล

$t_F = t_f$ และ $B_n = \pi n t_f$ สำหรับเวลาลงแบบเชิงเส้น

และ $t_F = \frac{t_f}{e}$ และ $B_n = \arctan\left(\frac{\pi f_n}{e}\right)$ สำหรับเวลาลงแบบเอ็กโปเนนเชียล

จากค่าแฟกเตอร์ส่งผ่านในสมการ(3.74)หากกำหนดให้เวลาขึ้นและเวลาลงเป็น 100% แบบเชิงเส้น ค่าแฟกเตอร์ส่งผ่านที่ได้เมื่อ $\cos(\omega_n t_d - A_n + B_n) = \pm 1$ คือ

$$D_n \leq \left| \frac{\sin(A_n)}{t_r} \right| + \left| \frac{\sin(B_n)}{t_f} \right| \quad (3.74)$$

$$\leq \frac{1}{t_r} + \frac{1}{t_f}$$

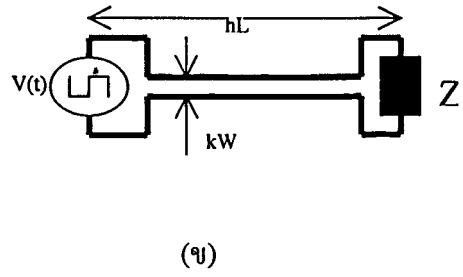
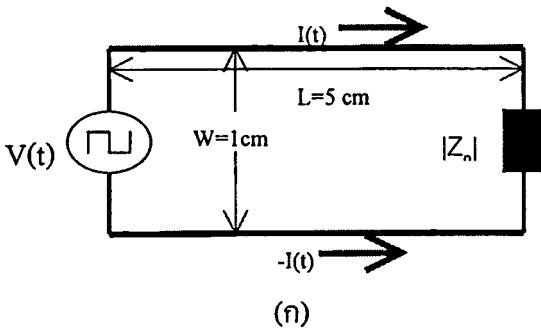
ในอีกกรณีหนึ่งค่ามากที่สุดของ D_n สามารถหาโดยการเพิ่มค่าเวลาขึ้นหรือขาลงของ $V(t)$ หรือทั้ง 2 กรณี จากสมการ(3.75) และ (3.76) ค่าการแพร่คลื่นมากที่สุดของวงจรแบบสั้นและแบบกลางจะเป็น

$$meas |E_n| \leq \frac{2Z_0W}{n^2\pi^2cd} \frac{V_p}{|z_n|} \cdot \left[\sin\left(\pi f_n \left(2L + \frac{W}{c}\right) \cdot \frac{\sin(A_n)}{t_r} + \frac{\sin(B_n)}{t_f}\right) \right] \quad (3.75)$$

และสำหรับวงจรแบบยาว

$$meas |E_n| \leq \frac{2Z_0W}{n\pi^2cd} \frac{V_p}{|z_n|} \left[\frac{|\sin(A_n)|}{t_r} + \frac{|\sin(B_n)|}{t_f} \right] \quad (3.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 แสดงวงจร Rectangular และวงจรที่ถูกปรับเปลี่ยน

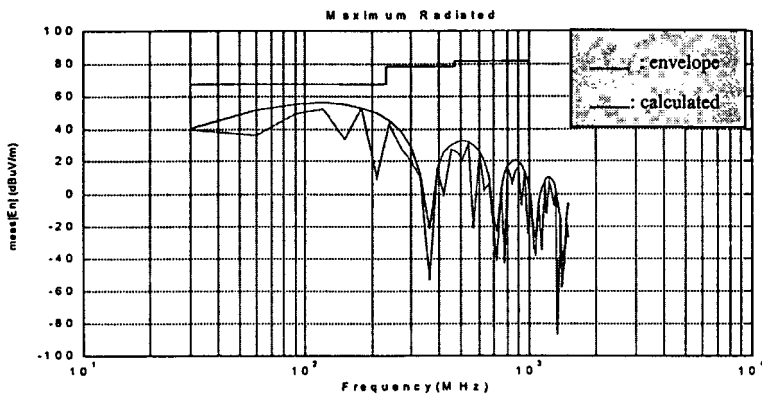
กำหนดให้แหล่งกำเนิดและโหลดของวงจรถูกแสดงดังรูป 3.25(ก) หากมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของแผ่น PCB (\bar{W}) รูปร่างของวงจรซึ่งถูกปรับเปลี่ยนแสดงดังรูป 3.25(ข) จากรูปความกว้างโดยเฉลี่ยของวงจรที่ถูกปรับเปลี่ยนสามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \bar{W} &= \frac{kW(hL) + (1-h)LW}{L} \\ &= [h(k-1) + 1]W \end{aligned} \tag{3.77}$$

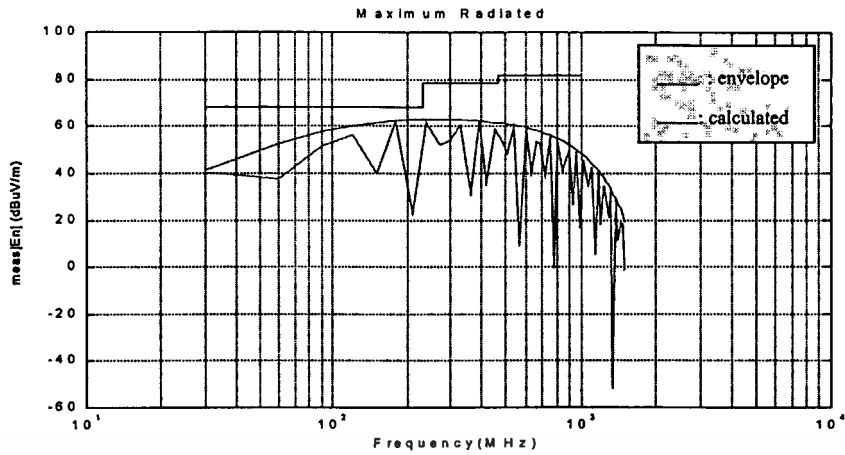
และค่ามากที่สุดของสนามไฟฟ้าแพร่ผ่านอากาศของวงจรที่ถูกปรับเปลี่ยนความกว้างของ PCB หาได้จาก

$$meas |E_n| \cong \left(\frac{2Z_0}{n\pi^2 cd} \right) \frac{V_p D_n}{|Z_n|} \bar{W} \sin \left[\frac{n\pi f(2L + \bar{W})}{c} \right] \tag{3.78}$$

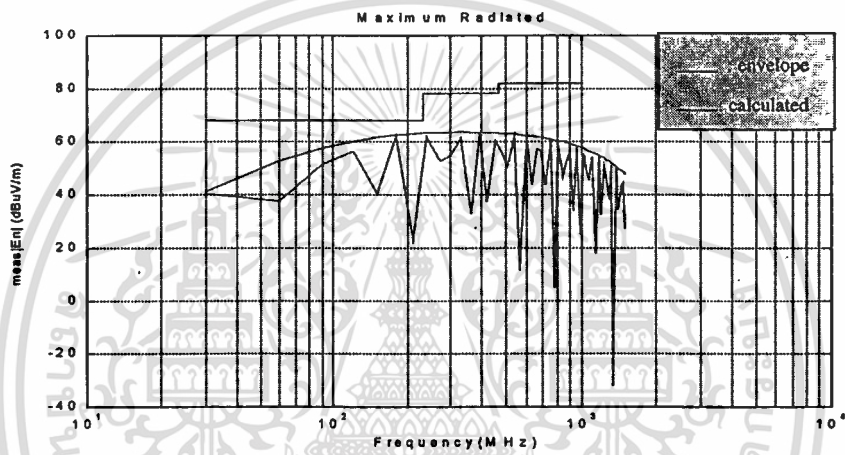
รูปที่ 3.26(ก)-(ข) แสดงการคำนวณการแพร่สนามไฟฟ้าออกจากวงจรรูปสี่เหลี่ยม(rectangular circuit) หรือ รูป จากผลของการคำนวณสรุปได้ดังนี้ ค่าตัวแปรของสัญญาณอินพุตเช่น เวลาขึ้น เวลาขาลง และ Duty Cycle มีผลต่อการแพร่สนามไฟฟ้า ค่าเวลาขึ้นและขาลงที่มีความชันมาก จะส่งผลให้การแพร่สนามไฟฟ้ามากตามไปด้วย โดยเรียงตามลำดับคือ 50 ns 80 ns และมากที่สุดเมื่อเป็น 100 ns เมื่อขนาดของรูปมีขนาดใหญ่ขึ้นการแพร่คลื่นก็จะมากขึ้นตามไปด้วยรูปที่ 3.27(ก)-(ข) ดังนั้นการลดระดับความแรงของสนามไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการลดระดับของสัญญาณอินพุต เวลาขึ้นและขาลง และขนาดของรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.25 (ข)



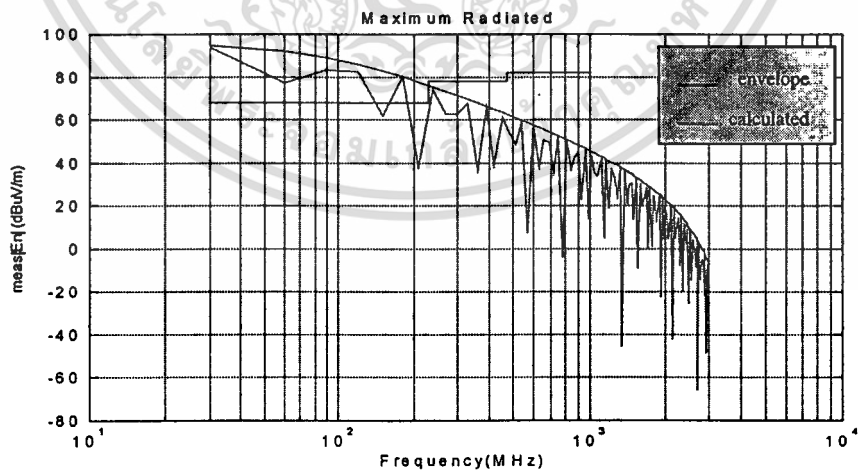
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ () ที่ 30MHz, $t_r=10$, $t_f=10$, duty cycle=50%, $V=5$ volt, $W=1$ cm, $L=5$ cm ระยะโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) 30MHz, $t_r=50$, $t_f=50$, duty cycle=50% ,V=5volt, W=1cm, L=5cm

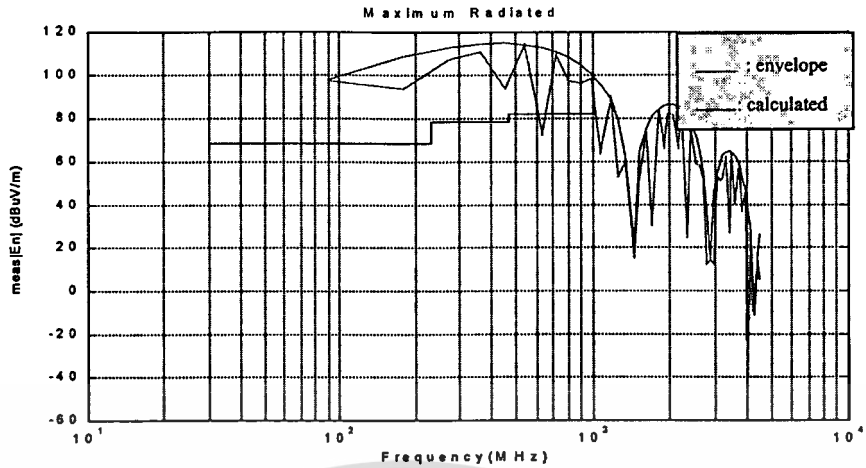


(ค) 30MHz, $t_r=100$, $t_f=100$, duty cycle=50% ,V=5volt, W=1cm, L=5cm

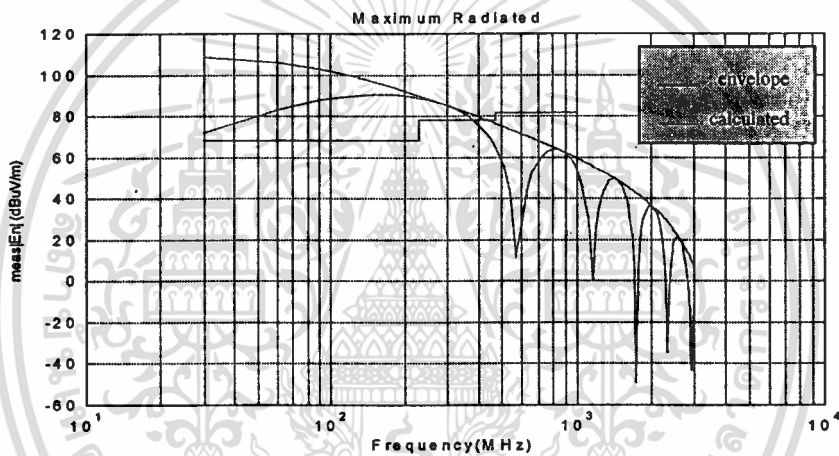


(ง) 30MHz, $t_r=50$, $t_f=50$, duty cycle=50% ,V=5volt, W=1cm, L=10cm

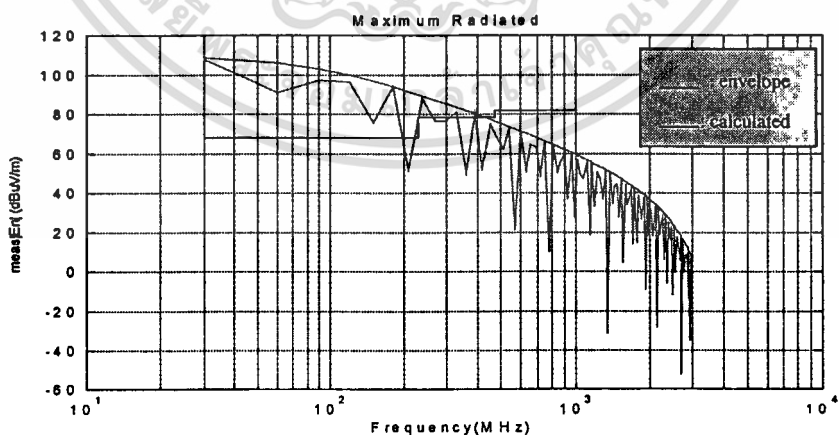
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) 20MHz, $t_r=100$, $t_f=100$, duty cycle=50% , $V=5$ volt, $W=1$ cm, $L=5$ cm



(ฉ) 30 MHz, $t_r=100$, $t_f=100$, duty cycle = 50%, $V=5$ Volt, $W=1$ cm, $L=10$ cm

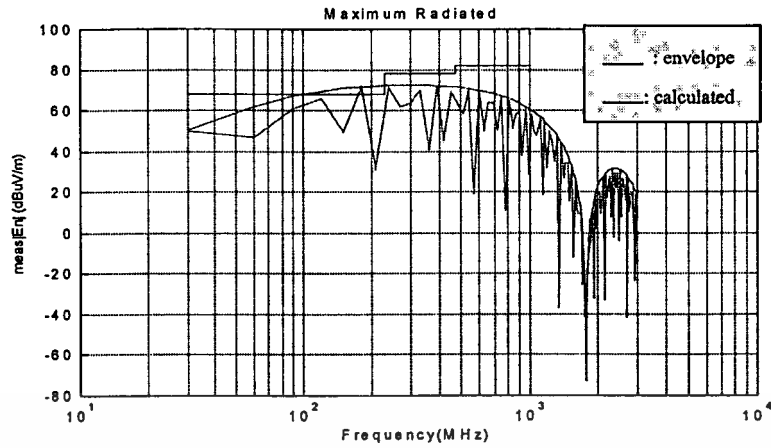


(ช) 30 MHz, $t_r=100$, $t_f=100$, duty cycle = 50%, $V=5$ Volt, $W=1$ cm, $L=30$ cm

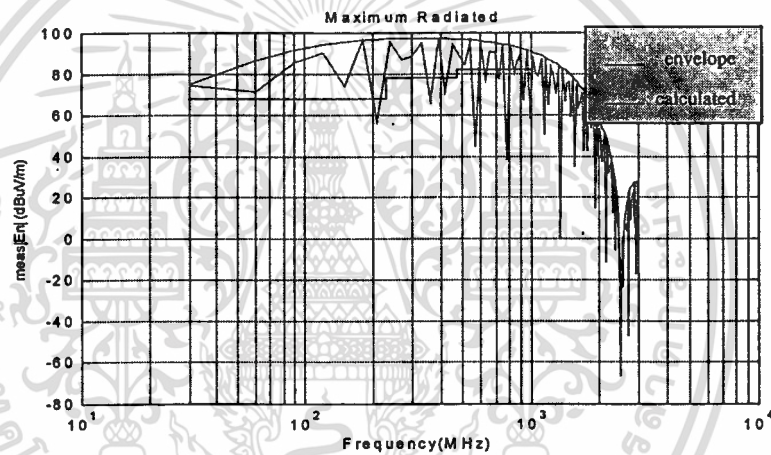
รูปที่ 3.26 แสดงผลการคำนวณการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสนามระยะไกลเมื่อปรับเวลาขึ้น/

ลงและความยาวสายทองแดง

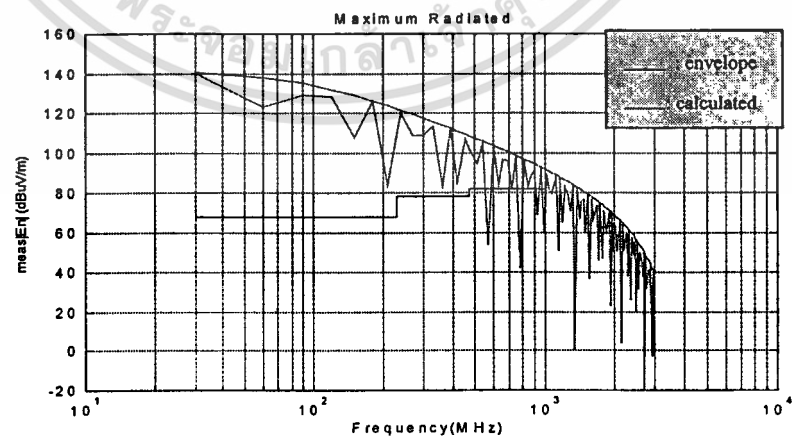
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 30 MHz, $t_r = 50$, $t_f = 50$, duty cycle = 50%, $V = 5$ Volt, $W = 5$ cm, $L = 1$ cm

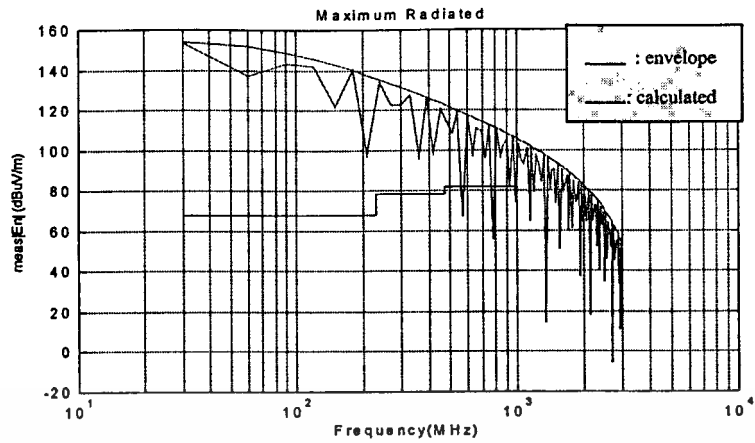


(ข) 30 MHz, $t_r = 100$, $t_f = 100$, duty cycle = 50%, $V = 5$ Volt, $W = 5$ cm, $L = 1$ cm

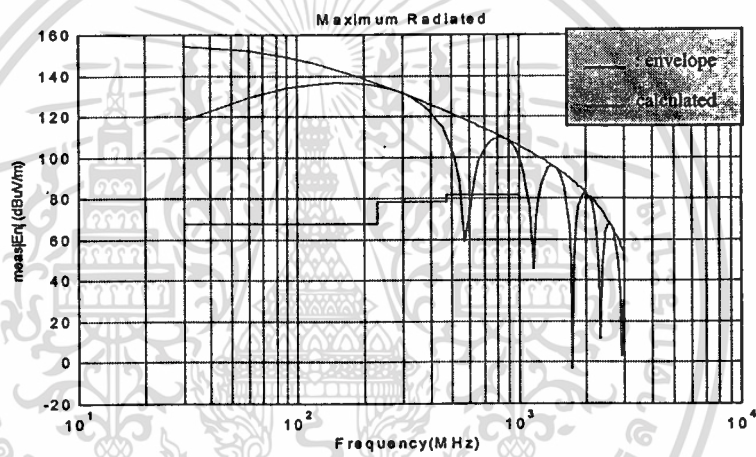


(ค) 30 MHz, $t_r = 100$, $t_f = 100$, duty cycle = 50%, $V = 5$ Volt, $W = 10$ cm, $L = 1$ cm

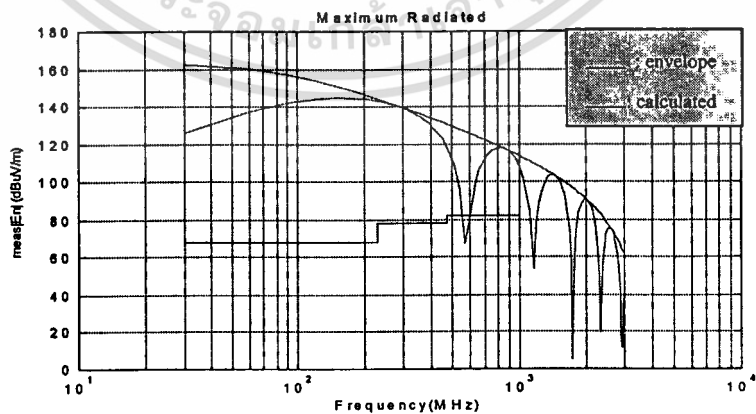
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) 30 MHz, $t_r = 100$, $t_f = 100$, duty cycle = 50%, $V = 5$ Volt, $W = 10$ cm, $L = 5$ cm



(จ) 30 MHz, $t_r = 100$, $t_f = 100$, duty cycle = 50%, $V = 5$ Volt, $W = 10$ cm, $L = 10$ cm



(ฉ) 30 MHz, $t_r = 100$, $t_f = 100$, duty cycle = 50%, $V = 5$ Volt, $W = 15$ cm, $L = 15$ cm

รูปที่ 3.27 แสดงผลการคำนวณการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสนามระยะไกลเมื่อปรับเวลาขึ้น/

เอกสารนี้เป็นเอกสารลงและควมกว้างของลายทองแดงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ออกจากวงจรดิจิทัล

การแพร่สนามไฟฟ้าจากวงจรดิจิทัล อาจมีสาเหตุมาจาก differential mode หรือ common mode การแพร่ใน different mode มีสาเหตุมาจากกระแส โดยรอบของลูป ซึ่งเกิดจากตัวนำของวงจรตามรูปที่ 3.28 รูปนี้จะทำหน้าที่คล้ายกับสายอากาศขนาดเล็กซึ่งแพร่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา [4] การแพร่สนามไฟฟ้าในแบบ common mode มีสาเหตุมาจากแรงดันตกคร่อมของวงจรซึ่งมาจากชิ้นส่วนของระบบซึ่งมีศักย์แตกต่างกันระหว่างวงจร ถึง กราวด์ สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกจากสายอากาศแสดงในรูปที่ 3.28

3.8.1 การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน differential mode

การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน differential mode สามารถจะใช้โมเดลของสายอากาศลูปได้ ลูปขนาดเล็กมีพื้นที่ A และกระแส I วัตที่ระยะห่าง r สามารถหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลจากสมการ

$$E = 131.6 \times 10^{-16} [f^2 AI] \left[\frac{1}{r} \right] \sin \theta \quad (3.79)$$

รูปที่ 3.28 แสดงการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากวงจรดิจิทัล

เทอมแรกในสมการที่ (3.79) คือค่าคงที่การส่งผ่านของตัวนำในอวกาศอิสระ เทอมที่ 2 คือค่าคุณลักษณะการแพร่สัญญาณของแหล่งกำเนิด เทอมที่ 3 คือการลดลงของสนามไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดระยะ r เทอมสุดท้ายคือมุมของสายอากาศซึ่งสัมพันธ์กับรูป

3.8.1.1 การแปลงฟูเรียร์

จากสมการข้างต้นการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกใช้ในกรณีของคลื่นชาแนล แต่โดยทั่วไปแล้ววงจรดิจิทัลจะใช้สัญญาณแบบ กระแสพัลส์ ดังนั้นจะต้องแปลงให้เป็นรูปชาแนลก่อน โดยการใช้สูตรฟูเรียร์ ตามสมการที่ (3.80)

$$I(n) = I \left[\frac{\sin(0.5n\pi)}{0.5n\pi} \right] \left[\frac{\sin(n\pi t_r / T)}{n\pi t_r / T} \right] \quad (3.80)$$

เมื่อ t คือเวลาขึ้น T คือคาบเวลาของคลื่น และ n คือ ลำดับของฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีการสงวนสิทธิ์ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2 การแพร่คลื่นในแบบคอมมอน (Common Mode Emission)

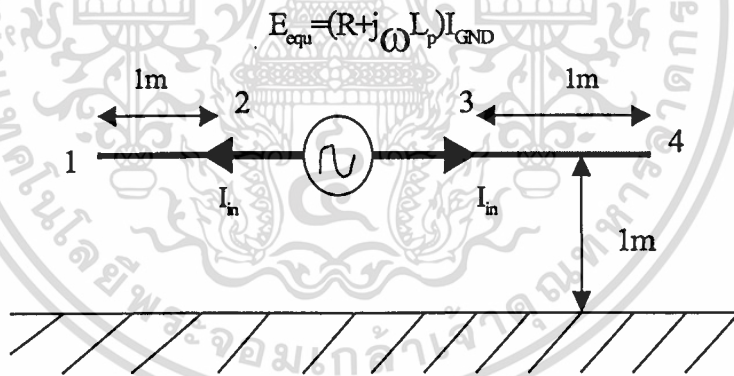
การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน Common mode emanates จากสายเคเบิลในระบบ ความถี่ของการแพร่ทำให้เกิด Common Mode potential ดูจากรูปที่ 3.28 การแพร่สัญญาณในแบบ Common Mode สามารถใช้โมเดลของสายอากาศโมโนโพลแบบสั้น ความยาว L เหนือกราวด์เพลน ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระยะห่าง r สามารถหาได้จาก

$$E = \frac{[4 \pi \times 10^{-7} [fLI] \sin \theta]}{r} \quad (3.81)$$

3.9 สมการที่ใช้ในการคำนวณการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากวงจรดิจิทัลที่ต่อด้วยสายสัญญาณ

บางครั้งแผ่นวงจรพิมพ์จะมีการเชื่อมต่อไปยังวงจรอื่นๆ โดยการใช้สายสัญญาณ วงจรตัวอย่างในกรณีนี้เช่น วงจรนาฬิกา โมเดลอย่างง่ายของระบบ แสดงในรูปที่ 3.29 [4][26]

เมื่อ track ของ PCB ถูกแทนโดยสายส่งสัญญาณแบบเส้นเดียว การเชื่อมต่อของสายจะใช้ตัวนำ (1-2) และ (3-4) วางเหนือกราวด์เพลน สายที่นำมาเชื่อมต่อกับแผ่น PCB มีความสำคัญกับทิศทางในการแผ่กระจายคลื่น และความแรงของสัญญาณไฟฟ้า

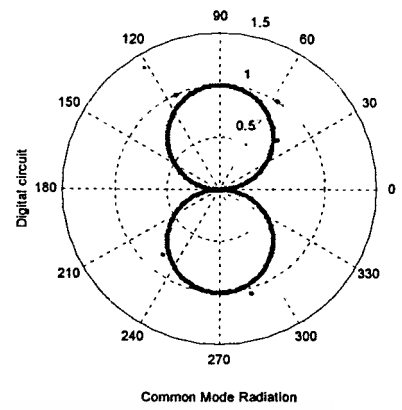
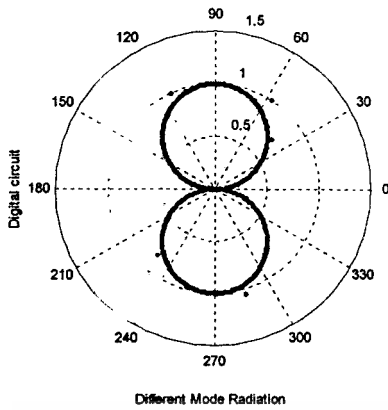


รูปที่ 3.29 แสดงวงจรสมมูลของวงจรดิจิทัล

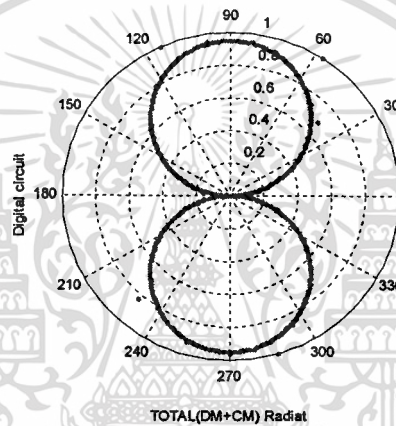
เมื่อพิจารณาผลของกราวด์เพลนซึ่งจะมีทั้งทิศทางการแพร่และการสะท้อนของกราวด์เพลน โดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของกราวด์เพลน จะเป็น -1 ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมจะหาได้จาก

$$E(\theta)_{total} \cong \frac{j\eta I_0 \eta}{2\pi r} (1 - \cos \frac{\beta l}{2}) \left(\frac{e^{-j\beta r_1}}{r_1} - \frac{e^{-j\beta r_2}}{r_2} \right) \quad (3.82)$$

เมื่อ r_1 และ r_2 เป็นระยะจากการส่ง และการสะท้อน จนถึงจุดสังเกต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

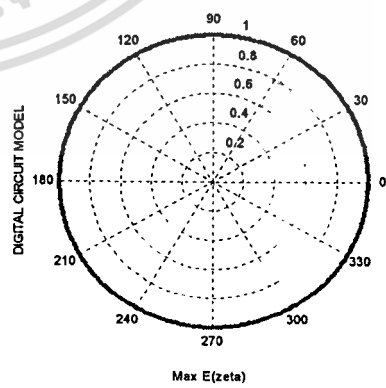
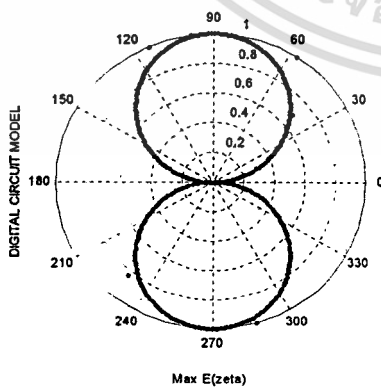


(ก) การแพร่คลื่นในคิฟเฟอร์เรนเชียลโหมด (ข) การแพร่คลื่นในคอมมอนโหมด



(ค) การแพร่คลื่นในโหมดรวม

รูปที่ 3.30 แสดงการแพร่คลื่นจากวงจรดิจิทัลที่ความถี่ 30 MHz

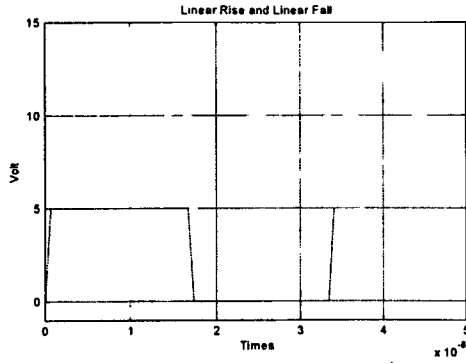


(ก) การแพร่สนามไฟฟ้า E_{θ}

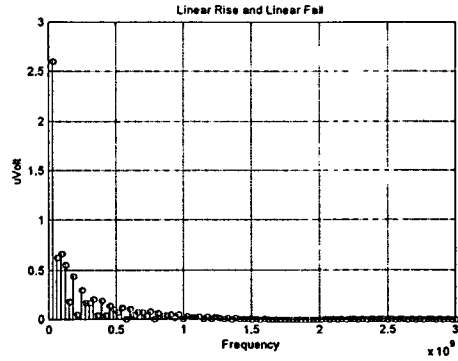
(ข) การแพร่สนามไฟฟ้ามากที่สุดจากวงจรดิจิทัล

รูปที่ 3.31 แสดงการแพร่คลื่นจากวงจรดิจิทัลและสายเคเบิลที่นำมาต่อแบบละเอียดที่ 30 MHz

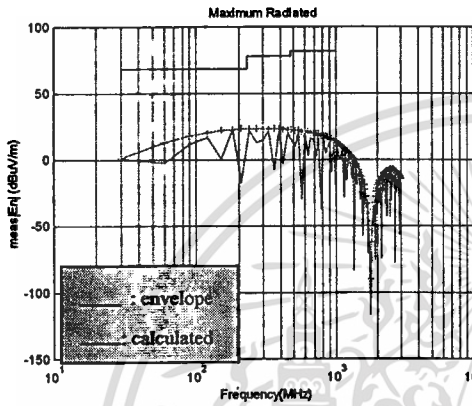
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



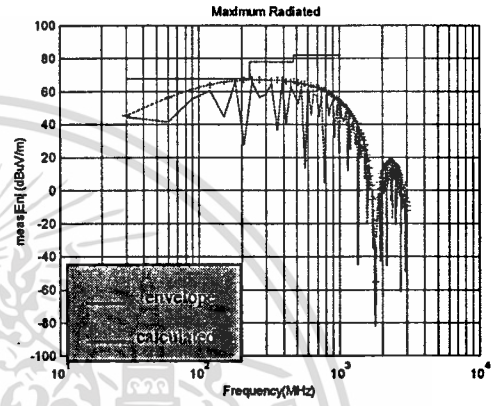
(ก) สัญญาณอินพุต 5V 50% ดิวตี้ไซเคิล



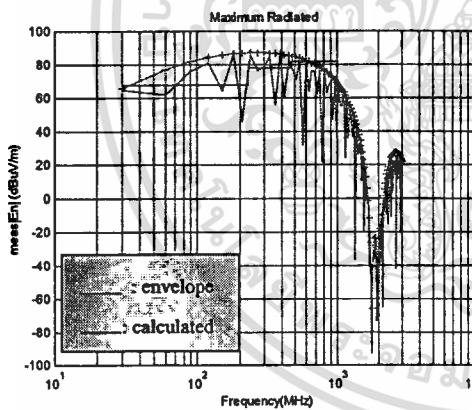
(ข) สัญญาณอินพุตเทอมความถี่



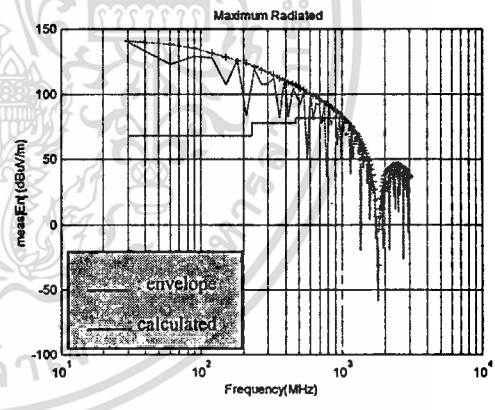
(ค) $w = 1 \text{ cm}, L = 1 \text{ cm}$



(ง) $w = 3 \text{ cm}, L = 3 \text{ cm}$



(จ) $w = 5 \text{ cm}, L = 5 \text{ cm}$



(ฉ) $w = 10 \text{ cm}, L = 10 \text{ cm}$

รูปที่ 3.32 สนามไฟฟ้าระยะไกลจากวงจรจิตอลซึ่งปรับความยาวและความกว้างของลูป

จากรูปที่ 3.32 พบว่าเมื่อป้อนสัญญาณพัลส์ความถี่ 30 MHz โดยกำหนดให้มีค่าเวลาขาขึ้นและขาลง คงที่เป็น 50 ns Duty Cycle เป็น 50 % และมีระดับของสัญญาณอินพุตเป็น 5 โวลต์ เข้าสู่โปรแกรมสำหรับคำนวณ จากผลการคำนวณชี้ชัดว่า การปรับขนาดความกว้างและความยาวของวงจรจิตอลจากตัวส่ง(Tx) ไปยังตัวรับ(Rx) สามารถลดระดับความแรงของสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาได้ โดยขนาดของลูปที่มีค่ามากจะแพร่สนามไฟฟ้าออกมาตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

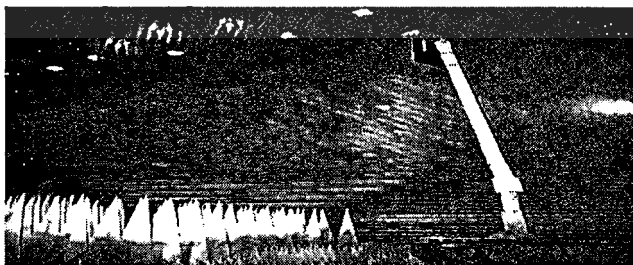
การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ EMC

ในการทดสอบทาง EMC ตามมาตรฐานสากลจะใช้โครงสร้างสำคัญของการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกันขึ้นกับชิ้นส่วน หรืออุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบ ขนาดของ EUT ราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ ความสะดวกในการใช้งาน โครงสร้างของห้องทดสอบทาง EMC มีดังนี้

1 Semi Anechoic Chamber เป็นอุปกรณ์หรือห้องที่ใช้ปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกสู่ภายนอก และป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณวิทยุ(RFI) จากภายนอกเข้ามารบกวนอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ ภายในห้องประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- ผนังซีลด์ เป็นโลหะซึ่งมีค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กไฟฟ้าสูง ใช้กันสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่ภายในห้องทดสอบ.
- ผนังเฟอร์ไรต์ เป็นออกไซด์ของโลหะหลายชนิด ใช้ในการดูดซับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสะท้อนภายในห้อง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกดูดซับและไม่มีการสะท้อนในห้อง
- แผ่นโฟมผสมผงเฟอร์ไรต์จะถูกดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ ภายในห้องไม่ให้เกิดการสะท้อน
- พื้นซึ่งเป็นกรวดเหล็กแบบเรียบใช้ในการสะท้อนสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- สายอากาศใช้ในการรับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแผ่ออกจากอุปกรณ์ทดสอบ สายอากาศจะถูกติดตั้งอยู่บนเสาอากาศคลื่นที่ได้อันสูง 4 เมตร
- แท่นหมุน เป็นจานโลหะรัศมี 1.5 เมตร ถึง 3 เมตร ใช้ในการวางอุปกรณ์ทดสอบ สามารถปรับมุมการหมุนได้ตั้งแต่ 0 องศาถึง 360 องศา เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งที่ EUT แพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าออกมามากที่สุด



รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของ Anechoic Chamber

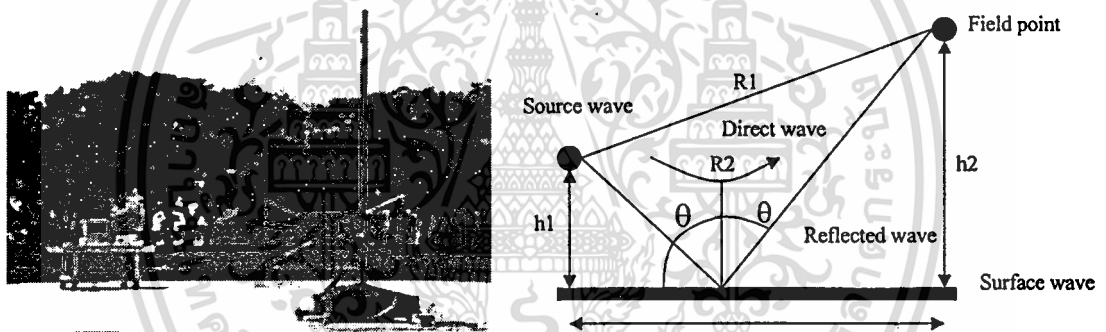
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 แนวการรับของสายอากาศตามมาตรฐานการทดสอบทาง EMC

โมเดลการแพร่ของคลื่นเหนือพื้นตัวนำซึ่งปกติเป็นพื้นโลหะขนาดของแผ่นกราวด์ เพลนจะเป็นไปตามข้อกำหนดของ National Institute of Standard and Technology [25] ประมาณ $30 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ การที่ใช้กราวด์เพลนเป็นโลหะคลื่นที่ตกกระทบจะทำให้เกิดการทะลุผ่านและบางส่วนเกิดการสะท้อน เพื่อที่จะหาค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่แพร่ออกมาจากอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ มาตรฐานทาง EMC กำหนดให้ทำการวัดโดยการกลับหัวของสายอากาศเป็นแบบแนวนอน (horizontal) และแนวตั้ง (Vertical) ผลของการสลับแกนของสายอากาศจะมีผลต่อความเข้มของสนามไฟฟ้าที่รับได้ สามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ

4.2.1. การรับของสายอากาศในแนวนอน (Horizontal Polarization)

ในกรณีของสายอากาศแนวนอน ตกกระทบตั้งฉากและขนานกับพื้นผิวสะท้อน เมื่อสายอากาศตัวส่งเป็นไดโพลตั้ง ค่าเกณฑ์ไดเรกแพทเทิร์น $D(\phi)$ คงที่



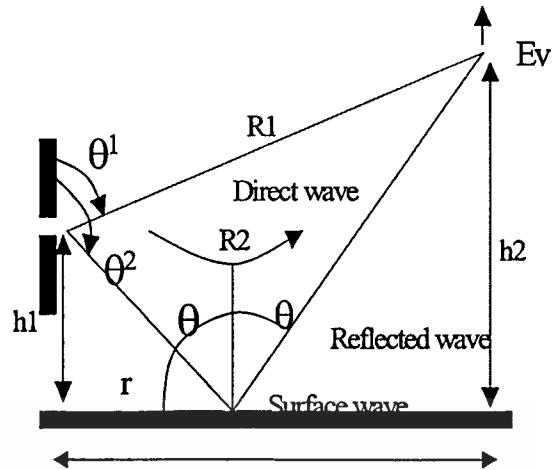
รูปที่ 4.2 แสดงแนวการรับของสายอากาศในแนวนอน

เมื่อ $\rho_h = -1$ ความเข้มของสนามไฟฟ้าระยะไกลหาได้จากสมการที่ (4.1)

$$E(r) = \frac{2\sqrt{30P_oD}}{r} \sin\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r}\right) \quad (4.1)$$

4.2.2 สายอากาศในแนวตั้ง (VERTICAL POLARIZATION)

การคำนวณความเข้มของสนามสำหรับสายอากาศแนวตั้ง ทำได้ยุ่งยากมากกว่าในกรณีของสายอากาศในแนวนอน ทิศทางของสายอากาศตัวส่งจะต้องพิจารณา จากตัวปล่อยสัญญาณแบบ ไดโพลสั้นและสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่น



รูปที่ 4.3 แสดงแนวการรับของสายอากาศแนวตั้ง

ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่วัดได้หาได้จากสมการที่ (4.2)

$$E_v(r) = \frac{2\sqrt{45P_0}}{r} \quad (4.2)$$

สมการที่ (4.1) และ (4.2) ถูกนำมาใช้ในการทวนสอบค่าที่ได้จากการวัดของสายอากาศแนวตั้งและแนวนอน โดยจะต้องทราบกำลัง (P) ของแหล่งกำเนิดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสายอากาศ (r) และความสูงของสายอากาศ (h) และถูกใช้ในการชดเชย (Compensate) ผลการคำนวณของสนามไฟฟ้าในระยะไกล

บทที่ 5

โครงข่ายประสาทเทียม

5.1 บทนำ

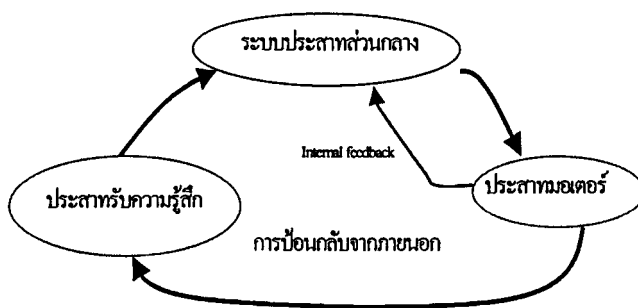
เมื่อเราพิจารณาถึงมนุษย์และสัตว์จะเห็นว่าสามารถรู้จักภาพและวิเคราะห์แยกแยะเสียง ได้ดีกว่าคอมพิวเตอร์ที่ทันสมัยที่สุด แม้จะเป็นคอมพิวเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่องานทางด้านนี้ โดยเฉพาะก็ตาม และนักวิจัยในสาขานี้ได้คาดหวังกันว่าระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network Systems: ANNS) จะเป็นคลื่นลูกใหม่ที่ใช้ในการประมวลผลข่าวสาร สำหรับใช้แทนหรือสนับสนุนการคำนวณแบบเดิม โครงข่ายประสาทเทียมจะช่วยเสริมความสามารถของคอมพิวเตอร์สำหรับการประมวลผลในระบบใหญ่ ๆ ซึ่งระบบนี้สามารถเรียนรู้และตัดสินใจสำหรับกระบวนการของระบบนั้น ๆ ได้

5.2 ระบบเซลล์ประสาททางชีววิทยา

ระบบประสาทมีหน้าที่ควบคุมรักษาสมดุลภายในร่างกายให้คงที่ ระบบประสาทของมนุษย์เป็นระบบที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนจะประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neurons) ประมาณ 10 เซลล์ [6] และเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทตัวอื่นอีกประมาณ 10 ล้าน เซลล์ ระบบประสาทมีอยู่ด้วยกัน 3 ส่วน แสดงในรูปที่ (5.1) คือ

1. ระบบประสาทส่วนกลาง (Central Nervous System)
2. ระบบประสาทรับความรู้สึก (Sensory Systems)
3. ระบบประสาทมอเตอร์ (Motor Systems)

จากภาพที่ (5.1) ระบบประสาทส่วนกลางจะทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ที่รับมาจาก ระบบประสาทรับความรู้สึกที่ประกอบด้วยเซลล์ประสาทรับความรู้สึก (Sensory Receptor) ซึ่งจะรับรู้เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมรอบตัว และจะส่งข่าวสารไปยังประสาทส่วนกลาง และเมื่อประสาทส่วนกลางประมวล แล้วก็ส่งสัญญาณไปควบคุมสั่งการระบบประสาทมอเตอร์ของอวัยวะแสดงผล (Effector) ให้ทำงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งภายในและภายนอกร่างกาย



รูปที่ 5.1 การสื่อสารข้อมูลในระบบประสาท

5.3 การสื่อสารข้อมูลในระบบประสาท

เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะประกอบด้วยตัวเซลล์ (Cell Body) และแขนงที่แยกออกจากตัวเซลล์ซึ่งได้แก่ แอกซอน (Axon) และ เดนไดรต์ (Dendrite) แสดงดังรูปที่ (5.2) แอกซอนมีจุดเริ่มต้นจากบริเวณส่วนที่หนาที่สุดของเซลล์ประสาทที่เรียกว่า Axon Hillock เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะมีแอกซอนเพียงหนึ่งอันปลายของแอกซอนจะแยกเป็นแขนงหลายเส้น



รูปที่ 5.2 โครงสร้างของเซลล์ประสาทและการส่งสัญญาณกระแสนประสาท

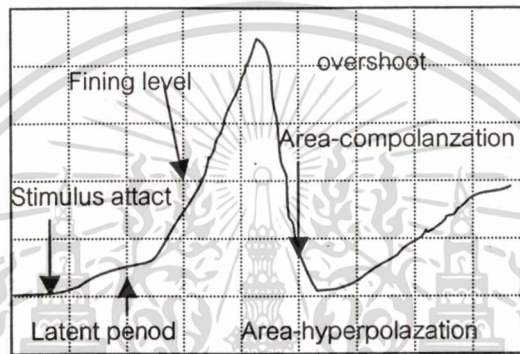
5.4 โครงสร้างของเซลล์ประสาทและการส่งสัญญาณกระแสนประสาท

Terminal Buttons และที่จุดสิ้นสุดนี้จะมีตัวรับกระแสนประสาท (Nerve impulse) ที่เรียกว่า Receptor Zone ซึ่งต่อกับเดนไดรต์ของประสาทตัวอื่น กระแสนประสาทหรือข้อมูลที่อยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมี จะไปกระตุ้นให้ตัวเซลล์ส่งเซลล์ประสาทตัวอื่น และเดนไดรต์จะทำหน้าที่รับกระแสนประสาทจากเซลล์อื่นเข้าสู่ตัวเซลล์

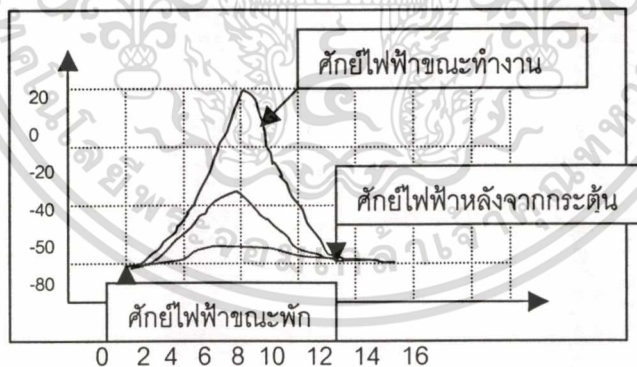
คุณสมบัติของเซลล์ประสาทโดยทั่วไปคือ จะมีความไวต่อการถูกกระตุ้น เมื่อเซลล์ประสาทถูกกระตุ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลย์ของไอออนบริเวณ Receptor Zone ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้น และเมื่อความต่างศักย์ของจุดนี้สูงกว่าค่าเทรชโฮลด์ก็จะทำให้เกิดการส่งสัญญาณกระแสนประสาทไปยังเซลล์อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต่างศักย์ของเยื่อหุ้มเซลล์ประสาทขณะพักประมาณ -60 ถึง -90 mV ถ้ามีการกระตุ้นเซลล์ประสาทจะมีการแก้โพลาไรซ์ (Depolarization) ของเยื่อหุ้มเซลล์ และหลังจากเกิดการแก้โพลาไรซ์จนความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเป็น 15 mV แล้ว จะทำให้อัตราการแก้โพลาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจุดนี้จะเรียกว่า Firing Level แสดงดังรูปที่ (5.3) เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด (35 mV) จะทำให้อัตราการแก้โพลาไรซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว (70%) และจะค่อย ๆ ลดลงกลับเข้าสู่ภาวะปกติ หลังจากเข้าสู่ภาวะปกติแล้วความต่างศักย์จะลดลงต่ำกว่าระดับปกติซึ่งจะเรียกช่วงนี้ว่า After Hyperpolarization ลำดับของการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ทั้งหมดนี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน (After Potential)



รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะการเกิดศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน



รูปที่ 5.4 แสดงศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานที่เกิดจากการรวมกันของซิแนปส์

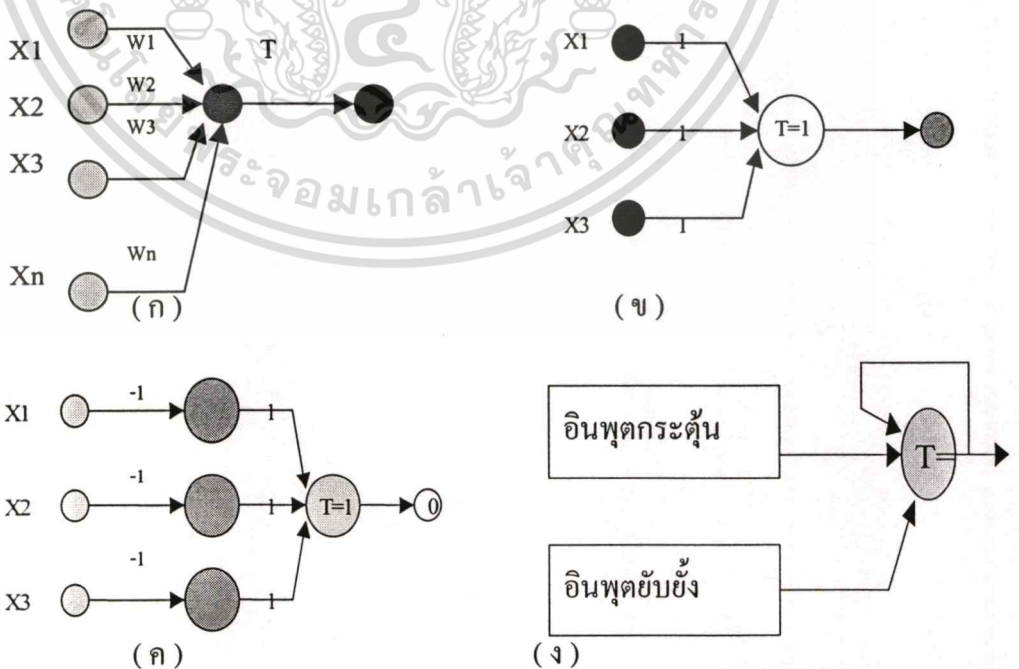
ภายในเซลล์เป็นลบมากขึ้น (ประมาณ -75 mV) ซึ่งจะส่งผลให้เซลล์ประสาทถูกกระตุ้นยากขึ้นกว่าปกติ คือต้องใช้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเป็น 16 mV จึงจะสามารถกระตุ้นเซลล์ประสาทให้ถึง Firing Level ได้ ซึ่งระยะนี้จะเรียกว่าระยะการคือ (Refractory Period)

5.5 แบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาท

ในหัวข้อที่แล้วเราได้กล่าวถึงการทำงานของระบบประสาทโดยทั่วไป ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ในหัวข้อนี้จะมาพิจารณากันถึงระบบการทำงานของแบบจำลองระบบประสาทที่จะใช้ในการประมวลผลโดยเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้ควบคุม (รักษาสมดุล) ระบบต่าง ๆ แบบจำลองที่จะกล่าวมาเป็นแบบแรกในที่นี่ถูกเสนอโดย McCulloch และ pitts ในปี ค.ศ. 1943 ซึ่งระบบของเซลล์ประสาทแสดงในภาพที่ (5.5) ก อินพุต x (สำหรับ $I = 1, 2, 3, \dots, n$) จะมีค่าเป็น $\{0,1\}$ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตสัญญาณจากเซลล์อื่นในขณะนั้นว่าจะมีหรือไม่มีสัญญาณ ส่วนสัญญาณที่จะส่งต่อไปยังเซลล์ถัดไปซึ่งเป็นเซลล์ส่งผล (เซลล์ของผลลัพธ์จะแทนด้วย O) และ Firing Level ของแบบจำลองนี้ถูกจำลองโดย

$$O^{k+1} = \begin{cases} 1 : & \text{ถ้า } \sum_{i=1}^n w_i x_i^k \geq T \\ 0 : & \text{ถ้า } \sum_{i=1}^n w_i x_i^k < T \end{cases} \quad (5.1)$$

โดยที่ $k = 0, 1, 2, \dots$ เป็นช่วงเวลาที่ต่อเนื่อง w เป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมต่อกับอินพุตที่ I ซึ่งถ้า $w = +1$ แสดงถึงสถานะการกระตุ้นของซินแนปส์ และถ้า $w = -1$ ซินแนปส์จะมีการยับยั้งการส่งผ่านสัญญาณและ T เป็นค่าความต่างศักย์เทรชโฮลด์หรือขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งถ้าค่าผลรวมของผลคูณระหว่างค่าถ่วงน้ำหนักกับสัญญาณอินพุตจะต้องมากกว่า T จึงจะมีสัญญาณผ่านไปยังเซลล์อื่นได้

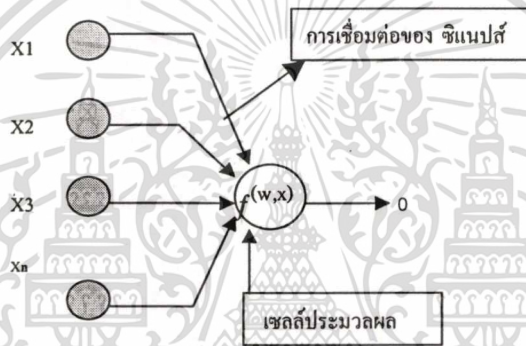


รูปที่ 5.5 แบบจำลองเซลล์ประสาทของ McCulloch-Pitts และโครงข่ายลอจิกพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แบบจำลอง (ข) เกต NOR (ค) เกต NAND (ง) เซลล์หน่วยความทรงจำ โยชนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของ McCulloch-Pitts แม้จะเป็นโครงข่ายแบบง่าย ๆ แต่แบบจำลองนี้สามารถใช้แทนตัวดำเนินการทางลอจิกได้ คือตัวดำเนินการ NOT OR และ AND เมื่อเรากำหนดค่าถ่วงน้ำหนักและค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมกับโครงข่าย ในรูปที่ (5.5) (ข) หรือ (5.5) (ค) เป็นแบบจำลองที่ใช้ดำเนินการซึ่งเป็น Gates ที่ใช้ในพีชคณิตบูลีนคือ NOR หรือ NAND ซึ่งมีอินพุตสามตัว และในรูปที่ (5.5) (ง) เป็นเซลล์ที่แทนหน่วยความทรงจำซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีการป้อนกลับจากเอาต์พุต

ANN ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นแบบจำลองที่ใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาแบบจำลองและระบบการเรียนรู้ชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวต่อไปซึ่งโครงข่ายนี้จะคล้ายกับแบบจำลองของ McCulloch-Pitts ส่วนที่ต่างกันคือค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองเนื่องจากค่าตัวแปรในแบบจำลอง ANN เป็นเลขจำนวนจริงและค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการเรียนรู้ซึ่งแบบจำลองนี้แสดงในรูปที่ (5.6)



รูปที่ 5.6 แบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม

5.6 แบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียม

จากรูปที่ (5.6) แสดงโครงข่ายการเชื่อมต่อของแบบจำลองเซลล์ประสาทที่สามารถสอนให้โครงข่ายตัดสินใจได้โดยมี X เป็นสัญญาณอินพุตและ w เป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการสอนโครงข่าย และแต่ละโหนดในโครงข่ายจะใช้แทนเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ ซึ่งบางครั้งจะเรียกว่าหน่วยประมวลผลพื้นฐาน (Process Element Unit) และมีซิแนปส์ซึ่งจะเชื่อมต่อโหนดเพื่อใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ การกระตุ้นหรือยับยั้งสัญญาณจะขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนัก w และสำหรับสัญญาณเอาต์พุตสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$0 = f(w'X) \quad (5.2)$$

โดยที่ w เป็นเวกเตอร์ของค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งสามารถกำหนดได้ดังนี้

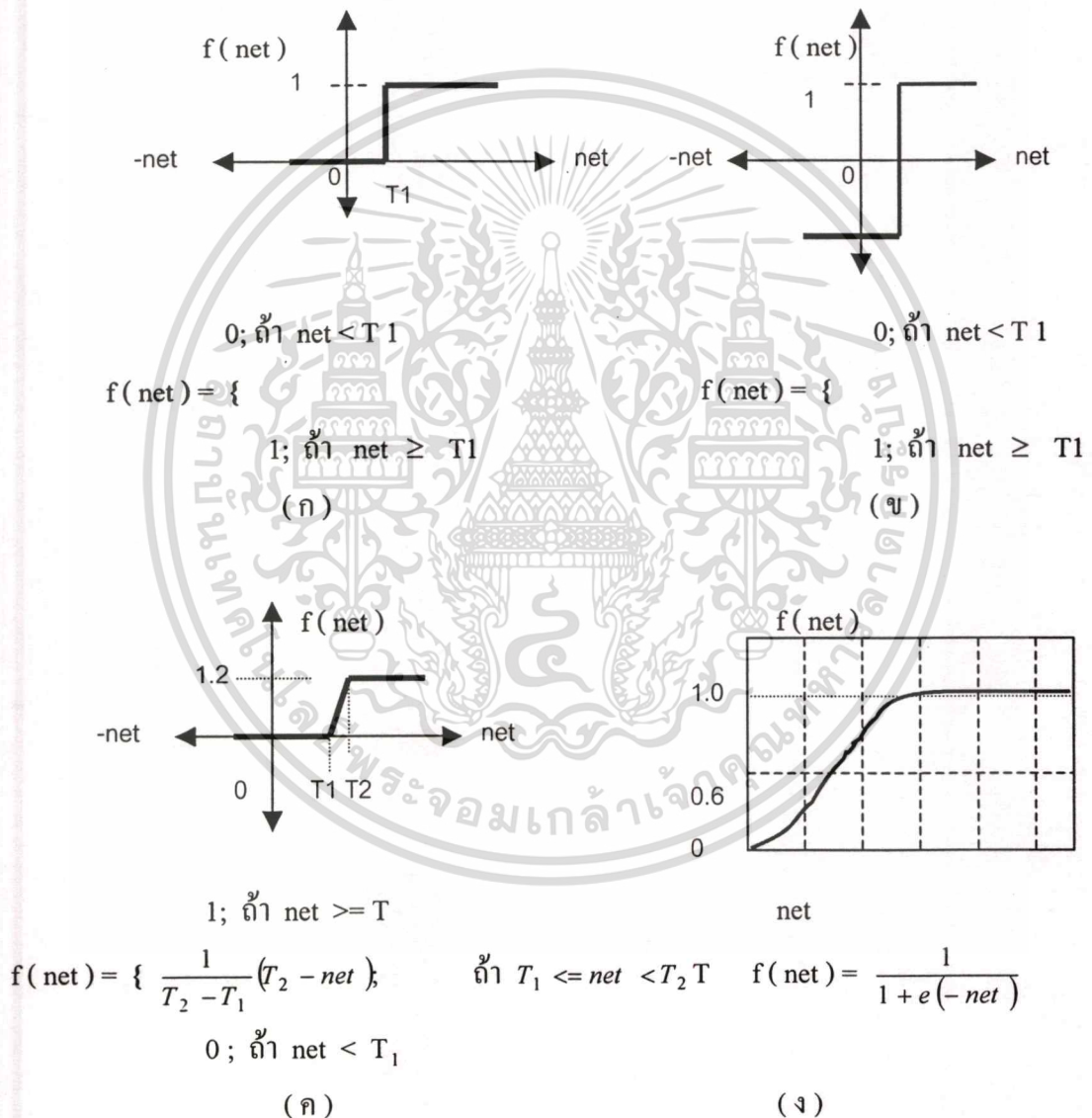
$$W = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_n] \quad (5.3)$$

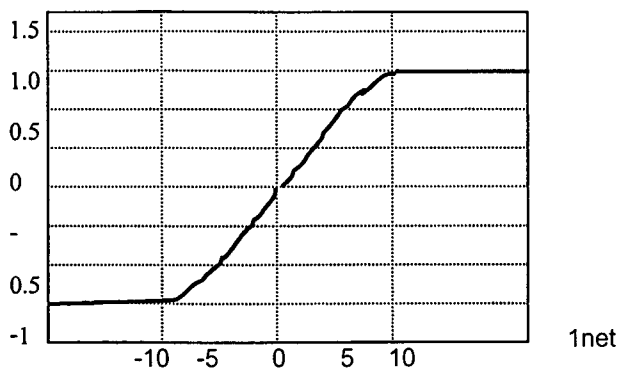
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ X เป็นเวกเตอร์อินพุต $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ เมื่อ t เป็นตัวดำเนินการทรานสโพลต์ของเมตริกซ์ฟังก์ชันกำหนดคณญาณเอาต์พุตในสมการที่ (124) ถูกเรียกว่าฟังก์ชันการเร่งเร็วหรือ แอกติเวชันฟังก์ชัน (Activation Function) [5] ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับกราฟของศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานในรูปที่ (5.7) Activation Function มีด้วยกันสองชนิดคือ ชนิดที่เป็นเชิงเส้นและชนิดไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ (5.7)

กำหนดให้ $net = W'x = \sum_{i=1}^n w_i x_i$ และ T_1, T_2 เป็นค่าเทรชโฮลด์





$$f(\text{net}) = \frac{2}{1 + e^{-(\text{net})}} - 1$$

(จ)

รูปที่ 5.7 Activation Function แบบชนิดต่างๆ (ก) Threshold Logic (ข) Bipolar Binary

(ค) Linear Threshold (ง) Sigmoid (จ) Bipolar Continuous

สำหรับ Activation Function ในรูปที่ (5.7) ที่เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ภาพที่ (5.7) (ก-ค) และแบบต่อเนื่อง (รูปที่ (5.7) (ง-จ) ค่าที่ได้จากฟังก์ชันเหล่านี้มีสองลักษณะ [5][6] คือ สองสภาพขั้วหรือ ไบโพลาร์ (Bipolar) ซึ่งโดเมนของ $f(\text{net})$ จะอยู่ในช่วงปิด $[-1,1]$ และหนึ่งสภาพขั้วหรือ ยูนิโพลาร์ (Unipolar) ซึ่งโดเมนของ $f(\text{net})$ จะอยู่ในช่วงปิด $[0,1]$ การที่จะกำหนดว่า Activation Function ใดคุณสมบัติดีที่สุดคงเป็นไปได้ยาก เนื่องจาก ANNs ไม่มีโครงข่ายที่แน่นอน นั่นคือโครงข่ายหนึ่งจะใช้ได้กับปัญหาใดปัญหาหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นการเลือก Activation Function ใดจะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับปัญหานั้นๆ

5.7 การเรียนรู้ของโครงข่าย

การเรียนรู้ของ ANN จะมีประสิทธิภาพเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่าย ซึ่งการสอน (Training) โครงข่ายก็คือการหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมให้แก่โครงข่ายนั้นๆ วิธีการสอน ANN มีอยู่สองแบบด้วยกัน คือ

การสอนแบบชี้แนะหรือดูแล (Supervised Learning) การสอนโดยวิธีนี้จะกำหนด เซตของการสอนให้กับโครงข่ายซึ่งเซตนี้ประกอบด้วยอินพุต และเอาต์พุตที่ต้องการ (Output Desired) เมื่อป้อนอินพุตให้กับโครงข่ายๆ ก็จะทำให้การประมวลผลจนได้คำตอบและค่าถ่วงน้ำหนัก สำหรับคำตอบที่ได้จากโครงข่ายจะถูกนำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาปัญญาประดิษฐ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความห่างจากคำตอบที่ต้องการของอินพุตในชุดเดียวกันมาน้อยเพียงใด ถ้ายังมีความผิดพลาดสูงอยู่ก็จะมีค่าถ่วงน้ำหนัก และทำการสอนต่อไปจนกว่าค่าความผิดพลาดระหว่างค่าคำตอบของโครงข่ายกับเอาต์พุตที่ต้องการมีค่าน้อยพอที่จะรับได้ จึงหยุดการสอนและค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้ก็จะเป็นเหมือนฟังก์ชันที่ใช้ในการแปลงข้อมูล

การสอนแบบที่ไม่มีการชี้นำและไม่มีการดูแล (Unsupervised Learning) การสอนโดยวิธีนี้จะป้อนอินพุตเข้าสู่โครงข่ายและภายในโครงข่ายจะมีเอาต์พุตโหนดอยู่หลายโหนดด้วยกัน โดยแต่ละโหนดจะแทนกลุ่มของข้อมูลที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน เมื่อป้อนอินพุตเข้าสู่โครงข่าย ๆ จะคำนวณค่าความสัมพันธ์ที่มีอยู่ภายในเซตของอินพุตโดยอาศัยค่าความถ่วงน้ำหนักเป็นตัวแยกความแตกต่างของอินพุตไปเก็บไว้ในโหนดเอาต์พุตของโครงข่าย การสอนโดยวิธีนี้จะไม่สามารถระบุได้ว่าเอาต์พุตโหนดใดเป็นของข้อมูลกลุ่มไหน ผู้ใช้จะต้องกำหนดเอง ซึ่งต่างจากการสอนชี้นำที่โครงข่ายสามารถระบุกลุ่มของเอาต์พุตได้แน่นอน

การสอนโครงข่ายเซลล์ประสาทจำลอง เป็นการหาฟังก์ชันการแปลงและฟังก์ชันการแปลงที่ได้จะมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งฟังก์ชันการแปลงของ ANN ในที่นี้คือเซตของค่าความถ่วงน้ำหนักของโครงข่าย ดังนั้นฟังก์ชันการแปลงจะมีศักยภาพมากน้อยเพียงใดนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายนั้น ๆ ว่ามีเสถียรภาพมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายนั้น ๆ ว่ามีเสถียรภาพมากน้อยเพียงใด และค่าถ่วงน้ำหนักคำนวณได้จากการสอนโครงข่าย ซึ่งการสอนโครงข่ายมีหลายแบบด้วยกันเช่น กฎการสอนของ Hebb, กฎการสอนแบบ การสอนโดยใช้สหสัมพันธ์, กฎการสอนแบบ Winner – Take – All, และกฎการสอนแบบ Outstar ของ Grossberg ในตารางที่ (5.1) ได้สรุปกฎการสอนโครงข่ายของวิธีต่าง ๆ ไว้

5.8 การแพร่กระจายกลับ

การแพร่กระจายกลับหรือแบคโพรพาเกชัน (Back-Propagation) เป็นขั้นตอนที่ใช้สอนโครงข่ายแบบ Multilayer Perceptron ซึ่งเป็นแบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทที่มีการเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายแบบเป็นชั้น ๆ ดังในรูปที่ (5.8) ซึ่งโครงข่ายนี้มีการเชื่อมโยงกัน 3 ชั้น ประกอบด้วยชั้นของอินพุตซึ่งมีเซลล์ประสาทอยู่ N โหนด ถัดมาเป็นชั้นของฮิดเดนหรือชั้นภายใน (Hidden Layer) ซึ่งประกอบด้วยโหนดต่าง ๆ จำนวน M โหนด และสุดท้ายคือชั้นของเอาต์พุตซึ่งมีโหนดต่าง ๆ อยู่ L โหนด โครงข่ายแบบ Multilayer Perceptron ในรูปที่ (5.8) แต่ละโหนดในชั้นเดียวกันจะไม่มีการเชื่อมโยงกันจะมีเฉพาะระหว่างชั้นเท่านั้น และการเชื่อม

ตารางที่ 5.1 แสดงการปรับค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับกฎการสอนแบบต่าง ๆ

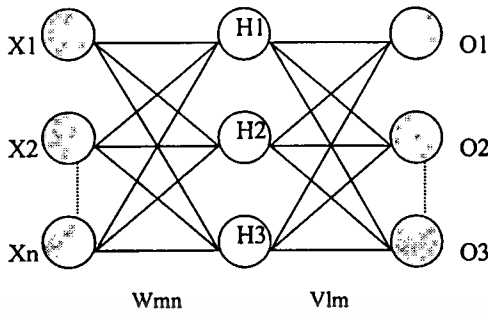
c เป็นค่าคงที่ของอัตราการเรียนรู้

S การสอนแบบชี้หน้า, U : การสอนแบบไม่มีการชี้หน้า

Δw_{ij} ค่าถ่วงน้ำหนักถูกปรับค่าและมีการเชื่อมต่อระหว่างอินพุตโหนดที่ i และเอาต์พุตโหนดที่ j

กฎการสอน	การปรับค่าถ่วงน้ำหนัก	ค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนัก	การสอน	Activation Function
Hebb	$\Delta w_{ij} = cf (W_i' X) x_j$	0	U	Any
Preceptron	$\Delta w_{ij} = c(d_i - f(W_i' X)) x_j$	จำนวนจริงใด ๆ	S	Binary Bipolar of Binary Unipolar
Delta	$\Delta x_i = c(d_i - o_i) f'(W_i' X) X$	จำนวนจริงใด ๆ	S	ฟังก์ชันต่อเนื่อง
Widrow-Hoff	$\Delta w_{ij} = c(d_i - (W_i' X)) x_j$	จำนวนจริงใด ๆ	S	Any
Correlation	$\Delta x_{ij} = cd_i x_j$	0	S	Any
Winner-Take-All	$\Delta w_{mj} = c(x_j - x_{mj})$ m : โหนดที่เป็น Winner	Random Normalized	U	ฟังก์ชันต่อเนื่อง
Outstat	$\Delta w_{ij} = c(d_i - w_{ij})$	0	S	ฟังก์ชันต่อเนื่อง

เหมือนในรูปที่ (5.8) อาจจะมีจำนวนชั้นมากกว่านี้ก็ได้ซึ่งอาจมีสี่ชั้น โดยการเพิ่มชั้นฮิดเดนเข้าไปอีกหนึ่งชั้น หรือถ้าต้องการจำนวนชั้นมากกว่านี้ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มชั้นของฮิดเดน ซึ่งโครงข่ายนี้มีการเชื่อมโยงกัน 3 ชั้น ซึ่งประกอบด้วยชั้นของอินพุตซึ่งมีเซลล์ประสาทอยู่ N โหนด ถัดมาเป็นชั้นของฮิดเดนหรือชั้นภายใน (Hidden Layer) ซึ่งประกอบด้วยโหนดต่าง ๆ จำนวน M โหนด และสุดท้ายคือชั้นของเอาต์พุตซึ่งมีโหนดต่าง ๆ อยู่ L โหนด โครงข่ายแบบในรูปที่ (5.8) แต่ละโหนดในชั้นเดียวกันจะไม่มี การเชื่อมโยงกันจะมีเฉพาะระหว่างชั้นเท่านั้น และการเชื่อมโยงนี้จะต่อถึงกันทุกโหนด โครงข่ายแบบ Multilayer Perceptron ไม่จำเป็นต้องมีสามชั้นเหมือนในรูปที่ (5.8) อาจจะมีจำนวนชั้นมากกว่านี้ก็ได้ซึ่งอาจมีสี่ชั้น โดยการเพิ่มชั้นฮิดเดนเข้าไปอีกหนึ่งชั้น หรือถ้าต้องการจำนวนชั้นมากกว่านี้ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มชั้นของฮิดเดน



$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n\}$$

เซตของอินพุต (input layer)

$$H = \{h_1, h_2, h_3, h_4, \dots, h_m\}$$

เซตของฮิดเดน (hidden layer)

$$O = \{o_1, o_2, o_3, o_4, \dots, o_l\}$$

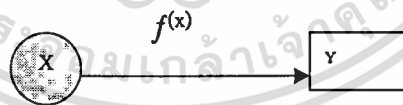
เซตของเอาท์พุต (output layer)

w : เมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อม
ชั้นอินพุตกับฮิดเดน

V : เมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อม
ชั้นฮิดเดนกับเอาท์พุต

รูปที่ 5.8 แสดงโครงข่าย Multilayer Perceptron ที่มี 3 ชั้น

ชั้นฮิดเดน เป็นตัวเพิ่มความสามารถให้แก่โครงข่ายเซลล์ประสาท โครงข่ายแบบ Multilayer Perceptron ถ้าไม่มีชั้นฮิดเดนก็จะกลายเป็นโครงข่ายแบบ Perceptron อย่างเช่น โครงข่ายแบบ Perceptron ที่เสนอโดย Rosenblatt ซึ่ง Minsky และ Papert ได้แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายเซลล์ประสาท จำลองนี้เป็นโครงข่ายที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาท์พุตในลักษณะเชิงเส้นซึ่งไม่สามารถจะแก้ปัญหาเอ็กคลูซิฟ (Exclusive OR : XOR) ได้ในกรณีที่ไม่ มีชั้นฮิดเดนความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการแปลงดังแสดงในตัวอย่างข้างล่างนี้



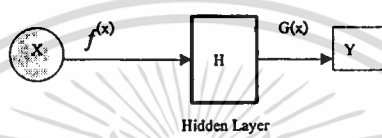
รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X และ Y

จากรูปที่ (5.9) เมื่อ X เป็นตัวแปรอิสระ Y เป็นตัวแปรตามและ $f(X)$ เป็นฟังก์ชันการแปลง จาก X ไปยัง Y ในกรณีที่ X เป็นการเป็นอิสระต่อกันแบบเชิงเส้น (Linearly Independent) เราสามารถคำนวณฟังก์ชันการแปลง $f(X)$ ได้ ตัวอย่างเช่น ถ้า $\alpha_1 = \{0,1\}$ และ $\alpha_2 = \{1,0\}$ เมื่อ $X = [\alpha_1, \alpha_2]$ และ $Y = [1,1]$ ดังนั้นเราสามารถคำนวณฟังก์ชันการแปลงได้ ดังนี้

$$X f(X) = Y \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อฟังก์ชันการแปลง $f(X) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ แต่ถ้าตัวแปร X ไม่เป็นอิสระต่อกันแบบเชิงเส้น (Linearly Dependent) เราไม่สามารถจะกำหนดฟังก์ชันการแปลง $f(X)$ ได้เช่นถ้า $\alpha_1 = \{0,0\}$ และ $\alpha_2 = \{1,1\}$ เมื่อ $X = [\alpha_1, \alpha_2]$ และ $Y' = [1,1]$ จะได้ว่า $X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ซึ่งในกรณีนี้เราไม่สามารถคำนวณฟังก์ชัน $f(X)$ ที่สอดคล้องกับ Y ได้ และในกรณีนี้จะเหมือนกับปัญหา XOR แต่ถ้าเพิ่มชั้นฮิดเดนเข้าไปในรูปที่ (5.10) จะทำให้สามารถแก้ปัญหาคือเป็น Linearly Dependent นี้ได้



รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X กับ Y โดยมีชั้นฮิดเดนเป็นตัวเชื่อม

ในการหาความสัมพันธ์จาก X ไปยัง Y โดยใช้ชั้นของฮิดเดนในทาง ANN จะทำให้ฟังก์ชัน $f(X)$ และ $g(X)$ ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่ง $f(X)$ และ $g(X)$ ในที่นี้ก็คือ ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จากการสอนโครงข่ายนั่นเอง การที่จะกำหนดชั้นของฮิดเดนว่าในโครงข่ายหนึ่ง ๆ ควรมีฮิดเดนกี่ชั้น และแต่ละชั้นประกอบด้วยกี่โหนดนั้นไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน ดังนั้นการกำหนดจำนวนชั้นและจำนวน โหนดของแต่ละชั้นของฮิดเดนสามารถทำได้โดยการทดลอง

5.9 วิธีการของกฎเดลต้าเอนกประสงค์

กฎเดลต้า (Delta Rule) ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สอนโครงข่ายเซลล์ประสาทจำลอง ซึ่งครั้งแรกใช้ในการสอนโครงข่ายเซลล์ประสาทจำลอง Perceptron ซึ่งจะเป็นกำการสอน Preceptron แบบต่อเนื่องและต่อมาได้พัฒนาการการสอนเดลต้ารูทให้ใช้ได้กับโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อกันหลายชั้นอย่าง จึงเรียกกฎเดลต้าที่ถูกพัฒนาขึ้นใหม่นี้ว่า กฎเดลต้าเอนกประสงค์ (Generalized Delta Rule : GDR)

ขั้นตอนการสอนโครงข่าย Multilayer Perceptron จะเรียกว่า ขั้นตอนการสอนแบบความผิดพลาดแพร่กระจายกลับหรือ Error Back-propagation ซึ่งเป็นการแพร่กระจายของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในชั้นเอาต์พุตที่ต้องการกับเอาต์พุตที่คำนวณได้ โดยคำนวณย้อนกลับจากชั้นเอาต์พุตผ่านชั้นฮิดเดนตลอดมาจนถึงชั้นอินพุตเพื่อทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักจากรูปที่ (5.8)

เมื่อทำการสอนโครงข่ายนี้ ซึ่งมีการสอนแบบซ้ำๆ ดังนั้นในการสอนจะต้องป้อนเซตของข้อมูลที่จะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สอนของอินพุท กำหนดให้ P เป็นจำนวนเซตทั้งหมดที่ใช้ในการสอนโครงข่ายคั้งนั้นเซตของอินพุทและเอาต์พุทที่ต้องการที่จะมีอยู่ P เซ็ต, ถ้าให้ D เป็นเซตของเอาต์พุทที่ต้องการจะได้ว่า $D_p = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_L\}$ เมื่อ $P = 1, 2, 3, \dots, P$

W เป็นเมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงระหว่างชั้นของอินพุทกับชั้นฮิดเดนซึ่ง W มีขนาด M แถวและ N คอลัมน์

V เป็นเมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงระหว่างชั้นฮิดเดนไปยังชั้นเอาต์พุทซึ่งมีขนาด L แถว และ N คอลัมน์

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & \dots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & \dots & W_{2n} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & \dots & W_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{M1} & W_{M2} & W_{M3} & \dots & W_{Mn} \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \dots & v_{2m} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & \dots & v_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{L1} & v_{L2} & v_{L3} & \dots & v_{Lm} \end{bmatrix}$$

เมื่อทำการป้อนเซตของข้อมูลที่ใส่สอนเข้าสู่โครงข่าย จะสามารถคำนวณ โหนดของฮิดเดนที่ m ได้ ดังนี้

$$net_m = \sum_{n=1}^N w_{mn} x_n \quad (5.4)$$

$$h_m = f(net_m)$$

และสามารถคำนวณเอาต์พุทโหนดที่ 1 ได้ดังนี้

$$net_1 = \sum_{m=1}^N v_{1m} h_m \quad (5.5)$$

$$O_1 = f(net_1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคำนวณชั้นของเอาต์พุตครบทุกโหนดแล้ว ขั้นต่อไปเป็นการปรับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายโดยใช้ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง ระหว่างค่าของผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายกับค่าเอาต์พุตที่ต้องการของแพทเทิร์นที่ P ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I (O_{pi} - d_{pi})^2 \quad (5.6)$$

ดังนั้นในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมต่อระหว่างชั้นเอาต์พุตกับชั้นฮิดเดน สำหรับแพทเทิร์นที่ P (H_p) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta V = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial V} \quad (5.7)$$

โดยที่ $\delta_p^v = (D_p - O_p) O_p (1 - O_p)$ ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนภายในชั้นของเอาต์พุต

α เป็นค่าโมเมนตัม
 η เป็นค่าอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) ซึ่งเป็นค่าคงที่และการปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมต่อระหว่างชั้นฮิดเดนกับชั้นอินพุตสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta W = \alpha V + \eta \delta_p^w X_p \quad (5.8)$$

โดยที่ $\delta_p^w = H_p (1 - H_p) (\delta_p^v)$ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนภายในชั้นฮิดเดน สำหรับ α และ η จะมีคุณสมบัติเหมือนกับสมการที่ (5.8)

ในกรณีที่มีโครงข่ายมี 1 ชั้นสามารถปรับค่าถ่วงน้ำหนักโดยวิธีค่าความผิดพลาดแพร่กระจายกลับได้ดังนี้

$$\Delta W^i = \alpha W^i + \eta \delta_p^i X_p^{i-1} \quad (5.9)$$

เมื่อ W^i เป็นเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักที่อยู่ระหว่างชั้นที่ i กับ $i-1$ ($i = 1, 2, 3, \dots, I$), X_p^{i-1} เป็นเซตของอินพุตแพทเทิร์นที่ P จากชั้นที่ $i-1$ และ δ_p^i แวกเตอร์ของความคลาดเคลื่อนสำหรับชั้นที่ i สำหรับชั้นเอาต์พุตหรือชั้นที่ 1 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\delta_p^i = (p_p - o_p^i) p_p^i (1 - o_p^i) \quad (5.10)$$

โดยที่ o_p^i คือชั้นของเอาต์พุต และสำหรับความคลาดเคลื่อนของชั้นที่ i ใด ๆ โดยที่ $i \neq I$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\delta^i_p = o_p^i (1 - o_p^i) (\delta_p^{i-1} w^{i-1}) \quad (5.11)$$

โดยที่ o_p^i คือเอาต์พุตชั้นที่ i แพทเทิร์นที่ P และสำหรับ δ_p^{i-1} และ w^{i-1} เป็นค่าความคลาดเคลื่อนและเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักของชั้นถัดไป

5.10 ปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการสอนโครงข่ายด้วยวิธี Back-propagation เพิ่มขึ้นมีดังนี้

5.10.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก

ก่อนที่จะทำการสอนโครงข่าย Multilayer Perceptron โดยวิธี Error Back-Propagation จำเป็นต้องกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงระหว่างชั้นทุกชั้น โดยค่านี้จะเป็นตัวเลขจำนวนจริงที่มีค่าน้อย ๆ ที่ได้มาจากการสุ่ม ค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์เชื่อมโยงจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการสอนและอาจจะส่งผลถึงค่าถ่วงน้ำหนักหลังจากที่ได้สอนโครงข่ายไปแล้วว่าจะมีศักยภาพมากน้อยเพียงใดในการแปลงข้อมูลอินพุตไปสู่เอาต์พุต แสดงขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนัก

กำหนดให้	ROW	เป็นจำนวนแถวของเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก
	COL	เป็นจำนวนคอลัมน์ของเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนัก
	W	เป็นเมตริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงระหว่างชั้นใด ๆ

```
Void Initial_Weights (Mutrix W, int ROW, int COL)
```

```
For (int I = 0 : i < ROW : I++)
```

```
For (int j = 0: j < COL : I++)
```

```
W[i][j] = 1 - random (101) / 53.0;
```

อัตราเร็วในการเรียนรู้ (Learn Rate : η) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่านี้จะเป็นค่าคงที่ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.05 - 0.25 แต่มีงานวิจัยบางส่วนที่ค่าอัตราเร็วในการเรียนรู้มีการปรับค่าได้ เช่น กำหนดให้อัตราเร็วในการเรียนรู้ผันแปรตามจำนวนรอบที่สอน อัตราเร็วในการเรียนรู้ผันแปรตามเอกสารที่เป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนซ้ำสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

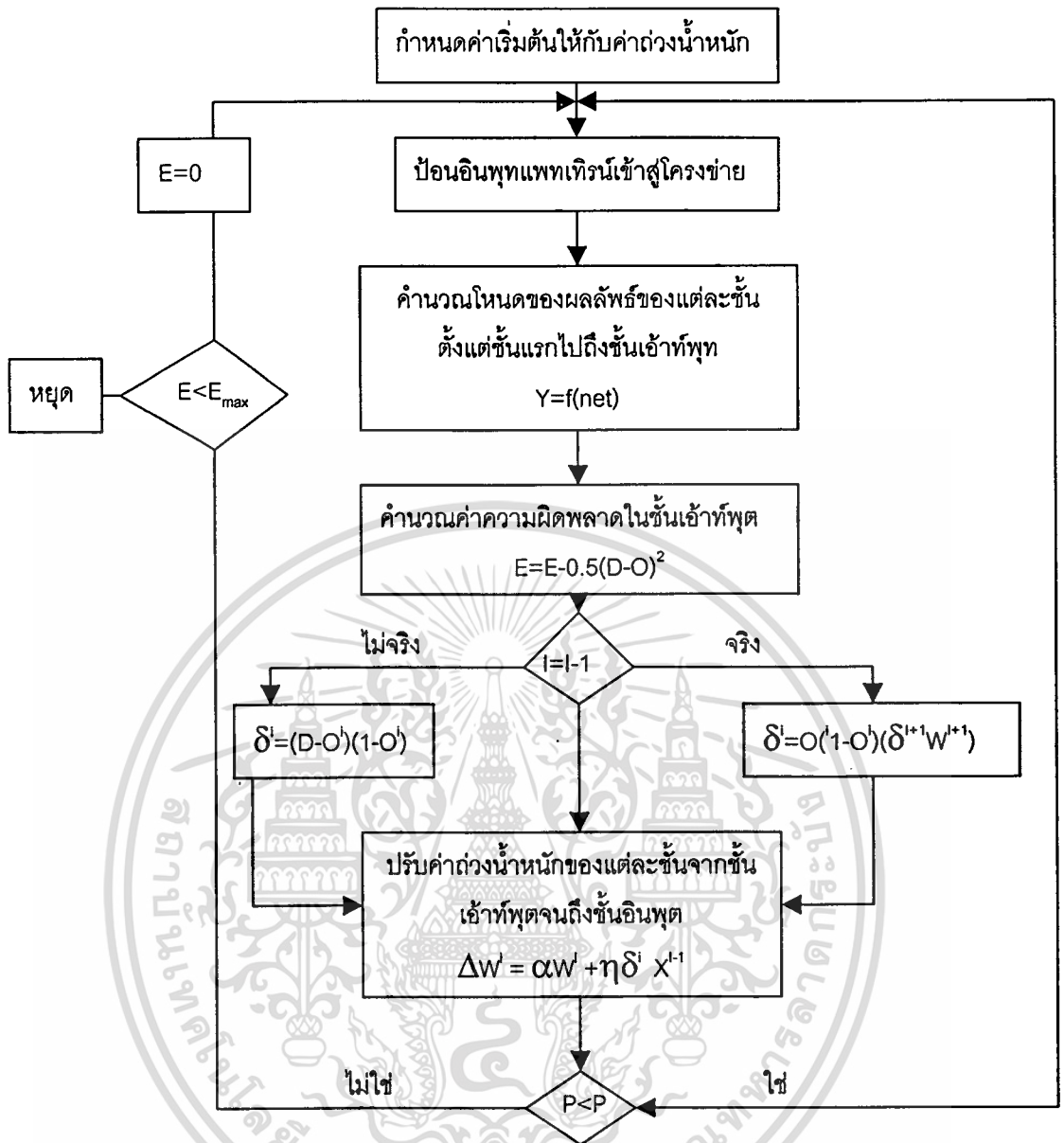
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของระบบ และค่าอัตราเร็วในการเรียนรู้ผันแปรตามค่าความแปรปรวนของแต่ละแพทเทิร์น

โมเมนตัม (Momentum : α) สำหรับกฎการสอบแบบเจเนอร์อลไลซ์เซลล์ด้า โดยทั่วไปค่าโมเมนตัมอาจจะใช้หรือไม่ใช้ก็ได้ แต่ค่านี้จะมีคุณสมบัติช่วงป้องกันการแกว่งของระบบ โดยค่านี้จะสัมพันธ์กับค่าอัตราเร็วในการเรียนรู้ คือถ้าอัตราเร็วในการเรียนรู้มีค่ามาก แต่ค่าโมเมนตัมมีค่าน้อยจะทำให้ระบบโครงข่ายเกิดการแกว่ง ส่วนกรณีอื่น ๆ โครงข่ายจะไม่เกิดการแกว่งแต่จะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการสอน

ไบแอส (Bias) โหนดไบแอสสำหรับโครงข่ายโดยทั่วไปอาจจะไม่มีก็ได้ ในกรุปของโครงข่ายที่ใช้ในระบบที่เป็น Real-time แล้วจะไม่ค่อยมีการใช้โหนดไบแอสเนื่องจากจะเสียเวลาในการคำนวณและถ้ามีการออกแบบโครงข่ายอย่างเหมาะสมแล้วทอมไบแอสไม่จำเป็นต้องมี แต่ถ้าโครงข่ายมีจำนวนโหนดไม่เหมาะสมคือมีจำนวนโหนดน้อยไป การเพิ่มโหนดไบแอสเข้าไปจะทำให้โครงข่ายสามารถจดจำได้ดีขึ้น โหนดไบแอสจะถูกเพิ่มเข้าไปเป็นโหนด ๆ หนึ่งในแต่ละชั้น ยกเว้นในชั้นของผลลัพธ์และโหนดไบแอสที่เพิ่มเข้าไปมักจะเป็นค่าคงที่ ผลของการเพิ่มโหนดไบแอสเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้ประสิทธิภาพการสอนดีขึ้น

5.11 ขั้นตอนการสอนโครงข่ายประสาทเทียม

การสอนโครงข่าย Multilayer Perceptron ด้วยวิธี Back-Propagation มีขั้นตอนการสอนดังอัลกอริทึมที่ 5-2 ซึ่งเป็นโครงข่ายแบบไม่มีไบแอสและในรูปที่ (5.11) เป็นแผนภูมิของขั้นตอนการสอนของอัลกอริทึมนี้โดยที่ E_{max} เป็นค่าความผิดพลาดที่ต่ำสุดที่พอจะยอมรับได้ ซึ่งในการสอนโครงข่ายในรอบหนึ่ง ๆ (Epoch) ก็คือการสอนชุดของแพทเทิร์นทั้งหมด P แพทเทิร์น ถ้าค่าความผิดพลาดของระบบ E ยังมีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดที่ตั้งไว้ E_{max} ก็จะนำข้อมูลชุดเดิมมาทำการสอนใหม่จนกว่าค่าความผิดพลาด E จะน้อยกว่าค่า E_{max}



รูปที่ 5.11 แผนภูมิการสอนแบบ Error Back-propagation ที่มี I ชั้น

แสดงขั้นตอนการสอนโครงข่าย โดยวิธี กำหนดให้

Float ***W; /* W[i][j][k] เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของชั้นที่ i ที่เชื่อมต่อระหว่าง อินพุต โหนดที่ k กับเอาต์พุต j โหนด */

Float **Layer; /* Layer[i][j] เป็นชั้นที่ i โหนดที่ j */

Float **Delta; /* Delta[i][j] เป็นค่าความผิดพลาดของชั้นที่ i โหนดที่ j */

Int *ROW; /* ROW[i] ชั้นที่ i มีจำนวนโหนดเท่ากับ ROW[i] */

Int *COL; /* COL[i] เป็นจำนวนคอลัมน์ของเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนักชั้นที่ i */

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่ระบุไว้ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Int    I;    /* จำนวนชั้นทั้งหมดของโครงข่าย */

Void   Set_Input_Pattern (Vector X) /* ป้อนเซตของอินพุตเข้าสู่อินพุตของโครงข่าย */
{
    Layer[0]=X;    /* ป้อนเวกเตอร์อินพุตให้กับเวกเตอร์ของชั้นอินพุต */
}

void   Forward_Propagate() /* คำนวณผลลัพธ์ของแต่ละชั้น */
{
    Vector input;
    float net;
    for (int I=0; I < (I-1); I++)
    {
        input=Layer[I];
        for (int j=0; j < ROW[j]; j++)
        {
            net = 0;
            for (int k = 0; k < COL[I]; k++)
                net = net + input[k]*W[I][j][k];
            /* คำนวณ โหนดผลลัพธ์โดยใช้ฟังก์ชัน Sigmoid */
            Layer [I+1][j] = 1/(1+ exp(-net));
        }
    }
}

```

```

float SSE() /* คำนวณค่าความผิดพลาดของชั้นเอาต์พุต */
{
    float sse = 0;
    for int j = 0; j < ROW[I-1]: j++
    {

```

$$E_p[j] = Layer [I-1][j] * (D_p [j]-Layer[I-1][j] * (1-Layer[I-1][j]));$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
    return see;
}

void Adjust_Weights() /*ปรับค่าถ่วงน้ำหนัก */
{
    float sum;
    /* ปรับค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นเอาต์พุต */
    for (int j = 0; j < ROW[I-1]; j++)
        for (int k = 0; k < COL[I-1]; k++)
            W[I-2][j][k] = a * W[I-5][j][k] - h * E_p[j] * Layer[I-2][k];
    /* ปรับค่าถ่วงน้ำหนักใช้ชั้นเอาต์พุต */
    for (int j = 0; j < COL[I-1]; j++)
        for (int k = 0; k < COL[[i];]; k++)
            net = net + nput[k] * W[i][j][k];
    /* คำนวณโหนดผลลัพธ์โดยใช้ฟังก์ชัน Sigmoid */
    Layer [ i + 1 ][ j ] = 1 / ( 1 + exp( -net );
    }
}

float SSE() /*ความผิดพลาดของชั้นเอาต์พุต */
{
    float sse = 0;
    for (int j = 0; j < ROW[I-1]; j++)
    {
        E_p [ j ] = Layer [ I - 1 ][ j ] * ( D_p [ j ] * ( 1 - Layer [ I - 1 ][ j ] );
        sse = sse + E_p [ j ] * E_p [ j ];
    }
    return sse;
}

void Adjust_Weights()

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float sum;
/* ปรับค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นเอาต์พุต */
for (int j = 0; j < ROW[I-1]; j++)
    for (int k = 0; k < COL[I-1]; k++)
        W[1-2][j][k] = *W[I-2][j][k] + h * Ep[j] * Layer[I-2][k];
/* คำนวณค่าความผิดพลาดของชั้นที่ I-1 */
for (int j = 0; j < COL[I-1]; j++)
{
    sum = 0;
    for (int k = 0; k < ROW[I-1]; k++)
        sum += Ep[k] * W[1-2][k][j];
    Delta[I-2][j] = Layer[I-2][j] * (1 - Layer[I-2][j]) * sum;
}
/* ปรับค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับชั้นที่ i ใดๆ โดยที่ i ≠ I */
for (int i = I-3; i >= 0; i--)
{
    for (int j = 0; j < ROW[i]; j++)
        for (int k = 0; k < COL[i]; k++)
            W[i][j][k] = j * W[i][j][k] + h * Deita[i+1][j] * Layer[i][k];
    /* คำนวณค่าความผิดพลาดของชั้นที่ i */
    if (i > 0)
        for (int j = 0; j < COL [I]; j++)
        {
            sum = 0;
            for (int k = 0; k < ROW[i]; k++)
                sum += Ep[k] * W[i][k][j];
            Delta [i][j] = Layer[i][j] * (1-Layer[i][j]) * sum;
        }
}
}

void Back_Propagation_Training()

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for (int i = 0; i < I; i++)          /* เป็นจำนวนชั้นทั้งหมดของโครงข่าย */
    Initatil_Weights(W[i], ROW[i], COL[i]; /* กำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก */
ถ้าค่าความผิดพลาดยังมากกว่าค่าความผิดพลาดต่ำสุดที่ตั้งเอาไว้ให้ทำการสุ่มโครงข่ายต่อไป
while (Error > ERROR_MIN)
{
    P = random(P); /* สุ่มแพทเทิร์นที่ p จากแพทเทิร์นที่ใช้สอนทั้งหมด P เซต */
    Set_Input_Pattern (X[P]); /* ป้อนอินพุตแพทเทิร์นที่ p เข้าสู่โครงข่าย */
    Forward_Propagate();          /* คำนวณผลลัพธ์ของแต่ละชั้น */
    error = SSE();                /* คำนวณค่าความผิดพลาด */
    Adjust_Weights();            /* ปรับค่าถ่วงน้ำหนัก */
}
}

```

เมื่อสอนโครงข่ายจนอยู่ในสภาวะที่เสถียรแล้วก็สามารถนำค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้มาหาคำตอบได้ดังอัลกอริทึมที่ 4-3

อัลกอริทึมที่ 4-3 ขั้นตอนการนำค่าถ่วงน้ำหนักมาใช้งาน

```

void Back_Propagation()
{
for (int p = 0; p < P; p++)      /* เป็นจำนวนแพทเทิร์นทั้งหมดของระบบ */
{
    Set_Input_Pattern (X[P]); /* ป้อนอินพุตแพทเทิร์นที่ p เข้าสู่โครงข่าย */
    Forward_Propagate(); /* คำนวณผลลัพธ์ของแต่ละชั้น และผลลัพธ์ของระบบ
                            ชั้นที่ 1 (Layer[1-i] */
}
}

```

5.12 การสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยการใช้อัลกอลิธึมของ MARQUARDT – LEVENBERG)

อัลกอลิธึมการเรียนรู้แบบการแพร่กลับ (back-propagation) เป็นโมเดลของโครงข่ายประสาทที่ได้รับความนิยมมากที่สุด งานวิจัยต่าง ๆ ถูกทำเพื่อสนับสนุนโครงสร้างนี้ เพื่อที่จะหาวิธีเร่งความสามารถในการจดจำของโครงข่าย โดยทั่วไปมีวิธีที่นิยมทำกัน 2 วิธี คือ

1. การพัฒนาเทคนิค al hoe[2] [5] วิธีนี้จะใช้การปรับเปลี่ยนอัตราการเรียนรู้ การใช้ค่าโมเมนตัม และการปรับสเกล(rescaling) อีกกรณีหนึ่ง คือการหาวิธีทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่ให้ค่าที่ดีที่สุด

2. คือ การใช้ คอนจูเกต แกรเดียนต์ (conjugate gradient) หรือ Quasi - Newton วิธีของ Newton มีประสิทธิภาพมากแต่จะต้องใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นอยู่กับขนาดของโครงข่าย และยังจำกัดที่ขนาดของหน่วยความจำ

สำหรับวิธีทางคณิตศาสตร์อื่นๆ คือการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น least - squares วิธีการอุปคิมม์โดยทั่วไป ถูกออกแบบให้ทำงานกับ ฟังก์ชันเป็นแบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตามเมื่อรู้เป้าหมายของโครงข่ายก็มีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบอัลกอริธึมที่มีประสิทธิภาพมากกว่าได้ วิธีการประยุกต์แบบไม่เชิงเส้นกับโครงข่ายประสาทเทียมเน้นหนักบนการประยุกต์แบบ ซีควนเชียล (sequential) เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักถูกปรับเปลี่ยนหลังจาก presentation ของคู่ อินพุต/เอาต์พุต วิธีการนี้มีประโยชน์ เมื่อเป็นการสอนแบบ on - line แต่วิธีนี้ต้องการการประเมินค่าหลายแบบสำหรับอัลกอริธึมมาตรฐาน

สำหรับโครงข่ายขนาดใหญ่ซึ่งต้องการหน่วยความจำขนาดใหญ่ในการคำนวณ และเป็นอุปสรรคอย่างยิ่งต่อเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วิธี Quasi - Newton) อย่างไรก็ตาม สำหรับโครงข่ายซึ่งประกอบด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก(weight) ซึ่งมีขนาดไม่เกินหลักร้อยวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคคอนจูเกต แกรเดียนต์ (conjugate gradient)

5.12.1 อัลกอริธึมการแพร่กลับ (BACK - PROPAGATION ALGORITHM)

เมื่อพิจารณาโครงข่ายหลายชั้น (multilayer feedforward network) เช่น โครงข่าย 3 ชั้น ดังรูปที่ (5.12) ค่า net อินพุตจนถึง i ในชั้น $k+1$ คือ

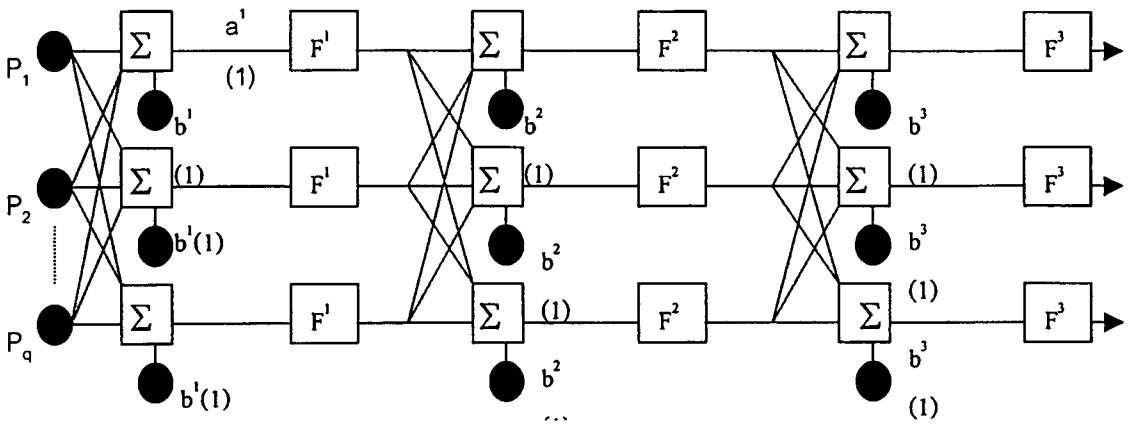
$$n^{k+1}(i) = \sum_{j=1}^k W^{k+1}(i, j) a^k(j) + b^{k+1}(i) \quad (5.10)$$

ค่าเอาต์พุตของหน่วย i จะเป็น

$$a^{k+1}(i) = f^{k+1}(n^{k+1}(i)) \quad (5.11)$$

$$a^o = \underline{p} \quad (5.12)$$

$$a^{k+1}(i) = \underline{f}^{k+1}(W^{k+1} \underline{a}^k + \underline{b}^{k+1}), k = 0, 1, \dots, m - 1 \quad (5.13)$$



รูปที่ 5.12 โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Back-Propagation

ความสัมพันธ์ของคู่อินพุต / เอาต์พุต

$$\{(p_1, t_1), (p_2, t_2), \dots, (p_q, t_q)\} \tag{5.14}$$

ดัชนีประสิทธิภาพ ของโครงข่ายคือ

$$V = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q (t_q - a_q^M)^2 = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q e_q^T e_q \tag{5.15}$$

เมื่อ a_q^M คือ เอาต์พุตของโครงข่าย เมื่อ q^{th} อินพุต, p_q

$e_q = t_q - a_q^M$ คือค่า เออเรอร์ สำหรับ q^{th} อินพุตสำหรับโครงข่ายแพร่กลับแบบมาตรฐาน เราใช้ ตัวดัชนีชี้ประสิทธิภาพ โดยกำหนดให้เป็น

$$V = \frac{1}{2} e_q^T e_q \tag{5.16}$$

เมื่อผลรวมของสแควร์ ถูกแทนที่โดยค่าผิดพลาดยกกำลังสอง สำหรับคู่ของ อินพุต / เอาต์พุตแบบเดี่ยวนิวรอลลิซึมที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$\Delta W^k(i, j) = -\alpha \frac{\partial v}{\partial w^k(i, j)} \tag{5.17}$$

$$\Delta b^k(i) = -\alpha \frac{\partial v}{\partial b^k(i)} \tag{5.18}$$

เมื่อ α คืออัตราการเรียนรู้ (learning rate) ถูกใช้ในการเปลี่ยนหน่วย i ในชั้น k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta^k(i) = \frac{\partial \hat{v}}{\partial n^k(i)} \quad (5.19)$$

จากการใช้สมการ (5.17) (5.18) และ (5.19) จะได้

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial w^k(i,j)} = \frac{\partial \hat{v}}{\partial n^k(i)} \frac{\partial n^k(i)}{\partial w^k(i,j)} = \delta^k(i) x^{k-1}(j) \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial \hat{v}}{\partial b^k(i)} = \frac{\partial \hat{v}}{\partial n^k(i)} \frac{\partial n^k(i)}{\partial b^k(i)} = \delta^k(i) \quad (5.21)$$

$$\underline{\delta}^k = F^k(\underline{n}^k) \underline{v}^{k+1T} \underline{\delta}^{k+1} \quad (5.22)$$

เมื่อ

$$F^k(\underline{n}^k) = \begin{bmatrix} f^k(\underline{n}^k(1)) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

และ

$$f^k(\underline{n}^k) = \frac{df^k(\underline{n}^k)}{dn} \quad (5.24)$$

ค่าความสัมพันธ์ของการแพร่กลับ ถูก กำหนดเริ่มต้น ที่ชั้นสุดท้าย

$$\underline{\delta}^M = -F^M(\underline{n}^M) (\underline{x}_q - \underline{a}_q) \quad (5.25)$$

การสอนโครงข่ายเริ่มจาก การแพร่จากอินพุตโดยการใช้สมการ (5.10) , (5.14) และการแพร่กลับ โดยการใช้สมการ (5.23) และ (5.24) สุดท้ายทำการปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนัก(weight) และค่าออฟเซต โดยการใช้สมการ (5.17) , (5.18) และ (5.25) ตามลำดับ

5.12.2 MARQUARDT – LEVENBERG อัลกอริทึม

Marquardt - Levenberg ถูกประเมิณคล้ายวิธีของ Newton สมมุติว่าเรามีฟังก์ชันซึ่งเราต้องการหาค่าที่น้อยที่สุดของเวกเตอร์ \underline{x} ดังนั้นวิธีของ Newton จะได้

$$\Delta \underline{x} = -[\nabla^2 V(\underline{x})]^{-1} \nabla V(\underline{x}) \quad (5.26)$$

เมื่อ $\nabla^2 V(\underline{x})$ คือ เมตริกซ์ Hessian และ $\nabla V(\underline{x})$ คือ แกรเดียนต์

ถ้าเรากำหนดให้ $V(\underline{x})$ คือ ผลรวมของ สแควร์ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V(\underline{x}) = \sum_{i=1}^N e_i^2(\underline{x}) \quad (5.27)$$

ดังนั้นแสดงได้ว่า

$$\nabla V(\underline{x}) = J^T(\underline{x})\underline{e}(\underline{x}) \quad (5.28)$$

$$\nabla^2 V(\underline{x}) = J^T(\underline{x})J(\underline{x}) + S(\underline{x}) \quad (5.29)$$

เมื่อ $J(\underline{x})$ คือ เมตริกซ์ จาโคเบียน

$$J(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\underline{x})}{\partial x_1} \\ \frac{\partial e_2(\underline{x})}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial e_N(\underline{x})}{\partial x_1} \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

และ

$$S(\underline{x}) = \sum_{i=1}^N e_i(\underline{x}) \nabla^2 e_i(\underline{x}) \quad (5.31)$$

สำหรับวิธี Gauss-Newton ค่า $S(\underline{x}) \approx 0$ และ ปรับสมการที่ (5.26) จะเป็น

$$\Delta \underline{x} = [J^T(\underline{x})J(\underline{x})]^{-1} J^T(\underline{x})\underline{e}(\underline{x}) \quad (5.32)$$

การปรับวิธีของ Gauss-Newton โดยใช้การปรับของ Marquardt-Levenberg

$$\Delta \underline{x} = [J^T(\underline{x})J(\underline{x}) + \mu I]^{-1} J^T(\underline{x})\underline{e}(\underline{x}) \quad (5.33)$$

ตัวแปร μ ถูกคูณด้วยค่าตัวแปร (β) whenever a step ซึ่งจะเพิ่มผลของ $V(\underline{x})$ เมื่อลด $V(\underline{x})$ μ ถูกหารด้วย β สังเกตว่าเมื่อ μ มีค่ามาก (with step $\frac{1}{\mu}$) ในขณะที่ μ มีค่าน้อย อัลกอริทึมดังกล่าวจะกลายเป็นวิธีของ Gauss-Newton

หลักสำคัญของอัลกอริทึมนี้ คือ การคำนวณของเมตริกซ์จาโคเบียน สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมในทอมของจาโคเบียน สามารถคำนวณโดยการปรับเปลี่ยนอัลกอริทึมการแพร่กลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบธรรมดา คำนวณที่ใช้ประสิทธิภาพ สำหรับการหาพิกัด(mapping) ถูกกำหนดโดยสมการที่ (159)

$$\underline{x} = [w^1(1,1)w^1(1,2)\dots w^1(S_1,R)b^1(1)\dots b^1(S_1)w^2(1,1)\dots b^M(SM)]^T \quad (5.34)$$

และ $N = Q \times SM$ การแพร่กระจายกลับแบบมาตรฐานสามารถคำนวณได้จากเทอม

$$\frac{\partial V}{\partial w^k(i,j)} = \frac{\partial \sum_{m=1}^{SM} e_q^2(m)}{\partial w^k(i,j)} \quad (5.35)$$

สำหรับส่วนย่อยใน เมตริกซ์จาโคเบียน ที่ใช้วิธี Marquardt คำนวณได้จาก

$$\frac{\partial e_q(m)}{\partial w^k(i,j)} \quad (5.36)$$

เทอมนี้สามารถคำนวณโดยใช้ค่าการแพร่กลับมาตรฐานที่ เลขอร์สุดท้าย

$$\Delta M = -F^M \left(n^M \right) \quad (5.37)$$

แต่ละคอลัมน์ของเมตริกซ์ในสมการที่ (5.30) คือค่า เซนซิทีฟเวกเตอร์ ซึ่งแพร่กลับผ่านโครงข่าย ไปยังแถวของจาโคเบียนเมตริกซ์

5.12.3 สรุปวิธี Marquardt

1. ที่อินพุตแต่ละ โหนดคำนวณหาความสัมพันธ์กับเอาต์พุต โดยใช้สมการ (5.28) และ (5.29) และหาค่า error จาก $(e_q = t_q - a_q^M)$ และคำนวณหาค่า sum square error ของ อินพุตแต่ละโหนด

2. คำนวณเมตริกซ์จาโคเบียน โดยใช้สมการ (5.20), (5.21), (5.22), (5.23) และ (5.24)

3. แก้สมการ (5.26) หาค่า Δx

4. คำนวณค่า sum square error โดยการใช้ $\underline{x} + \Delta x$ ถ้าผลรวมของ square error น้อยกว่า ค่าคำนวณในขั้นที่ 1 ให้ลดค่า μ โดย β กำหนดให้ $\underline{x} = \underline{x} + \Delta x$ และกลับไปขั้น (step) 1 ถ้าผลรวมของ square error ไม่ลดให้เพิ่มค่า μ โดย β และไปขั้น (step) 3.

5. คำนวณจนค่า square อยู่เข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ (5.21)

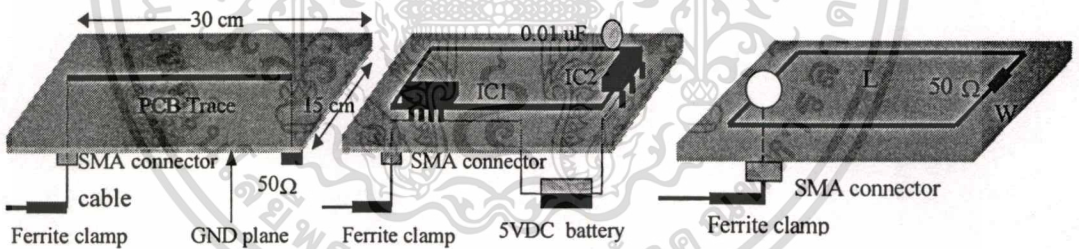
บทที่ 6

การทดลอง

6.1 โครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ วงจรพิมพ์พื้นฐาน และวงจรดิจิทัลอย่างง่ายถูกใช้เป็นส่วนกำเนิดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า บนแผ่นวงจรพิมพ์จะประกอบด้วย ลายทองแดง (micro-strip trace) ซึ่งมีรูปร่างและลักษณะการจัดวางแตกต่างกัน เช่น มีการเปลี่ยนแปลงความยาว ความกว้าง มุมของลายทองแดง จำนวนเส้นของลายทองแดง รัศมีของลายทองแดง รูปร่างลักษณะเฉพาะ (shape) วงจร rectangular และวงจรดิจิทัล เป็นต้น

ลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์แต่ละชิ้นมีความยาว 30 cm กว้าง 15 cm ถูกปรับให้มีคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ที่ปลายด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรเพื่อให้เข้าได้กับอิมพีแดนซ์ของเครื่องมือวัด (measurement impedance) ขั้วอินพุตของแผ่นวงจรพิมพ์เป็นแบบ SMA ลายทองแดงซึ่งมีได้หลายรูปแบบ วางอยู่กึ่งกลางของแผ่นวงจรพิมพ์ ด้านล่างของแผ่นวงจรพิมพ์เป็นกราวนด์เพลนขนาด 30 cm x 15 cm ดังแสดงในรูปที่ 6.1

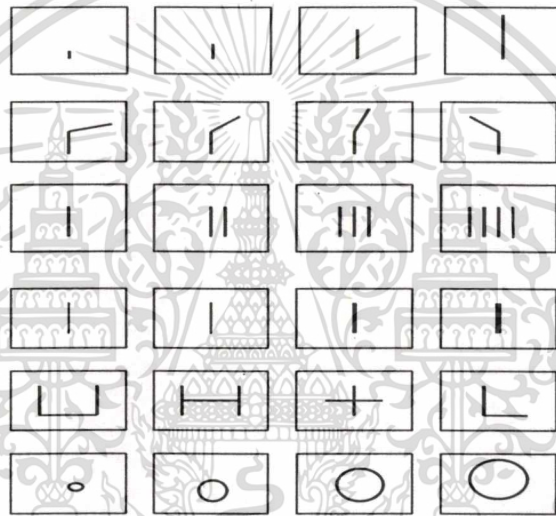


รูปที่ 6.1 แสดงโครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในการแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า

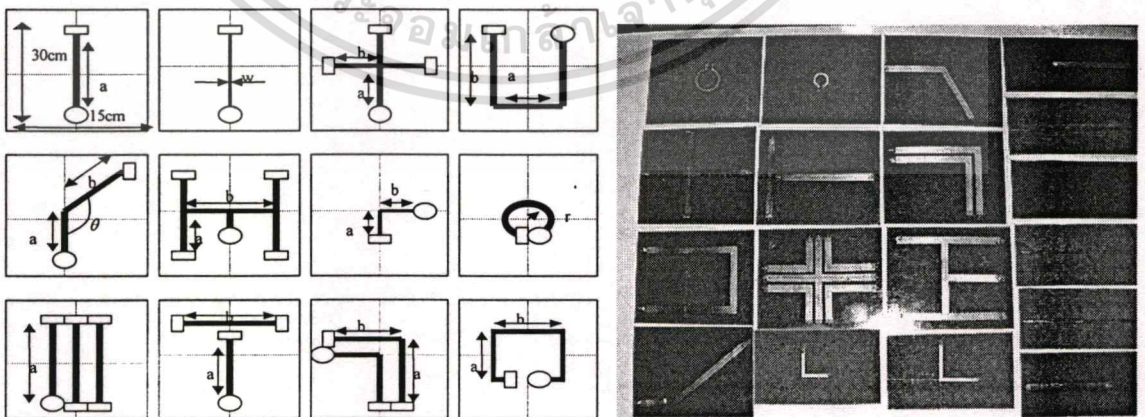
ในส่วนของวงจรดิจิทัล (Digital Circuits) แผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งถูกใช้ในการกำเนิดสัญญาณประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟตรง 5VDC ซึ่งจ่ายให้กับ ICs บนแผ่นวงจร โดยเป็นแบตเตอรี่ภายใน เพื่อไม่ให้มีสัญญาณรบกวนจากการทำงานเป็นสวิทช์ของแหล่งจ่าย ซึ่งปกติจะเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานเป็นสวิทช์ (Switching Power Supply) ในส่วนของโหลดจะใช้ตัวเก็บประจุ ขนาด 0.01 uF ต่อที่เอาต์พุตของ IC 2 สายนำสัญญาณดิจิทัลระหว่าง IC 1 กับ IC 2 จะมีความยาว 10 cm วงจรดิจิทัลมีหลายรูปแบบ ถูกวางอยู่กึ่งกลางของแผ่นวงจรพิมพ์ ด้านล่างของแผ่นวงจรพิมพ์เป็นกราวนด์เพลน ส่วนป้อนสัญญาณอินพุตเป็นขั้วต่อแบบ SMA สายสัญญาณอินพุตถูกเชื่อมต่อผ่านเฟอร์ไรต์ เพื่อลดระดับของสัญญาณรบกวนในสายสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดง โครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์

การปรับเปลี่ยน	รายการที่ปรับเปลี่ยน
ความยาว (cm)	5, 10, 15, 20, 25, 30
มุม (degree)	30° , 45° , 60° , 120° , 135° , 150°
จำนวนเส้นทองแดง	2 line, 3 line, 4 line, 5 line
ความกว้าง (mm)	0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 20
รูปร่าง	L, U, 7, I, T, X, H
รัศมี (cm)	3, 5, 11, 15, 20
วงจรถิฉิตอล	AND, OR, INV, NOR, NAND, EX-OR, D-F/F, RS-F/F

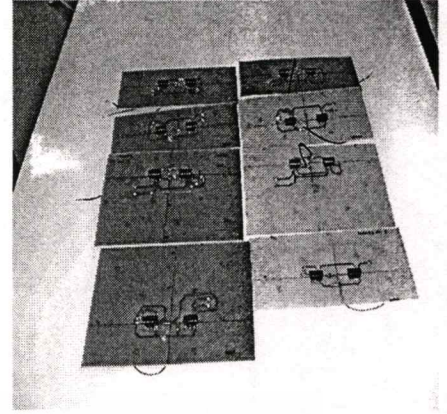
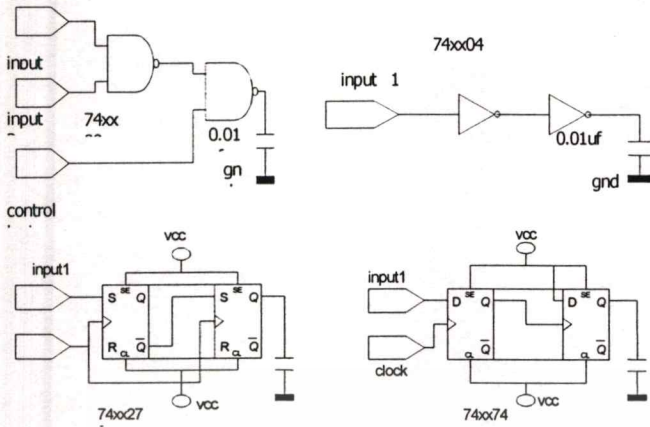


รูปที่ 6.2 แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 6.3 แสดง โครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 วงจรดิจิทัล

ส่วนกำเนิดสัญญาณของวงจรดิจิทัล อินพุตขาเข้าเป็นสัญญาณนาฬิกา (Clock) สัญญาณแอกทีฟเกต (Active gate) สัญญาณพัลส์ป้อนเข้าสู่วงจรโดยการต่อผ่านขั้วต่อแบบ SMA สายสัญญาณซึ่งป้อนเข้าที่ส่วนอินพุตของแผ่นวงจร ถูกร้อยผ่าน Ferrite Clamps เพื่อลดระดับของสัญญาณรบกวนจากภายนอกเหนี่ยวนำเข้าสู่สายนำสัญญาณลงได้อย่างน้อย 20 dB[13]

6.2 การวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ (Magnetic Near Field Measurement)

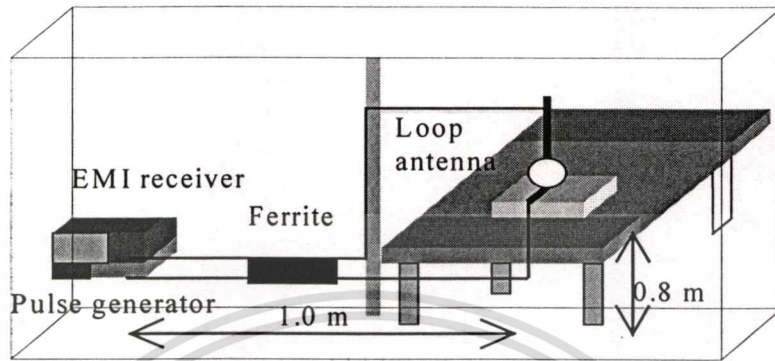
การวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ ถูกทำในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (shielded enclosure room) ขนาด 3 m x 5 m x 2 m เพื่อป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณสนามแม่เหล็กในห้องนี้ประกอบด้วย

1. เครื่องวิเคราะห์ความถี่ (Spectrum Analyzer) AFJ รุ่น CR55ER
2. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ (Pulse Generator) รุ่น HP 81110A
3. ภาคขยายสัญญาณ (Pre-Amplifier) 24 dB รุ่น LANGER EMV
4. สายนำสัญญาณแบบมีค่าการสูญเสียต่ำ (Ultra Low loss Cable) ความยาว 1 m
5. สายอากาศแบบลูป (Loop Antenna) 30 MHz- 1 GHz รุ่น LANGER RF-R400-1
6. เฟอไรท์ แคลมป์ (Ferrite Clamp)

6.2.1 วิธีการวัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Near Field Measurement procedure)

แผ่นวงจรพิมพ์ถูกวางบนโต๊ะซึ่งเป็นฉนวน สูงจากพื้นกราวด์เพลน 80 cm โดยแผ่นวงจรพิมพ์ถูกวางห่างจากผนังของห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 40 cm ตามมาตรฐาน CISPR 22 [25] เอกสารสายสัญญาณอินพุตของแผ่นวงจรพิมพ์จะถูกต่อเข้ากับส่วนขั้วต่อชนิด SMA ซึ่งอยู่ด้านล่างของบอร์ดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราวด์เพลน ส่วนกำเนิดสัญญาณพัลส์หรือเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ ถูกวางห่างจากแผ่นวงจรรพิมพ์ 1 m และถูกร้อยผ่านเฟอร์ไรต์เคลมปี รูปการวัดสนามแม่เหล็กในระยะใกล้ถูกแสดงดังรูปที่ 6.5



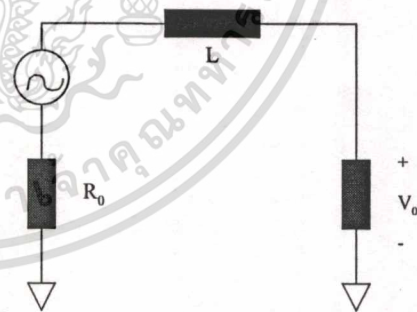
รูปที่ 6.5 แสดงการวัดสัญญาณแม่เหล็กในระยะใกล้

6.2.2 สายอากาศลูปที่ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็ก

สายอากาศแบบลูป (Loop) ทำด้วยสายเคเบิลแบบ semi-rigid โดยมีช่องว่างระหว่างปลายลูปทั้งสองเพื่อใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กในระยะใกล้ ปลายลูปข้างหนึ่งถูกต่อดำด้วยตัวต้านทานที่ปลาย 50 Ω รูปที่ 6.6 (ก) แสดงโครงสร้างของลูปแม่เหล็ก ลูปที่ใช้ในการวัดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 mm วงจรสมมูลย์ของลูปแสดงดังรูปที่ 6.6(ข)



(ก) สายอากาศแบบลูป



(ข) วงจรสมมูลย์

รูปที่ 6.6 สายอากาศแบบลูป และวงจรสมมูลย์

- เมื่อ
- L อินดักแตนซ์ของลูป
 - R_0 ตัวต้านทานของปลายลูป 50 Ω
 - R_m อินพุท อิมพีแดนซ์ ของเครื่องมือวัด
 - $V_s = j\omega\phi$ แหล่งจ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ ฟลักซ์แม่เหล็ก

ω คือ ความถี่เชิงมุม

สำหรับ รูปขนาดเล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถคำนวณได้จาก

$$\phi = \mu_0 HS \quad (6.1)$$

เมื่อ μ_0 ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก (permeability)

H สนามแม่เหล็ก

S พื้นที่ของลูป

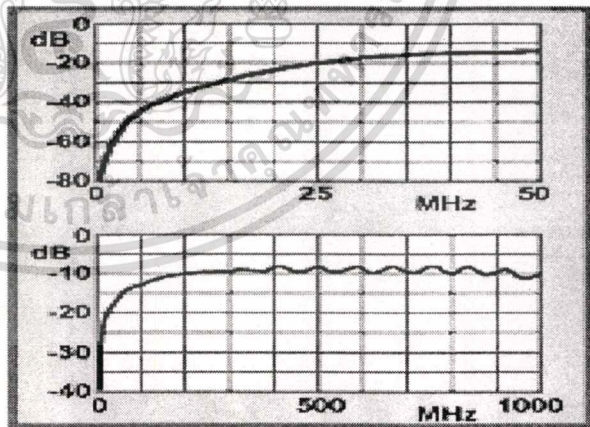
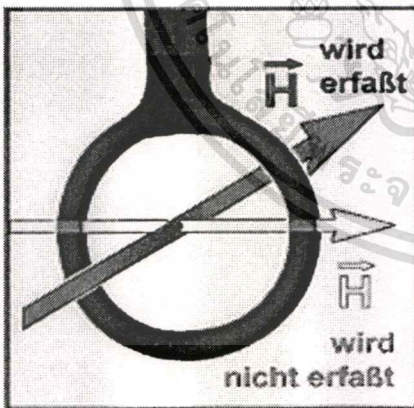
แฟกเตอร์ของสายอากาศ(Antenna factor) คือ อัตราส่วนของสนามแม่เหล็กต่อแรงดันไฟ

ฟ้าตกคร่อม R_m [6]

$$\frac{H}{V_0} = \left| \frac{R_0 + R_m + j\omega L}{j\omega\mu_0 SR_m} \right| \quad (6.2)$$

$$\frac{\sqrt{(R_0 + R_m)^2 + (\omega L)^2}}{\omega\mu_0 SR_m}$$

$$\approx \frac{R_0 + R_m}{\omega\mu_0 SR_m}$$



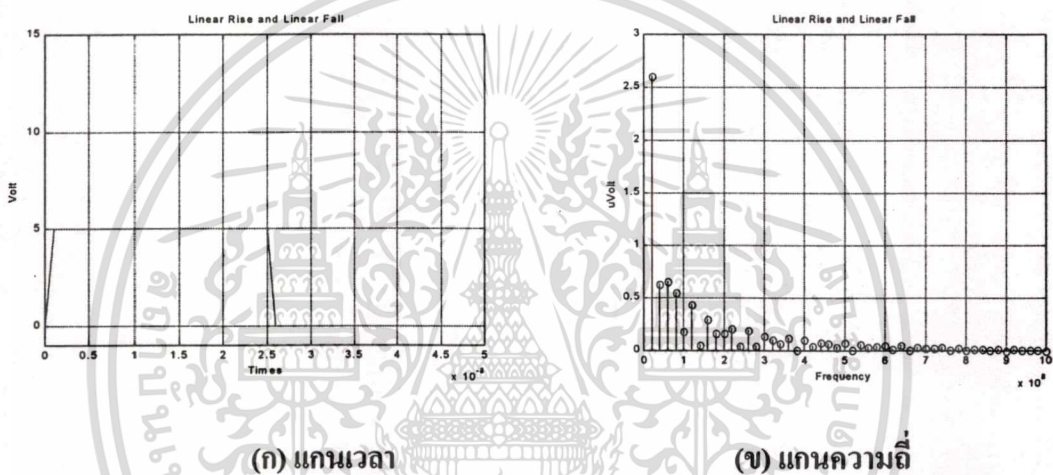
รูปที่ 6.7 แสดงค่าแฟกเตอร์ของสายอากาศลูป

เนื่องจากการวัดทางแม่เหล็กไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล (CISPR16) ได้แบ่งแยกการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วน [21][22] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การแพร่คลื่นผ่านสายตัวนำ(conducted Emission) โดยมีความถี่ในการทดสอบเริ่มที่ 9 kHz ถึง 30 MHz
- การแพร่คลื่นทางอากาศ(Radiated Emission) เริ่มที่ 30 MHz ถึง 1 GHz

สัญญาณอินพุตเป็นรูปพัลส์ กำเนิดจากเครื่องกำเนิดพัลส์ความถี่(pulse generator) ความถี่ 30 MHz มีขนาดแอมพลิจูด 5 VDC เวลาขึ้น (rise-time) และขาลง (fall-time) ของสัญญาณพัลส์ เป็น 50 ns และมีค่าคิวตี้ ไซเคิล (Duty cycle) 50 เปอร์เซ็นต์ สัญญาณอินพุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณถูกนำมาพิจารณาในเทอมของความถี่ โดยใช้วิธีการของฟูเรียร์ (Fourier Method) รูปแบบของสัญญาณอินพุตในเทอมเวลาและเทอมความถี่ ถูกแสดงในรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 สัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าวงจรพิมพ์

6.2.3 การทำนายการแพร่คลื่นโดยการใช้โปรแกรม

เนื่องจากโครงสร้างของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์มีหลายชนิด เช่นมีการเปลี่ยนแปลงความยาว ความกว้างของลายทองแดง รัศมี รูปร่างลักษณะ วงจรดิจิตอล วงจรรูปสี่เหลี่ยม เป็นต้น รูปร่างลักษณะของลายทองแดงซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันนี้ จะให้ผลการตอบสนองทางความถี่ไม่เหมือนกัน [8] [11]

การแพร่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของลายทองแดงแต่ละแบบหาโดยการนำรูปแบบของสัญญาณ (waveform) ที่ป้อนเข้าสู่วงจรในเทอมความถี่คูณกับอิมพีแดนซ์หรือค่าตัวแปรต่าง ๆ ของลายวงจรพิมพ์แต่ละความถี่ ซึ่งมีลักษณะไม่เหมือนกันขึ้นกับลักษณะของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ [12][20] โดยการใช้โปรแกรม MATLAB [26] ผลการทำนายการแพร่คลื่นของลายวงจรแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 6.11

6.2.4 การวัดสนามแม่เหล็กกระแสใกล้จากแผ่นวงจรพิมพ์

การวัดค่าสนามแม่เหล็กกระแสใกล้จะถูกทำ 3 ครั้ง โดยการใช้ตัวตรวจวัดแบบพีค (Peak detector) ควอซีพีค (Quasi-peak detector) และตัวตรวจจับแบบเฉลี่ยค่า (Average detector) ตามมาตรฐาน CISPR 16-1, CISPR16-2 [21][22]

โดยการตั้งค่า Resolution Bandwidth เป็น 100 kHz และ Video Bandwidth 300 kHz ค่าแฟกเตอร์ของสายอากาศ (Antenna Factor) กำลังขยายของแอมพลิฟายเออร์ (Amplifier gain) 20 dB และค่าการลดทอนของสายนำสัญญาณ (cable loss) ถูกชดเชย (Compensated) เข้าในระบบการวัด โดยการควบคุมค่าของความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ในช่วง ± 2.5 dB โดยคำนวณตามคำแนะนำตามมาตรฐาน CISPR16-4 [23]

6.2.4.1 โหมดในการวัด

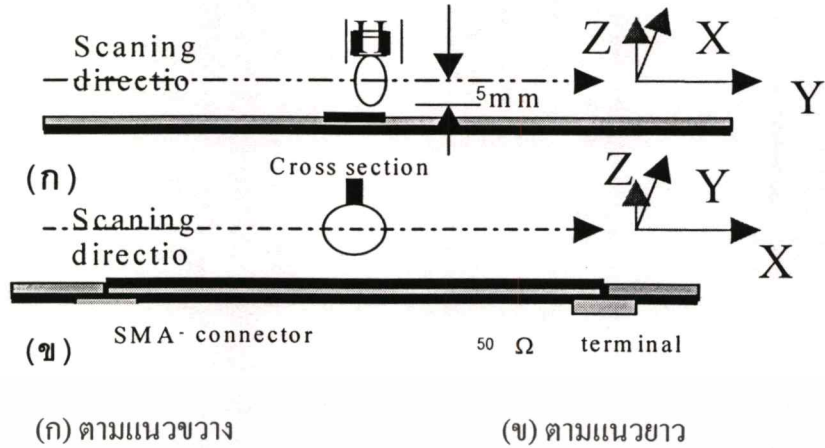
การวัดสนามแม่เหล็กกระแสใกล้จากแผ่นวงจรพิมพ์ในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

- การวัดแบบการกวาดเร็ว (fast scanning mode)
- การวัดแบบเต็มย่านความถี่ (full frequency range scanning mode)

สนามแม่เหล็กกระแสใกล้ ที่วัดได้จากสายอากาศแบบรูปใน แบบการกวาดแบบเร็ว (fast scan mode) มีหลายความถี่ ในวิทยานิพนธ์นี้เลือก พิจารณาเฉพาะฮาร์โมนิกที่ 3 ของความถี่ 30 MHz (90 MHz) เพราะมีค่าแอมพลิจูดสูงสุด และเป็นดัชนีสำหรับใช้ชี้คุณลักษณะในการแพร่สนามแม่เหล็กของวงจรพิมพ์แต่ละแบบ

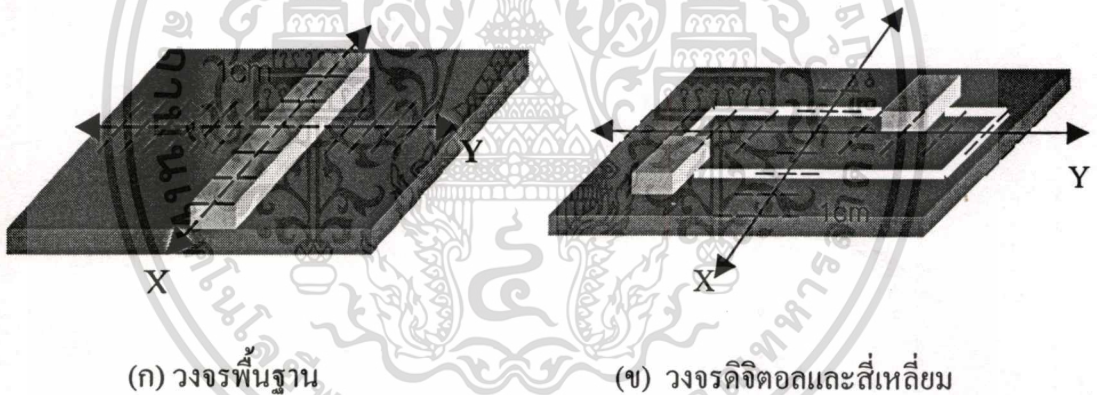
ขณะทำการวัดสายอากาศรูปถูกวางเหนือลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ 1 cm และทำการอ่านค่าสนามแม่เหล็กในทิศทางแกน X และทิศทางแกน Y ตามลำดับ โดยแกน X คือแนวแกนขวางของแผ่นวงจรพิมพ์ และแกน Y คือแนวตามยาวของแผ่นวงจรพิมพ์ โดยมีความละเอียดในการอ่านค่าเป็น 1 cm รูปแบบของการวางและการเคลื่อนที่ของรูปบนแผ่นวงจรพิมพ์ แสดงดังรูปที่ 6.9

เมื่อการวัดสนามแม่เหล็กในโหมดการกวาดแบบเร็วแล้วเสร็จ โปรแกรมจะรายงานจุดโคออร์ดิเนต (X,Y) ของแผ่นวงจรพิมพ์ที่กำเนิดสนามแม่เหล็กสูงสุดออกมา จากนั้นการวัดในโหมดละเอียด (full frequency range scanning mode) ความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz จะเริ่มต้น โดยจะทำการเก็บค่าสัญญาณที่จุดโคออร์ดิเนต (X,Y) ที่ให้แอมพลิจูดสูงสุด (ที่ 90 MHz) เป็นเวลา 3 นาที (MAX-HOLD) และบันทึกผลการวัด



รูปที่ 6.9 แสดงทิศทางการวัดสนามแม่เหล็กบนแผ่นวงจรพิมพ์

รูปแบบการเคลื่อนที่ของสายอากาศอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ แบบพื้นฐาน แบบคิจิตอลและแบบสี่เหลี่ยม(rectangular circuit) แสดงดังรูปที่ 6.10 (ก) - (ข)



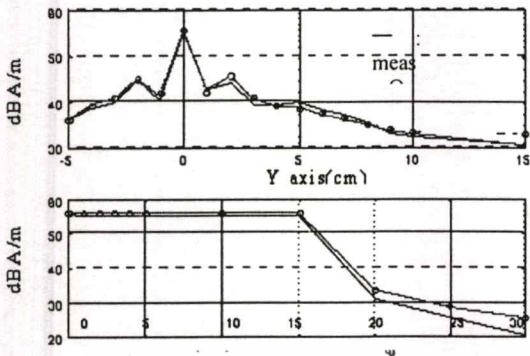
รูปที่ 6.10 แสดงการเคลื่อนที่ของสายอากาศบนแผ่นวงจรพิมพ์

6.2.5 ผลการวัดของสนามแม่เหล็กระยะใกล้จากแผ่นวงจรพิมพ์เปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยโปรแกรม

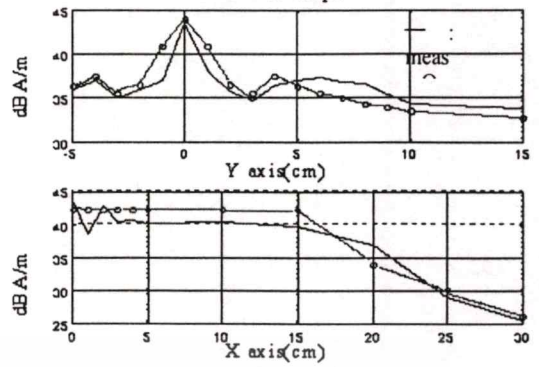
ผลการวัดสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามแนวยาว (Longitudinal) และตามแนวขวาง (Transverse) ของแผ่นวงจรพิมพ์แต่ละแบบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 90 MHz แสดงดังรูปที่ 6.11 (ก) - (ข)

จากรูปผลการคำนวณทางซอฟต์แวร์มีค่าใกล้เคียงกับการวัดจริง ตำแหน่งซึ่งมีค่าระดับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ฮาร์มอนิกที่ 3 สูงที่สุดจะถูกใช้เป็นตำแหน่งใหม่ในการ วัดสนามแม่เหล็ก ระยะใกล้ ในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz ตามมาตรฐาน CISPR22 [25] ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

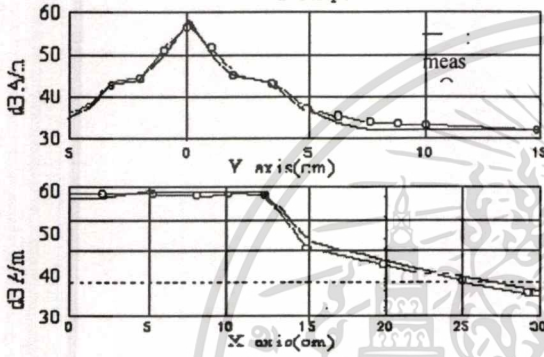
I-shape 0.5mm width



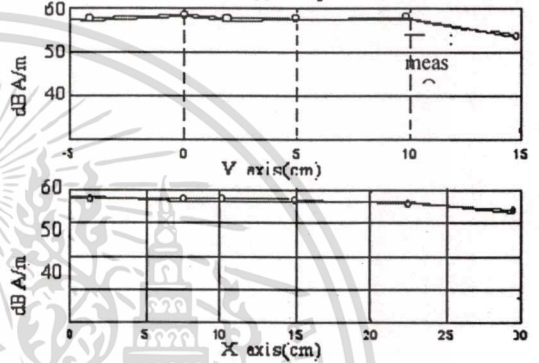
X-shape



L shape



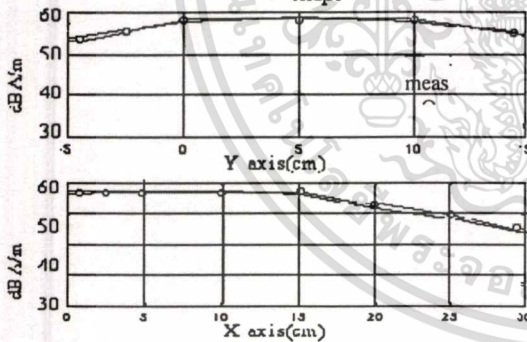
X-shape



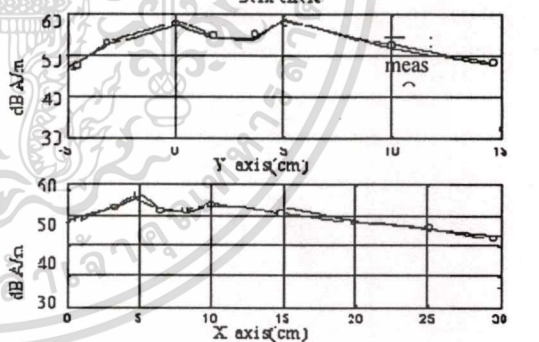
(ค) ลายทองแดงรูปตัว "L"

(ง) ลายทองแดงรูปตัว "T"

U-shape



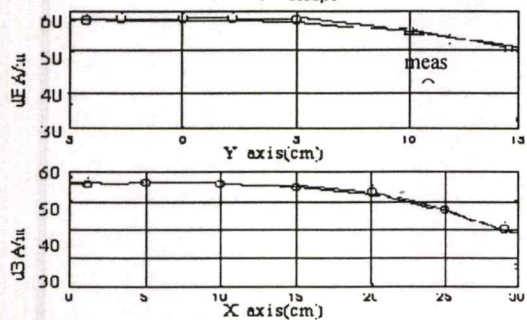
Semi circle



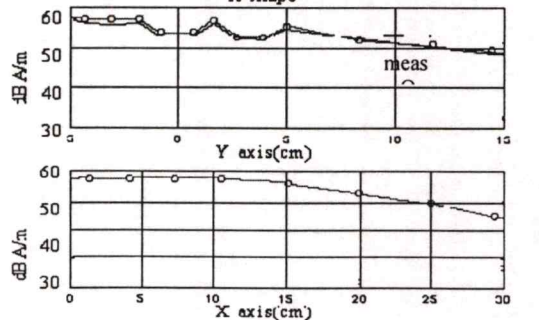
(จ) ลายทองแดงรูปตัว "U"

(ฉ) ลายทองแดงรูปตัว "O"

7-shape



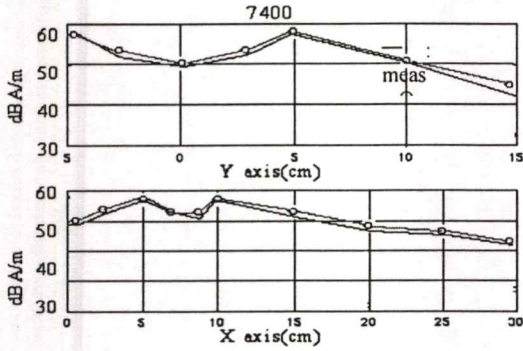
H-shape



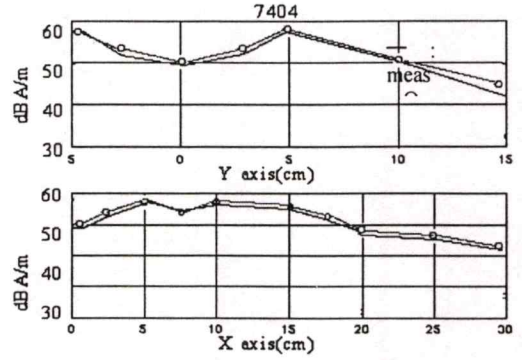
(ช) ลายทองแดงรูปตัว "7"

(ซ) ลายทองแดงรูปตัว "H"

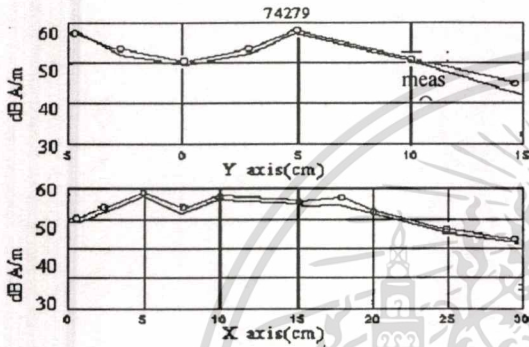
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



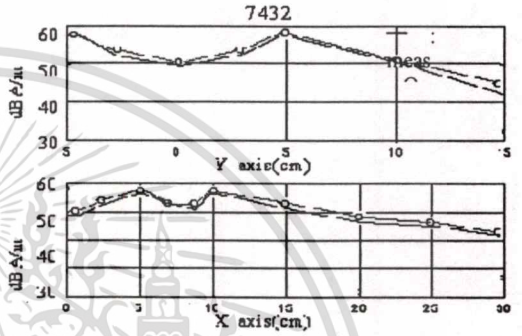
(ฉ) ลายทองแดงรูปตัว “7400”



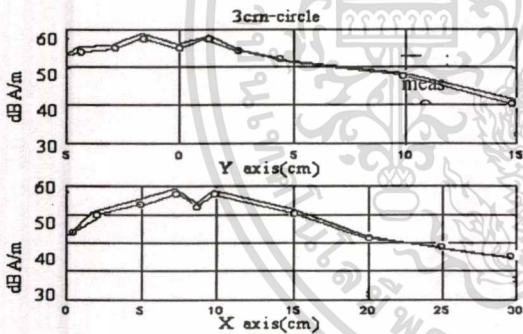
(ณ) ลายทองแดงรูปตัว “7404”



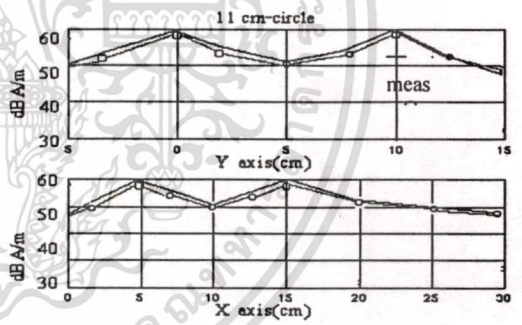
(ญ) ลายทองแดงรูปตัว “74279”



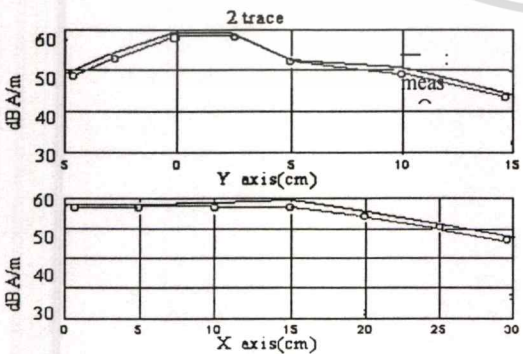
(ค) ลายทองแดงรูปตัว “7432”



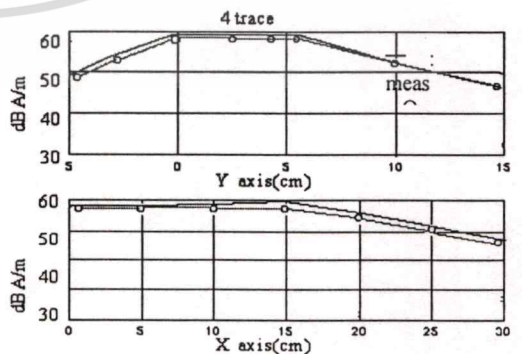
(ต) ลายทองแดงรูปวงกลมรัศมี “3 cm”



(ด) ลายทองแดงรูปวงกลมรัศมี “11 cm”

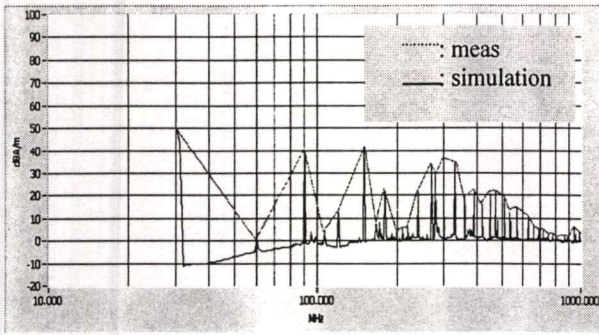


(ท) ลายทองแดงรูปตัว “2 trace”

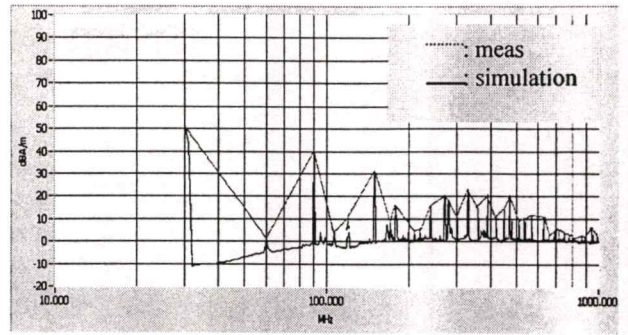


(ธ) ลายทองแดงรูปตัว “4 trace”

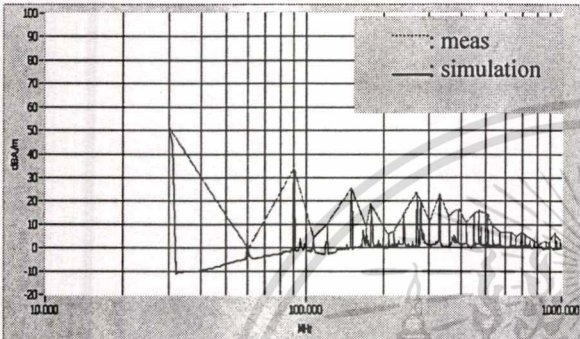
รูปที่ 6.11 แสดงผลการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และผลการคำนวณ (ในการวัดแบบเร็ว) ด้านการคำนวณ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



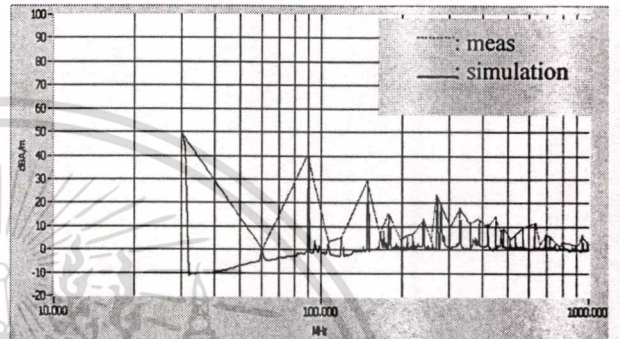
(ก) 5cm



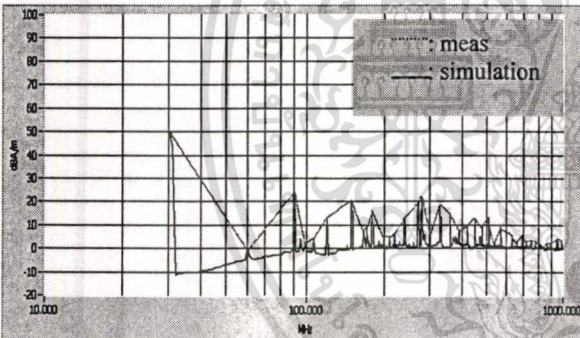
(ข) 10cm



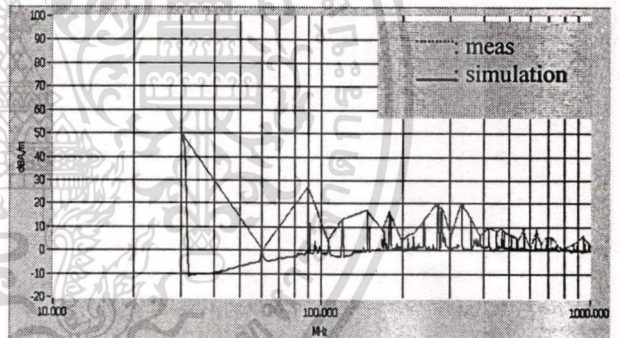
(ค) 15 cm



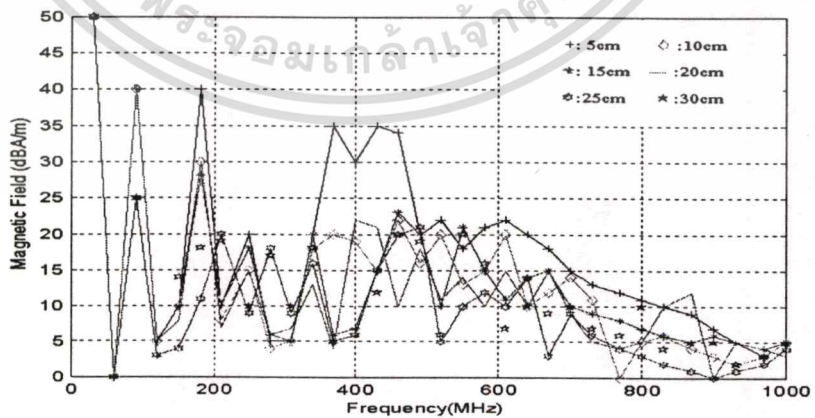
(ง) 20 cm



(จ) 25 cm

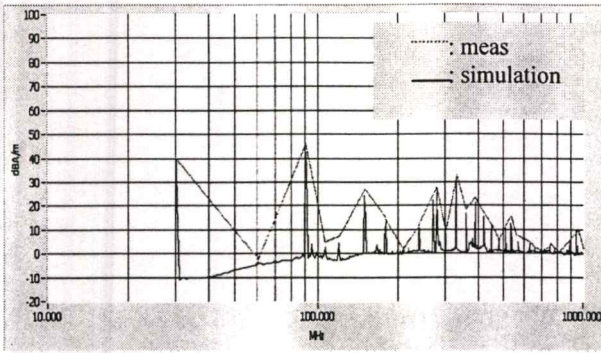


(ฉ) 30 cm

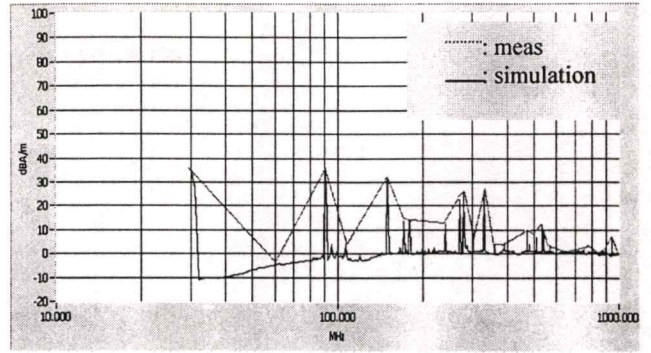


รูปที่ 6.12 แสดงสนามแม่เหล็กระยะใกล้เมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวของสายทองแดง

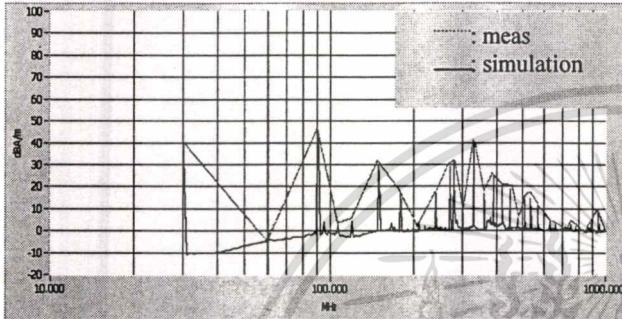
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



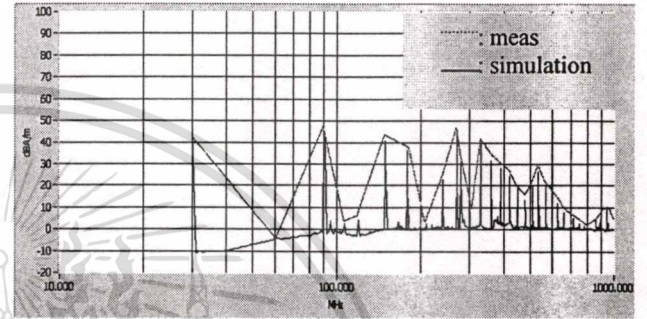
(ก) 30 องศา



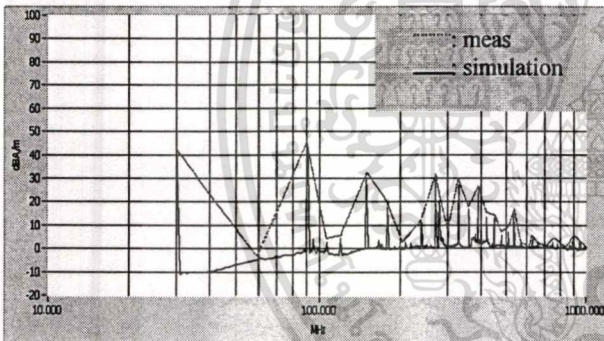
(ข) 45 องศา



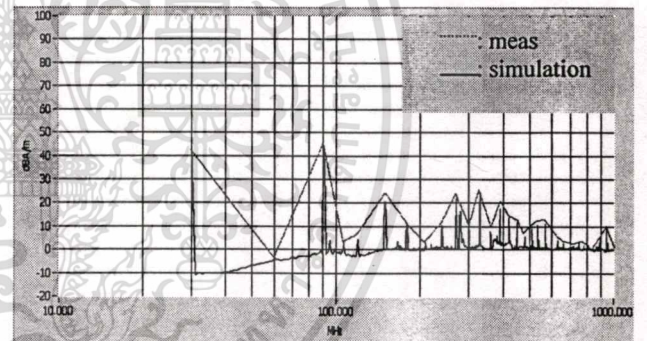
(ค) 60 องศา



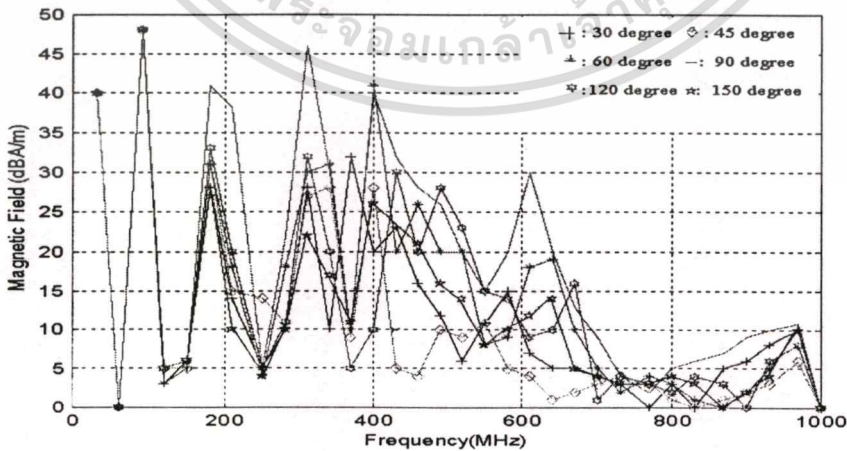
(ง) 90 องศา



(จ) 120 องศา

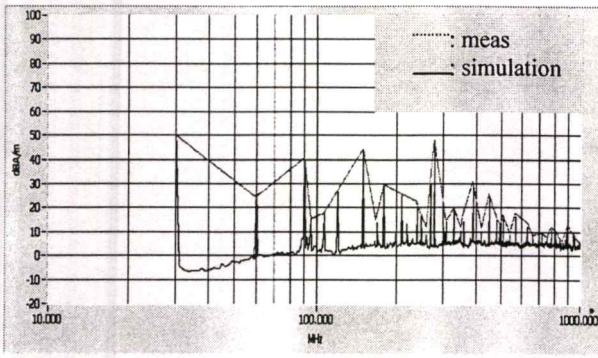


(ฉ) 135 องศา

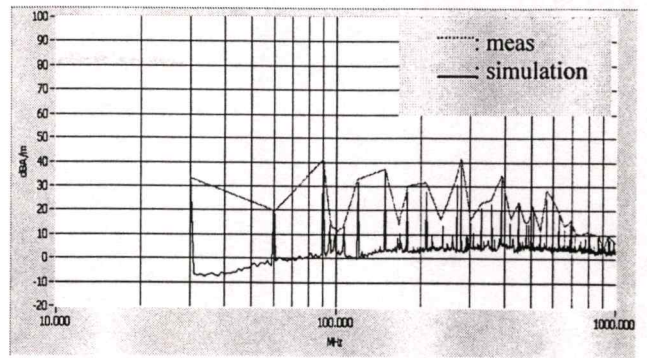


รูปที่ 6.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงมุมของสายทอง

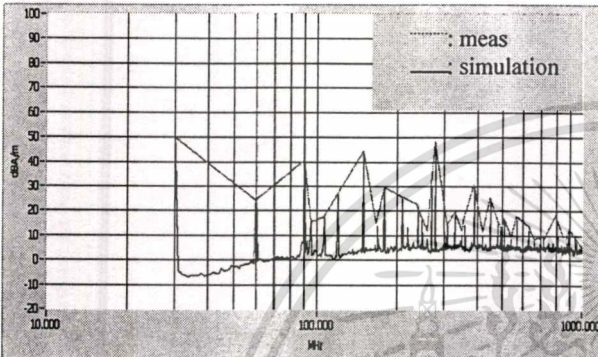
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



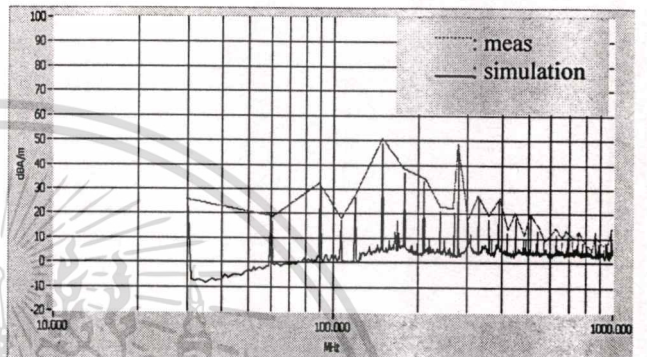
(ก) 7400



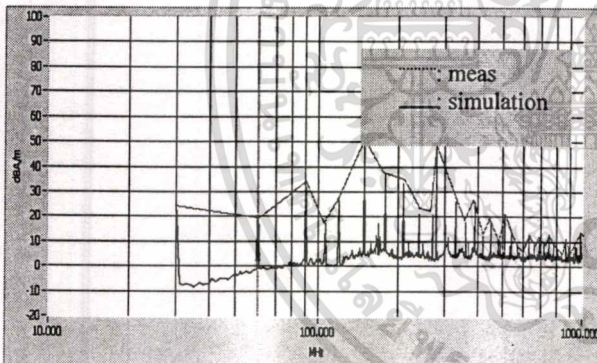
(ข) 7404



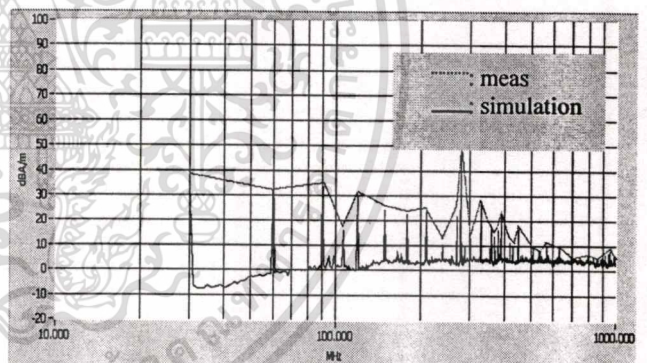
(ค) 74123



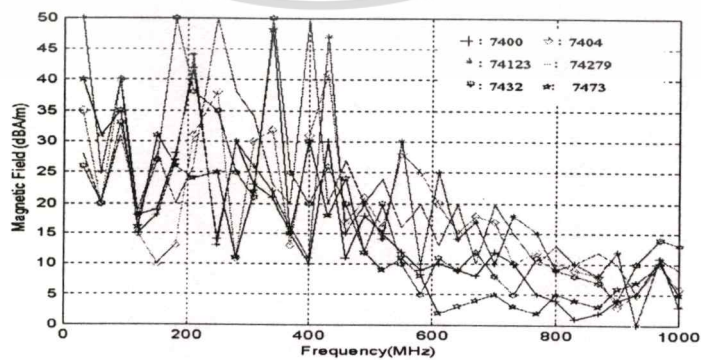
(ง) 74279



(จ) 7432

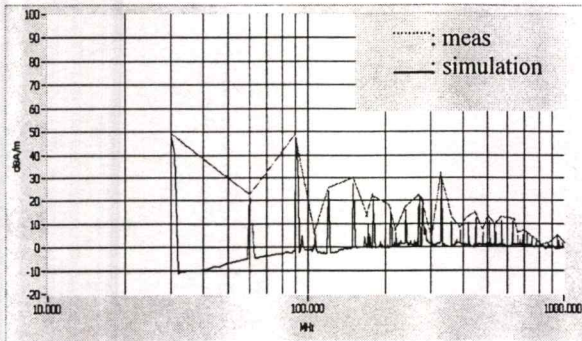


(ฉ) 7473

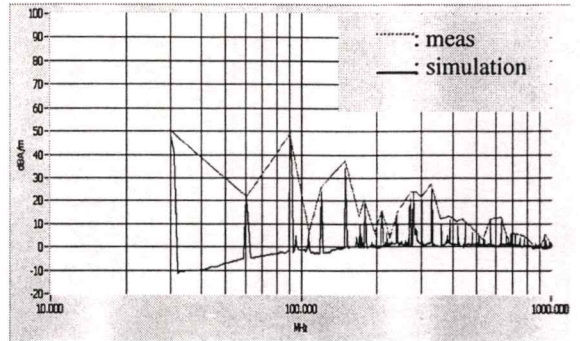


รูปที่ 6.14 แสดงวงจรดิจิทัล

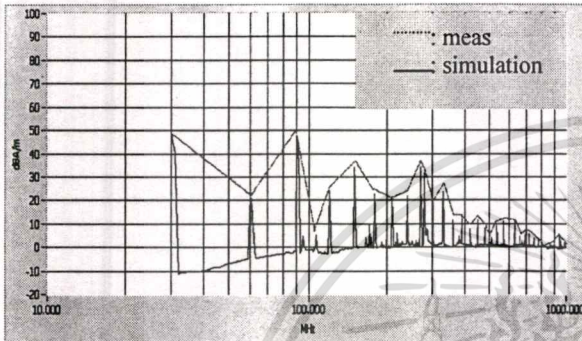
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



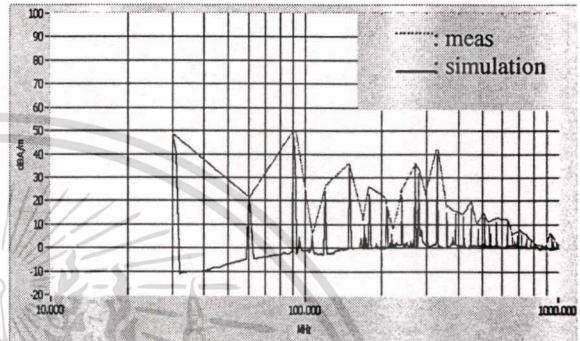
(ก) 1 mm



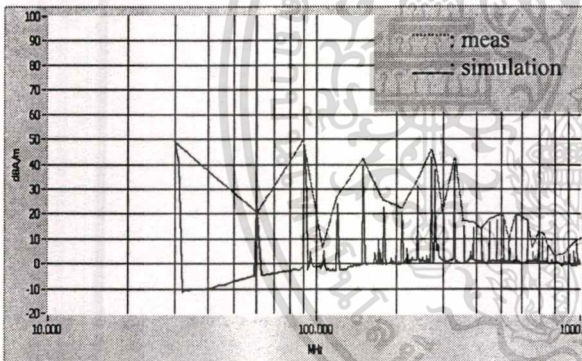
(ข) 2mm



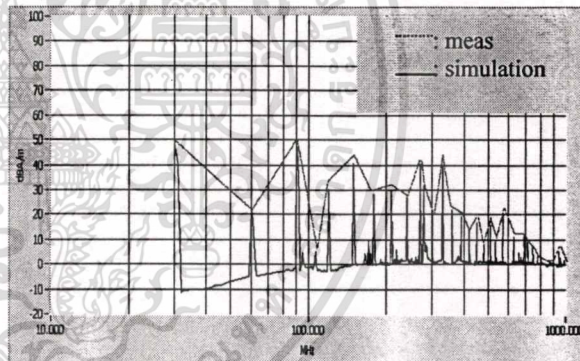
(ค) 5 mm



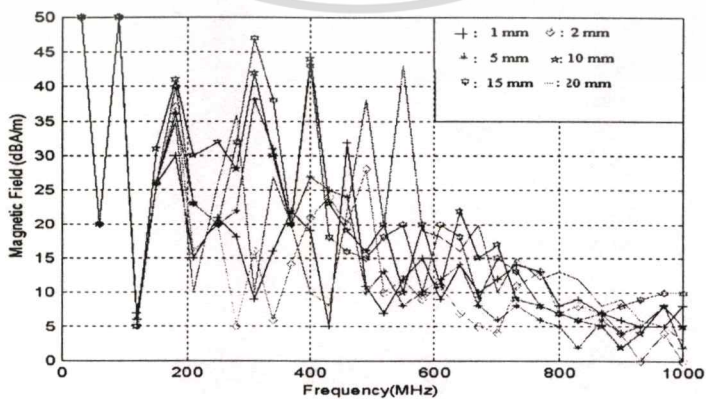
(ง) 10 mm



(จ) 15 mm



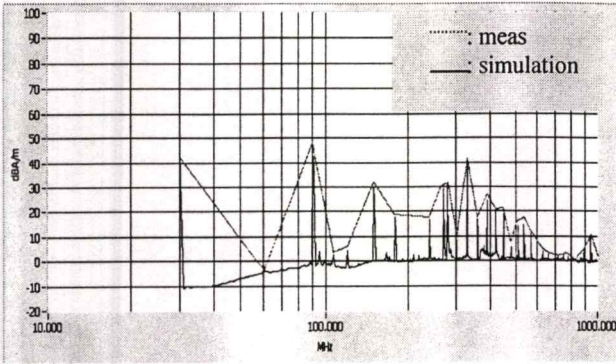
(ฉ) 20 mm



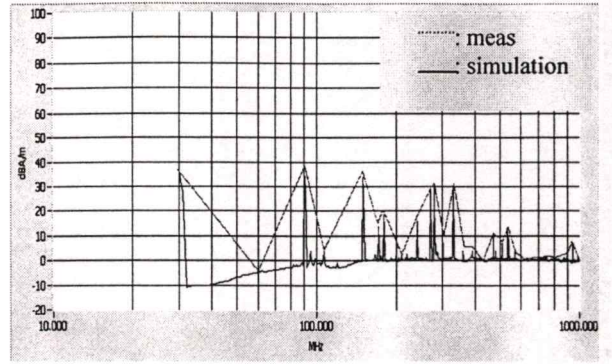
รูปที่ 6.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงความกว้างของลวดวงจรพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

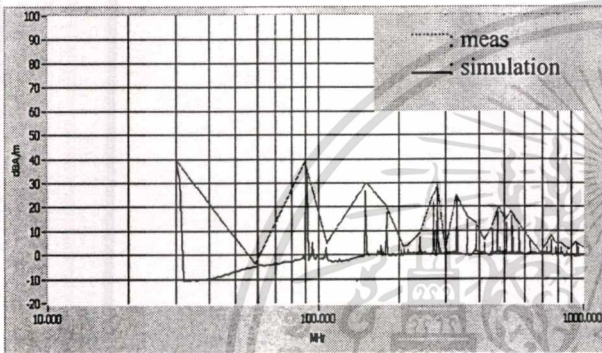
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



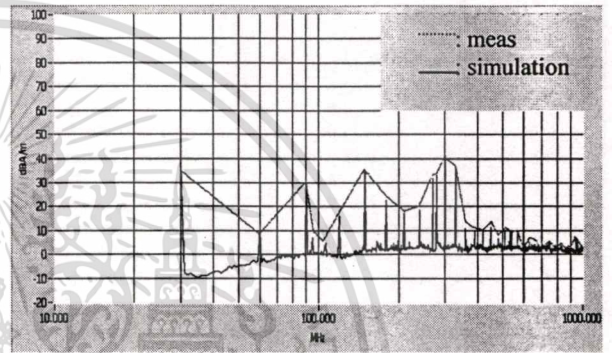
(ก) H



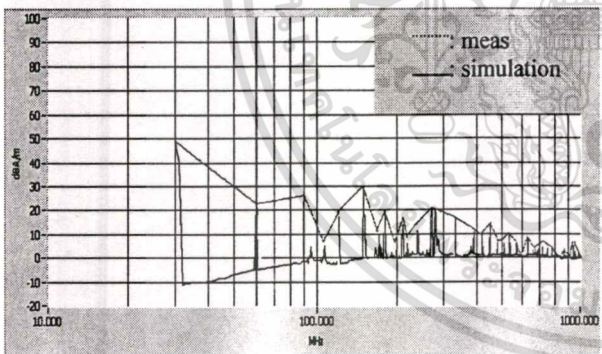
(ข) L



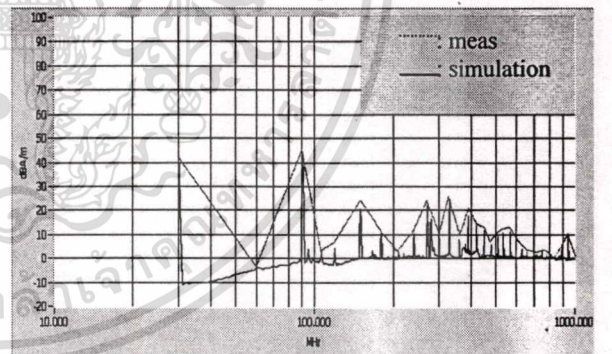
(ค) T



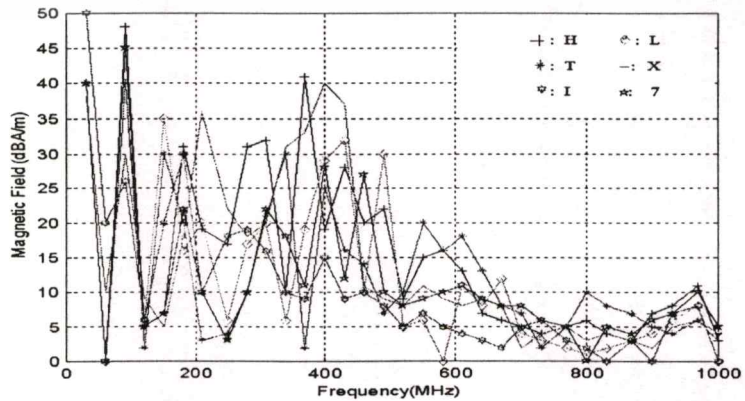
(ง) X



(จ) I



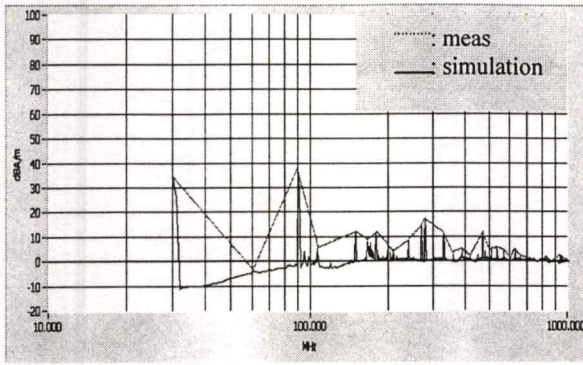
(ฉ) 7



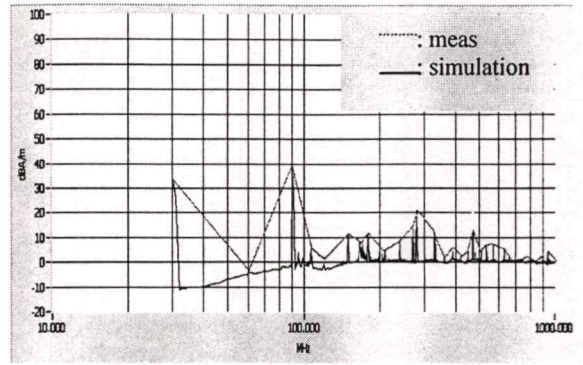
รูปที่ 6.16 แสดงสนามแม่เหล็กจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลวดทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

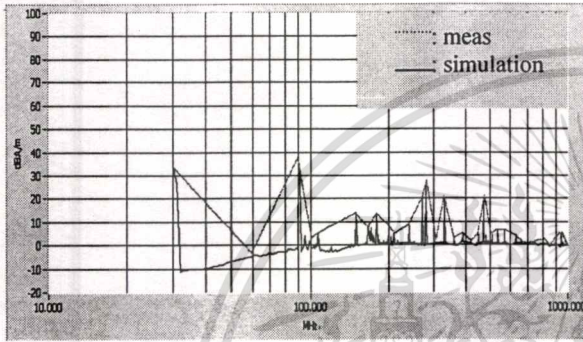
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



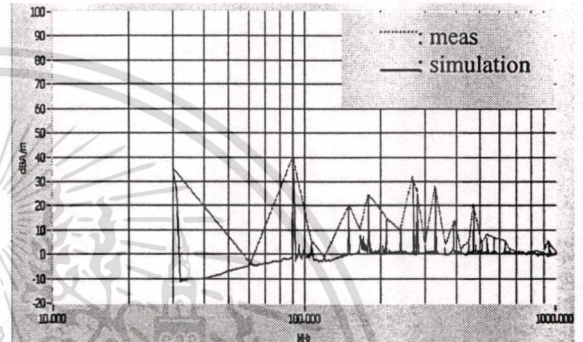
(ก) 3 cm



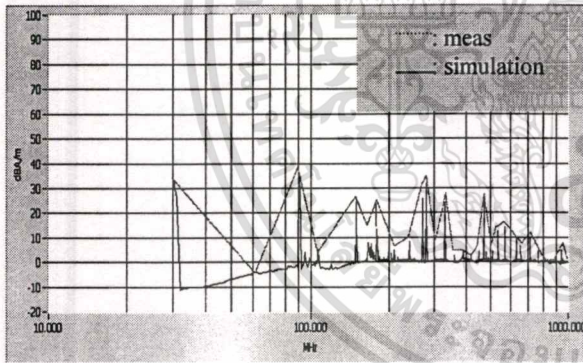
(ข) 5 cm



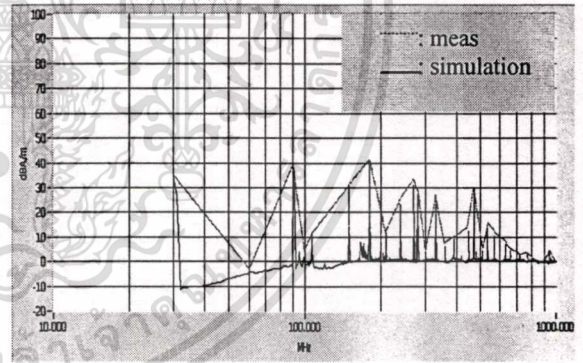
(ค) 11 cm



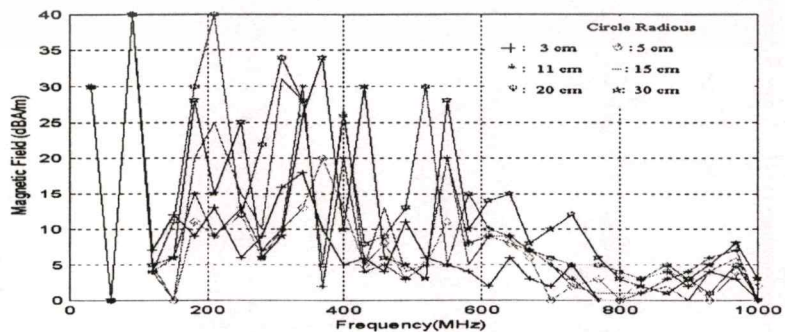
(ง) 15 cm



(จ) 20 cm



(ฉ) 30 cm

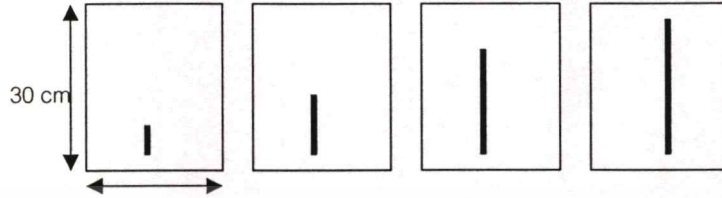


รูปที่ 6.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงรัศมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.6 ผลการปรับความยาวของทองแดง

จากรูปที่ 6.12 (ก) ถึง(จ) การเปลี่ยนแปลงความยาวของลายทองแดงจะมีผลทำให้ สนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาเกิดการเปลี่ยนแปลง สนามแม่เหล็กจากลายทองแดงซึ่งมีขนาดสั้นกว่าจะวัดได้มากกว่าที่มีความยาวเพิ่มขึ้น ขึ้นกับระยะทางเดินของกระแส [14] [16]

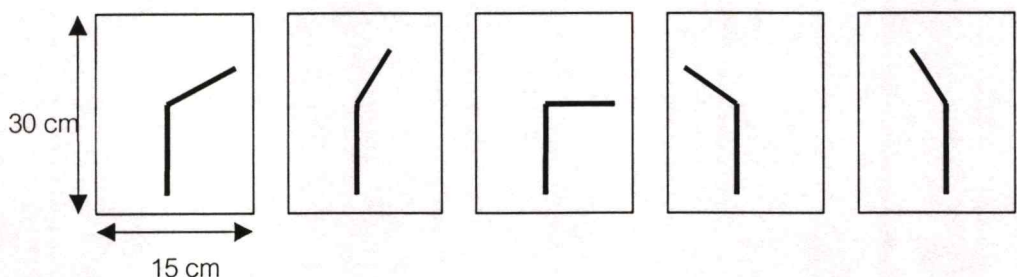


รูปที่ 6.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงความยาวของลายทองแดง

จากรูปสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่วัดจากลายทองแดงยาว 5 cm จะมีค่ามากที่สุดและสนามแม่เหล็กจากลายทองแดงรูปตัว “I” ความยาว 30 cm จะมีค่าน้อยที่สุด จากรูปที่ 6.12 เมื่อนำแอมป์ลิจูดทั้งหมดมาพล็อต พบว่าเราสามารถแยกแยะและชี้บ่งขนาดความยาวของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยอาศัยแอมป์ลิจูดของสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกจากลายทองแดง โดยสังเกตความถี่ในช่วง 500 MHz ถึง 1 GHz สำหรับย่านความถี่ต่ำ 80 MHz ถึง 400 MHz แอมป์ลิจูดของสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาจากวงจรพิมพ์แต่ละแบบมีขนาดไม่แตกต่างกันนัก และไม่เหมาะสำหรับการจำแนกชนิดของลายทองแดง สำหรับแอมป์ลิจูดของลายทองแดงความยาว 5 cm แอมป์ลิจูดของสนามแม่เหล็กในช่วง 300 MHz ถึง 500 MHz จะสูงกว่าแอมป์ลิจูดของลายทองแดงทั้งหมดเป็นเพราะรีโซแนนท์ของแผ่นวงจรพิมพ์

6.2.7 ผลการปรับมุมของลายทองแดง

มุมของลายทองแดงในวิทยานิพนธ์นี้ถูกปรับจาก 30 องศา ถึง 135 องศา ดังรูปที่ 6.19 ผลการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ เมื่อมุมของลายทองแดงเปลี่ยนแปลงถูกแสดงดังรูปที่ 6.13 (ก) – (จ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 6.19 แสดงการปรับมุมของลายทองแดง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่วัดจากลายทองแดงแต่ละแบบมาพล็อตรวมกัน จะพบว่า แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กแพร่ออกจากลายทองแดงซึ่งมีมุม 30 องศา จะให้แอมพลิจูดออกมาสูงที่สุดในทุกความถี่ และแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กของลายทองแดงซึ่งมีมุม 30 องศา จะมีลักษณะใกล้เคียงกับแอมพลิจูดของลายทองแดงซึ่งมีมุม 60 องศาและ 135 องศา แต่มีแอมพลิจูดเท่ากัน

แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กจากลายทองแดงมุม 45 องศา จะแตกต่างจากของลายทองแดงอื่นๆ โดยเฉพาะที่ความถี่ 500 MHz-700 MHz

สำหรับในช่วงความถี่ต่ำ (30 MHz-200 MHz) ลักษณะของแอมพลิจูดจะใกล้เคียงกันมาก และไม่สามารถแยกแยะได้ ดังนั้นการแยกแยะมุมของลายทองแดงจึงใช้การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในช่วงความถี่สูง (400 MHz ถึง 700 MHz) ในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 700 MHz สนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาจะมีลักษณะคล้ายกันอีกครั้ง และมีขนาดเล็กมากจึงทำให้แยกแยะได้ยาก โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 700 MHz ถึง 800 MHz

ดังนั้นการแยกแยะมุมของลายทองแดงจึงใช้การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในช่วงความถี่สูง (400 MHz ถึง 700 MHz)

6.2.8 ผลของการเปลี่ยนชนิดของวงจรถิจริตอล

วงจรถิจริตอลในวิทยานิพนธ์นี้มีอยู่ 2 ตัว ตัวแรกเป็นตัวส่งสัญญาณ (Tx) และตัวที่สองเป็นตัวรับสัญญาณ (Rx) การเปลี่ยนแปลงชนิดของวงจรถิจริตอลจะใช้โครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์เหมือนกันทุกชนิดแต่จะเปลี่ยนเฉพาะ IC เท่านั้น



รูปที่ 6.20 แสดงโครงสร้างของการรับและส่งสัญญาณของวงจรถิจริตอล

สำหรับวงจรถิจริตอลที่ใช้ประกอบด้วย 7400 (NAND), 7404 (INVERTER), 74123, 74279 (R-S F/F), 7432 (OR), 7473 (D F/F), 7408 (EX-OR) และชนิดของเกตที่ใช้ทั้งหมดเป็นแบบ TTL ลอจิก

ผลของการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดของเกตบนแผ่นวงจรพิมพ์ แสดงดังรูปที่ 6.14 (ก)-(จ) โดย (I) แทนแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกจากวงจรถิจริตอล และ - คือผลจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ของแผ่นวงจรพิมพ์แต่ละชนิดมาพล็อตรวมกัน จะแสดงในรูปที่ 6.14

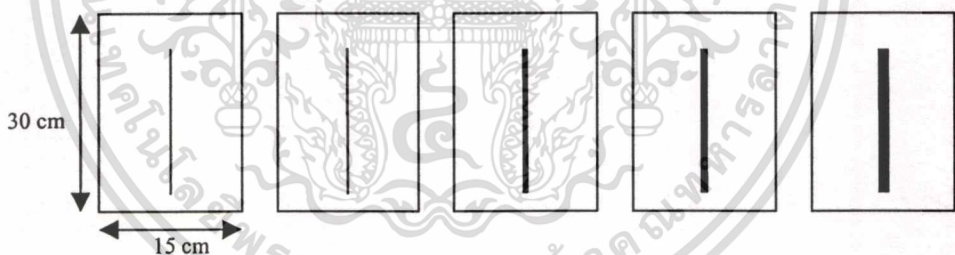
จากรูปพบว่าแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาของเกดแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 100 MHz ถึง 700 MHz แอมพลิจูดสูงสุดจะแพร่ออกจากเกด 74279 และ 7432

นอกจากนี้ยังพบว่าสนามแม่เหล็กในช่วงความถี่ 100 MHz ถึง 400 MHz ของเกด 7400 และ 74123 มีลักษณะเหมือนกัน และแอมพลิจูดใกล้เคียงกันมาก จึงไม่สามารถแยกแยะชนิดของเกดทั้ง 2 ได้โดยอาศัยความถี่ในช่วงนี้ อย่างไรก็ตาม เมื่อสังเกตที่ความถี่สูง 700 MHz ถึง 800 MHz แอมพลิจูดของเกด 74123 จะสูงกว่าของเกด 7400 ดังนั้นสามารถใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ช่วงนี้เป็นตัวจำแนกชนิดของเกดได้

สำหรับเกด 7404 และ 7473 แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก สามารถแยกจากของเกดอื่นๆ ได้ง่าย โดยสังเกตในช่วงความถี่ 100 MHz ถึง 800 MHz จะแตกต่างกับเกดอื่นๆ

6.2.9 ผลของการปรับความกว้างของลายวงจรพิมพ์ (NF)

ลายวงจรพิมพ์จะถูกเปลี่ยนความกว้างจากน้อยไปสู่มากดังนี้ 1 mm 2 mm 5mm 10mm 15mm และ 20mm ตามลำดับ สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่วัดจากแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงความกว้าง แสดงดังรูปที่ 6.15 (ก)–(จ)



รูปที่ 6.21 แสดงการปรับความกว้างของลายทองแดง

เมื่อนำแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่วัดได้จากลายทองแดงแต่ละแบบมาพล็อตรวมกันดังรูปที่ 6.15 พบว่าลักษณะของสนามแม่เหล็กเมื่อความกว้างของลายทองแดงเพิ่มขึ้นจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันและจะแตกต่างกันเฉพาะแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กเท่านั้น โดยสนามแม่เหล็กจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความกว้างของลายทองแดงมีขนาดใหญ่ขึ้น

จากรูป 6.15 จะพบว่าสนามแม่เหล็กจากลายทองแดงกว้าง 20 mm จะมีขนาดสูงที่สุด และสนามแม่เหล็กจากแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งมีลายทองแดงกว้าง 1 mm จะมีค่าน้อยที่สุด นอกจากนี้แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กกระยะใกล้จากลายทองแดงกว้าง 20 mm ในช่วงความถี่สูง (500 MHz ถึง 700 MHz) ยังมีค่ามากที่สุด และแตกต่างจากสนามแม่เหล็กของลายทองแดงอื่นๆ

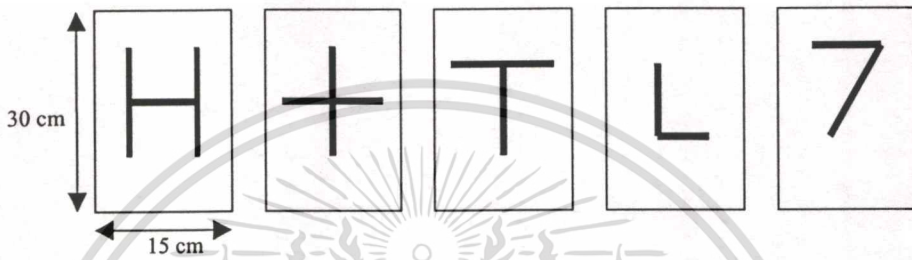
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากผลการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ของสายทองแดง ซึ่งเปลี่ยนแปลงความกว้างพบว่า เราสามารถจำแนกความกว้างของสายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ได้ โดยอาศัยแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่แพร่ออกจากสายทองแดง ตลอดช่วงความถี่(30 MHz ถึง 1 GHz)

6.2.10 การปรับรูปร่างลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์

รูปร่างของสายวงจรพิมพ์ในวิทยานิพนธ์นี้ ออกแบบโดยสังเกตลักษณะทั่วไปของแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้งานปกติโดยส่วนมากจะประกอบด้วยโครงสร้างดังนี้ รูปตัว I, H, L, T, X และ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 6.22 แสดงการปรับรูปร่างลักษณะของสายทองแดง

สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่แพร่ออกมาจากสายทองแดงแต่ละแบบจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งนี้ขึ้นกับโครงสร้างพื้นฐานของสายทองแดงนั้นๆ สายทองแดงซึ่งมีลักษณะตัว H จะมีจำนวนมุมหัก (90 องศา) เป็นจำนวนมากที่สุด เมื่อเทียบกับสายทองแดงอื่นๆ (L, T, X และ 7) ดังรูป 6.22

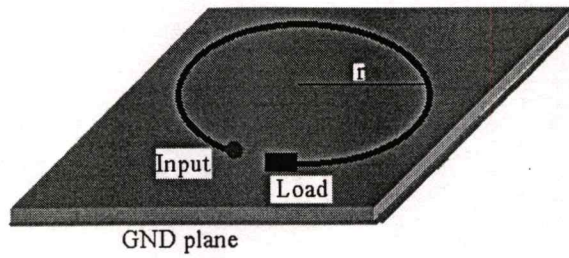
สายวงจรพิมพ์ซึ่งมีลักษณะรูปตัว “ H ” และตัว “ X ” จะมีแอมพลิจูดสูงสุดเนื่องจากมีจำนวนมุมมาก ที่สุด (2 จุด) รองลงมาคือตัว T L และ 7 ตามลำดับ

สนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาจากสายทองแดงแต่ละแบบถูกแสดงดังรูปที่ 6.16 (ก) - (ง) เมื่อนำแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรแต่ละแบบมาพล็อต เพื่อเปรียบเทียบกันพบว่า สนามแม่เหล็กของสายทองแดงรูปตัว H และ X มีค่ามากที่สุดที่ความถี่ 300 MHz ถึง 450 MHz และสามารถจำแนกชนิดของสายทองแดงทั้งหมด โดยอาศัยแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กในช่วงความถี่ 500 MHz ถึง 700 MHz

6.2.11 ผลของการปรับรัศมีของสายทองแดง

ในการทดสอบการแพร่สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ของสายทองแดงซึ่งมีลักษณะคล้ายสายอากาศรูป สายทองแดงถูกออกแบบให้เป็นลูปรรัศมี 3 cm 5 cm 11 cm 15 cm 20 cm และ 30 cm ตามลำดับ โครงสร้างของสายทองแดงซึ่งเปลี่ยนแปลงรัศมี แสดงดังรูปที่ 6.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.23 แสดงโครงสร้างของการปรับรัศมีของวงจรมิมพ์

ผลของสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาจากลายทองแดงเมื่อเปลี่ยนแปลงรัศมี พบว่า สนามแม่เหล็กจากลายทองแดงซึ่งมีรัศมี 30 cm จะมีขนาดมากที่สุด โดยเฉพาะในช่วงความถี่สูง (500 MHz ถึง 900 MHz) แต่เมื่อเทียบลายทองแดงซึ่งมีรัศมี 30 cm กับ 20 cm พบว่าสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 100 MHz ถึง 200 MHz ของลายทองแดงรัศมี 20 cm จะมากกว่าจากรัศมี 30 cm ประมาณ 15 dB ผลของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงความถี่นี้มาจากควิริโซแนนท์ของลายทองแดงเมทซ์ พอดีกับสายอากาศที่ใช้วัด

ลายทองแดงซึ่งมีรัศมี 3 cm และ 5 cm มีแอมพลิจูดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยและมีลักษณะคล้ายกัน การจำแนกลายทองแดงรัศมี 3 cm และ 5 cm ทำได้โดยการพิจารณาแอมพลิจูดในช่วงความถี่ 500 MHz ถึง 700 MHz

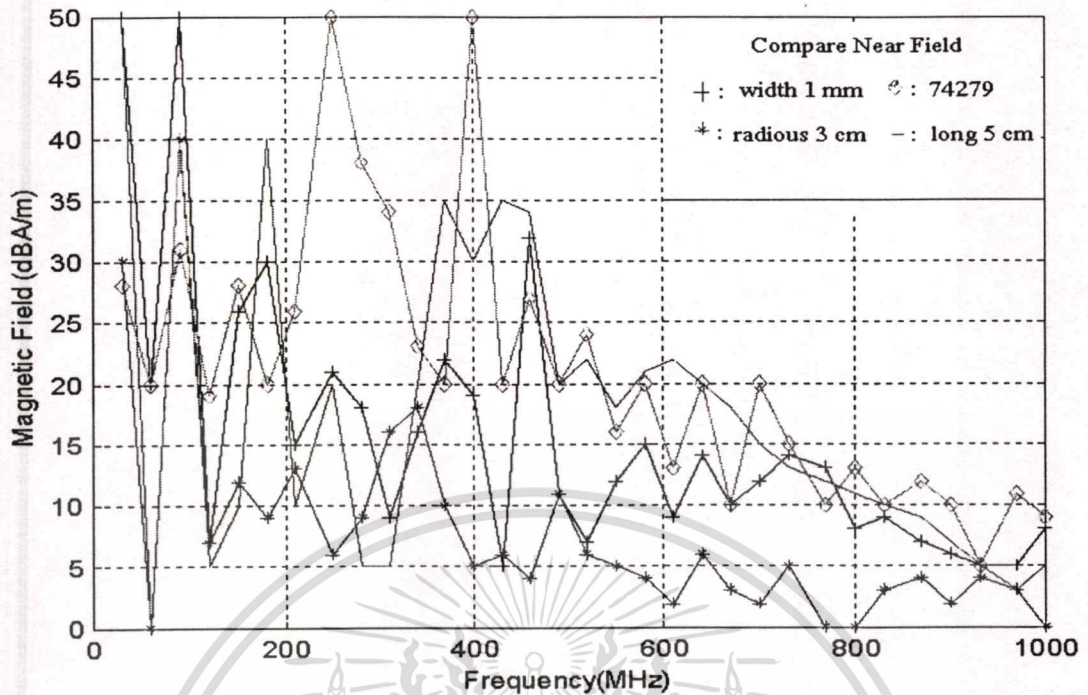
ลายทองแดงซึ่งมีรัศมี 11 cm และ 15 cm สามารถจำแนกได้โดยการพิจารณาแอมพลิจูดในช่วงความถี่ 100 MHz ถึง 200 MHz

อย่างไรก็ตามพบว่าเราสามารถจำแนกลักษณะของลายทองแดงซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงรัศมีโดยอาศัยสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกจากวงจรมิมพ์ได้ โดยพิจารณาความถี่ช่วงที่เป็นจุดเด่นความถี่หลัก (dominant peak) ของวงจรมิมพ์แต่ละชนิดได้

6.2.12 การเปรียบเทียบการแพร่สนามแม่เหล็กของแผ่นวงจรมิมพ์ซึ่งมีลักษณะต่างกัน

เมื่อนำแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กที่วัดระยะใกล้ของลายทองแดงทั้งหมด 4 กลุ่มมาพล็อตรวมกันในรูปที่ 6.24 และพิจารณาความแตกต่างของลายทองแดงแต่ละแบบจะพบว่า แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 200 MHz ถึง 1 GHz ของลายทองแดงทั้ง 4 ชนิด สามารถแยกแยะได้อย่างง่ายดาย

จากคุณสมบัตินี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการจดจำและจำแนกลักษณะของลายทองแดงบนแผ่นวงจรมิมพ์ โดยอาศัยการแพร่สนามแม่เหล็กในระยะใกล้



รูปที่ 6.24 แสดงการเปรียบเทียบของ PCB ที่มีลักษณะแตกต่างกัน

6.3 การวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล (Far-Field Measurement)

การวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลซึ่งแผ่ออกมาจากวงจรพิมพ์ แผ่นวงจรพิมพ์ถูกวางอยู่บนโต๊ะซึ่งเป็นฉนวนและสามารถหมุนได้รอบตัว(360 องศา) สูงจากพื้นกราวด์เพลน 80 cm อยู่ในห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi Anechoic Chamber) ภาครับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วย

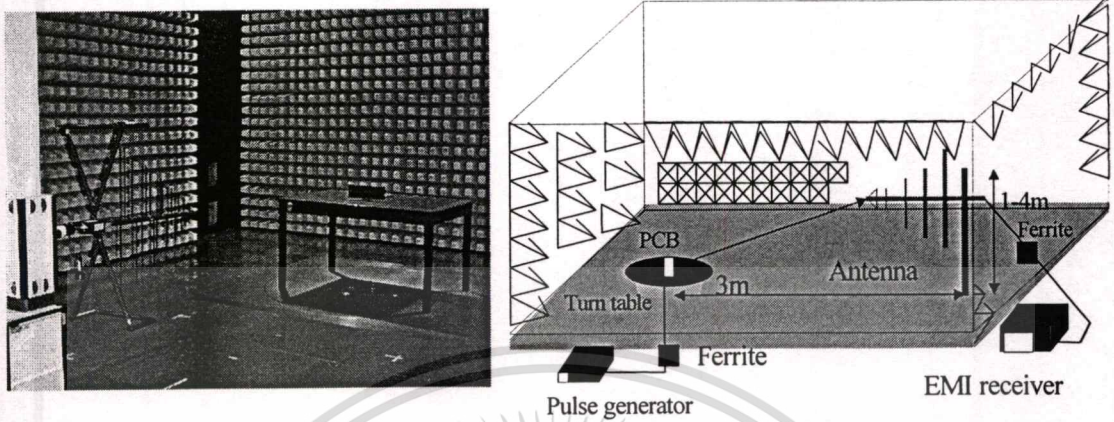
1. สายอากาศแบบ Bi-Log โดยวัดความถี่ในช่วง 30MHz ถึง 1 GHz
2. แอมพลิไฟเออร์ 25 dB

สายอากาศจะถูกปรับเปลี่ยนขั้ว(Polarization) การรับสนามไฟฟ้าตามแนวแกนนอน (Horizontal) และแนวแกนตั้ง (Vertical) เพื่อหาความแรงสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์มากที่สุด ตามมาตรฐาน CISPR22 [25] ระยะระหว่างแผ่นวงจรพิมพ์และสายอากาศตัวรับ เป็น 3 m ตามมาตรฐาน

3. ส่วนสัญญาณอินพุตของแผ่นวงจรพิมพ์คือ เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่แบบพัลส์(Pulse Generator) โดยการตั้งความถี่ของสัญญาณเป็น 30 MHz เวลาขาขึ้น (rise-time) และขาลง (fall time) 50 ns และคูตี่ไซเคิล(Duty cycle) 50 เปอร์เซ็นต์ (เหมือนกับการวัดในสนามแม่เหล็กระยะไกล) สายนำสัญญาณจากสายอากาศถูกต่อผ่าน เฟอร์ไรต์ แคลปป์ ไปยังเครื่องกำเนิดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่และเครื่องวิเคราะห์ความถี่ ซึ่งถูกวางอยู่นอกห้อง Semi Anechoic Chamber แสดงดังรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 แสดงการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล ตามมาตรฐาน CISPR22

6.3.1 วิธีการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกล

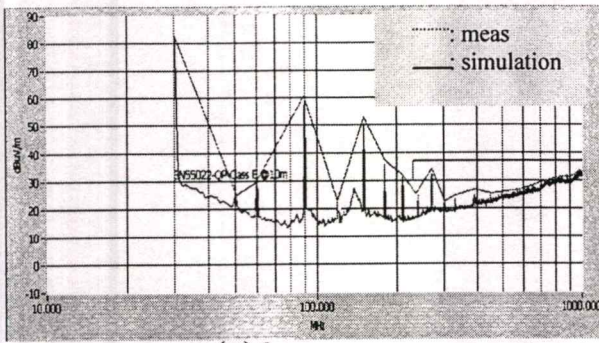
การวัดความเข้มสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz จะใช้ตัวตรวจจับแบบ Peak และ Quasi-Peak ค่าความสูญเสียในสายนำสัญญาณ (cable loss) เกณฑ์ของสายอากาศ (antenna factor) ถูกชดเชยในระบบการวัด และคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด (measurement uncertainty) ตามมาตรฐาน CISPR 16-4 [23]

ในระหว่างการวัดสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ สายอากาศซึ่งเป็นตัวรับสนามไฟฟ้าถูกเลื่อนขึ้น / ลงในช่วงความสูง 1 เมตร ถึง 4 เมตร และถูกกลับขั้วการวัด (polarization) จากแนวนอนเป็นแนวตั้งและสลับไปมา แผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งถูกวางอยู่บนแท่นหมุน (turn table) ถูกหมุนจาก 0 องศา ถึง 360 องศา และหมุนทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา เพื่อหาความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงที่สุดที่แผ่ออกมาจาก แผ่นวงจรพิมพ์ ตามมาตรฐาน CISPR 22 สนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากวงจรพิมพ์มากที่สุดในแต่ละมุมและแต่ละความสูง จะถูกบันทึกค่าอัตโนมัติโดยใช้ฟังก์ชัน Max-Hold สำหรับแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการตรวจจับแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในแต่ละย่านความถี่ถูกกำหนดให้เป็นไปตามมาตรฐาน CISPR 22

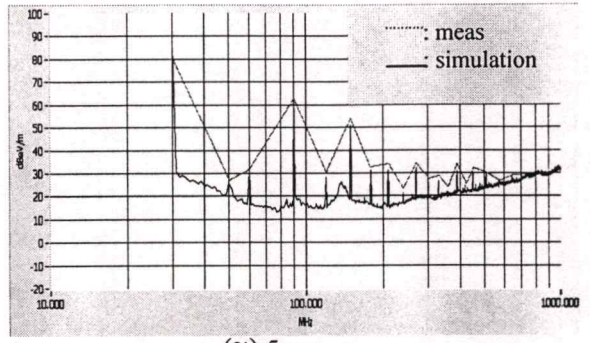
ในวิทยานิพนธ์นี้ สนามไฟฟ้าระยะไกลซึ่งแผ่ออกจากสายทองแดงซึ่งมีลักษณะแตกต่างกัน ถูกนำมาพล็อตกราฟ โดยแยกออกเป็นกลุ่มๆ เพื่อง่ายในการพิจารณา ดังนั้นกลุ่มการปรับความยาว การปรับรัศมีของสายทองแดง การปรับความกว้างของสายทองแดง การเปลี่ยนรูปร่างลักษณะของสายทองแดง และวงจรดิจิทัลอย่างง่าย ในตอนท้ายสนามไฟฟ้าในการวัดแต่ละกลุ่มจะถูกนำมาพล็อตรวมกันเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมา

รูปที่ 6.26-6.31 แสดงสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากวงจรพิมพ์ ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบกับการคำนวณ

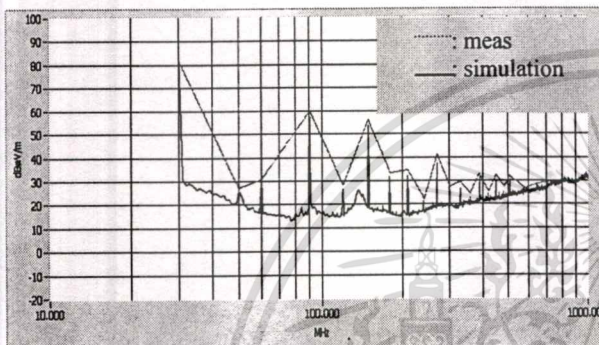
ไม่ว่าทั้งหมดนี้จะเป็นสิ่งที่ต้องเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



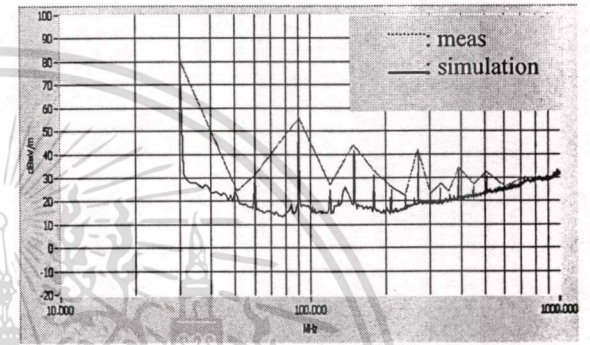
(ก) 3 cm



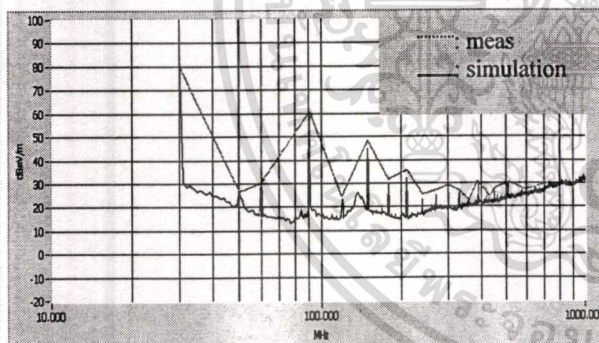
(ข) 5 cm



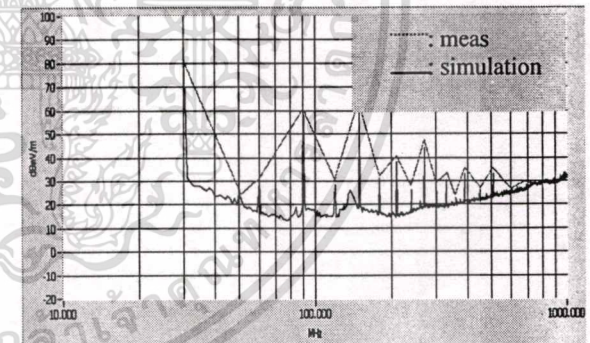
(ค) 10 cm



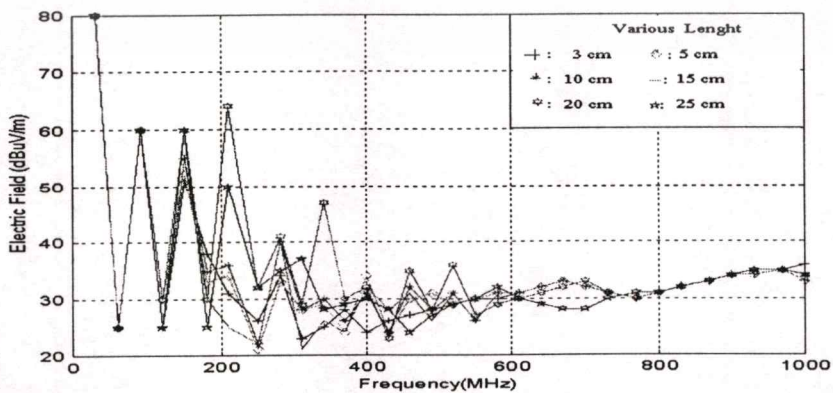
(ง) 11 cm



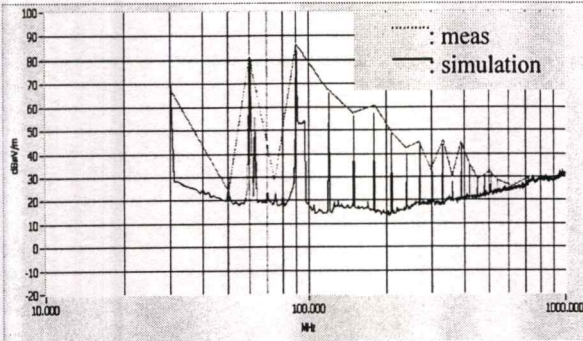
(จ) 20 cm



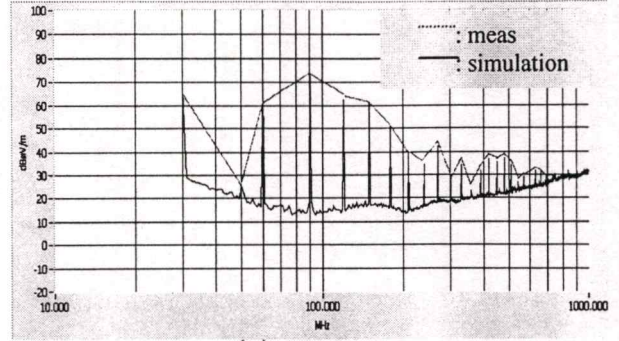
(ฉ) 25 cm



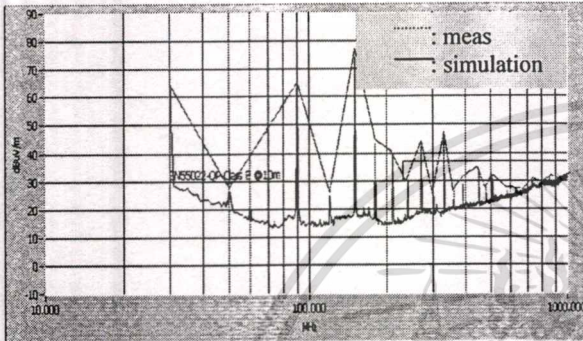
รูปที่ 6.26 แสดง สนามไฟฟ้าแพร่จากสายจรมหัพพีซึ่งเปลี่ยนแปลงความยาว
 เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



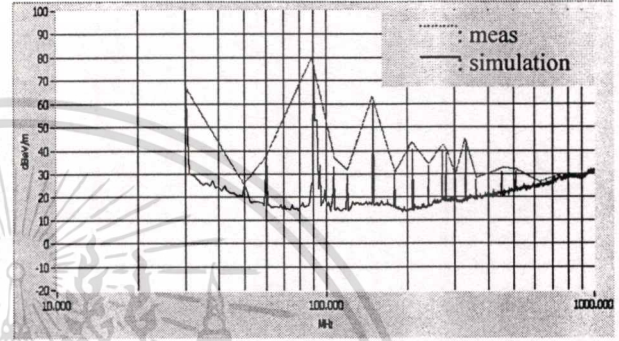
(ก) 6.2000



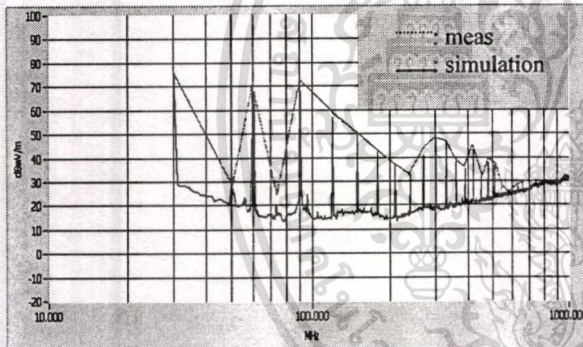
(ข) 6.2002



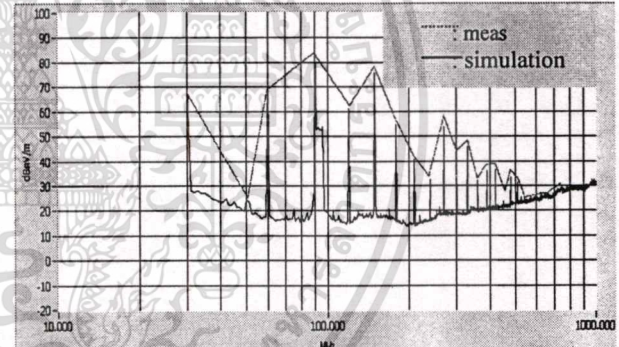
(ค) 6.2004



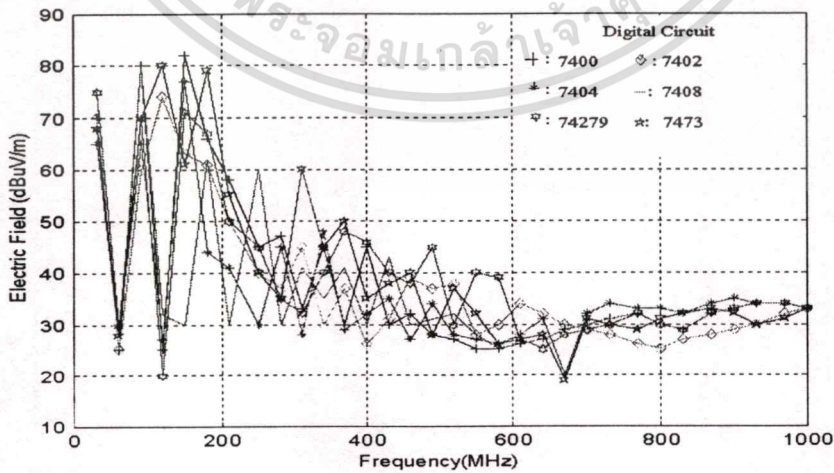
(ง) 6.2008



(จ) 6.2026.25

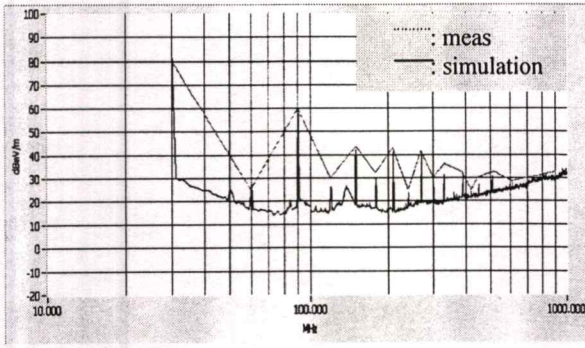


(ฉ) 6.206.19

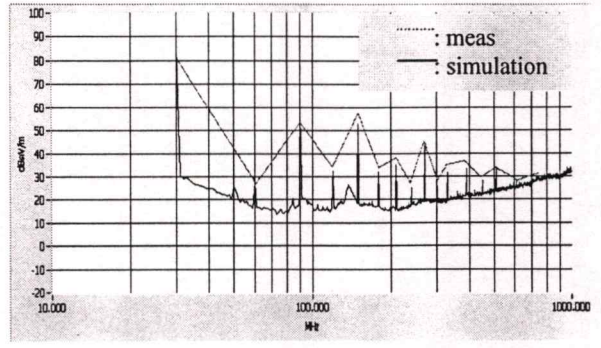


รูปที่ 6.27 แสดงสนามไฟฟ้าแพร่อจากลายวงจรพิมพ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงวงจรดิจิทัล

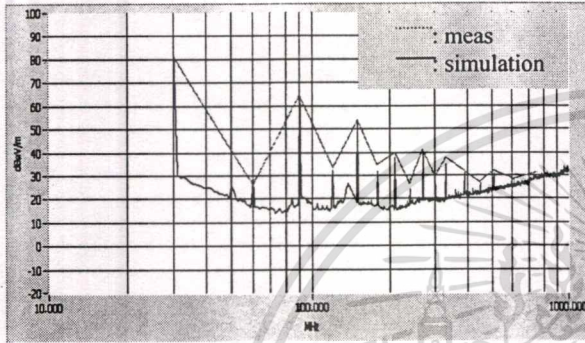
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



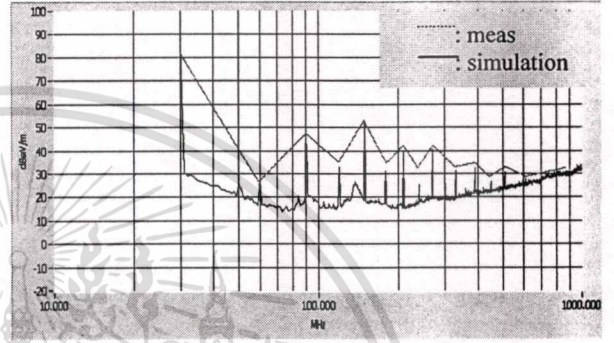
(ก) 30°



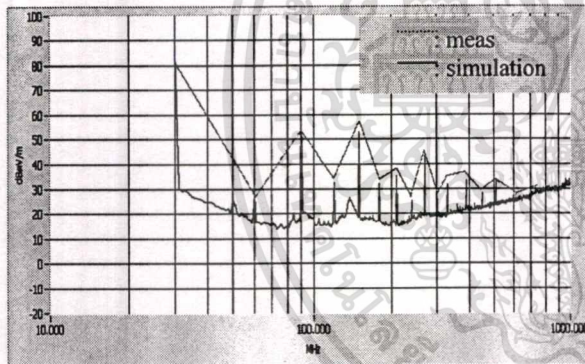
(ข) 45°



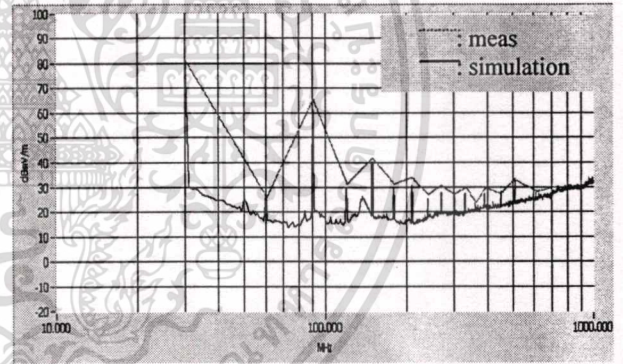
(ค) 60°



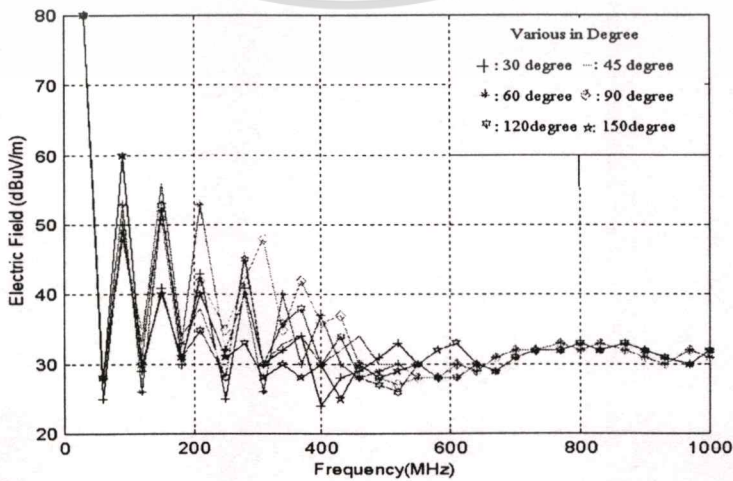
(ง) 90°



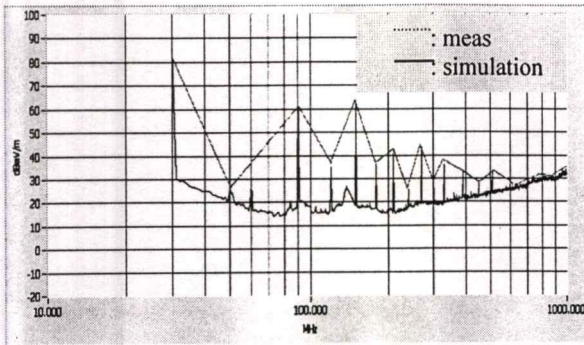
(ฉ) 120°



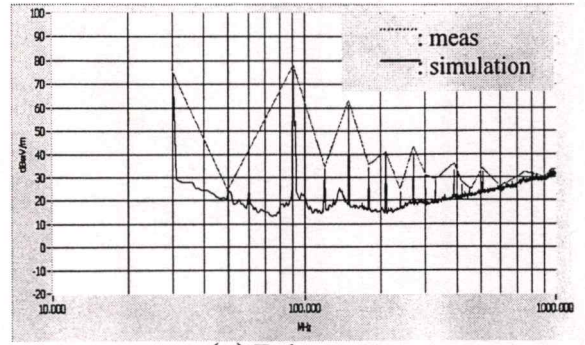
(ช) 150°



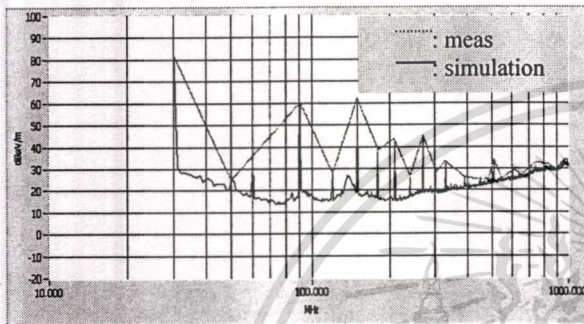
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 6.28 แสดงสนามไฟฟ้าแปรจากลยวงจรพีมพีซึ่งเปลี่ยนแปลงมุม
 ไม่วางกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



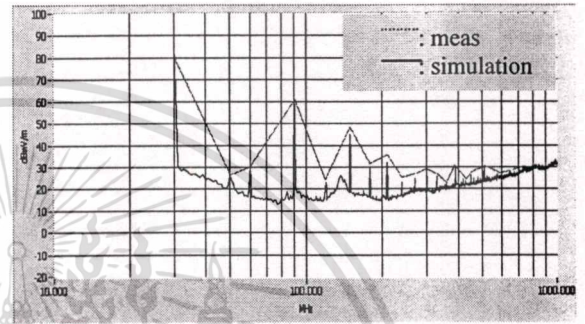
(ก) L shape



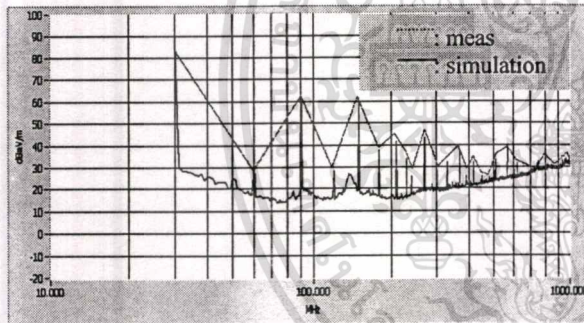
(ข) T shape



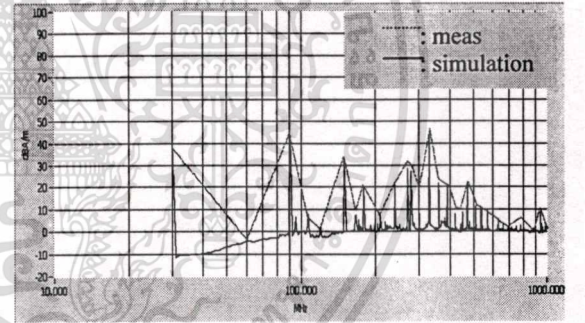
(ค) U shape



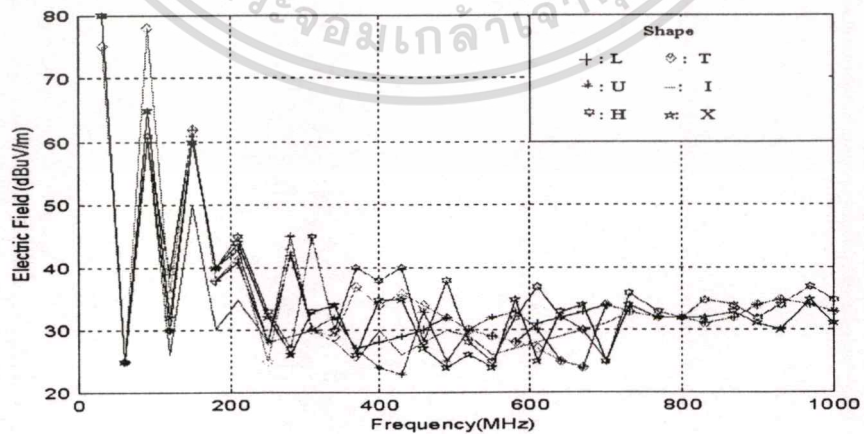
(ง) I shape



(จ) H shape

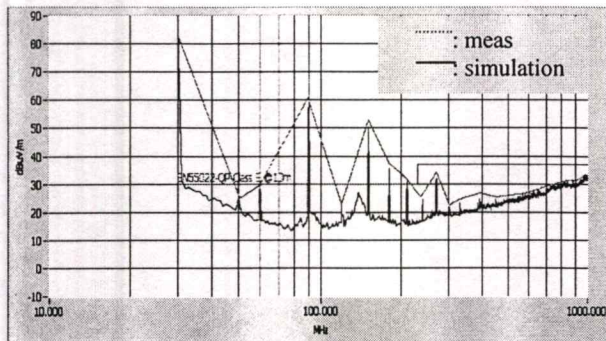


(ฉ) X shape

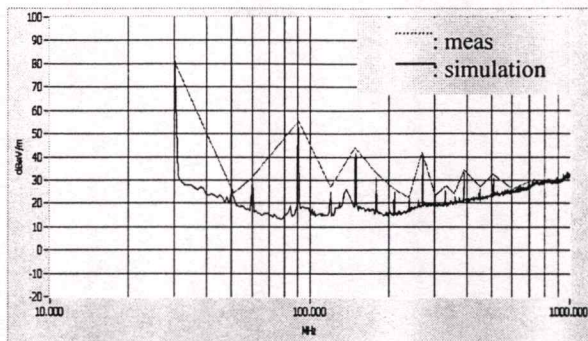


รูปที่ 6.29 แสดงสนามไฟฟ้าแพร่จากสายวงจรมิมพ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะ

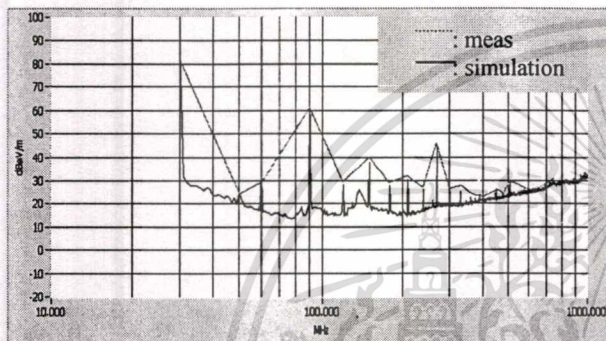
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



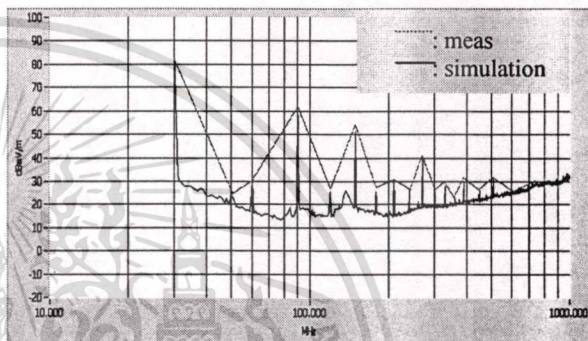
(ก) 3 cm



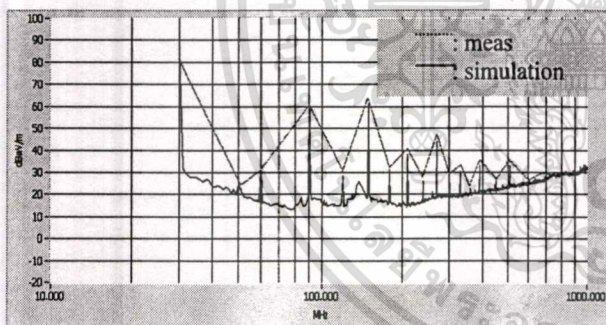
(ข) 5 cm



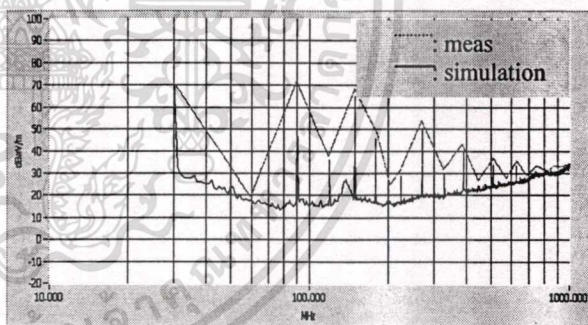
(ค) 11 cm



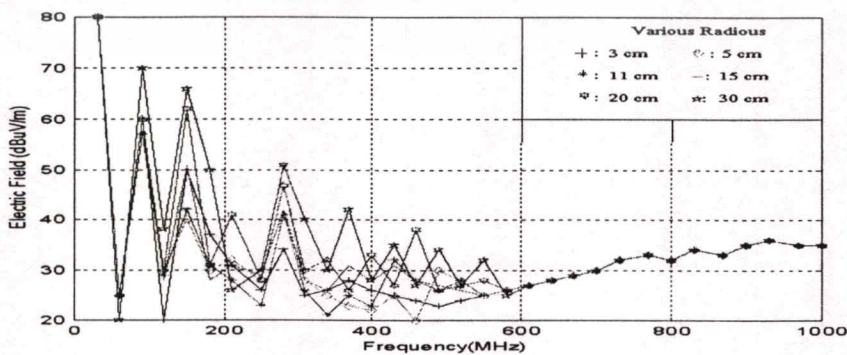
(ง) 15 cm



(ฉ) 20 cm

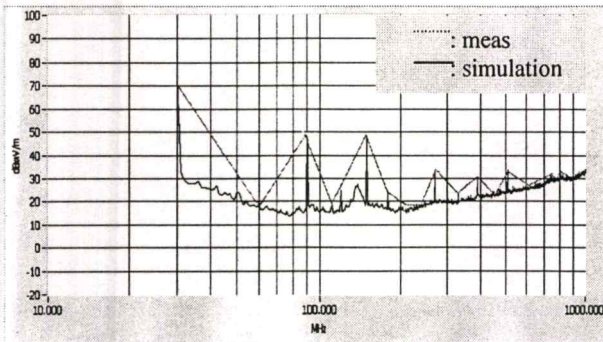


(ช) 30 cm

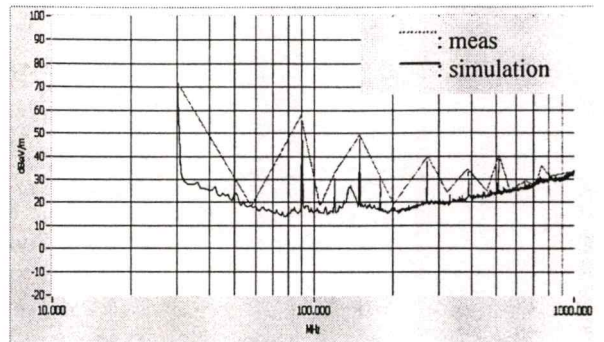


รูปที่ 6.30 แสดงสนามไฟฟ้าจากแผ่นวงจรมิมพ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงรัศมี

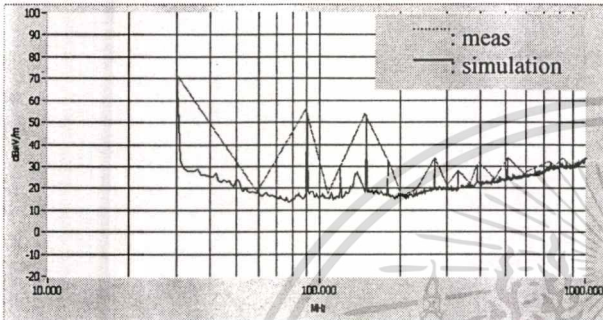
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



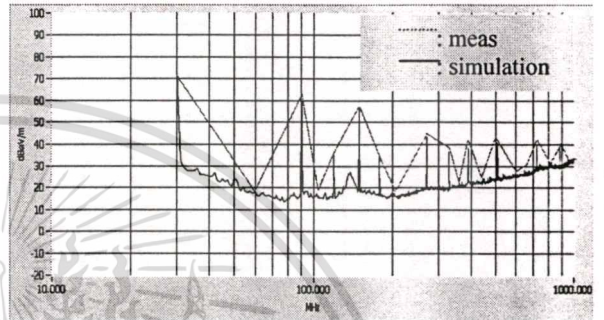
(ก) 1 mm



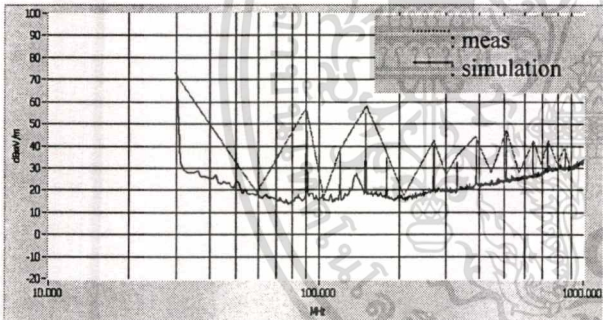
(ข) 2mm



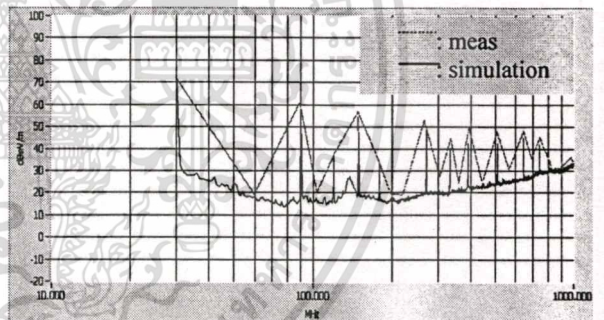
(ค) 5 mm



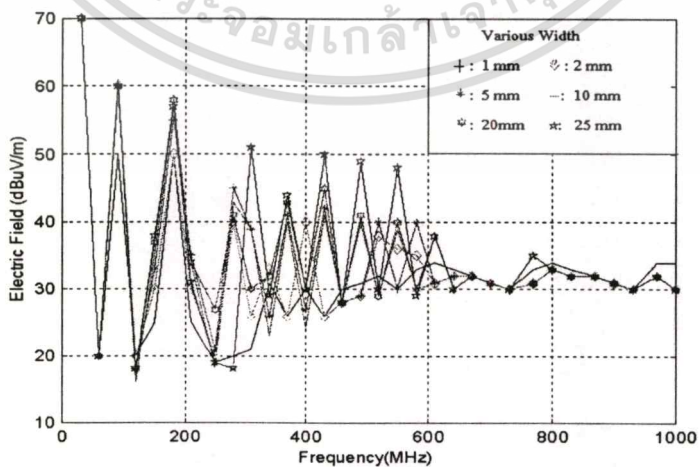
(ง) 10 mm



(อ) 20 mm



(ฉ) 25 mm



รูปที่ 6.31 สนามไฟฟ้าจากแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงความกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1 ผลของการปรับความยาวของลายทองแดง

ผลการวัดสนามไฟฟ้าจากแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งถูกปรับความยาวจาก 3 cm ไปจนถึง 20 cm ถูกแสดงในรูปที่ 6.26 (ก) – (จ) ผลของสนามไฟฟ้าซึ่งแพร่ออกมาจากลายทองแดงรูปตัว “I” ซึ่งถูกปรับความยาวแสดงได้ดังนี้

- ลายทองแดงซึ่งมีความยาว 3 cm จะมีแอมพลิจูดในช่วงความถี่สูงน้อยที่สุด (300 MHz ถึง 1GHz) และสนามไฟฟ้าจากลายทองแดงความยาว 30 cm มีแอมพลิจูดมากที่สุดในทุกความถี่

การเพิ่มความยาวของลายทองแดง จะทำให้แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะที่ฮาร์โมนิกอันดับสูงมากกว่า 300 MHz จากรูปถ้าเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของลายทองแดงของความยาว 3 cm กับ 5 cm พบว่าที่ความถี่ต่ำๆ (30 MHz - 150 MHz) แอมพลิจูดจะมีขนาดเท่ากัน การจำแนกความยาวของแผ่น PCB รูปตัว “I” ความยาว 3 cm กับ 5 cm พิจารณาจากแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่ 150 MHz - 600 MHz ซึ่งพบว่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน เป็นที่น่าสังเกตว่าสนามไฟฟ้าที่วัดจากลายทองแดงความยาว 5 cm และ 10 cm มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก ในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงแต่ยังคงสามารถจำแนกได้ โดยพิจารณาจากสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่ 350 MHz-500 MHz

อีกประการหนึ่งสนามไฟฟ้าจากลายทองแดงยาว 11 cm และ 25 cm ที่ความถี่สูงมีลักษณะใกล้เคียงกัน การจำแนกลายทองแดงความยาว 11 cm กับ 25 cm พิจารณาจากแอมพลิจูดในช่วง 150 MHz-300 MHz ซึ่งแตกต่างกันอย่างชัดเจน

6.3.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงชนิดของวงจรดิจิทัล

วงจรดิจิทัลที่วัดสนามไฟฟ้าจะเป็นชนิดเดียวกับที่วัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ โดยชนิดของเกตที่ประกอบอยู่บนวงจรพิมพ์จะเป็นแบบ TTL ลอจิก ผลการวัดสนามไฟฟ้าจากวงจรดิจิทัล แสดงดังรูปที่ 6.27 (ก) – (จ)

จากรูปจะพบว่าทั้งแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าและรูปแบบของคลื่น (tendency) แตกต่างกันอย่างชัดเจนและง่ายต่อการจำแนกว่ามาจากเกตชนิดใด

- วงจรเกต 7400 (NAND) จะมีแอมพลิจูดสูงสุดที่ 90 MHz (3rd harmonics) และจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 300 MHz ยกเว้นที่ความถี่ 170 MHz จะมีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น ต่างจาก 74275 (R-S F/F) ที่แอมพลิจูดจะลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 90 MHz – 230 MHz และจะเพิ่มสูงสุดอีกครั้งที่ช่วงความถี่ 300 MHz สำหรับช่วงความถี่สูงแอมพลิจูดจะลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 90 MHz ถึง 230 MHz และจะเพิ่มสูงสุดอีกครั้งที่ช่วงความถี่ 300 MHz สำหรับช่วงความถี่สูง (700 MHz ถึง 1 GHz) แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระดับสัญญาณพื้น (noise floor) และไม่สามารถแยกแยะได้ว่าเป็นของลายวงจรชนิดใด

เขต 7404 และ 7473 จะมีรูปคลื่น (tendency) ในช่วงความถี่สูงคล้ายกันแต่แอมพลิจูดไม่เท่ากัน เราสามารถจำแนกวงจรทั้งสองโดยพิจารณาจากแอมพลิจูดในช่วงความถี่ 60 MHz -200 MHz จากรูป 6.27(ก)-(ค) สังเกตว่าแอมพลิจูดของ 7473 จะมีลักษณะขยุบลงช่วง 110 MHz มากกว่าของ 7402

สำหรับเขต 7404 กับ 7408 จะมีแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าแตกต่างกันมากกับเขตอื่นๆ การจำแนกเขต 7404 กับเขต 7408 พิจารณาสถาปัตยกรรมไฟฟ้าในช่วงความถี่มากกว่า 100 MHz จนถึง 700 MHz รูปที่ 6.27 แสดงการเปรียบเทียบการแพร่สนามไฟฟ้าจาก เขตแต่ละชนิดในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz

6.3.3 ผลของการปรับมุมของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์

ผลของการสนามไฟฟ้าซึ่งวัดจากลายทองแดงซึ่งถูกปรับมุมจาก 30 องศา ถึง 150 องศา แสดงในรูปที่ 6.2 เมื่อนำแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกจาก การปรับมุมของลายทองแดง มาพล็อตรวมกันจะพบว่าสนามไฟฟ้าจากลายทองแดงซึ่งถูกปรับให้มีมุม 90 องศา จะทำให้แอมพลิจูดในช่วง 300 MHz ถึง 410 MHz สำหรับย่านความถี่ต่ำ 30 MHz ถึง 100 MHz และช่วงความถี่สูง 600 MHz ถึง 1 GHz แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของลายทองแดง ทั้งหมดมีขนาดและลักษณะของแอมพลิจูดไม่แตกต่างกันมากนัก การจำแนกชนิดของลายทองแดง จะพิจารณาในช่วงความถี่ 300 MHz ถึง 500 MHz

6.3.4 ผลของการปรับเปลี่ยนรูปร่างของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์

สนามไฟฟ้าที่วัดได้จากแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งถูกปรับเปลี่ยนรูปร่างลักษณะเช่น L, T, U, I, H และ X ถูกแสดงในรูปที่ 6.29 (ก)-(ค) จากรูปสามารถจำแนกสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากลายทองแดงทั้งหมดออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

- กลุ่มลายทองแดง L, T, U และ I จากการพิจารณาสถาปัตยกรรมไฟฟ้าพบว่ารูปร่างของแอมพลิจูดเกือบจะเหมือนกัน แต่จะแตกต่างในช่วง 300 MHz ถึง 600 MHz เท่านั้น โดยแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าจากลายทองแดงรูปตัว L จะมากที่สุด และรองลงมาคือ T, U และ L ตามลำดับ

- กลุ่มลายทองแดงรูปตัว H และ X จะพบว่าแอมพลิจูดในช่วงความถี่ 300 MHz ถึง 6160 MHz มีค่ามากกว่ากลุ่มของลายทองแดง L, T, U และ I แต่จะพบว่าแอมพลิจูดในช่วงความถี่ นี้แตกต่างชัดเจนจากกลุ่มที่กล่าวมา การจำแนกว่าสนามไฟฟ้าจากลายทองแดง H หรือ X พิจารณาจากแอมพลิจูดในช่วงความถี่ 400 MHz ถึง 700 MHz โดยถ้าเป็นของลายทองแดงรูปตัว “ X ” ขนาดของแอมพลิจูดจะลดลงอย่างต่อเนื่องจากความถี่ 400 MHz ถึง 600 MHz ในขณะที่แอมพลิจูดของลายทองแดงรูปตัว “ H ” มีลักษณะเพิ่มขึ้นแล้วจึงลดลง

6.3.5 ผลของการปรับความกว้างของลายทองแดง

จากสมการที่ 115 และ 116 แสดงว่าการปรับความกว้างของลายทองแดงจะทำให้ขนาดของลูบใหญ่มากขึ้นและจะทำให้การแพร่สนามไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ในวิทยานิพนธ์นี้ความกว้างของลายทองแดงถูกปรับจาก 1 mm ถึง 25 mm และถูกวัดการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกล ผลของการวัดและการคำนวณแสดงในรูปที่ 6.31 (ก)-(ฉ)

จากรูปพบว่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้จากลายทองแดงกว้าง 1 mm จะมีแอมพลิจูดน้อยที่สุดและจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความกว้างของลายทองแดงเพิ่มมากขึ้น โดยสนามแม่เหล็กจากลายทองแดงขนาดความกว้าง 25 mm จะมีแอมพลิจูดมากที่สุด

การจำแนกว่าสนามไฟฟ้าว่าแพร่ออกจากวงจรชนิดใดพิจารณาจากแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่ 270 MHz ถึง 700 MHz ดังแสดงในรูปที่ 6.31

6.3.6 ผลของการปรับรัศมีของลายทองแดง

ผลการวัดการแพร่สนามไฟฟ้าจากลายทองแดงซึ่งถูกปรับรัศมีจากน้อยไปมากแสดงดังรูปที่ 6.30 (ก)-(ฉ)

สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากลายทองแดงจะมีขนาดเพิ่มมากขึ้น เมื่อรัศมีมีขนาดใหญ่ขึ้น การจำแนกสนามไฟฟ้าจากลายทองแดงรัศมี 3 cm กับ 30 cm ทำได้ง่ายโดยพิจารณาจากความถี่มากกว่า 100 MHz ขึ้นไป

สำหรับขนาดรัศมีซึ่งใกล้เคียงกัน เช่น 3 cm กับ 5 cm และ 11 cm กับ 15 cm รูปร่างของสนามไฟฟ้ามีลักษณะใกล้เคียงกันมาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอย่างละเอียดพบว่าเราสามารถจำแนกขนาดรัศมีของลายทองแดง โดยพิจารณาช่วงความถี่ที่เป็นจุดเด่นของแต่ละวงจร เช่น

รัศมี 3 cm กับ 5 cm สามารถแยกแยะได้ง่ายเพียงอาศัยแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่กลาง 200 MHz ถึง 300 MHz และ 600 MHz ถึง 700 MHz

รัศมี 11 cm กับ 15 cm พบว่าสามารถแยกแยะได้ง่าย เพียงอาศัยแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่กลาง 100 MHz ถึง 200 MHz และความถี่ 400 MHz ซึ่งแอมพลิจูดจะปรากฏที่ลายทองแดงรัศมี 15 cm ถึง 13 dB

สำหรับวงจรรัศมี 20 cm กับ 30 cm แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของทั้งสองวงจรที่ความถี่ 100 MHz ถึง 300 MHz และที่ 500 MHz ถึง 700 MHz มีขนาดแตกต่างกัน โดยสนามไฟฟ้าของวงจรรัศมี 30 cm จะมากกว่าของวงจรรัศมี 20 cm ประมาณ 20 dB

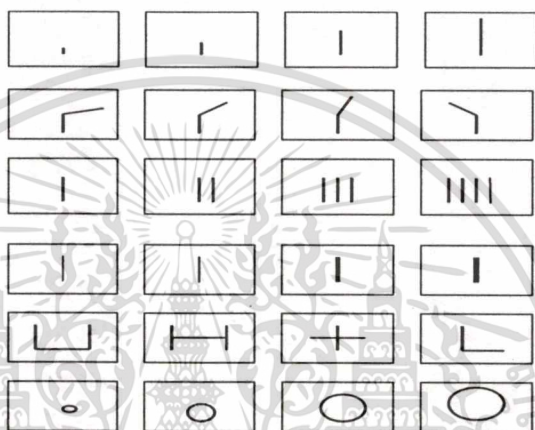
6.3.7 การเปรียบเทียบการปรับรูปร่างลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกัน

สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกจากวงจรพิมพ์แต่ละชุด ถูกนำมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่

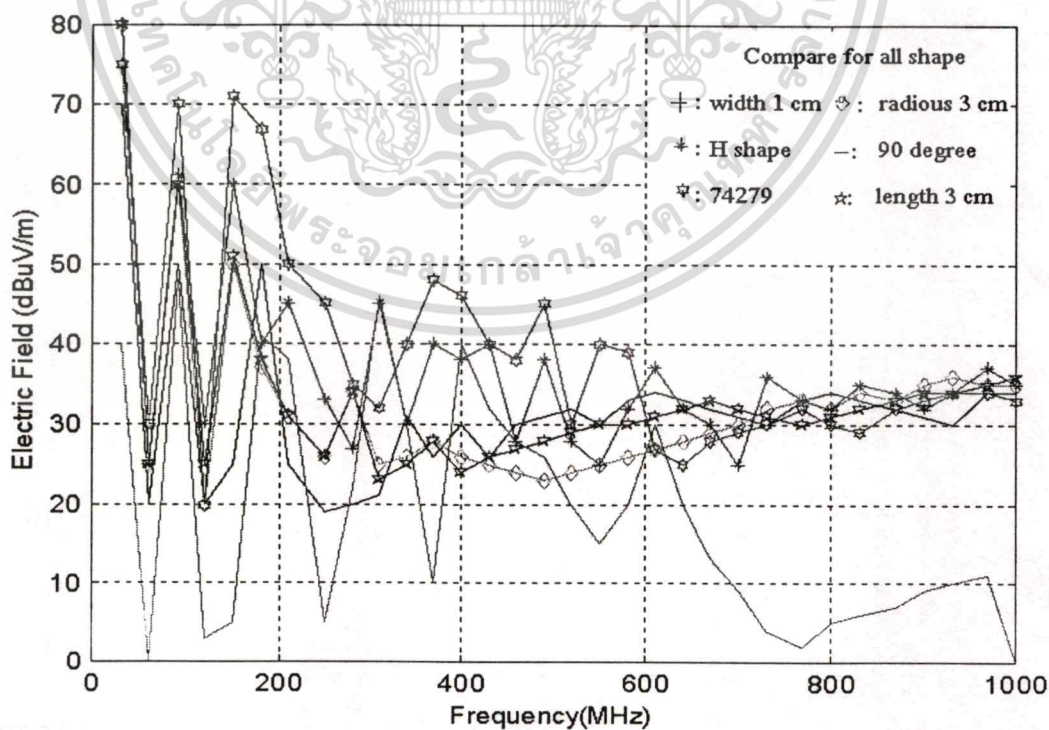
6.32

เมื่อเทียบกับระดับของสนามไฟฟ้าของวงจรพิมพ์ทั้ง 6 ชนิด ซึ่งถูกปรับความกว้าง ความยาว รัศมี มุม รูปร่างลักษณะและวงจรดิคิตอลในกราฟรูปร่างเดียวกัน พบว่าแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่ 150 MHz ถึง 750 MHz มีขนาดแตกต่างกันและสามารถใช้ความถี่ในช่วงนี้ทำการแยกแยะชนิดของแผ่นวงจรพิมพ์ได้

จากการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดแต่ละชนิดจะพบว่า สามารถจำแนกสายทองแดงแต่ละแบบได้โดยอาศัยสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แพร่ออกมาจากวงจรพิมพ์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการจัดกลุ่มและจำแนกลักษณะของสายทองแดงโดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม



(ก) ลักษณะของสายทองแดง

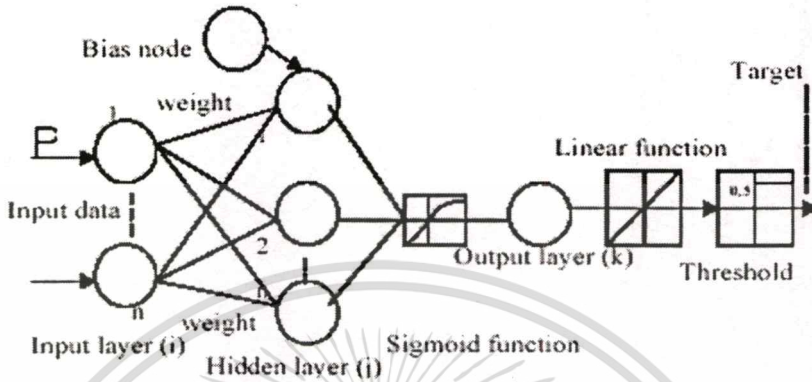


(ข) แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าจากสายทองแดง

รูปที่ 6.32 แสดงการสนามไฟฟ้าระยะไกลจากแผ่นวงจรพิมพ์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 การสอนโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นแบบการแพร่กลับ (Back-Propagation) มี 3 ชั้นประกอบด้วย ชั้นอินพุต ชั้นฮิดเดน และชั้นเอาต์พุต มีโครงสร้างดังรูปที่ 6.33



รูปที่ 6.33 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

6.4.1 ขั้นตอนการสอนโครงข่ายประสาทเทียม

การแพร่ไปข้างหน้า (Feed Forward Propagation)

การสอนโครงข่ายประสาทเทียมเริ่มจาก ป้อนข้อมูลเข้าสู่ชั้นอินพุต จากนั้นทำการตั้งค่าของชั้นเอาต์พุตเป็นค่าเป้าหมายในการเรียนรู้ (Target) (ข้อมูลนี้สามารถเป็นได้ทั้งแบบต่อเนื่อง (continuous) และแบบเป็นช่วง (discrete)) ขึ้นกับความเป็นอิสระของข้อมูลในระบบที่ต้องการให้โครงข่ายจดจำ (Recognize) จากนั้นตั้งค่าอัตราการเรียนรู้ (learning rate) โมเมนตัม (momentum) และค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (maximum error) เพื่อกำหนดเงื่อนไขในการหยุดการสอนของโครงข่าย สุ่มข้อมูลค่าถ่วงน้ำหนัก (weights) ชุดแรกให้กับโครงข่าย คำนวณค่าที่ได้ในแต่ละชั้น จนถึงชั้นเอาต์พุต เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับค่าเป้าหมาย หากน้อยกว่าค่าผิดพลาดรวมที่ตั้งไว้ให้แพร่กลับ

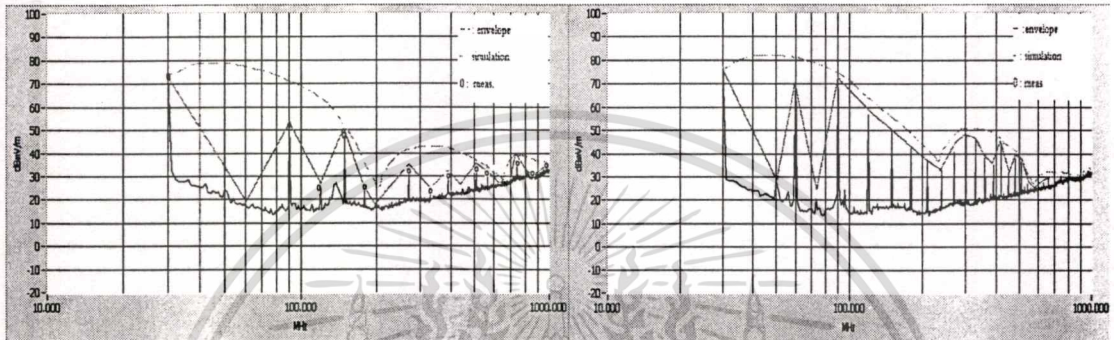
การแพร่กลับ (Back-Propagation)

ถ้าค่าผิดพลาดรวมที่คำนวณในชั้นเอาต์พุตมีค่าน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ โครงข่ายประสาทเทียมจะแพร่กลับจากชั้น เอาต์พุต ไปยังชั้นฮิดเดน และจากชั้นฮิดเดน ไปชั้นอินพุต การคำนวณจะแพร่ไปข้างหน้าและย้อนกลับไปมาจนกระทั่ง ค่าผิดพลาดที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าผิดพลาดที่ตั้งไว้โครงข่ายจะหยุดการเรียนรู้และบันทึกค่า ถ่วงน้ำหนัก ลงในฐานข้อมูล และพร้อมที่จะทำการจำแนกข้อมูล (identification) ที่ป้อนจากชั้นอินพุต

6.4.2 การเตรียมข้อมูลเพื่อสอนโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์

ข้อมูลที่จัดเตรียมเพื่อป้อนเข้าสู่โครงข่ายคือ สนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวัดหรือการคำนวณในระยะใกล้และระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์แต่ละแบบ

ในวิทยานิพนธ์นี้ นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมในแต่ละความถี่ซึ่งมีความต่อเนื่องมากกว่าการวัด (ซึ่งเป็นแบบ discrete) ข้อมูลจากการวัดหรือการคำนวณซึ่งเป็นแบบไม่ต่อเนื่องจะถูกนำมา ประมาณค่าและสร้างเส้นขอบ(envelope plot) โดยการใช้เทคนิค interpolation



(ก) วงจรพิมพ์รูปตัว "I"

(ข) วงจรคิจิตอล

รูปที่ 6.34 แสดงเส้นขอบของการแพร่จากวงจรพิมพ์

เส้นขอบของความถี่ที่ได้จากการ interpolation จะเป็นค่าต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 6.34 ข้อมูลทั้งหมดของการคำนวณทางซอฟต์แวร์(envelope) ไม่สามารถนำเข้าสู่อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมได้ เพราะมีข้อมูลมากเป็นค่าต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz) จะทำให้โครงข่ายประสาทเทียมเสียเวลาในการเรียนรู้ และทำให้เกิดค่าผิดพลาดในการคำนวณมาก

6.4.2.1 การควอนไทซ์ (Quantization)

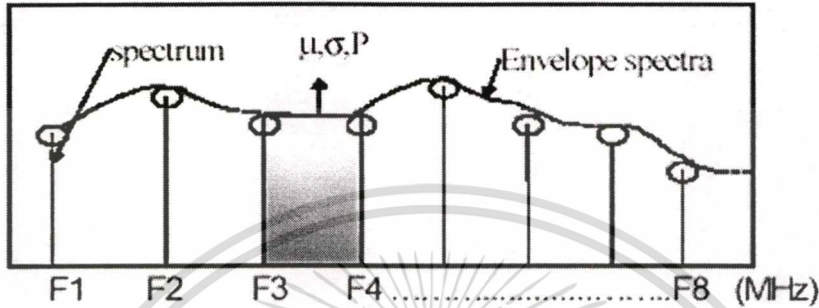
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำวิธีการทางสถิติ (Statistical Calculation) มาทำการลดจำนวนของข้อมูลดังกล่าวลง โดยการแบ่งช่วงความถี่จาก 30 MHz ถึง 1 GHz ออกเป็น 8 ช่วง การแบ่งช่วงความถี่ของสัญญาณดังกล่าวจะใช้การสุ่มคาบสัญญาณแบบลอการิทึม (Logarithm) โดยการใช้สมการที่ (6.3)

$$F_{n+1} = 2F_N + 20\log_2 \frac{N}{8} \quad N = 2..13 \quad (6.3)$$

เมื่อ F_{n+1} คือความถี่ลำดับถัดไป และ F_N คือความถี่เริ่มต้น(30MHz) ผลของการแบ่งช่วงความถี่โดยใช้สมการ (6.3) แสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงการแบ่งช่วงสัญญาณความถี่โดยการแบ่งคาบ 8 ช่วง

Interval (MHz)	1	2	3	4	5	6	7	8
F_{lower}	32	60	115	198	310	448	615	808
F_{upper}	60	115	198	310	448	615	808	1000



รูปที่ 6.35 แสดงขอบของสัญญาณจากการ interpolation และการแบ่งช่วงความถี่

ข้อมูลแต่ละช่วงที่ได้จากการแบ่งในสมการที่ (6.3) จะถูกนำมาควอนไทซ์ (Quantize) โดยการใช้ ค่าการกระจายทางสถิติในแบบ Normal (Guassian) ดังแสดงในสมการที่ (6.4)

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2} \quad (6.4)$$

เมื่อ μ คือค่ากลางของการกระจายข้อมูล

σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

X คือค่าการกระจายแบบสุ่มของข้อมูล

ค่าตัวแปรในการหาค่าการกระจายของข้อมูลแบบ Gaussian สามารถแทนได้โดยคู่ของจำนวนจริง 2 ตัว ซึ่งเป็นค่าจริงของพารามิเตอร์ซึ่งปรากฏที่การกระจายแบบสุ่มมาตรฐาน แสดงดังสมการที่ (6.6)

ค่าการกระจายแบบสุ่มถูกเลือกจากค่า “ X ” หาได้จากสมการที่ (6.5)

$$x = u + y_1 \sigma \sqrt{\frac{-2 \ln(y_1^2 + y_2^2)}{(y_1^2 + y_2^2)}} \quad (6.5)$$

เมื่อ y_1 และ y_2 เป็นอิสระต่อกัน สามารถเลือกให้มีค่าอยู่ระหว่าง -1 และ 1 ขึ้นอยู่กับการตั้งค่าของ Z_1 และ Z_2 ในช่วง $[0,1]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_1 = 2Z_1 - 1 \quad y_2 = 2Z_2 - 1 \quad (6.6)$$

ตารางที่ (6.3) แสดงค่าของการคำนวณทางสถิติของค่ามัธยฐาน (μ) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) และค่าความน่าจะเป็น(P) ของสนามแม่เหล็กกระยะไกล และสนามไฟฟ้ากระยะไกล และถูกใช้เป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม ถูกกำหนดให้เป็นเลขดิจิตอลแบบ 6 บิต (“0” หรือ “1”) โดยที่ 5 บิตแรกถูกใช้ในการจำแนกสายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ บิตที่ 6 ใช้ในการแยกชนิดของการวัด (“0” สำหรับการวัดสนามแม่เหล็กกระยะไกล และ “1” สำหรับการวัดสนามไฟฟ้ากระยะไกล) รูปแบบของความสัมพันธ์ที่ป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังนี้

$$Pattern_set(n) = \{ \{ I^{(1)}, T^{(1)} \}, \dots, \{ I^{(8)}, T^{(8)} \} \}$$

$$I^{(l)} = \{ \{ \mu_r, \sigma_r, P \}, \dots, \{ \mu_s, \sigma_s, P \} \}$$

$$T^{(l)} = \{ T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6 \}$$

เมื่อ n จำนวนเซตของข้อมูล
 I เซตของข้อมูลอินพุตได้จากการคำนวณทางสถิติ
 T เซตของข้อมูลเอาต์พุต (เลขดิจิตอล 6 บิต)

- รูปแบบของเซตข้อมูลที่ป้อนให้โครงข่ายของ แผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “I”

$I_{I-shape} = \{ \{ 45.87, 8.53, 0.01 \}, \{ 34.67, 6.81, 0.03 \}, \dots, \{ 9.70, 1.46, 0.13 \} \}$ และค่าเป้าหมายของโครงข่ายในการเรียนรู้ สำหรับแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “I” $T = [0, 0, 0, 0, 1, 0(NF)]$

- รูปแบบของเซตข้อมูลที่ป้อนให้โครงข่ายของ แผ่นวงจรพิมพ์สำหรับ “AND”

$I_{AND} = \{ \{ 55.80, 11.02, 0.03 \}, \{ 61.90, 6.50, 0.04 \}, \dots, \{ 39.40, 3.40, 0.08 \} \}$ และค่าเป้าหมายของโครงข่ายในการเรียนรู้ สำหรับแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว AND_(FF) เป็น $T = [1, 0, 0, 0, 0, 1(FF)]$

ความสัมพันธ์ของค่าอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียม แสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์และการป้อนค่าอินพุตและเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียม

PCB Config.		Frequency Interval (Intv.) which input to the NN								NN Target					
		Intv. 1	Intv. 2	Intv. 3	Intv. 4	Intv. 5	Intv. 6	Intv. 7	Intv. 8	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
I-shape (NF)	- μ	45.87	34.67	33.20	25.16	24.24	20.68	17.6	9.70						
	- σ	8.53	6.81	14.67	6.73	3.16	3.25	1.70	1.46	0	0	0	0	1	0
	-P	0.01	0.03	0.03	0.02	0.07	0.06	0.12	0.13						
AND (NF)	- μ	50.12	35.24	29.32	26.92	21.60	17.50	11.23	10.11						
	- σ	9.17	6.52	2.35	4.13	2.98	1.86	0.691	0.54	0	0	0	1	0	0
	-P	0.02	0.02	0.09	0.05	0.07	0.11	0.16	0.17						
I-shape (FF)	- μ	31.70	36.80	25.60	27.00	24.80	21.80	20.40	10.10						
	- σ	10.46	4.19	4.03	5.62	4.42	3.78	3.32	3.30	0	1	0	0	1	1
	-P	0.02	0.07	0.07	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09						
AND (FF)	- μ	55.80	61.90	50.50	52.10	46.10	47.90	48.80	39.40						
	- σ	11.02	6.50	8.50	5.24	6.42	6.73	5.70	3.40	1	0	0	0	0	1
	-P	0.03	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.08						
30 (NF)	- μ	25.06	70.15	67.12	57.18	43.43	45.12	20.40	10.12						
	- σ	12.13	9.10	4.29	3.12	3.12	3.21	2.54	3.22	0	1	0	1	0	0
	-P	0.09	0.90	0.20	0.23	0.04	0.98	0.92	0.45						
30 (FF)	- μ	56.18	65.14	45.43	50.12	40.21	42.11	30.29	12.45						
	- σ	4.32	5.32	6.21	3.57	3.98	6.00	9.04	3.67	0	1	0	1	0	1
	-P	0.03	0.08	0.09	0.10	0.92	0.59	0.33	0.22						
1mm (NF)	- μ	45.56	43.01	41.09	48.56	30.98	20.21	16.32	12.23						
	- σ	9.45	4.67	3.46	3.24	2.67	4.33	2.12	3.23	1	1	0	0	0	0
	-P	0.98	0.92	0.56	0.58	0.76	0.86	0.32	0.21						
1mm (FF)	- μ	35.43	60.43	43.22	25.21	23.45	21.32	17.89	10.21						
	- σ	3.24	5.55	4.21	3.45	4.34	6.77	5.64	3.23	1	1	0	0	0	1
	-P	0.09	0.40	0.90	0.45	0.55	0.34	0.98	0.87						
X (NF)	- μ	75.80	59.90	40.50	57.10	56.10	17.20	15.80	19.20						
	- σ	31.02	10.30	6.70	6.54	8.42	4.23	5.70	2.10	1	0	0	0	0	0
	-P	0.12	0.21	0.03	0.53	0.24	0.14	0.01	0.12						
X (FF)	- μ	55.80	61.90	50.50	52.10	46.10	47.90	48.80	39.40						
	- σ	11.02	6.50	8.50	5.24	6.42	6.73	5.70	3.40	1	0	0	0	0	1
	-P	0.03	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.08						

ค่าเข้าที่พุดซึ่งได้จากการคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียม ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าเทรชโฮลด์ (Treshold) ค่าเทรชโฮลด์ในวิทยานิพนธ์นี้ถูกกำหนดให้มีค่าเป็น 0.5 เพราะค่าเป้าหมายในการเรียนรู้ของโครงข่ายเป็นเลขดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“1” ถ้า NN output ≥ 0.5

calculated _ output = {

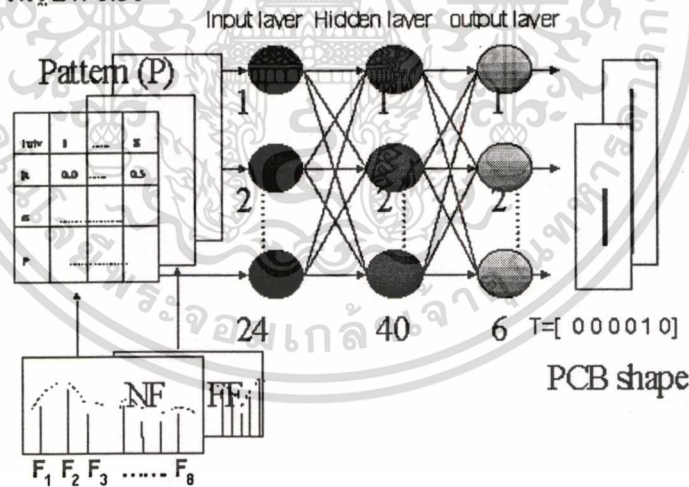
“0” ถ้า NN output ≤ 0.5

6.5 การใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการจำแนกสนามแม่เหล็กระยะใกล้และสนามไฟฟ้าระยะไกล

โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบด้วย อินพุตจำนวน 24 โหนด 40 ฮิดเดนโหนด และ 6 เอ้าท์พุตโหนด ถูกใช้ในการเรียนรู้และจดจำสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า โดยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของโครงข่ายคือค่าความผิดพลาดมากที่สุด (maximum error) ค่าอัตราการเรียนรู้ (learning rate) และค่าโมเมนตัม (Momentum) ถูกกำหนดให้เป็น 0.00001, 0.001 และ 1 0.6 ตามลำดับ

6.5.1 การสอนโครงข่ายประสาทเทียมให้จดจำสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแผ่นวงจรพิมพ์ จากการวัดหรือการคำนวณในสนามระยะใกล้ และระยะไกล ถูกนำมาผ่านวิธีการทางสถิติ เพื่อลดจำนวนชุดของข้อมูลที่จะป้อนเข้าสู่ชั้น อินพุต ของโครงข่าย ส่วนเป้าหมายในการเรียนรู้ถูกกำหนดให้เป็นเลขดิจิตอล 6 บิต ดังแสดงในรูปที่ 6.36



รูปที่ 6.36 แสดงการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมในการจำแนกแผ่นวงจรพิมพ์

โครงข่ายในรูปแบบประกอบด้วย 24 อินพุตโหนด (8 ช่วงสัญญาณแต่ละช่วงประกอบด้วยค่ามัธยฐาน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความน่าจะเป็น) 40 ฮิดเดนโหนด และ 6 เอ้าท์พุตโหนดถูกใช้ในการสอนให้จดจำชนิดของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์

โครงข่ายประสาทเทียมใช้เวลาในการเรียนรู้ทั้งหมด 2 ชั่วโมง โดยให้ค่าผิดพลาดสูงสุดที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้ายอมรับได้เป็น 0.0009 เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมสำเร็จขั้นตอนในการเรียนรู้แล้ว ค่าถ่วงน้ำหนักไม่วางกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความสัมพันธ์ของกลุ่มลำดับ อินพุต และเอาต์พุตจะถูกบันทึกลงในฐานข้อมูล โครงข่ายประสาทเทียมพร้อมจะทำการจำแนกลายทองแดงจากการใช้สัญญาณสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกจากวงจรพิมพ์

6.5.2 การจำแนกสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และสนามไฟฟ้าระยะใกล้ของแผ่นวงจรพิมพ์ โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม

ในการทดสอบการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม สนามแม่เหล็กกระยะใกล้และสนามไฟฟ้าระยะใกล้จากแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกัน (unknown PCB) ถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำการจำแนก ลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ การพิจารณาว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถจำแนกลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ได้หรือไม่ทำได้โดย เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากโครงข่ายประสาทเทียม(NN calculated Output) กับค่าที่ผ่านการเทสโฮลด์(Threshold)แล้ว

ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณและค่าเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียมในแต่ละรูปแบบ(pattern) มีค่าสอดคล้องกันดังแสดงในตารางที่ 5 ค่าเทสโฮลด์ซึ่งมีค่าเป็น 0.5 ถูกใช้ในการแปลงค่าเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียมให้เป็นค่าเป้าหมาย

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการคำนวณจากโครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย

PCB Config.	Computed Output						Computed Output					
	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅	O ₆	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
I-shape (NF)	0.04	-0.81	0.19	-0.43	0.95	0.31	0	0	0	0	1	0
AND (NF)	0.34	0.36	0.68	-0.91	-0.52	0.00	0	0	0	1	0	0
I-shape (FF)	0.03	0.95	0.21	-0.43	0.84	0.85	0	1	0	0	1	1
X(NF)	1.00	0.25	-0.58	0.34	0.15	-0.67	1	0	0	0	0	0
X(FF)	0.87	0.25	-0.56	-0.78	0.56	0.77	1	0	0	0	1	1
AND (FF)	-0.67	0.15	0.04	0.41	0.16	0.90	1	0	0	0	0	1

6.5.3 ผลการจำแนกชนิดของลายทองแดงโดยอาศัยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่แพร่จากวงจรมิมพ์

- สนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรมิมพ์รูปตัว “I” จะมีแอมพลิจูดบิตที่ 2 และบิตที่ 5 เป็น “1” และมีบิตที่ 1 3 และ 4 เป็น “1” และมีบิตที่ 6 ซึ่งใช้แยกการวัดในสนามระยะใกล้และระยะไกล เป็น “1 (FF)”

- สนามแม่เหล็กระยะใกล้ของแผ่นวงจรมิมพ์รูปตัว “I” จะมีแอมพลิจูดบิตที่ 1 ถึงบิตที่ 4 เป็น “0” และมีบิตที่ 5 เป็น “1” และมีบิตที่ 6 ซึ่งใช้แยกการวัดในสนามระยะใกล้และระยะไกล เป็น “0 (NF)”

- สนามแม่เหล็กระยะใกล้ของวงจรมิมพ์ (AND) จะมีแอมพลิจูดของโครงข่ายที่ผ่านการทำเทรสโฮลด์แล้วเป็น “00 1011” และบิตที่ 6 ถูกเซตเป็น “0 (NF)”

- สนามแม่เหล็กระยะใกล้ของวงจรมิมพ์ (AND) จะมีแอมพลิจูดของโครงข่ายที่ผ่านการทำเทรสโฮลด์แล้ว 5 บิตแรกเป็น “10000” และบิตที่ 6 ถูกเซตเป็น “1 (FF)”

โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการสอนให้เรียนรู้แล้ว สามารถจดจำและจำแนกลายทองแดงและรูปแบบของวงจรมิมพ์บนแผ่นวงจรมิมพ์ได้ โดยใช้สนามแม่เหล็กระยะใกล้ และสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แพร่ออกมามีแสดงในตารางที่ 6.5

6.5.4 ดัชนีประสิทธิภาพ (Performance index)

เพื่อที่จะแสดงประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการจดจำและจำแนกลายทองแดงบนแผ่นวงจรมิมพ์ โดยอาศัยการแพร่สนามแม่เหล็กระยะใกล้ และสนามไฟฟ้าระยะไกล

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบดัชนีชี้ ประสิทธิภาพในการจำแนก (Performance Error Index : PEI) โดยกำหนดให้เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าผิดพลาดในการทำนาย (Faulty case error) ต่อจำนวนของแพทเทิร์นที่นำเข้าทั้งหมด ($n = 50$)

$$PEI = \frac{(\text{Faulty_case_error})}{\text{Number_of_training_data_set}} \quad (6.7)$$

6.5.5 การปรับแต่งโครงข่ายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจดจำและจำแนกข้อมูล

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ มีโครงสร้างการทำงานแบบแพร่กระจายกลับ (Back-Propagation) แบบ 3 เลเยอร์ ในการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการจดจำสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ผู้ออกแบบสามารถปรับแต่งโครงข่าย เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสามารถทำได้ดังนี้

6.5.5.1 การปรับเปลี่ยนจำนวนอินพุตโหนด

จากโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบด้วย อินพุตซึ่งได้จากการแบ่งช่วงสัญญาณความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz ออกเป็น 8 ช่วง และนำข้อมูลแต่ละช่วงมาทำควอนไทซ์ (quantize) โดยการใช้วิธีการทางสถิติ จะได้ค่า มัชฐาน (μ) ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (σ) และค่า ความน่าจะเป็น (P)

นำค่าดังกล่าวมาป้อนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมโครงข่ายประกอบด้วย 24 อินพุตโหนด 50 ฮิดเดนโหนด และ 6 เอ้าท์พุตโหนดถูกใช้ในการเรียนรู้ โครงข่ายประสาทเทียมใช้เวลาในการเรียนรู้ 7 ชม. (ใช้คอมพิวเตอร์ Pentium III 750 MHz 64 MB memory)

จากนั้นสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และสนามไฟฟ้าระยะไกลจากแผ่นวงจรมิมพ์ซึ่งไม่รู้ชนิด (dummy sample) ถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายเพื่อทำการจำแนก โครงข่ายที่ป้อนค่าตัวแปรทางสถิติทั้ง 3 เป็นอินพุต ให้ค่า PEI 3.0% โดยใช้จำนวนของแผ่นวงจรมิมพ์จำนวน 50 ชิ้นในการทดสอบ

เพื่อที่จะลดเวลาในการเรียนรู้ของโครงข่ายลง ค่ามัชฐาน และ การเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเท่านั้น ถูกใช้เป็นอินพุตของโครงข่าย โครงข่ายซึ่งประกอบด้วย 16 อินพุตโหนด (8 ช่วงความถี่ แต่ละช่วงประกอบด้วย ค่ามัชฐาน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) 40 ฮิดเดนโหนด และ 6 เอ้าท์พุตโหนดถูกใช้ในการเรียนรู้

โครงข่ายใช้เวลาในการเรียนรู้ 5 ชม. จากนั้นการทดสอบโครงข่ายจะเริ่มต้น โดยการป้อนข้อมูลความถี่ในแต่ละช่วงเข้าสู่ชั้นอินพุต โครงข่ายประสาทเทียมที่มีการปรับค่าอินพุตโหนดแล้ว ให้ค่า PEI 20 % โดยใช้จำนวนของแผ่นวงจรมิมพ์จำนวน 50 ชิ้นในการทดสอบ

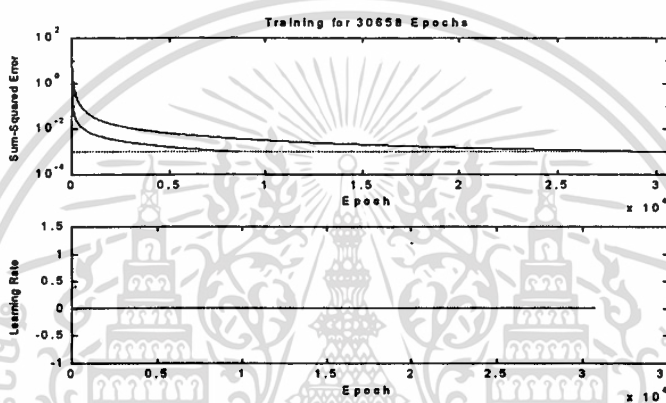
ตารางที่ 6.5 แสดงผลการจำแนกของโครงข่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอินพุตและฮิดเดนโหนด

No	Number of NN node (nodes)			Statistical Parameter	PEI (%)	Learning Time (Hours)
	Input	Hidden	Output			
1	24	50	6	μ, σ, P	3.0	7.0
2	24	40	6	μ, σ, P	3.5	4.0
3	24	30	6	μ, σ, P	5.4	3.5
4	24	20	6	μ, σ, P	8.5	2.8
5	24	10	6	μ, σ, P	10.0	2.0
6	16	40	6	μ, σ	20.0	5.0
7	16	30	6	μ, σ	28.0	4.5
8	16	20	6	μ, σ	44.0	4.0
9	16	10	6	μ, σ	-	No convergent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5.5.2 การปรับเปลี่ยนจำนวนของ ฮิดเดนโหนด ของโครงข่ายประสาทเทียม

การปรับแต่งตัวแปรที่เป็นจำนวนของฮิดเดนโหนด จะทำให้เวลาที่ใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมมีการเปลี่ยนแปลง อาจทำให้เวลาในการสอนลดลงหรือเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเป็นอิสระของข้อมูล (degree of freedom) ที่ใช้เป็นส่วนอินพุตและส่วนเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียม ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการปรับเปลี่ยนจำนวนของฮิดเดนโหนดเพื่อหาขนาดของโครงข่ายที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้โครงข่ายในการจดจำสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า รูปที่ 6.37 แสดงผลของการปรับจำนวนของฮิดเดนโหนดจาก 10 โหนดเป็น 20 โหนดจะทำให้เวลาในการเรียนรู้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.37 แสดงการลดผิดพลาดสูงสุด ของโครงข่ายประสาทเทียม ขณะทำการสอนเมื่อมีจำนวนของฮิดเดนเป็น 10 และ 20 โหนด

6.5.5.3 การปรับแต่งวิธีการเตรียมข้อมูล

การปรับวิธีการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้เป็นส่วนอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม (Pre-processing) ในวิทยานิพนธ์นี้สนามไฟฟ้าที่ใช้เป็นส่วนอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz ถูกนำมาผ่านวิธีการทางสถิติ (Statistical Calculation) เพื่อลดข้อมูลในส่วนอินพุตของโครงข่าย สนามไฟฟ้าในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz จะถูกสุ่มเป็น 8 ช่วงโดยการใช้สมการ (6.3) เพื่อที่จะทำการศึกษาจำนวนของการแบ่งช่วงของข้อมูลและศึกษาผลในการจำแนกเวลาในการเรียนรู้ ในวิทยานิพนธ์นี้จำนวนคาบของการสุ่มถูกปรับเปลี่ยน เป็นจำนวนเท่าของ 8 ช่วง คือ 16 ช่วง 32 ช่วง และ 64 ช่วงตามลำดับ โดยการใช้สมการ(6.8)-(6.10) เวลาที่ใช้ในการสอน โครงข่าย และความถูกต้องของการจำแนกสัญญาณแสดงดังตารางที่ 6.6

$$F_{n+1} = 2F_N + 20 \log_2^{N/16} \quad N=2, \dots, 16 \quad (6.8)$$

$$F_{n+1} = 2F_N + 20 \log_2^{N/32} \quad N=2, \dots, 32 \quad (6.9)$$

$$F_{n+1} = 2F_N + 20 \log_2^{N/64} \quad N=2, \dots, 64 \quad (6.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ F_{n+1} คือความถี่ลำดับถัดไป และ F_N คือความถี่เริ่มต้น(30 MHz)

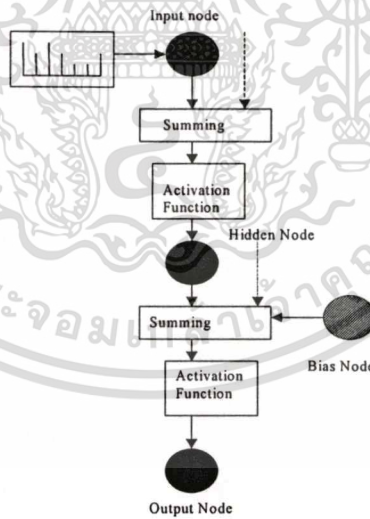
ตารางที่ 6.6 แสดงการผลของการเปรียบเทียบการปรับแต่งช่วงของการสุ่มข้อมูล

จำนวนช่วงของการสุ่ม (คาบ)	เวลาในการสอน (นาที)	PEI (%)
8	20	3.5
16	45	3.3
32	100	3.0
64	300	2.7

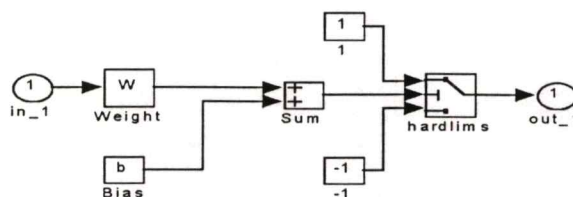
6.5.5.3 การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ภายในโครงข่าย

การปรับค่าพารามิเตอร์ภายในโครงข่าย เช่น อัตราการเรียนรู้ (learning rate) ฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) จะมีผลต่อเวลาในการเรียนรู้และความถูกต้องในการจำแนกสัญญาณของโครงข่าย

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการเรียนรู้และ ทำการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันกระตุ้น โดยแสดงดังรูปที่ 6.39 (ก) ถึง (ง)

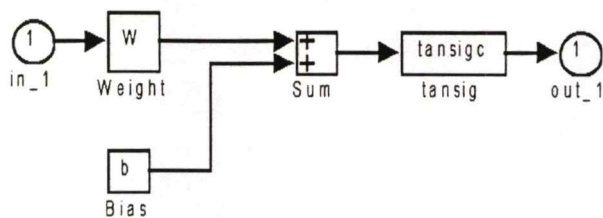


รูปที่ 6.38 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายที่ใช้ในการเรียนรู้สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า

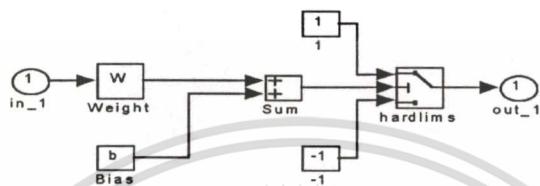


(ก) Saturation (-1,1)

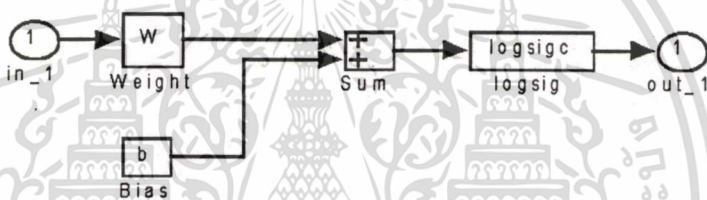
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(๗) Tansig



(๘) Hardlin



(๙) Logsig

รูปที่ 6.39 แสดงโครงสร้างของส่วน Activation Function ที่ใช้ในการปรับแต่งโครงข่ายประสาทเทียม ผลของการปรับใช้ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) ซึ่งแตกต่างกัน ของโครงข่ายแสดงในตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 แสดงผลการปรับเปลี่ยนอัตราการเรียนรู้และ Activation Function

อัตราการเรียนรู้	Activation Function	เวลาในการเรียนรู้ (นาที)	PEI (%)
0.01	Hardlin	10	3
0.01	Purelin	10	2
0.01	Tansig	10	1.5
0.1	Hardlin	40	5
0.1	Purelin	60	5
0.1	Tansig	30	5
0.5	Hardlin	No-converge	-
0.5	Purelin	No-converge	-
0.5	Tansig	No-converge	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่สามารถเผยแพร่ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6 สรุปผลของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของโครงข่าย

จากการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโครงข่าย จะทำให้ประสิทธิภาพในการเรียนรู้และความสามารถของโครงข่ายในการจำแนกข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลง เช่น

- การเพิ่มจำนวนโหนดของส่วนอินพุต(การเพิ่มช่วงในการแบ่งสัญญาณ) จะทำให้เวลาในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมนานขึ้น แต่จะทำให้ความถูกต้องของข้อมูลเพิ่มมากขึ้น

- การเพิ่มจำนวนโหนดในส่วนของฮิดเดน จะทำให้เวลาในการสอนโครงข่ายมากขึ้น แต่ทำให้ความถูกต้องของข้อมูลเพิ่มมากขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

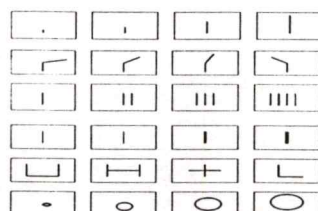
- การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์อื่นๆของโครงข่าย เช่น อัตราการเรียนรู้ และฟังก์ชันกระตุ้น(activation function) จะทำให้เวลาในการเรียนรู้และค่าผิดพลาดของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในตารางที่ 6.7 สรุปโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถใช้ในการเรียนรู้และสามารถจำแนกลักษณะของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เหมาะสม ประกอบด้วย 24 อินพุตโหนด 40 ฮิดเดนโหนด และ 6 เอาท์พุตโหนด โดยใช้การเตรียมหรือแบ่งข้อมูลออกเป็น 8 ช่วง โครงข่ายดังกล่าวใช้เวลาในการคำนวณน้อยและให้ค่าผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

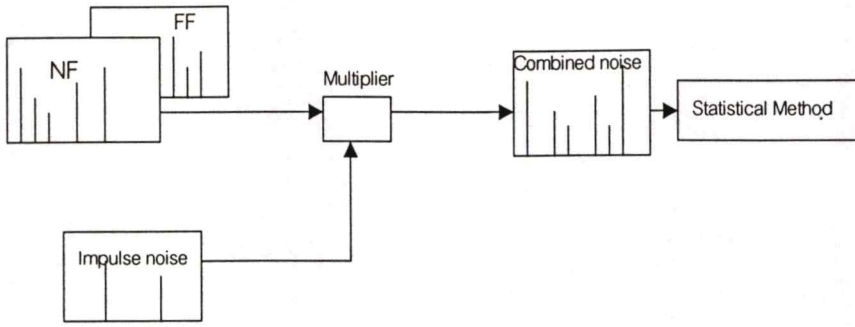
6.7 การทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมให้ทำการจำแนกลายวงจรมีเมื่อถูกรบกวน

เพื่อที่จะทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการจำแนกลายทองแดงเมื่อถูกรบกวนจากสัญญาณอื่นๆ สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6.40 ถูกรวมกับสัญญาณรบกวนที่สร้างขึ้น

6.7.1 รูปแบบของสัญญาณรบกวน (artificial impulse noise)

สัญญาณพัลส์ความถี่แบบสุ่มจาก 30 MHz ถึง 1 GHz แอมพลิจูด 0 dB ถึง 25 dB ได้ถูกป้อนเข้ารวมกับสัญญาณที่วัดได้จากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า สัญญาณดังกล่าวจะถูกนำมาคูณกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากการวัด วิธีการรวมสัญญาณอิมพัลส์เข้ากับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากการวัดจะใช้ตัวรวมสัญญาณ(combilner) แสดงดังรูปที่ 6.40 สัญญาณที่ได้จากการวัดจะถูกนำมาคูณ(Multiply) กับสัญญาณอิมพัลส์ จะถูกนำมาประมวลผลทางสถิติและป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม

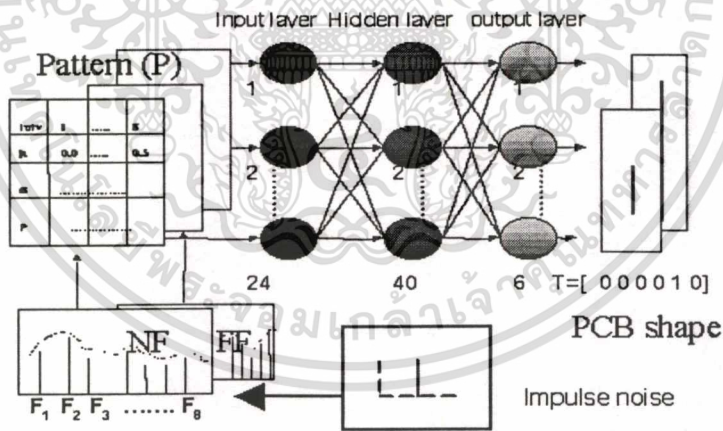




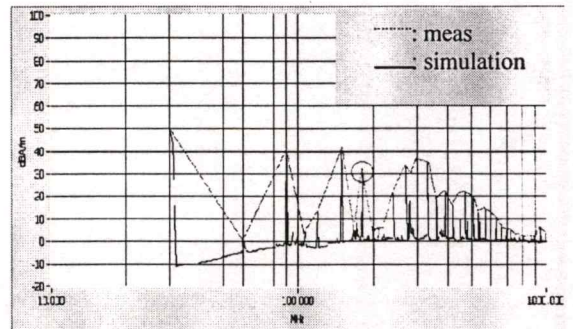
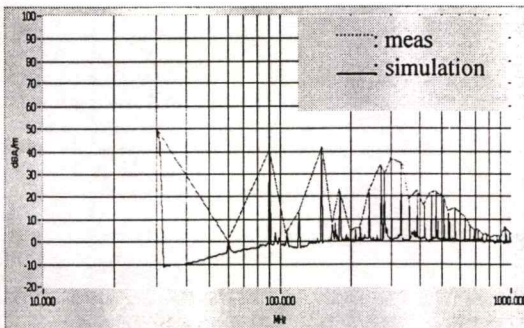
รูปที่ 6.41 แสดงการรวมสัญญาณการวัดกับสัญญาณอิมพัลส์

6.7.2 รูปแบบของโครงข่ายที่ใช้ในการจำแนกลักษณะของ แผ่นวงจรพิมพ์ขณะมีสัญญาณรบกวน

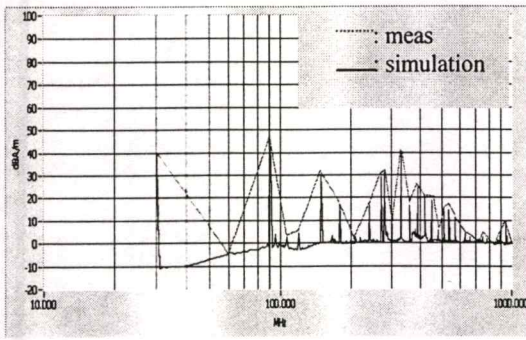
โครงข่ายประสาทเทียมในรูปที่ 6.42 ซึ่งประกอบด้วย 24 อินพุตโหนด 40 ฮิดเดนโหนด และ 6 เอาท์พุตโหนด ถูกใช้ในการจำแนกลักษณะของลายทองแดง เมื่อถูกรบกวนโดยสัญญาณอิมพัลส์ที่รบกวนส่วนอินพุตจะถูกนำมาคำนวณ และแบ่งออกเป็น 8 ช่วงความถี่โดยการใช้สมการที่ (163) จากนั้นข้อมูลของแต่ละช่วงจะถูกนำมาควอนไทซ์ และได้ค่าแต่ละช่วงออกมาดังนี้ ค่ามัธยฐาน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าความน่าจะเป็น ข้อมูลที่ใช้ในการป้อนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังตารางที่ 6.8



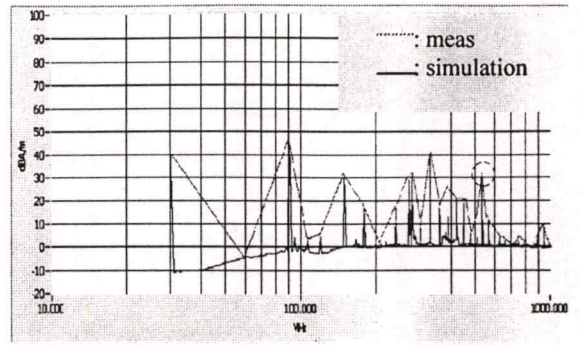
รูปที่ 6.42 แสดงการรบกวนโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้ สัญญาณอิมพัลส์



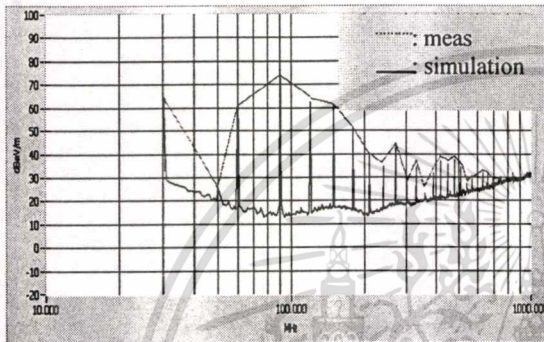
เอกสารนี้เป็นเอกสาร (ก) 5 cm สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น (ข) 5 cm + สัญญาณอิมพัลส์ ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



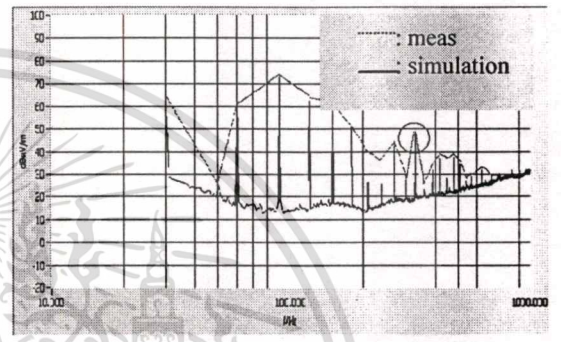
(ค) 45 องศา



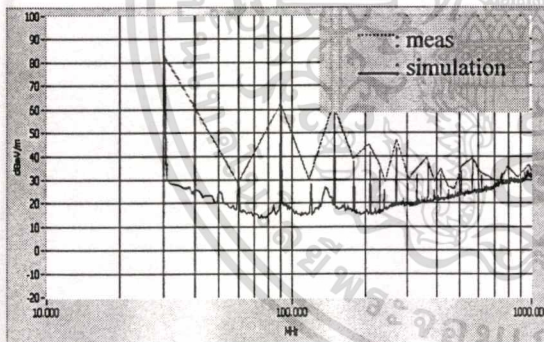
(ง) 45 องศา + สัญญาณอิมพัลส์



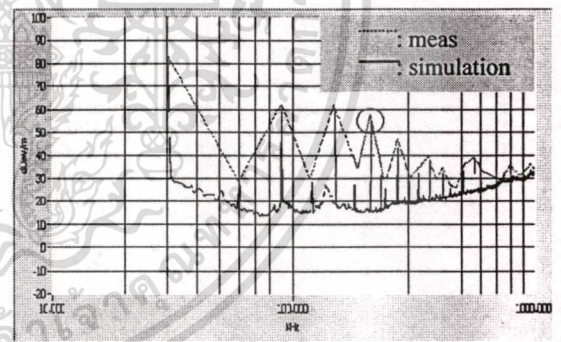
(จ) 7400



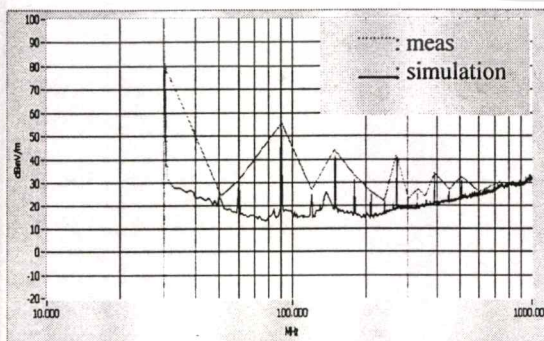
(ฉ) 7400 + สัญญาณอิมพัลส์



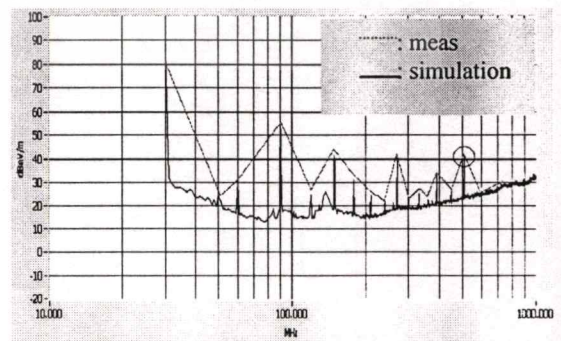
(ช) X



(ฌ) X + สัญญาณอิมพัลส์



(ฉ) รัศมี 3 cm



(ญ) รัศมี 3 cm + สัญญาณอิมพัลส์

รูปที่ 6.43 แสดงสนามไฟฟ้าระยะไกลของแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งถูกปรับมุม
 เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.8 แสดงตัวอย่างข้อมูลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งถูกรบกวนโดยสัญญาณ
อิมพัลส์

PCB Config.		Frequency Interval (Intv.) which input to the NN								NN Target					
		Intv. 1	Intv. 2	Intv. 3	Intv. 4	Intv. 5	Intv. 6	Intv. 7	Intv. 8	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
I-shape (NF)	-μ	45.87	34.67	40.20	29.10	24.24	20.68	17.6	9.70						
	-σ	8.53	6.81	18.00	3.16	3.16	3.25	1.70	1.46	0	0	0	0	1	0
	-P	0.01	0.03	0.02	0.01	0.07	0.06	0.12	0.13						
AND (NF)	-μ	50.12	35.24	29.32	26.92	30.60	23.06	11.23	10.11						
	-σ	9.17	6.52	2.35	4.13	4.78	2.09	0.691	0.54	0	0	0	1	0	0
	-P	0.02	0.02	0.09	0.05	0.17	0.76	0.16	0.17						
I-shape (FF)	-μ	31.70	36.80	35.60	27.00	24.80	21.80	20.40	10.10						
	-σ	10.46	4.19	8.00	5.62	4.42	3.78	3.32	3.30	0	1	0	0	1	1
	-P	0.02	0.07	0.09	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09						
AND (FF)	-μ	55.80	61.90	50.50	52.10	66.70	47.90	48.80	39.40						
	-σ	11.02	6.50	8.50	5.24	3.52	6.73	5.70	3.40	1	0	0	0	0	1
	-P	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04	0.05	0.08						
30 (NF)	-μ	25.06	70.15	80.70	57.18	43.43	45.12	20.40	10.12						
	-σ	12.13	9.10	5.43	3.12	3.12	3.21	2.54	3.22	0	1	0	1	0	0
	-P	0.09	0.90	0.60	0.23	0.04	0.98	0.92	0.45						
30 (FF)	-μ	56.18	63.14	45.43	50.12	40.21	42.11	30.29	12.45						
	-σ	4.32	7.81	6.21	3.57	3.98	6.00	9.04	3.67	0	1	0	1	0	1
	-P	0.03	0.12	0.09	0.10	0.92	0.59	0.33	0.22						
Imm (NF)	-μ	45.56	43.01	41.09	48.56	30.98	19.90	16.32	12.23						
	-σ	9.45	4.67	3.46	3.24	2.67	45.54	2.12	3.23	1	1	0	0	0	0
	-P	0.98	0.92	0.56	0.58	0.76	0.09	0.32	0.21						
Imm (FF)	-μ	35.43	60.43	43.22	25.21	23.45	21.32	17.89	15.09						
	-σ	3.24	5.55	4.21	3.45	4.34	6.77	5.64	6.83	1	1	0	0	0	1
	-P	0.09	0.40	0.90	0.45	0.55	0.34	0.98	0.87						
X (NF)	-μ	75.80	59.90	40.50	76.85	56.10	17.20	15.80	19.20						
	-σ	31.02	10.30	6.70	9.08	8.42	4.23	5.70	2.10	1	0	0	0	0	0
	-P	0.12	0.21	0.03	0.05	0.24	0.14	0.01	0.12						
X (FF)	-μ	55.80	81.90	50.50	52.10	46.10	47.90	48.80	39.40						
	-σ	11.02	3.43	8.50	5.24	6.42	6.73	5.70	3.40	1	0	0	0	0	1
	-P	0.03	0.21	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.08						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.7.3 ประสิทธิภาพของการจำแนกสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าโดยโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อถูกรบกวนโดยสัญญาณอิมพัลส์

เพื่อที่จะแสดงประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมในการจดจำและจำแนก ลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ เมื่อถูกรบกวนโดยสัญญาณอิมพัลส์โดยอาศัยการแพร่สนามแม่เหล็ก ระยะใกล้ และสนามไฟฟ้าระยะไกล

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบตัวชี้ประสิทธิภาพในการจำแนก โดยใช้วิธี Relative Ultimate Measurement Accuracy หรือ RUMA โดยกำหนดให้เป็นความสัมพันธ์ของ จำนวนของการจำแนกเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน - จำนวนของการจำแนกเมื่อถูกรบกวนโดยสัญญาณอิมพัลส์ ต่อ จำนวนของการจำแนกเมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน และแสดงในสมการที่ (6.11)

$$RUMA = \frac{(R_{ef} - F_{noise}) \times 100}{R_{ef}} \quad (6.11)$$

เมื่อ R_{ef} คือของสัญญาณอ้างอิงซึ่งไม่ถูกรบกวน

F_{noise} คือจำนวนของการจำแนกเมื่อถูกรบกวนโดยอิมพัลส์

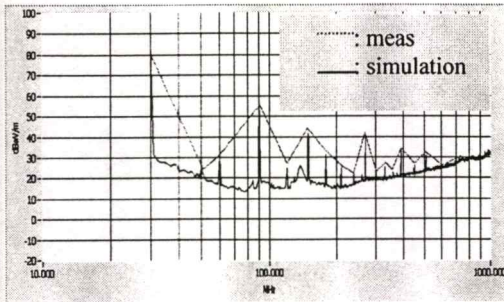
6.8 ผลการจำแนกลายทองแดงเมื่อถูกรบกวนโดยสัญญาณอิมพัลส์

ลายทองแดงซึ่งมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 6.40 ถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า จำนวนของลายทองแดงที่ถูกใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายทั้งหมดมีจำนวน 20 แบบ การทดสอบจะทำการสุ่มลายทองแดงทั้งหมดออกมา และแยกออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ไม่มีสัญญาณรบกวน และกลุ่มที่มีสัญญาณ อิมพัลส์ ลายทองแดงทั้ง 2 กลุ่มจะถูกสุ่มขึ้นมาและนำข้อมูลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม ผลของการจำแนกลายทองแดงกรณีถูกรบกวนโดยสัญญาณอิมพัลส์แสดงในตารางที่ 6.9

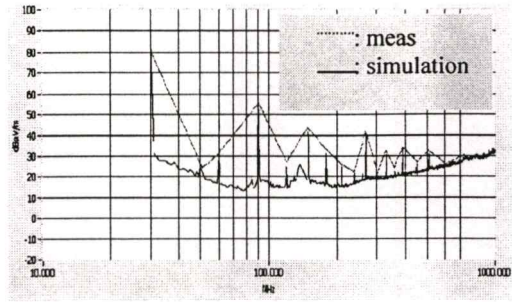
6.8.1 กลุ่มของการปรับความยาวของลายทองแดง

เมื่อใส่สัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ โดยมีการปรับพารามิเตอร์ของสัญญาณรบกวน ได้แก่ แอมพลิจูด (dB) การสุ่มค่าความถี่ (random) เข้าในกลุ่มของการปรับเปลี่ยนความยาวของลายทองแดง ความยาว 5 ซม. 10 ซม. 15 ซม. 20 ซม. 25 ซม. 30 ซม. จะพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถแยกแยะระหว่าง ลายทองแดงรูปตัว “ I ” ความยาว 5 ซม. และความยาว 10 ซม. เพราะรูปคลื่นของสัญญาณ (tendency) มีความใกล้เคียงกันมากโครงข่ายประสาทเทียมให้ค่า RUMA 50.32 % ในส่วนของความยาวอื่นๆ 15 ซม. 20 ซม. 25 ซม. และ 30 ซม. แม้ว่ามีสัญญาณรบกวนแต่ก็ยังสามารถหาจุดเด่นของลายทองแดงแต่ละแบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 5 cm + อิมพีแดนซ์

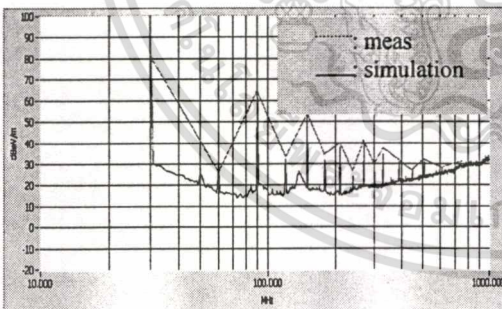
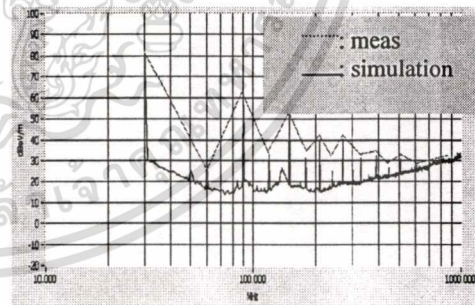


(ข) 10 cm

รูปที่ 6.44 แสดงสนามไฟฟ้าจากลายทองแดงรูปตัว “I”

6.8.2 กลุ่มของการปรับมุมของลายทองแดง

ในกลุ่มของการปรับมุมของลายทองแดงจาก 30° 45° 60° 90° 120° 135° และ 150° ลายทองแดงในกลุ่มนี้จะถูกสุ่มขึ้นมาและป้อนสัญญาณรบกวนแบบอิมพีแดนซ์ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม โครงข่ายประสาทเทียมจะถูกใช้ในการจำแนกลายทองแดง สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากลายทองแดงซึ่งถูกปรับมุม จากผลการจำแนกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมพบว่า โครงข่ายไม่สามารถจำแนกสนามไฟฟ้าจากลายทองแดงซึ่งมีมุม 90° เมื่อรวมสัญญาณอิมพีแดนซ์ และมุม 60° ในที่นี้ค่า RUMA เป็น 50.76 % รูปของสนามไฟฟ้าจากลายทองแดงมุม 60° และ 90° ซึ่งรวมสัญญาณพัลส์แสดงในรูป 6.45

(ก) 60° (ข) 90° + อิมพีแดนซ์

รูปที่ 6.45 แสดงสนามไฟฟ้าจากลายทองแดงซึ่งถูกปรับมุม

6.8.3 กลุ่มของลายทองแดงอื่นๆ

ในกลุ่มของลายทองแดงอื่นๆ เช่นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของลายทองแดง (I, H, X T, L, 7, U) กลุ่มของวงจรดิจิทัล(NAND, OR, NOR, EX-OR, R-S F/F, D-FF, Inverter) และ การปรับรัศมี(3 cm, 5 cm, 11 cm, 15 cm, 20 cm) พบว่าเมื่อเพิ่มสัญญาณอิมพีแดนซ์เข้ากับสัญญาณรบกวนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่วัดได้ และนำข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม พบว่าโครงข่ายสามารถจำแนกสายทองแดงได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เป็นเพราะสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกจากสายทองแดงในกลุ่มข้างต้น มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน การเพิ่มสัญญาณอิมพัลส์เข้าไปจะส่งผลกระทบต่อในการจำแนกเพียงเล็กน้อย ค่า RUMA ในที่นี้เป็น 3.24 %

ตารางที่ 6.9 แสดงผลการจำแนกสายทองแดง เมื่อถูกรบกวนโดยสัญญาณอิมพัลส์

Amplitude Level (dBm)	Random Frequency (MHz)					RUMA (%)
	30-200	200-400	400-600	600-800	800-1 GHz	
0.00	x					0.24
		x				0.25
			x			0.27
				x		0.30
					x	0.33
5.00	x					10.23
		x				13.24
			x			12.09
				x		11.15
					x	13.87
10.00	x					20.54
		x				22.87
			x			23.50
				x		21.98
					x	24.09
15.00	x					30.98
		x				32.76
			x			33.65
				x		35.09
					x	34.76
20.00	x					40.87
		x				43.75
			x			44.65
				x		45.43
					x	46.21

ตารางที่ 6.10 แสดงผลการจำแนกสายทองแดง เมื่อถูกรบกวน โดยสัญญาณอิมพัลส์ (ต่อ)

Amplitude Level (dBm)	Random Frequency (MHz)					RUMA (%)
	30-200	200-400	400-600	600-800	800-1 GHz	
25.00	X					47.89
		X				47.89
			X			48.90
				X		48.54
					X	48.21
30.00	X					50.21
		X				51.86
			X			52.43
				X		53.42
					X	54.33
35.00	X					55.87
		X				55.65
			X			54.76
				X		55.61
					X	55.32
40.00	X					60.65
		X				61.34
			X			62.86
				X		65.97
					X	67.98

จากตารางที่ 6.10 แสดงผลการจำแนกสายทองแดงบนวงจรพิมพ์ โดยใช้ค่า RUMA พบว่าเมื่อเพิ่มระดับของสัญญาณรบกวนจาก 0.0 dB ถึง 40 dB และในแต่ละระดับสัญญาณจะสุ่มความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz และถูกพิจารณาโดยแบ่งเป็น 5 ช่วงคือ 30MHz - 200 MHz 200 MHz - 400 MHz 400 MHz - 600 MHz 600 MHz - 800 MHz และ 800 MHz -1 GHz พบว่าเมื่อระดับของสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นโครงข่ายจะสูญเสียความสามารถในการจำแนกข้อมูลลง (RUMA มีค่าเพิ่มขึ้น) การใช้งานโครงข่ายในการจำแนกข้อมูลในวิทยานิพนธ์นี้ยอมรับค่าผิดพลาดในการจำแนกไม่เกิน 15 % จากจำนวนของข้อมูลทั้งหมด 50 รูปแบบ ดังนั้นโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์นี้จึงอนุญาตให้มีขนาดของสัญญาณรบกวนได้ไม่เกิน 5 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

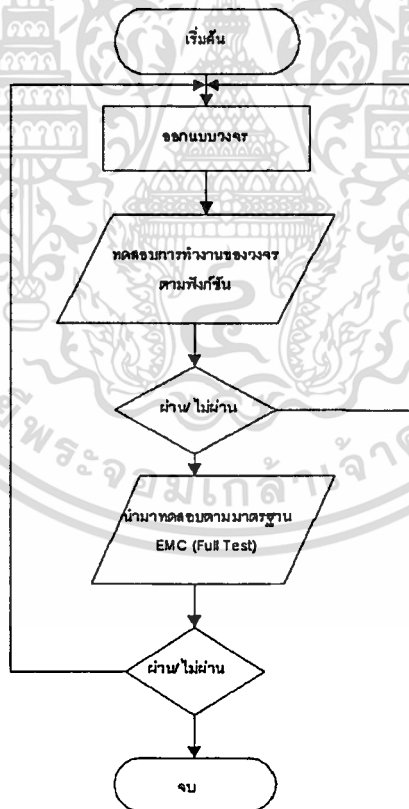
บทที่ 7

การทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

7.1 การทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลจากการใช้สนามแม่เหล็กระยะใกล้

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์จะมีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

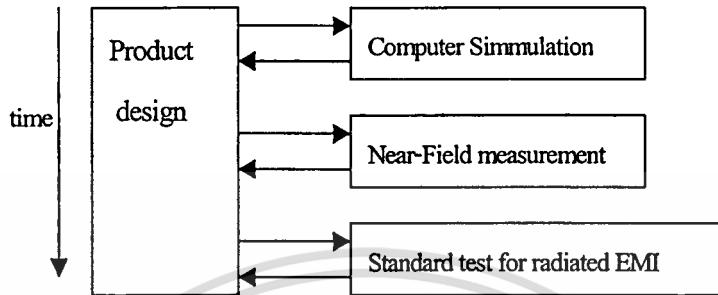
- ออกแบบวงจร และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการจำลองการทำงานของวงจร เพื่อให้สามารถทำงานตามที่ออกแบบไว้ (functional testing)
- วัดการแพร่คลื่น โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานซึ่งต้องใช้อุปกรณ์การทดสอบที่มีราคาแพง (Full- Compile Testing) หากความแรงของสัญญาณมากกว่า เส้นจำกัด (limit line) [24][25] ผู้ออกแบบจะต้องนำวงจรดังกล่าวไปแก้ไข และจะต้องนำมาทดสอบใหม่ จนกระทั่งผ่านมาตรฐาน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลามาก



รูปที่ 7.1 แสดงกระบวนการในการออกแบบผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนในการออกแบบวงจรและทดสอบการทำงานจะใช้เวลาเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับระยะเวลาของกระบวนการทั้งหมด ส่วนเวลา 90 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือเสียไปในการแก้ไขให้วงจรแพร่คลื่นออกมาต่ำกว่ามาตรฐานไม่ให้ออกเกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการที่จะช่วยให้ผู้ออกแบบเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบผลิตภัณฑ์สามารถทำได้ ดังรูปที่ 7.2 คือเริ่มจากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำนายการแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า จากนั้นนำอุปกรณ์ต้นแบบไปผ่านการทดสอบแบบ pre-compile (Near-Field measurement) และทดสอบตามมาตรฐาน(Full-Compile Testing) เป็นอันดับสุดท้าย



รูปที่ 7.2 แสดงวิธีการในการลดเวลาในการออกแบบผลิตภัณฑ์

การทดสอบทาง EMC ตามมาตรฐาน จะต้องทำการติดตั้ง (setup) และมีลำดับขั้นตอนการปฏิบัติ (procedure) ตามมาตรฐานและทำบนพื้นที่ทดสอบตามมาตรฐาน เช่น CISPR22 CISPR15[24] หรืออื่นๆ แต่เนื่องจากการทดสอบบนพื้นที่ทดสอบที่ได้กล่าวมาแล้ว มีค่าใช้จ่ายมาก และจะต้องเสียเวลานาน ดังนั้นจึงไม่สะดวกกับผู้ออกแบบวงจร ในขั้นตอนของการแก้ไขปัญหาทาง EMC

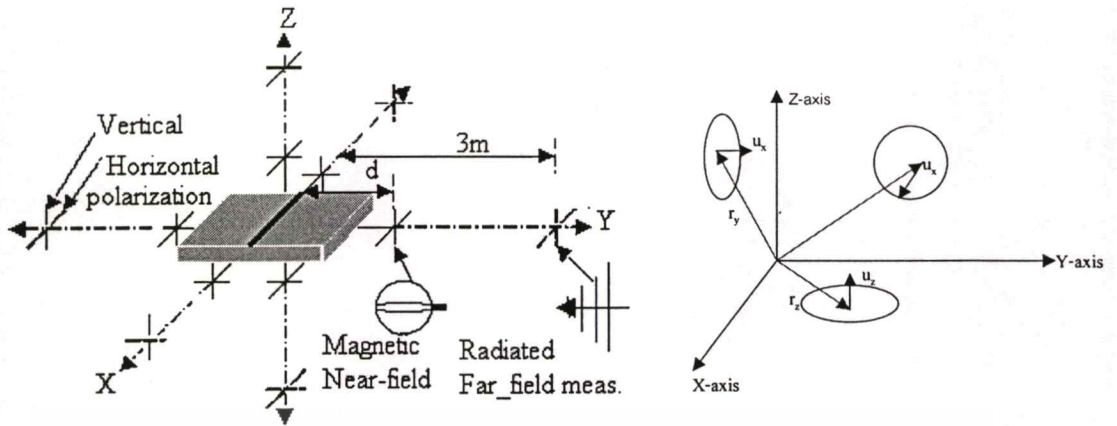
ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ออกแบบการทดสอบที่ง่าย ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบ ก่อนนำไปทดสอบบนพื้นที่ทดสอบตามมาตรฐาน วิธีการทดสอบดังกล่าวเรียกว่า การทดสอบแบบ Pre-compile โดยใช้การวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ ที่แพร่ออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์ และนำผลการวัดของสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ (ซึ่งมีราคาถูกกว่าและเสียเวลาน้อย) ไปใช้ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าในกระยะไกล (ซึ่งใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพง และเสียเวลามาก) [7][10] [17][18]

7.2 วิธีการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้เพื่อใช้ทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล

ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกล จากการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ของแผ่นวงจรพิมพ์ในวิทยานิพนธ์นี้ มีขั้นตอนดังนี้

- การวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้จะวัดใน 6 ทิศทางรอบแผ่นวงจรพิมพ์ โดยมีระยะห่างเท่ากันทุกด้านเป็น 0.03 m แสดงดังรูปที่ 7.3
- ผลที่วัดได้จากสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ถูกแปลงเป็นการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกล เมื่อวัดที่ระยะ 3 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ทำการเปรียบเทียบผลการทำนายที่ได้โดยเปรียบเทียบกับการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลตามมาตรฐาน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้ และสนามไฟฟ้าระยะใกล้ (ข) ทิศทางการวางรูปขณะวัด

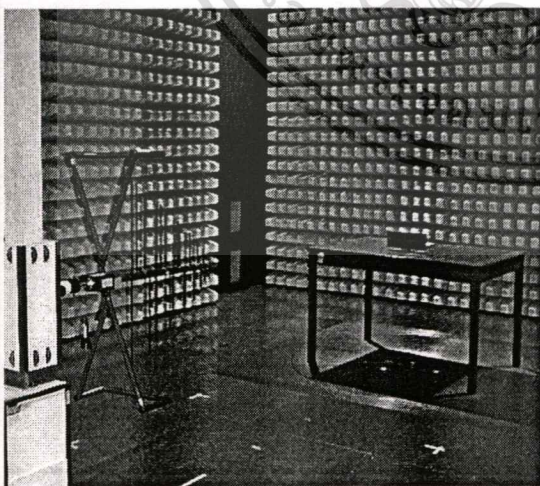
รูปที่ 7.3 แสดงตำแหน่งการวัดของสนามระยะใกล้

การวัดตามมาตรฐานสากล (CISPR22) จะต้องทำใน Semi Anechoic Chamber โดยมีระยะห่างจากแผ่นวงจรพิมพ์ถึงสายอากาศเป็น 10 m แต่เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ Semi anechoic chamber ซึ่งมีระยะทดสอบ 3 m ในการทดสอบ ดังนั้นเพื่อความถูกต้องของข้อมูลจึงต้องแปลงระดับสัญญาณที่วัดได้จากระยะทดสอบ 3 m ไปเป็นระยะทดสอบ 10 m โดยใช้สมการ(171) [25]

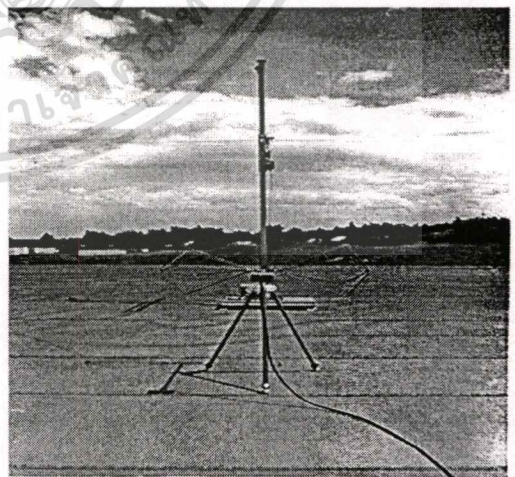
$$a = 20 \log \frac{10m}{3m} = 3.3dB \tag{171}$$

เมื่อ a คือระดับความแรงของสนามไฟฟ้า

$$\text{ความแรงของสัญญาณที่ } 10 \text{ m} = \text{ความแรงของสัญญาณที่ } 3 \text{ m} - 3.3 \text{ dB}$$



(ก) 3 m Anechoic Chamber



(ข) 10 m Open Area Testsite

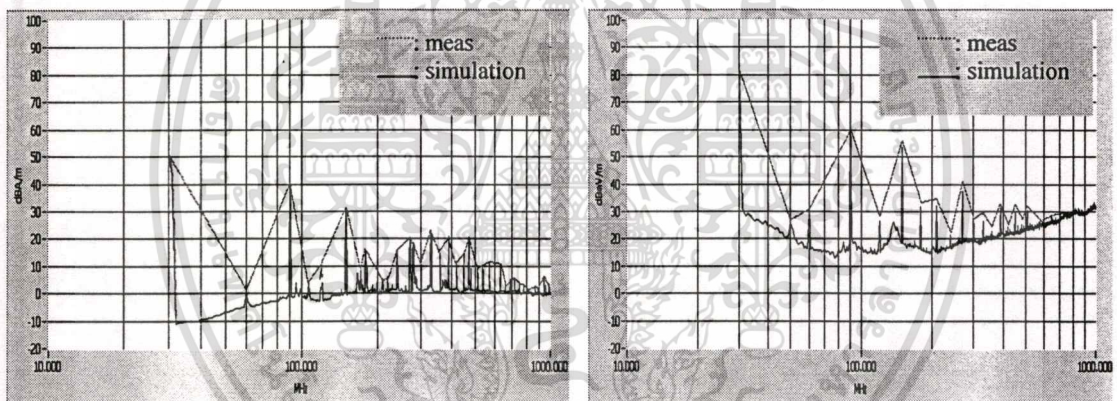
รูปที่ 7.4 แสดงการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในระยะไกล (Far-Field)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

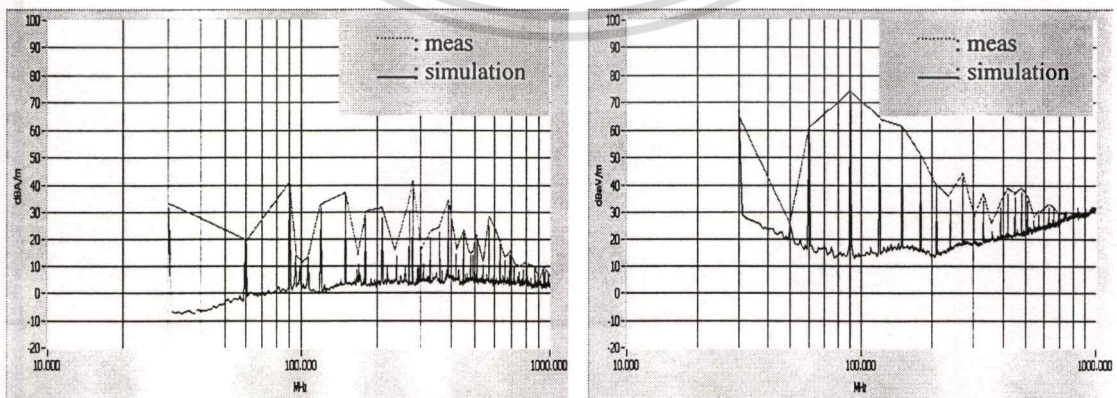
การคำนวณหาการแผ่สนามไฟฟ้าระยะไกล สามารถใช้ข้อมูลจากการวัดสนามแม่เหล็ก ระยะใกล้ ใน 6 ทิศทาง ตามรูปที่ 7.3 แต่เนื่องจากการวัดสนามไฟฟ้าระยะไกลตามมาตรฐาน CISPR22 จะต้องมีการกลับขั้วของสายอากาศ (polarization) ด้วรับเป็นแนวตั้ง (Vertical Polarization) และ แนวนอน (Horizontal Polarization)

ดังนั้นสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่วัดได้ในระยะใกล้และระยะไกล จะมีทั้งสิ้น 12 ชุด ข้อมูลในการวัดแผ่นวงจรพิมพ์ 1 แผ่น แอมพลิจูดสูงสุดที่วัดได้ในแต่ละความถี่จะถูกนำมาพล็อตรวมเป็นกราฟเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.5 (ก)-(ง)

ในงานวิจัยนี้จะทำการบันทึกการแผ่สูงสุด และค้างข้อมูลมากที่สุด (Max-Hold) ความเข้มของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในแต่ละความถี่จาก 30 MHz ถึง 1 GHz วิธีการวัดทั้งหมดจะเป็นไปตามมาตรฐาน CISPR22 โดยชดเชยค่าแฟกเตอร์ของสายอากาศ(antenna factor) สายนำสัญญาณ และคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด(measurement uncertainty) เพื่อความถูกต้องตามวิธีการที่แนะนำในมาตรฐาน CISPR 16 - 4 [23]

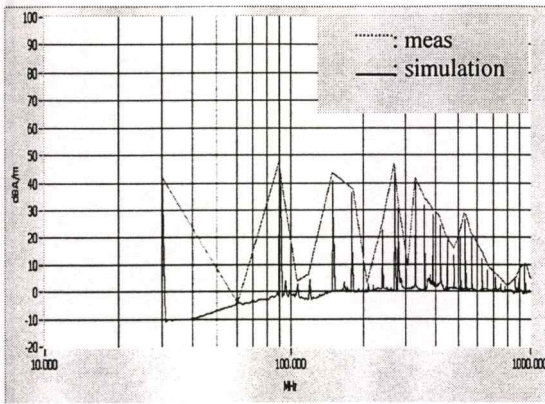


(ก) สนามแม่เหล็กระยะใกล้ ของสายทองแดงรูปตัว "T" 10 cm (ข) สนามไฟฟ้าระยะไกล

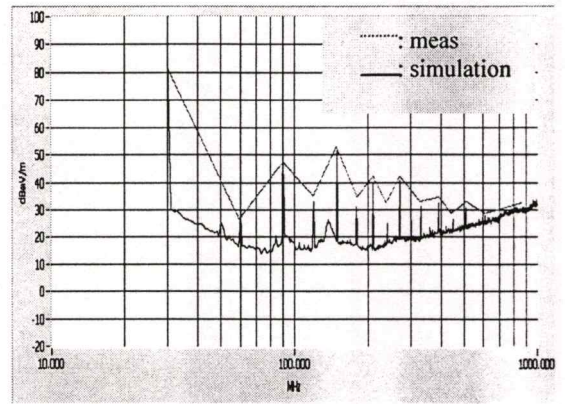


(ค) สนามแม่เหล็กระยะใกล้ ของสายทองแดง 7402 (ง) สนามไฟฟ้าระยะไกล

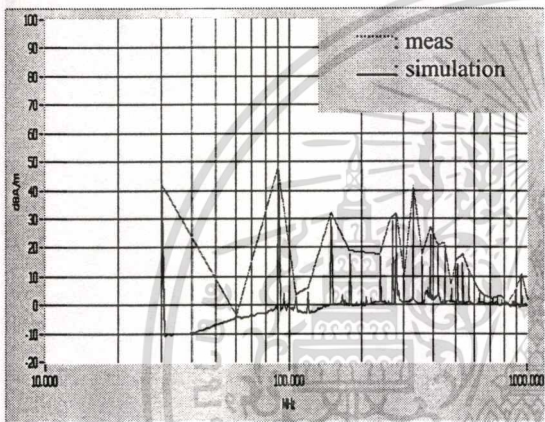
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



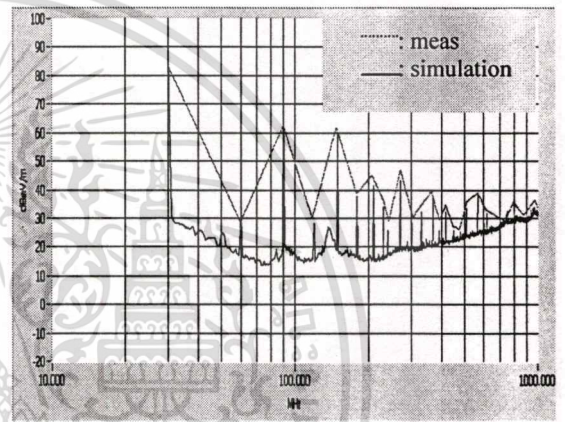
(จ) สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ ของลายทองแดงมุม 90 องศา



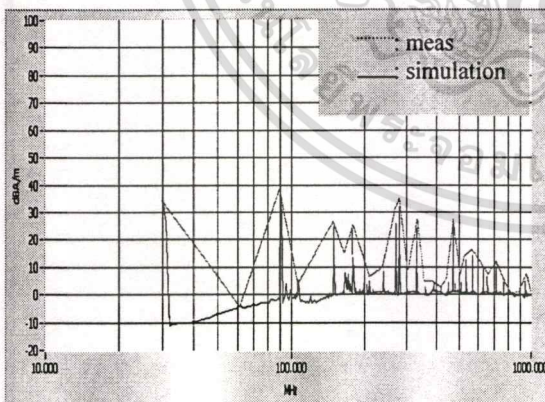
(ฉ) สนามไฟฟ้าระยะไกล



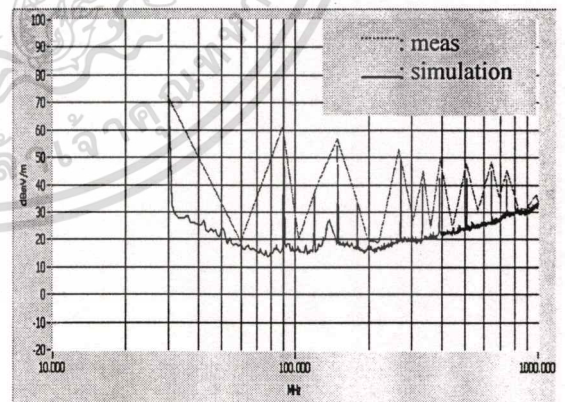
(ช) สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ ของลายทองแดงรูปตัว “H”



(ซ) สนามไฟฟ้าระยะไกล



(ค) สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ ของลายทองแดงกว้าง 25 mm

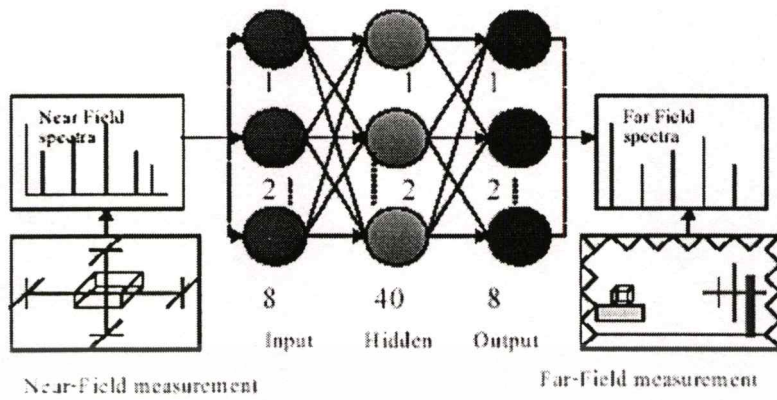


(ค) สนามไฟฟ้าระยะไกล

รูปที่ 7.5 แสดงสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 การนำข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 7.6 แสดงการสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกล จากการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้

สนามแม่เหล็กกระยะใกล้ของแผ่นวงจรพิมพ์ถูกใช้เป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม คือสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แพร่ออกมาจากวงจรพิมพ์

กำหนดให้ค่าอินพุตและเอาต์พุตของโครงข่ายเป็นเลขจำนวนจริง (real number) และถูกใช้ในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลที่แพร่ออกมาจากวงจรพิมพ์ ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ป้อนเข้าโครงข่ายเพื่อทำการเรียนรู้แสดงดังนี้

$$Pattern_set(n) = \{ \{ I^{(1)}, T^{(1)} \}, \dots, \{ I^{(8)}, T^{(8)} \} \}$$

$$I^{(1)} = \{ I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8 \},$$

$$T^{(1)} = \{ T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8 \}$$

เมื่อ n จำนวนเซตของข้อมูล (50)

I เซตของข้อมูลอินพุต (สนามแม่เหล็กกระยะใกล้)

T เซตของข้อมูลเอาต์พุต (สนามไฟฟ้าระยะไกล)

- รูปแบบของเซตข้อมูลที่ป้อนให้โครงข่ายของ แผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “I”

$I_{I_shape} = [40, 41, 22, 33, 36, 21, 16, 10]$ และค่าเป้าหมายของโครงข่ายในการเรียนรู้

สำหรับแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “I” $T = [60, 51, 31, 32, 27, 30, 28, 30]$

- รูปแบบของเซตข้อมูลที่ป้อนให้โครงข่ายของ แผ่นวงจรพิมพ์สำหรับ “AND”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

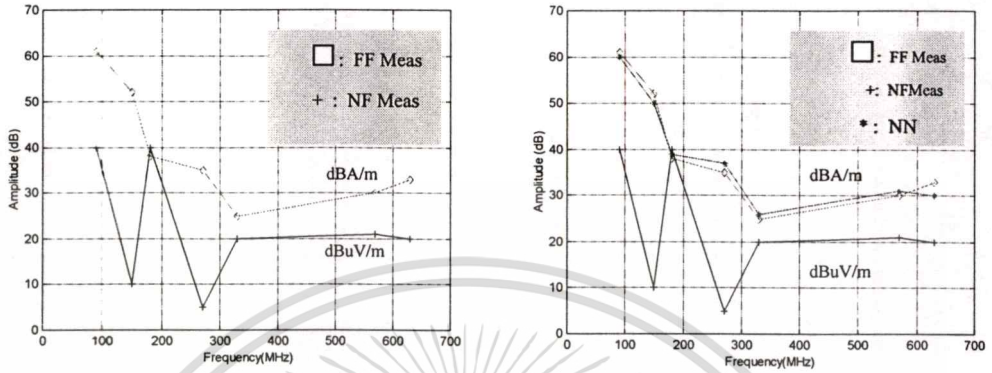
$I_{AND} = [40, 43, 30, 48, 20, 30, 18, 10]$ และค่าเป้าหมายของโครงข่ายในการเรียนรู้ สำหรับแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว AND_(FF) เป็น $T = [84, 58, 59, 45, 47, 46, 28, 26]$ ความสัมพันธ์ของค่าอินพุตและเอาท์พุตที่ใช้ในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมแสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงตัวอย่างในการคำนวณส่วนอินพุตและเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียม

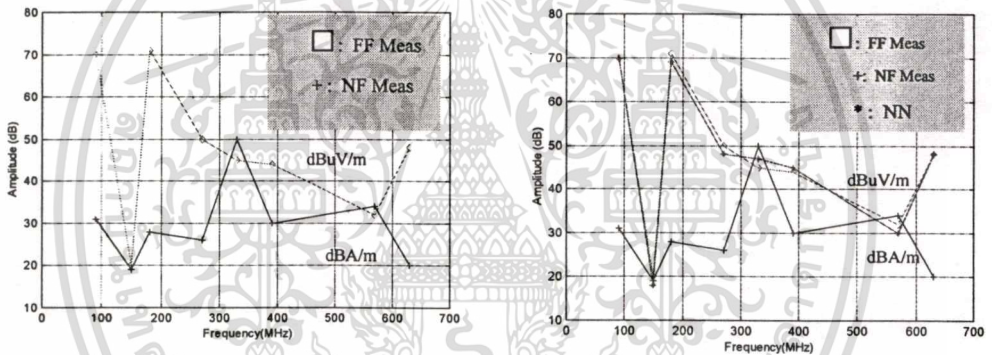
PC B	NN input Magnetic near-field spectra (dBA/m) $I^{(n)} = [I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8]$								NN target Radiated far-field spectra (dB μ V/m) $T^{(n)} = [T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8]$							
	90 MHz I_1	150 MHz I_2	180 MHz I_3	270 MHz I_4	330 MHz I_5	390 MHz I_6	570 MHz I_7	630 MHz I_8	90 MHz T_1	150 MHz T_2	180 MHz T_3	270 MHz T_4	330 MHz T_5	390 MHz T_6	570 MHz T_7	630 MHz T_8
Odd Har.	90 MHz I_1	150 MHz I_2	180 MHz I_3	270 MHz I_4	330 MHz I_5	390 MHz I_6	570 MHz I_7	630 MHz I_8	90 MHz T_1	150 MHz T_2	180 MHz T_3	270 MHz T_4	330 MHz T_5	390 MHz T_6	570 MHz T_7	630 MHz T_8
5 cm	40	41	22	33	36	21	16	10	60	51	31	32	27	30	28	30
10 cm	40	30	12	20	21	20	12	10	60	53	31	38	26	31	26	27
30 cm	26	17	14	18	20	7	10	8	60	61	32	45	27	46	25	27
30°	47	26	13	27	14	5	5	4	60	41	30	40	32	30	25	27
60°	47	30	18	30	40	23	11	3	63	54	31	41	35	31	29	30
90°	47	41	38	33	40	30	20	12	45	52	33	42	32	32	30	33
7400	40	43	30	48	20	30	18	10	84	58	59	45	47	46	28	26
74279	30	50	40	48	27	26	10	11	72	50	43	42	47	36	25	28
7473	33	25	21	47	30	21	9	9	82	79	55	53	46	47	26	30
1 mm Width	50	30	20	20	33	8	11	11	49	50	22	32	25	30	25	32
10 mm width	50	35	22	33	42	16	12	12	62	56	36	46	38	38	26	32
T	39	27	20	30	25	12	11	4	78	61	36	40	30	33	26	28
H	48	30	17	31	41	25	11	4	60	60	40	42	43	25	40	31
...
X	30	34	21	32	38	10	10	2	63	54	50	25	38	45	39	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

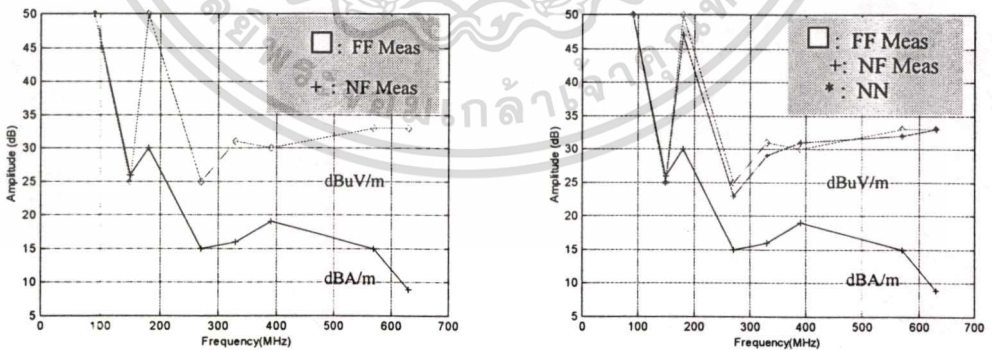
โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบด้วย อินพุตจำนวน 8 โหนด 40 ฮิดเดน และ 8 เอาท์พุต โหนด ถูกใช้ในการเรียนรู้และทำนายสนามไฟฟ้าจากการวัดสนามแม่เหล็ก โดยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของโครงข่ายคือค่าความผิดพลาดมากที่สุด (error) ค่าอัตราการเรียนรู้ (learning rate) และค่า โมเมนตัม (Momentum) ถูกกำหนดให้เป็น 0.00001, 0.001 และ 1 0.6 ตามลำดับ



(ก) สายทองแดงรูปตัว "I" ยาว 10cm



(ข) วงจรดิจิทัล 74279



(ค) สายทองแดงกว้าง 1 mm

รูปที่ 7.7 แสดงการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมจดจำความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งหมดได้แล้ว แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 90 MHz 150 MHz 180 MHz 270 MHz 330 MHz 390 MHz 570 MHz และ 630 MHz ของแผ่นวงจรพิมพ์รูปต่างๆ ถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม เพื่อ

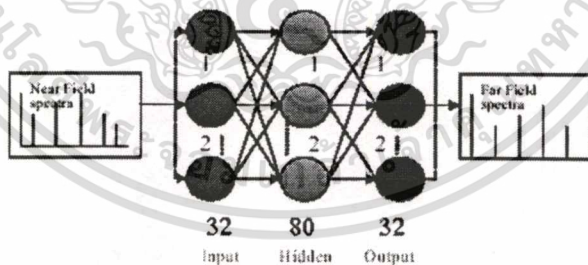
ทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกล ผลการทำนายสนามไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังรูปที่ 7.7 (ก)-(ค)

จากรูปที่ 7.7 แสดงความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กจากการวัดระยะใกล้(+) สนามไฟฟ้าระยะไกล(□) และผลการคำนวณจากโครงข่ายประสาทเทียม(*) ของลายทองแดงรูปตัว “1” ความยาว 10 cm. วงจรดิจิทัล 74279 และลายทองแดงกว้าง 1 mm. พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับการวัดจริง โดยมีรูปแบบของสนามไฟฟ้า(tendency) ใกล้เคียงกับการวัดระยะไกลแต่แอมพลิจูดแตกต่างกัน (1-3 dB)

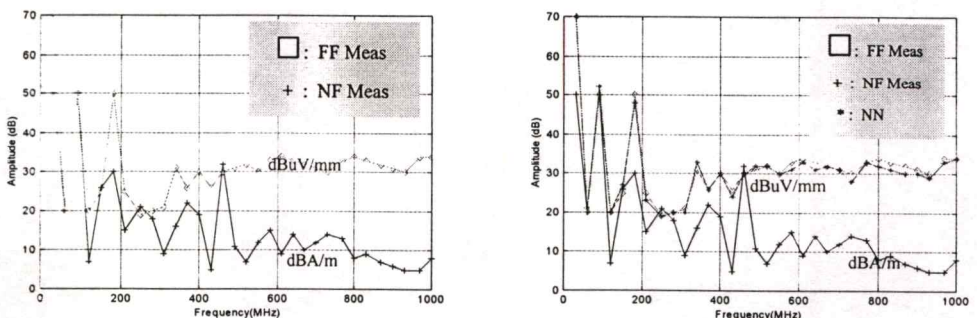
7.4 การปรับโครงข่ายประสาทเทียมให้มีความแม่นยำในการทำนาย

เพื่อที่จะปรับ โครงข่ายประสาทเทียมให้มีความสามารถในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลมากขึ้น แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดระยะใกล้ของแผ่นวงจรพิมพ์ ที่ความถี่ 30 MHz 60 MHz 90 MHz จนถึง 1000 MHz ถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกลของแต่ละความถี่(ความถี่ 30 MHz 60 MHz 90 MHz จนถึง 1000 MHz) ของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กนั้นๆ และนำมาผ่านกระบวนการเรียนรู้แล้ว

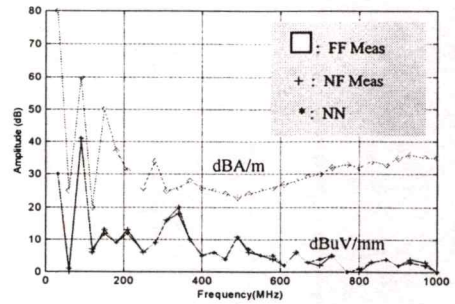
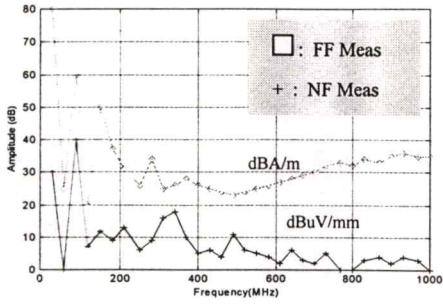
นำโครงข่ายที่ปรับแล้วมาทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล โดยอาศัยสนามแม่เหล็กจากการวัดระยะใกล้ได้ ผลการทำนายแสดงในรูปที่ 7.9 (ก)- (ง) พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ 1 - 2 dB



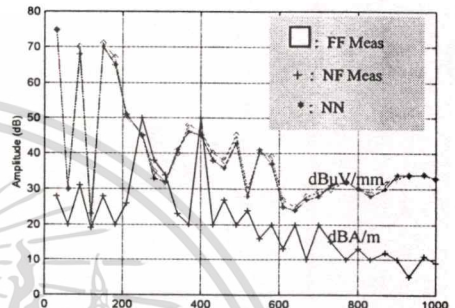
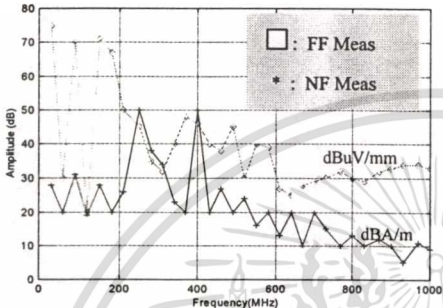
รูปที่ 7.8 แสดงการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล



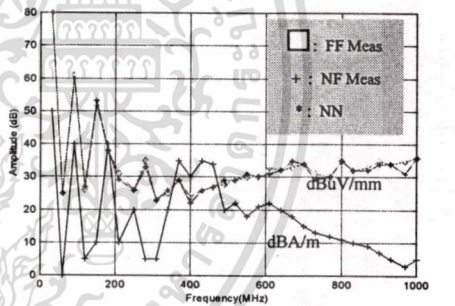
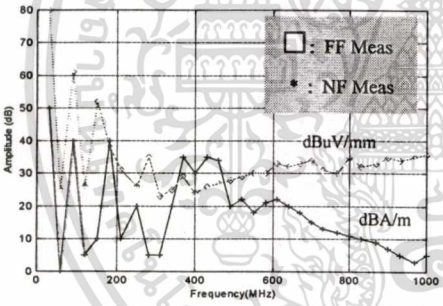
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ (ก) ปรับความกว้าง 1mm ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) วงจรรัศมี 3 cm



(ค) วงจรดิจิตอล



(ง) การปรับความยาว 1 cm

รูปที่ 7.9 แสดงผลการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

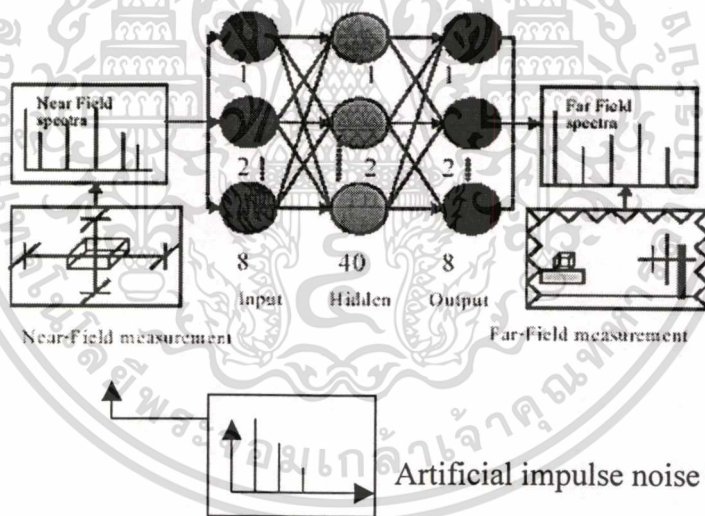
ค่าเข้าที่พูดที่ได้จากการคำนวณและค่าเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าสอดคล้องกันแสดงดังรูป 7.9 สำหรับวงจรรูปตัว “ I ” ยาว 10 cm. มีความกว้างเป็น 1 mm. ผลการทำนายสนามไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าแตกต่างจากการวัดประมาณ 2 dB และเป็นที่น่าสังเกตว่าสนามแม่เหล็กแพธจากวงจรรูปรัศมี 3 cm. มีขนาดมากที่สุดเมื่อเทียบกับวงจรอื่นๆทั้งหมด แต่สนามไฟฟ้าระยะไกลที่วัดได้กลับมีแอมพลิจูดน้อยที่สุด เป็นการยืนยันว่าที่ระยะใกล้สนามจะเป็นแม่เหล็กและระยะไกลจะเป็นสนามไฟฟ้า และวงจรประเภทูปไม่เหมาะสมจะทำสายอากาศตัวส่ง [6]

นอกจากนี้ยังพิสูจน์ได้ว่าการแพร่สนามไฟฟ้า มีสาเหตุมาจากการทำงานในแบบคอมมอน โหมด(common mode) [19] อย่างไรก็ตามผลการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล โดยใช้โครงข่ายที่ ให้ค่าที่แม่นยำมาก (แตกต่างจากการวัด 1-2 dB)

สำหรับวงจรดิจิทัลและสายทองแดงรูปตัว “ I ” ผลการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าการทำนายอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ คือแตกต่างจากการวัด 1- 2 dB

โดยปกติเมื่อรวมค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเครื่องมือ (Measurement Uncertainty) ทาง EMC เพื่อใช้ในการวัดการแพร่สัญญาณรบกวนแพร่ผ่านอากาศ (Radiated Emission) ตามคำแนะนำในมาตรฐาน CISPR 16-4 [23] พบว่าจะอยู่ในช่วง 5 dB ถึง 7 dB ผลการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้า ระยะไกลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าความผิดพลาดอยู่ระดับ 2 dB ดังนั้นโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ออกแบบขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถทำนายโดยชดเชยค่าความไม่แน่นอนของการวัดได้

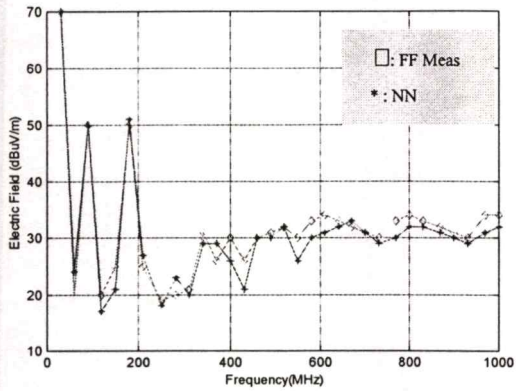
7.5 การทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อถูกรบกวน



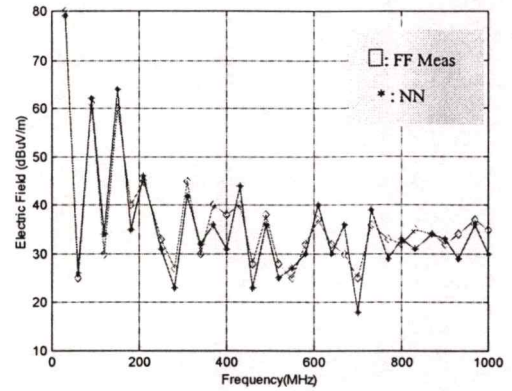
รูปที่ 7.10 แสดงการรบกวนโครงข่ายประสาทเทียม

เพื่อที่จะทดสอบความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล โดยการใช้สนามแม่เหล็กระยะใกล้ สนามแม่เหล็กระยะใกล้ที่ได้จากการวัดในตารางที่ 11 ถูกเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบ อิมพัลส์ (impulse noise) โดยมีค่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงดังนี้ ความถี่ 30 MHz ถึง 1GHz แบบสุ่ม(randomize) ขนาดแอมพลิจูด 1V แบบ peak-peak

โครงข่ายประสาทเทียมในรูปที่ 7.10 ซึ่งประกอบด้วย 32 อินพุต โหนด 40 ฮิดเดน โหนด และ 32 เอาท์พุต โหนด ถูกใช้ในการทดสอบ โครงข่ายประสาทเทียมในรูปที่ 7.11 (ก) และ(ข) ให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ค่าการทำนายแตกต่างจากการวัด 3 ถึง 5 dB ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



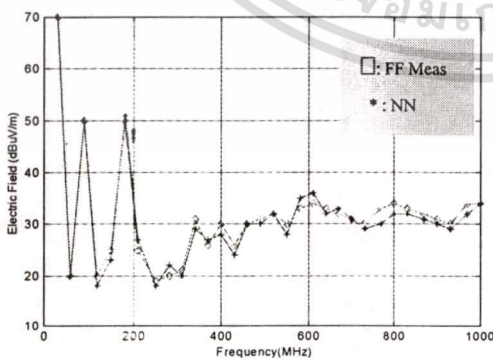
(ก) ลายทองแดงกว้าง 2 mm



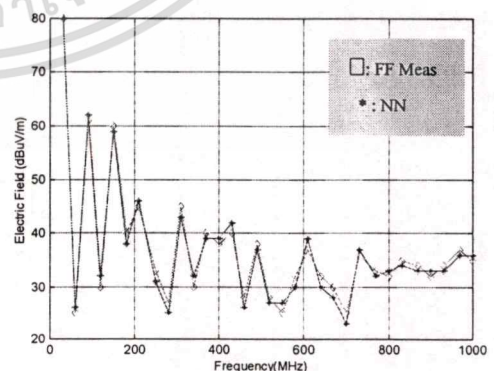
(ข) ลายทองแดงรูปตัว “ H ”

รูปที่ 7.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโครงข่ายเมื่อส่วนการวัดสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ถูกรบกวนโดยสัญญาณอิมพัลส์

เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายของโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะใกล้ เมื่อสนามแม่เหล็กกระยะใกล้ซึ่งป้อนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมถูกรบกวนโดยสัญญาณอิมพัลส์ จำนวนของ อินพุตโหนดและเอาต์พุตโหนดในรูปที่ 7.10 ถูกทำให้มีจำนวนคงที่ เป็น 32 อินพุตโหนดและ 32 เอาต์พุตโหนด แต่ปรับจำนวนของฮิดเดนโหนดเป็น 120 โหนด และปรับฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) ใน โปรแกรม MATLAB เป็นแบบ tansig และ purelin ข้อมูลของโครงข่ายซึ่งประกอบด้วยความถี่ทั้งฮาร์โมนิกส์เลขคี่และเลขคู่ ถูกใช้เป็นอินพุตของโครงข่าย โครงข่ายที่ผ่านการเรียนรู้ใช้เวลาานาน 3.5 ชม. ให้ค่าแตกต่างจากการวัด 1 ถึง 2 dB ผลของการทำนายสนามไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายแสดงในรูปที่ 7.12 (ก) - (ข)



(ก) ลายทองแดงกว้าง 2 mm



(ข) ลายทองแดงรูปตัว “ H ”

รูปที่ 7.12 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโครงข่ายเมื่อปรับจำนวนฮิดเดนโหนดเป็น

120 โหนดและใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบ Tansig และ Purelin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ซึ่งผู้ใช้งานต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขการใช้งานที่แนบมา ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6 การเปรียบเทียบการทำนายของโครงข่ายประสาทเทียบกับอัลกอริธึมอื่น

เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลการทำนายการแพร่คลื่นจากวงจรพิมพ์ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียบกับอัลกอริธึมอื่น เช่น Current Element Model (CEM) Method of Moment (MOM) ซึ่งเป็นอัลกอริธึมที่นิยมและมีความแม่นยำในงานทาง EMC [1][8][9]

แผ่นวงจรพิมพ์รูป “สี่เหลี่ยม (rectangular circuit)” ซึ่งมีความยาว 5 cm กว้าง 3 cm และวงจรพิมพ์รูปตัว “I” ถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า จากโครงสร้างของวงจรทั้งสอง พบว่าเหมือนกับโครงสร้างของสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบลูป ซึ่งเป็นโครงสร้างอย่างง่ายที่ใช้ในการคำนวณการแพร่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 7.10 สัญญาณพัลส์ความถี่ 30 MHz 3V peak-peak ถูกป้อนเข้าสู่สายทองแดง



(ก) แผ่นวงจรพิมพ์รูป “I” (สายอากาศไดโพล) (ข) แผ่นวงจรพิมพ์รูปสี่เหลี่ยม (สายอากาศลูป)

รูปที่ 7.13 แสดงโครงสร้างของแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการวัดและการคำนวณจาก CEM MOM และ โครงข่ายประสาทเทียม

7.6.1 วิธีการในการเปรียบเทียบ

1. ใช้สมการสายอากาศไดโพล และสายอากาศลูป [11] คำนวณการแพร่สนามไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนแปลง ระยะทางจากแหล่งกำเนิดและจุดสังเกต (r) มุมของจุดสังเกตเทียบกับแหล่งกำเนิด (θ, ϕ) และความถี่ (f) ที่ต้องการศึกษา โดยกำหนดให้ใช้สเตปในการคำนวณเป็นแบบละเอียด (1 สเตป)

2. นำค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการการแพร่สนามไฟฟ้าจากสายอากาศไดโพลและสายอากาศลูปป้อนเป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม โดยกำหนดให้มีค่าอัตราการสุ่มเป็น 5 สเตป ถึง 10 สเตป และกำหนดให้ค่าเป้าหมายของโครงข่ายคือ ค่าที่ได้จากการคำนวณของสมการสายอากาศไดโพลและลูป จากนั้นสอนโครงข่ายให้ทำการจดจำ

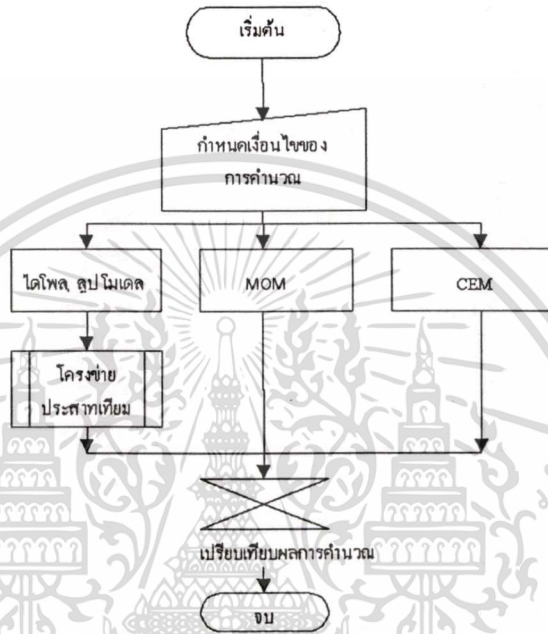
3. ใช้เงื่อนไขการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าของแต่ละอัลกอริธึม ทำการคำนวณการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกลจากวงจรทั้งสองดังนี้

- Current Element Model (CEM) ใช้รูปแบบการแพร่คลื่นจาก ชิ้นส่วนกระแส (current element) โดยกำหนดให้มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณเหมือนกับสายอากาศ ไม่ว่าจะเป็นกรณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโพลและรูป เช่น สมบัติทางอิมพีแดนซ์ของแผ่นวงจรมิมพี ระยะห่างจากจุดกำเนิดและจุดสังเกตมุม และความถี่ของสัญญาณอินพุต

- MOM ใช้สมการการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบรูป โดยวิธีการ Method of Moment [12] จำนวนการแพร่คลื่นโดยมีค่าตัวแปรต่างๆ เหมือนกับข้อที่ 1 โดยกำหนดให้เงื่อนไขของการคำนวณเหมือน ไดโพล และ CEM

4. เปรียบเทียบผลการคำนวณ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณทั้งหมดของแต่ละวิธี



รูปที่ 7.14 แสดงวิธีการเปรียบเทียบผลการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม MOM และ CEM

7.6.2 การป้อนข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม

จากสมการการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลโดยใช้ classical model [4][19] จะทำให้สามารถคำนวณ การแพร่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ดังนี้

$$E_{\theta} = 30 IL\beta^2 \sin \theta \left[\frac{j}{\beta_r} + \frac{1}{(\beta_r)^2} - \frac{j}{(\beta_r)^3} \right] \epsilon^{j\omega t} \epsilon^{-j\beta r} \quad (7.1)$$

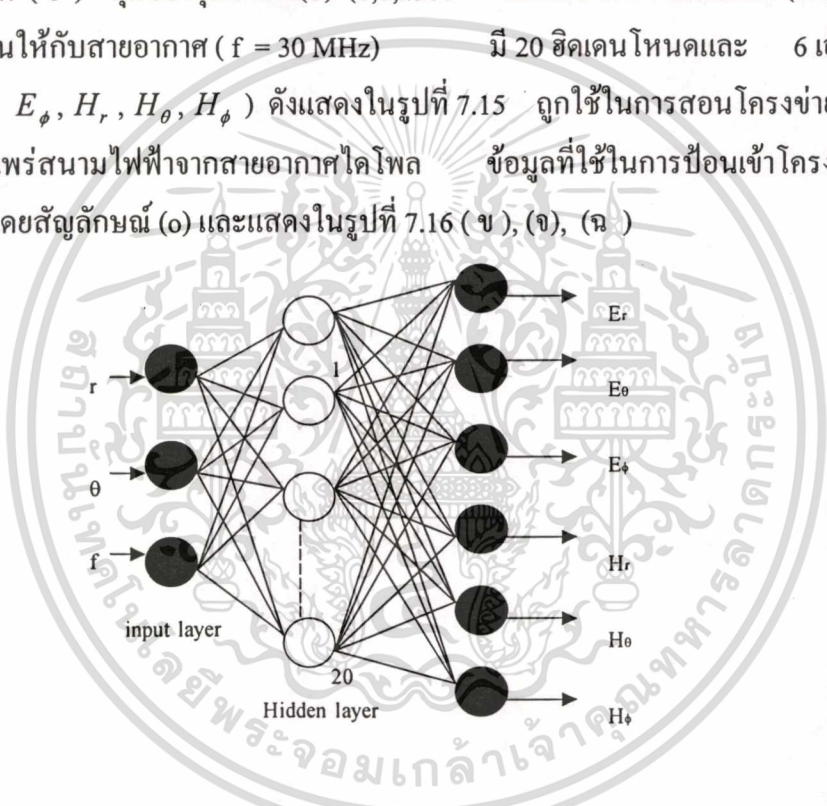
$$E_r = 60 IL\beta^2 \cos \theta \left[\frac{1}{(\beta_r)^2} - \frac{j}{(\beta_r)^3} \right] \epsilon^{j\omega t} \epsilon^{-j\beta r} \quad (7.2)$$

$$H_{\phi} = \frac{IL\beta^2}{4\pi} \sin \theta \left[\frac{j}{\beta_r} + \frac{1}{(\beta_r)^2} \right] \epsilon^{j\omega t} \epsilon^{-j\beta r} \quad (7.3)$$

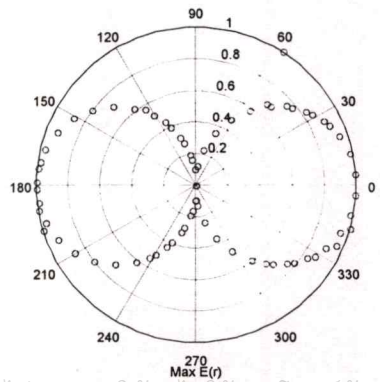
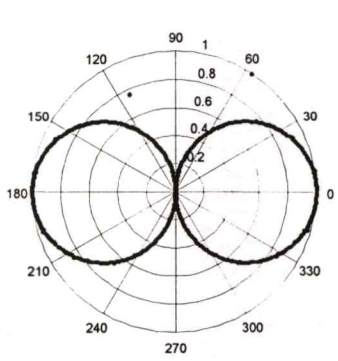
- เมื่อ $|r^w - r^u|$ คือ ระยะระหว่าง แหล่งกำเนิดและจุดสังเกต (เมตร)
- θ คือ มุมของจุดสังเกตเทียบกับแหล่งกำเนิด (องศา)
- f คือ ความถี่ที่ป้อนให้สายอากาศ (MHz)

สนามไฟฟ้าแพร่จากชั้นส่วนกระแสแนวตั้งรูปตัว “T” หรือ สายอากาศไดโพลซึ่งมีความยาว 5 เซ็นติเมตร โดยการป้อนสัญญาณพัลส์ความถี่ 30 MHz 50 % คู่อัซไคติก และมีเวลาขาขึ้นและขาลง 50 ns

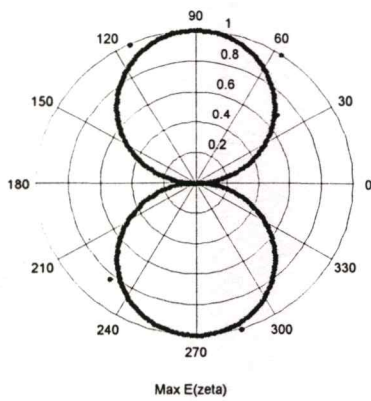
โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบด้วย 3 อินพุตโหนดคือ ระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดและจุดสังเกต (r) มุมของจุดสังเกต(θ) ($0,1,..360^\circ$ โดยมีระยะห่างแต่ละขั้น (step) 5°) และความถี่ที่ป้อนให้กับสายอากาศ ($f = 30$ MHz) มี 20 ฮิดเดนโหนดและ 6 เอาท์พุตโหนด ($E_r, E_\theta, E_\phi, H_r, H_\theta, H_\phi$) ดังแสดงในรูปที่ 7.15 ถูกใช้ในการสอนโครงข่ายให้จดจำและทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าจากสายอากาศไดโพล ข้อมูลที่ใช้ในการป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียมแสดงโดยสัญลักษณ์ (o) และแสดงในรูปที่ 7.16 (ข), (จ), (ฉ)



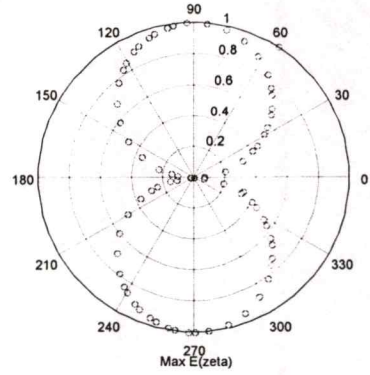
รูปที่ 7.15 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าของสายอากาศไดโพลหรือแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “T” ($E_\phi, H_r, H_\theta = 0$)



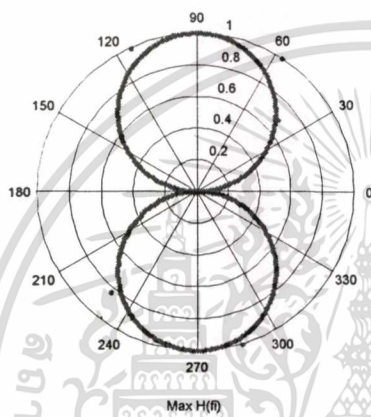
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (ก) E_r (ข) อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม
 ไม่ว่าจะฉีกใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



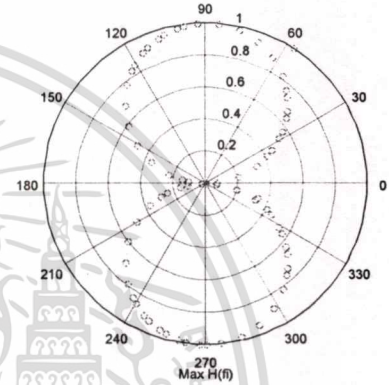
(ค) E_θ



(ง) อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม



(จ) H_ϕ



(ฉ) อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 7.16 แสดงการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล

7.6.3 สมการการแพร่คลื่นของสายอากาศแบบขลุบ

สมการการแพร่คลื่นของสายอากาศขลุบโดยใช้ classical model [4][19] จะทำให้สามารถทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ดังนี้

$$E_\phi = -j 30 IS \beta^3 \sin \theta \left[\frac{j}{\beta_r} + \frac{1}{(\beta_r)^2} \right] \mathcal{E}^{j\omega t} \mathcal{E}^{-j\beta r} \quad (7.5)$$

$$H_\theta = \frac{jIS\beta^3}{4\pi} \sin \theta \left[\frac{j}{\beta_r} + \frac{1}{(\beta_r)^2} - \frac{j}{(\beta_r)^3} \right] \mathcal{E}^{j\omega t} \mathcal{E}^{-j\beta r} \quad (7.6)$$

$$H_r = \frac{jIS\beta^3}{2\pi} \cos \theta \left[\frac{1}{(\beta_r)^2} - \frac{j}{(\beta_r)^3} \right] \mathcal{E}^{j\omega t} \mathcal{E}^{-j\beta r} \quad (7.7)$$

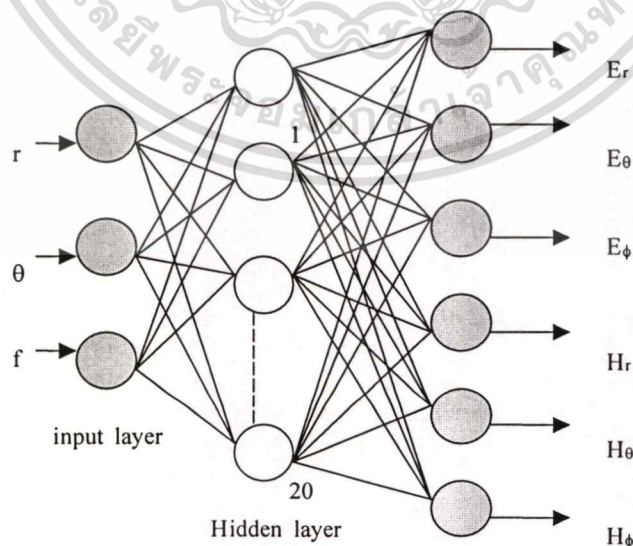
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $E_\theta, E_r, H_\phi = 0$ (7.8)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

 E_ϕ : สนามไฟฟ้าตามขวาง (V / m) H_θ : สนามแม่เหล็กตามขวาง (A / m) H_r : สนามแม่เหล็กตามแนวรัศมี (A / m) r : ระยะทางจากจุดถึงจุดสังเกต (m) I : กระแส (A) S : พื้นที่ของลูป (m^2) $\beta = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ ค่าคงที่เฟส (rad / m) λ : ความยาวคลื่น (m) ω : $2\pi f$, (rad / sec) f : ความถี่ (H_z)

สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าแพร่จากวงจรรูปสี่เหลี่ยม (rectangular) หรือ สายอากาศลูปซึ่งมีความยาว 5 cm กว้าง 5 cm โดยการป้อนสัญญาณพัลส์ความถี่ 30 MHz 50 % คู่อัซไคเคิล และมีเวลาขึ้นและขาลง 50 ns

โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบด้วย 3 อินพุตโหนดคือ ระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดและจุดสังเกต (r) มุมของจุดสังเกต (θ) ($0, 1, \dots, 360^\circ$ โดยมีระยะห่างแต่ละขั้น (step) 5°) และความถี่ ($f = 30$ MHz) ที่ป้อนให้กับสายอากาศ 20 อินพุตโหนดและ 6 เอาท์พุตโหนด ($E_r, E_\theta, E_\phi, H_r, H_\theta, H_\phi$) ดังแสดงในรูปที่ 113 ถูกใช้ในการสอนโครงข่ายให้ทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าจากสายอากาศลูป ข้อมูลที่ใช้ในการป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียมแสดงโดยสัญลักษณ์ (o) และแสดงในรูปที่ 7.19 (ข), (ง), (จ)

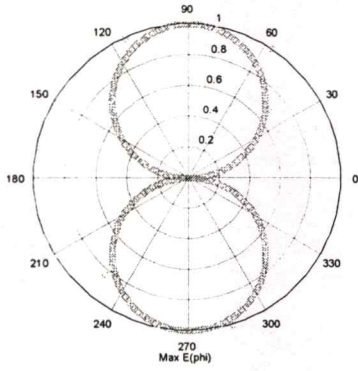


รูปที่ 7.17 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าของ

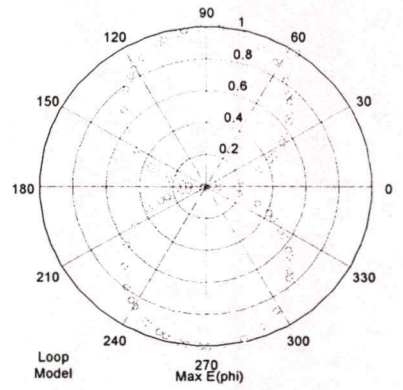
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สายอากาศไดโพลหรือแผนวงจรมุมรูปตัว "I" ($E_\theta, E_r, H_\phi = 0$)

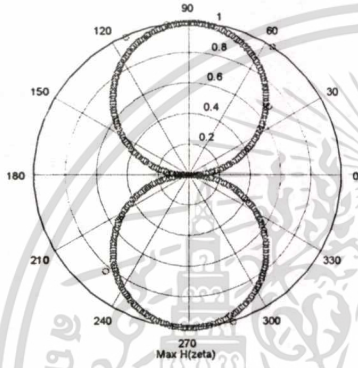
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



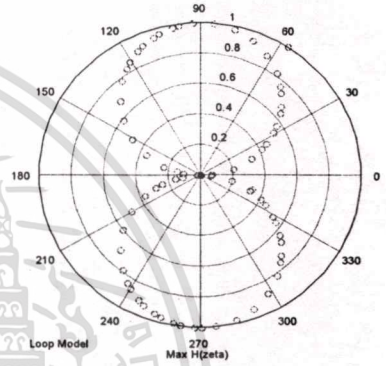
(ก) E_ϕ



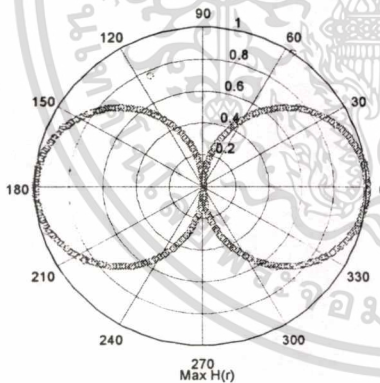
(ข) อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม



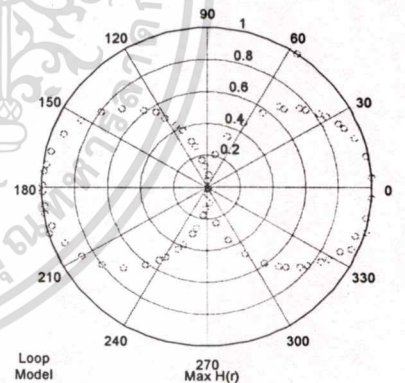
(ค) H_ϕ



(ง) อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม



(จ) $H(r)$



(ฉ) อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ 7.18 แสดงการแพร่คลื่นของสายอากาศลูปโดยใช้ Moment Method และ โครงข่ายประสาทเทียม

7.6.6 Method of Moment (MOM)

การวิเคราะห์พฤติกรรมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบสามารถวิเคราะห์โดยสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) โดยสมการนี้สามารถแปลงเป็นเทอมสมการอินทิกรัล

โดยใช้เทคนิค Method of Moment (MOM) เทคนิค MOM คือการแก้ปัญหามสมการอินทิกรัลไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัสมันบุรณ์ โดยการลดรูปสมการของระบบให้เป็นสมการเชิงเส้นอย่างง่าย ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปของเมตริกซ์ [8] [20] ดังนี้

$$[Z_{mn}][I_n] = [E_m] \quad (7.9)$$

เมื่อ Z_{mn} คือ ฟังก์ชันของ geometry และถูกกำหนดโดย การแปลงของ n-th เบสิก (basis) ฟังก์ชันของ กรีน(Green) ในอวกาศอิสระ

$$G(r^{\omega}, r^{\omega'}) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-jk(r^{\omega}-r^{\omega'})}}{|r^{\omega}-r^{\omega'}|} \quad (7.10)$$

สำหรับศักย์แบบสเกลลาร์

$$G(r^{\omega}) = \frac{j}{\epsilon\omega} \iiint_V \nabla_j^{\omega}(r^{\omega'}) \nabla_j G(r^{\omega}, r^{\omega'}) dv' \quad (7.11)$$

และ ศักย์แบบเวกเตอร์

$$A^{\omega}(r^{\omega}) = \mu \iiint_V J^{\omega}(r^{\omega'}) \cdot G(r^{\omega}, r^{\omega'}) dv' \quad (7.12)$$

จากศักย์ในสมการข้างต้นสามารถหาสนามไฟฟ้า

$$E^{\omega}(r^{\omega}) = -j\omega A^{\omega} - \nabla^{\omega} \lambda \quad (7.13)$$

และสนามแม่เหล็ก

$$H^{\omega}(r^{\omega}) = \frac{1}{\mu} \nabla^{\omega} \times A^{\omega} \quad (7.14)$$

สนามไฟฟ้าระยะใกล้ และระยะไกล ตามทิศแกน Z ของกระแสนำความยาว $\Delta\lambda$

$$E_r = Z_o \frac{I}{2\pi} \int_{\Delta\lambda} \frac{\cos q}{|r^{\omega}-r^{\omega'}|} \left(1 + \frac{1}{jk_o |r^{\omega}-r^{\omega'}|} \right) e^{-jk_o |r^{\omega}-r^{\omega'}|} dz' \quad (7.15)$$

เมื่อ $|r^{\omega}-r^{\omega'}|$ คือ ระยะระหว่าง แหล่งกำเนิดและจุดสังเกต
 $K_o = \omega\mu\epsilon$ เลขคลื่นในอวกาศอิสระ
 $Z_o = 377 \Omega$ ค่าอิมพีแดนซ์ในอวกาศอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (7.16) - (7.19) ใช้ในการคำนวณสนามไฟฟ้าระยะใกล้และไกลของไดโพลตาม

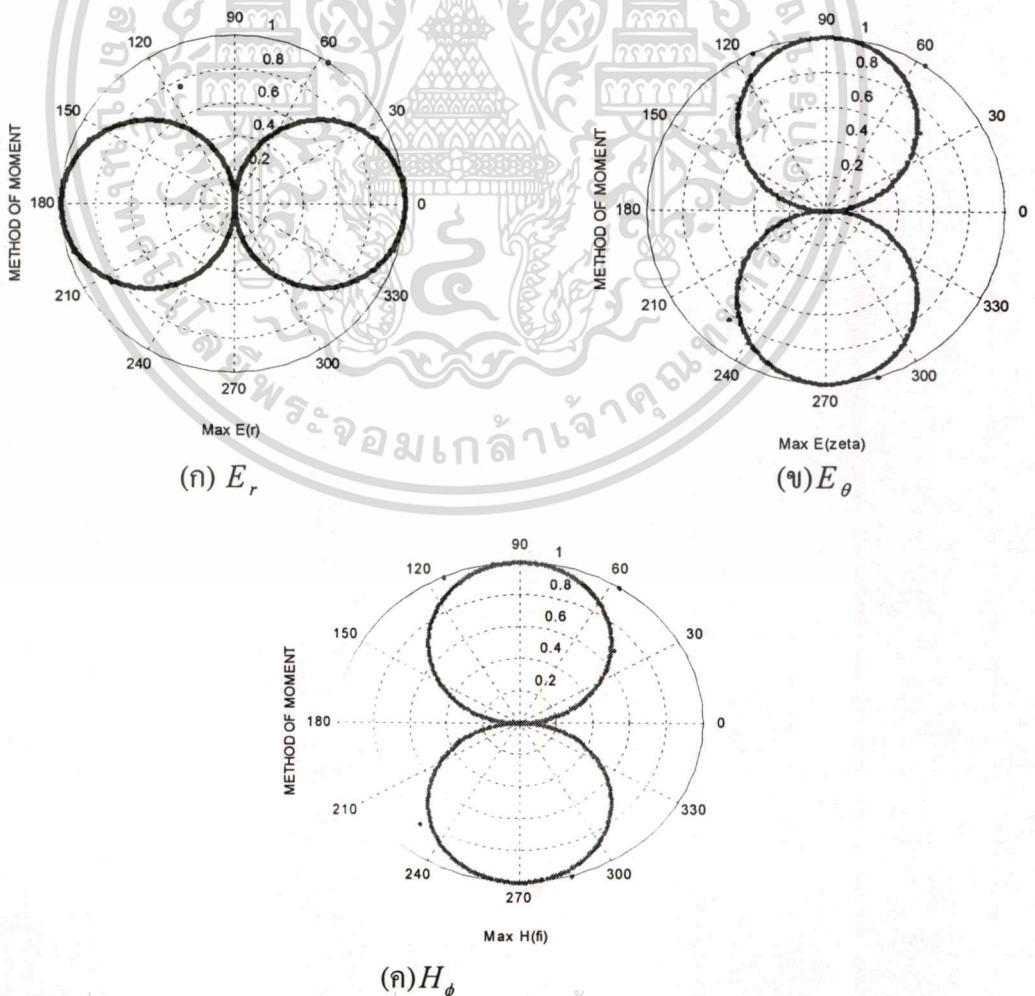
$$E_{\theta} = Z_o \frac{I}{2\pi} \int_{\Delta\lambda} \frac{\sin \theta}{|r^{\text{obs}} - r^{\text{src}}|} \left(1 + \frac{1}{jk_o |r^{\text{obs}} - r^{\text{src}}|} - \frac{1}{k_o^2 |r^{\text{obs}} - r^{\text{src}}|^2} \right) e^{-jk_o |r^{\text{obs}} - r^{\text{src}}|} dz \quad (7.16)$$

$$E_{\phi} = 0 \quad (7.17)$$

$$H_r = H_{\phi} = 0 \quad (7.18)$$

$$E_r = Z_o \frac{I}{2\pi} \int_{\Delta\lambda} \frac{\sin \theta}{|r^{\text{obs}} - r^{\text{src}}|} \left(1 + \frac{1}{jk_o |r^{\text{obs}} - r^{\text{src}}|} \right) e^{-jk_o |r^{\text{obs}} - r^{\text{src}}|} dz \quad (7.19)$$

ผลการคำนวณ โดยการใช้ MOM ในโคออร์ดิเนต ทรงกลม rectangular และ โพลาร์ของ แผ่นวงจร พิมพ์รูปตัว "T" หรือไดโพล แสดงในรูปที่ 7.20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ในรูปที่ 7.19 แสดงการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลโดยการใช้ Moment Method ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.7 ผลการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโครงข่ายประสาทเทียมกับอัลกอริทึมอื่นๆ

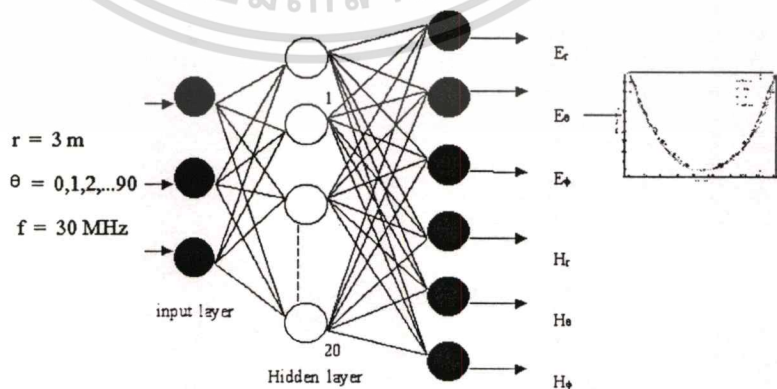
ผลการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าจากสายอากาศไดโพลหรือแผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “ I ” โครงข่ายประสาทเทียมที่ออกแบบนี้ใช้เวลาในการเรียนรู้ 1 ชั่วโมง โดยกำหนดให้มีค่าผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ 0.01 dB เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้แล้วค่าถ่วงน้ำหนักและค่าความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตโหนดจะถูกเก็บไว้เพื่อใช้ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าต่อไป

การทดสอบโครงข่ายผู้ใช้งานสามารถป้อนค่าอินพุตซึ่งประกอบด้วย ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและจุดสังเกต (r) มุมของสายอากาศและจุดสังเกต (θ) และความถี่ (f) เข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อจะทำนายการแพร่สนามไฟฟ้า (ค่าที่ป้อนให้โครงข่ายสามารถใส่ค่าที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 5 ของการคำนวณแต่ละขั้น(step) ซึ่งไม่ได้ทำการสอนโครงข่ายประสาทเทียมไว้)

จากนั้นโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการทำนายค่าสนามไฟฟ้าออกมา ผลของการคำนวณโดยโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังรูปที่ 7.22 (ก) - (จ)

การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้า จากการเปลี่ยนแปลงมุมของจุดสังเกตเทียบกับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ทำได้โดยการป้อนค่ามุมของแหล่งกำเนิด(θ) เป็นค่าใดก็ได้ ตามรูปที่ 7.22 ในที่นี้ป้อนค่ามุมเป็นค่าต่อเนื่องจาก 0 องศา ถึง 90 องศา แล้วให้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามมุมรอบสายอากาศไดโพล ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 7.20

จากรูปแสดงการเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าในเชิงมุม โดยการคำนวณจากโครงข่ายประสาทเทียม (●) MOM (□) CEM (O) และจากการวัดจริง(---) จากผลการคำนวณพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าการทำนายใกล้เคียงกับการวัดจริงมาก(1 – 2 dB)และใช้เวลาในการคำนวณ 2 นาที ในขณะที่ CEM ให้ค่าผิดพลาดมากที่สุด(5- 7 dB)ใช้เวลาในการคำนวณ 5 นาที และ MOM ให้ค่าการคำนวณ (1- 3 dB) แต่ใช้เวลาในการคำนวณ 2 ชั่วโมง



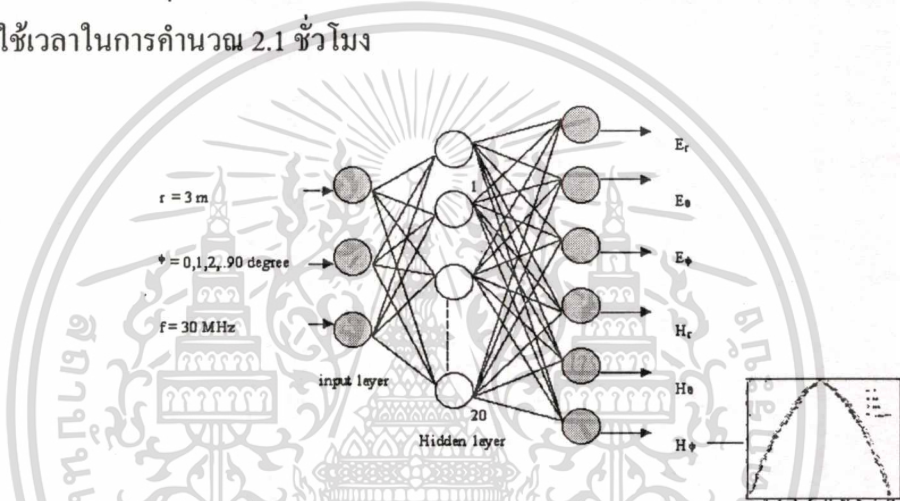
รูปที่ 7.20 แสดงการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล

ของสายอากาศไดโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าของวงจรรูปสี่เหลี่ยมหรือสายอากาศรูป จากการเปลี่ยนแปลงมุมของจุดสังเกตเทียบกับแหล่งกำเนิดสัญญาณทำได้โดยการป้อนค่ามุมของแหล่งกำเนิด(ϕ) เป็นค่าใดก็ได้ ตามรูปที่ 7.22 ในที่นี้ป้อนค่ามุมเป็นค่าต่อเนื่องจาก 0 องศา ถึง 90 องศา แล้วให้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามมุมรอบสายอากาศรูป ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 7.23

จากรูปแสดงการเปรียบเทียบสนามไฟฟ้าในเชิงมุม โดยการคำนวณจาก โครงข่ายประสาทเทียม (●) MOM(□) CEM(O) และจากการวัดจริง(---) จากผลการคำนวณพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าการทำนายใกล้เคียงกับการวัดจริงมาก(1 – 3 dB)และใช้เวลาในการคำนวณ 3 นาที ในขณะที่ CEM ให้ค่าผิดพลาดมากที่สุด(5- 8 dB)ใช้เวลาในการคำนวณ 5 นาที และ MOM ให้ค่าการคำนวณ (1- 3 dB) แต่ใช้เวลาในการคำนวณ 2.1 ชั่วโมง

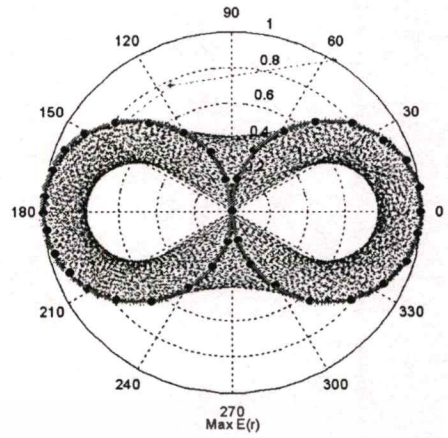
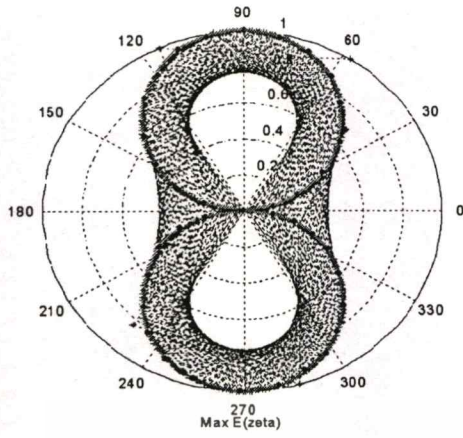


รูปที่ 7.21 แสดงการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศรูป

โครงข่ายประสาทเทียมที่ออกแบบนี้ใช้เวลาในการเรียนรู้ 2 ชั่วโมง โดยกำหนดให้มีค่าผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ 0.01 dB เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้แล้วค่าถ่วงน้ำหนักและค่าความสัมพัทธ์ของ อินพุตและเอาต์พุตโหนดจะถูกเก็บไว้เพื่อใช้ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าต่อไป

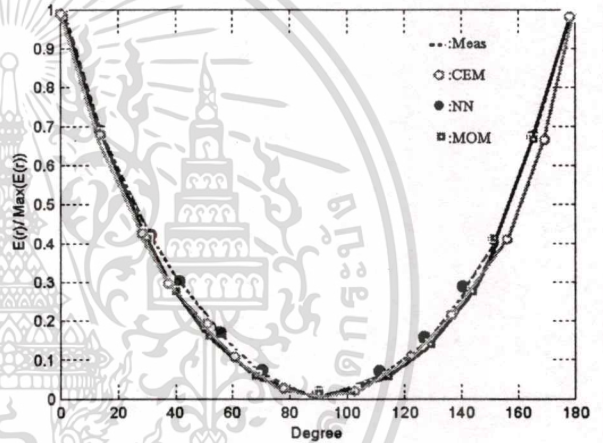
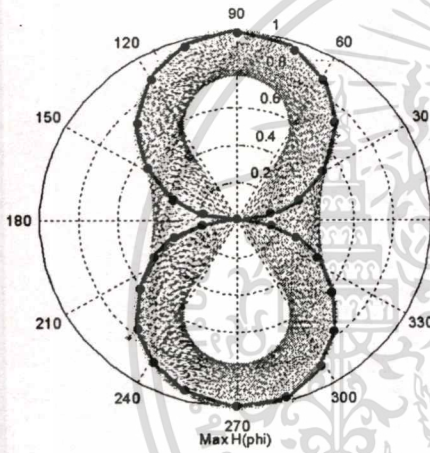
การทดสอบโครงข่ายผู้ใช้งานสามารถป้อนค่าอินพุตซึ่งประกอบด้วย ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและจุดสังเกต (r) มุมของสายอากาศและจุดสังเกต(θ) และความถี่ (f) เข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อจะทำนายการแพร่สนามไฟฟ้า (ค่าที่ป้อนให้โครงข่ายสามารถใส่ค่าที่อยู่ระหว่าง 0° ถึง 5° ของการคำนวณแต่ละขั้น (step) ซึ่งไม่ได้ทำการสอนโครงข่ายประสาทเทียมไว้)

จากนั้นโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการทำนายค่าสนามไฟฟ้าออกมา ผลของการคำนวณโดยโครงข่ายประสาทเทียมแสดงดังรูปที่ 7.23 (ก) - (จ)



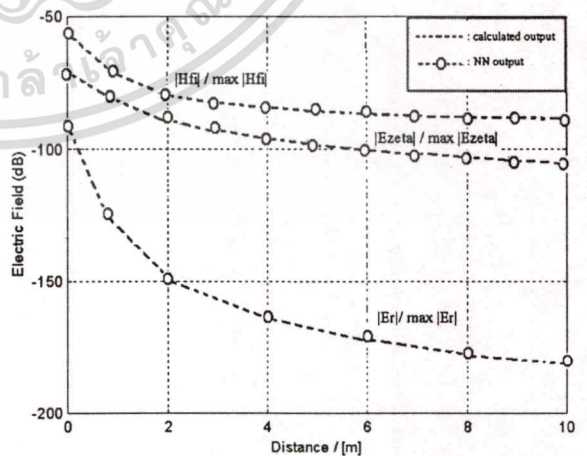
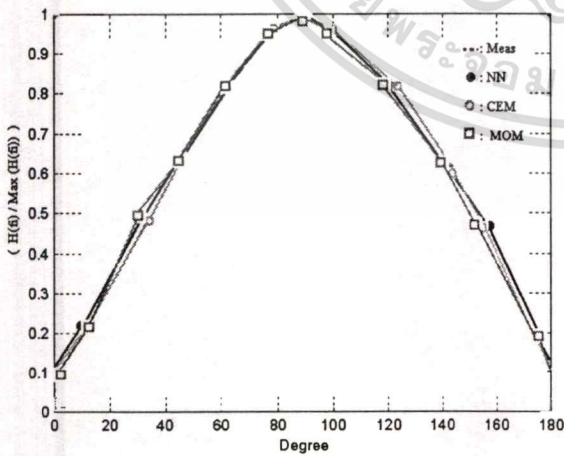
(ก) E_r

(ข) E_θ



(ค) H_ϕ

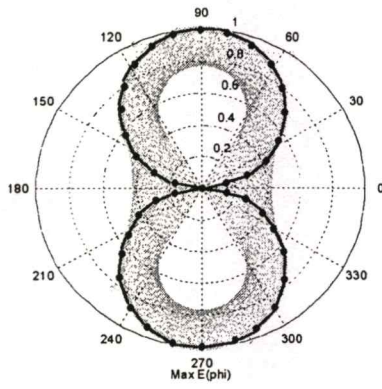
(ง) E_θ กับมุม



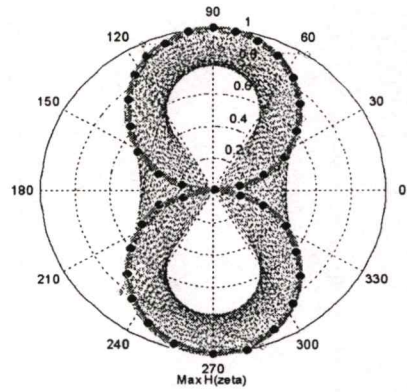
(จ) H_ϕ กับมุม

(ฉ) E_e, E_θ, H_ϕ กับระยะทาง

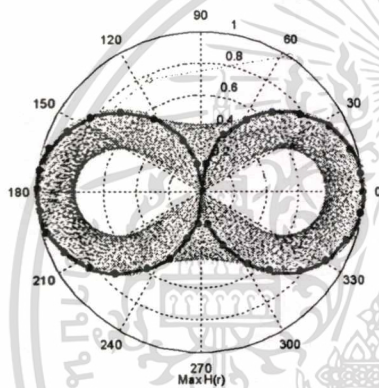
รูปที่ 7.22 แสดงการทำนายการแพร่คลื่น โดยการใช้องค์ข่ายประสาทเทียม (o: MOM, -: NN) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของหลายทองแดงรูปตัว "I" ที่ความถี่ 300 MHz ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามละเมิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



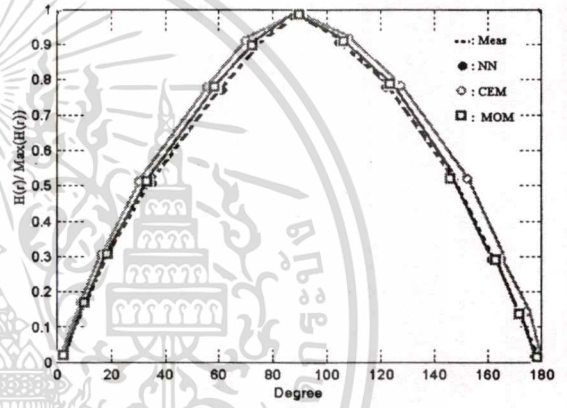
(ก) E_ϕ



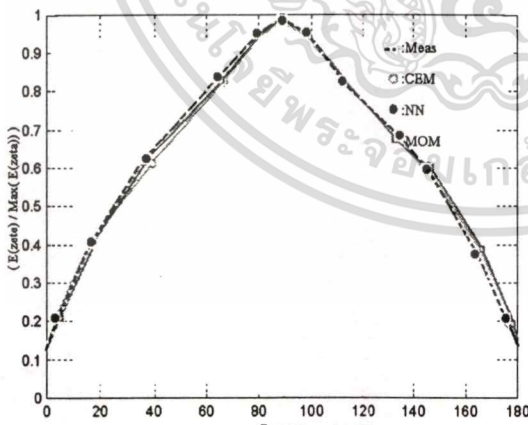
(ข) H_ϕ



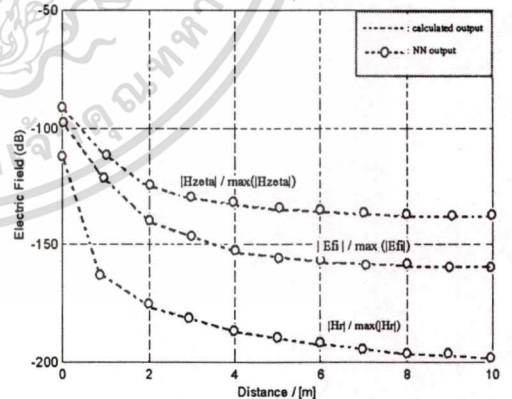
(ค) H_ϕ



(ง) H_ϕ กับมุม



(จ) E_ϕ กับมุม



(ฉ) H_r, H_θ, E_ϕ กับระยะทาง

รูปที่ 7.23 แสดงการทำนายการแพร่คลื่น โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (o:MOM, -:NN) ของลายทองแดงรูปสี่เหลี่ยมหรือรูป

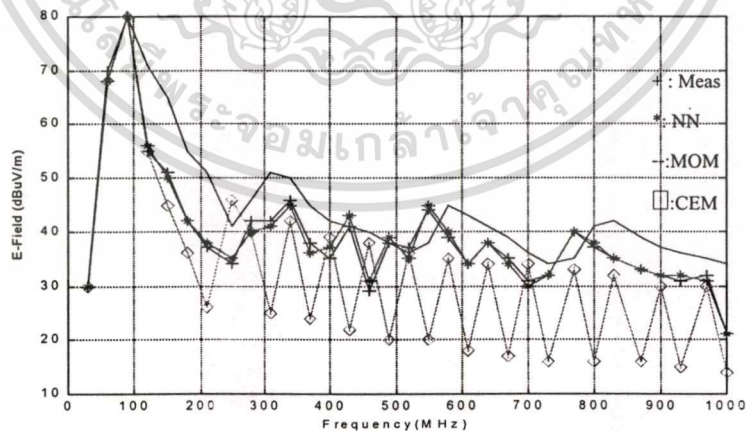
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศไดโพลและสายอากาศรูปโดยการป้อนค่าอินพุตของโครงข่ายเป็นมุมของจุดสังเกตและแหล่งกำเนิดสัญญาณ(θ) โดยการกำหนดความถี่ที่ใช้ในการคำนวณ (f) เป็น 30 MHz ผลของการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับการวัดจริงมากแสดงในรูปที่ 7.22 และ 7.23

เพื่อจะทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าของวงจรทั้งสองในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณ และจุดสังเกต (r) จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ตามมาตรฐานการทดสอบทาง EMC (3 m) และมุมของจุดสังเกต(θ) เป็น 0 องศา อินพุตโหนด ของโครงข่ายประสาทเทียมถูกกำหนดให้มีค่าเป็นความถี่(f) ในช่วง 30 MHz ถึง 1GHz

เมื่อทดสอบการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าระยะไกล จากสายอากาศไดโพลหรือ แผ่นวงจรพิมพ์รูปตัว “ I ” และการแพร่สนามไฟฟ้าจากสายอากาศรูป โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1GHz แล้วนำผลการคำนวณที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงดังรูปที่ 7.24

จากผลการคำนวณในรูป พบว่าสนามไฟฟ้าจากการทำนายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด(แตกต่าง 1 ถึง 2 dB) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้วิธี MOM พบว่าวิธี Method of Moment ให้ลักษณะรูปคลื่น(Tendency)ที่ใกล้เคียงกันและใช้เวลาในการคำนวณ 3 ชม. แต่ความละเอียดของการทำนายโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมจะมากกว่า ในส่วนของการคำนวณโดยใช้วิธี CEM พบว่าแอมพลิจูดจะแตกต่างกันประมาณ 7 ถึง 8 dB ที่ความถี่สูง อย่างไรก็ตามรูปของคลื่น(tendency) จากการคำนวณโดยวิธีของ CEM คล้ายกับผลจากการคำนวณโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม โดยเฉพาะที่ฮาร์มอนิกส์เลขคี่ใช้เวลาในการคำนวณ 10 นาที



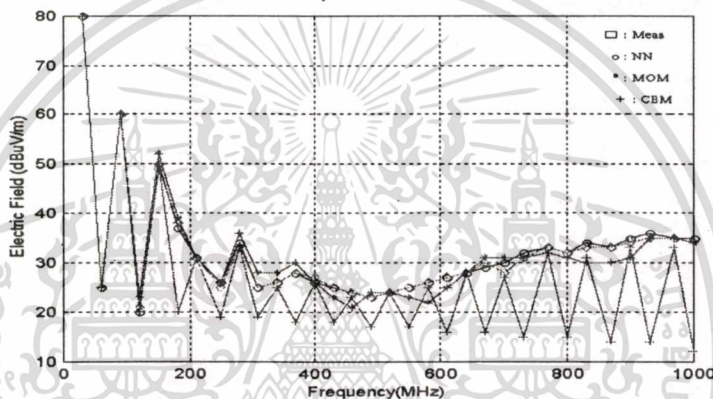
รูปที่ 7.24 แสดงผลการคำนวณโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับการใช้ MOM CEM และการวัดจริงของสายอากาศไดโพล หรือ “ I ”

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณสนามไฟฟ้าซึ่งแพร่ออกมาจากสายอากาศรูปหรือ การปรับรัศมีของวงจร โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม MOM CEM และการวัดจริง พบว่าผลการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมให้ค่าใกล้เคียงกับการวัดจริง โดยแตกต่าง

ประมาณ 2 dB โค้งขำยใช้เวลาในการเรียนรู้ 1 ชม. ในขณะที่การคำนวณโดยใช้ CEM ใช้เวลา 10 นาทีและให้ค่าผิดพลาดมากที่สุดโดยเฉพาะที่ฮาร์โมนิกส์เลขคู่ (แตกต่างกันประมาณ 5- 10 dB)

ผลของการคำนวณโดยใช้วิธีการ MOM ให้ค่าผิดพลาดประมาณ 1-3 dB และใช้เวลาในการคำนวณ 3 ชม. รูปที่ 7.25 แสดงผลการเปรียบเทียบของสนามไฟฟ้าจากวงจรรูป รูปคลื่นของการแพร่สนามไฟฟ้า(tendency) ของการคำนวณโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม การวัดจริงและการใช้วิธี MOM มีลักษณะใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเฉพาะระดับของสนามไฟฟ้าเท่านั้น

ตารางที่ 7.2 แสดงผลการเปรียบเทียบการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าจากสายอากาศแบบไดโพลและแบบลูป(ซึ่งเป็นโมเดลที่ใช้ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าที่นิยม) โดยเปรียบเทียบกับวิธีการของ MOM CEM และ NN จากผลการคำนวณพบว่าความแม่นยำของการทำนายโดยใช้ NN มากที่สุดและเสียเวลาในการคำนวณน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับวิธี MOM และ CEM



รูปที่ 7.25 แสดงผลการคำนวณสนามไฟฟ้าจากสายอากาศลูปรัศมี 3 cm โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม MOM CEM และการวัดจริง

ตารางที่ 7.2 แสดงผลการเปรียบเทียบการใช้อัลกอริทึม MOM CEM และ NN ในการทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าจากสายอากาศไดโพลและลูป

อัลกอริทึม	Error (dB)		เวลาในการคำนวณ (นาที)
	Dipole	Loop	
MOM	1-3	1-3	120 (สำหรับไดโพล) 130 (สำหรับลูป)
CEM	5-7	5-8	5 (สำหรับไดโพล) 5 (สำหรับลูป)
Neural Network	1-2	1-3	2 (สำหรับไดโพล) 3 (สำหรับลูป)

บทที่ 8

สรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการแบบใหม่ในการจดจำและจำแนกสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) จากการวัดในสนามระยะใกล้ (Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field) โดยจะศึกษาพฤติกรรมการแพร่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากชิ้นส่วนกระแสนขนาดเล็ก วงจรรูป และวงจรดิจิทัลอย่างง่าย โดยการปรับโครงสร้างทางกายภาพของลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ เช่น ความยาว ความกว้าง มุม รัศมี เป็นต้น ผลของการวัดสนามแม่เหล็กระยะใกล้และสนามไฟฟ้าระยะไกล จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ที่นิยม เช่น โคโพล ลูป MOM CEM เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการคำนวณและยืนยันความถูกต้องของการวัด

ข้อมูลการวัดที่ได้จากการวัดและการคำนวณด้วยโปรแกรมจะถูกนำมาผ่านกรรมวิธีการทางสถิติเพื่อป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับรองรับข้อมูลสเปกตรัมของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า โครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์นี้ถูกประยุกต์ใช้ใน ลักษณะคือ

1. ในการจดจำและจำแนกสนามแม่เหล็กระยะใกล้และสนามไฟฟ้าระยะไกล ซึ่งแผ่ออกจากแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกัน อาทิเช่น มีการปรับความยาว ความกว้าง มุมของลายทองแดง จำนวน เส้นของลายทองแดง รูปร่างของเส้นทองแดง และวงจรดิจิทัลอย่างง่าย (AND, OR, NAND, NOR, EX-OR, D F/F, R-S F/F)

2. ประยุกต์ใช้ในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลซึ่งแพร่จากวงจรเมื่อวัดบนพื้นที่ทดสอบมาตรฐาน โดยอาศัยสนามแม่เหล็กจากการวัดในระยะใกล้

8.1 การจดจำและจำแนกสนามแม่เหล็กระยะใกล้และสนามไฟฟ้าระยะไกล

โครงข่ายประสาทเทียมแบบ 3 ชั้น ถูกสอนโดยการใช้ค่าอินพุตจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากการวัดในระยะใกล้และระยะไกลโดยการใช้กรรมวิธีทางสถิติ เพื่อลดข้อมูลในส่วนอินพุตของโครงข่าย ส่วนเป้าหมายในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมกำหนดให้เป็นเลขดิจิทัล จำนวน 6 บิต ซึ่งสัมพันธ์กับจำนวนแฮชพุตที่ได้จากการคำนวณของโครงข่าย โครงข่ายประสาทเทียม สามารถจำแนกลายทองแดงและชนิดของวงจรดิจิทัลบนแผ่นวงจรพิมพ์ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันหลายชนิดได้โดยการใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้และระยะใกล้ที่แพร่ออกจากวงจรพิมพ์

8.2 ประยุกต์ใช้ในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลซึ่งแพร่จากวงจรเมื่อวัดบนพื้นที่ทดสอบมาตรฐาน โดยอาศัยสนามแม่เหล็กจากการวัดในระยะใกล้

ในการทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกล โดยอาศัยสนามแม่เหล็กจากการวัดในสนามระยะใกล้ โครงข่ายประสาทเทียมหลายลักษณะถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยเปลี่ยนแปลงจำนวนของอินพุต ฮิดเดนและเอาต์พุต โหนด ข้อมูลที่ใช้ป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ทำนายการแพร่สนามไฟฟ้าในระยะไกลคือแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กระยะใกล้

โครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการสอนแล้วสามารถทำนายสนามไฟฟ้าระยะไกลจากการใช้สนามแม่เหล็กระยะใกล้ โดยการใช้เพียงแอมพลิจูดของการแพร่คลื่นในระยะใกล้เท่านั้น

ประโยชน์ของโครงข่ายประสาทเทียมคือใช้เวลาในการคำนวณน้อยมากเมื่อเทียบกับโมเดลอื่น นอกจากนี้เอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณของโครงข่ายประสาทเทียมยังมีความแม่นยำมากเมื่อเทียบกับ Moment of Method และ Current Element Model ซึ่งเป็นที่นิยมในการทำนายสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

8.3 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นของวงจรดิจิทัลหรือลายทองแดงอย่างง่ายในวิทยานิพนธ์นี้สัญญาณอินพุตที่ถูกป้อนเข้าวงจรเพื่อกำเนิตสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเป็นแบบพัลส์และไม่ได้พิจารณาถึงผลของ ringing effect ด้วยฉะนั้นการคำนวณการแพร่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในบางความถี่จึงให้ผลการคำนวณที่ผิดพลาด ดังนั้นในการปรับปรุงโมเดลที่ใช้ในการคำนวณจะต้องทำการชดเชยและพิจารณาผลของ Ringing effect ด้วย

2. อุปกรณ์ที่ถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบไม่ซับซ้อน ดังนั้นโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมในวิทยานิพนธ์นี้ยังไม่สามารถประยุกต์ใช้งานจริงได้ การปรับเปลี่ยนและศึกษาพฤติกรรมการแพร่สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของวงจรที่ซับซ้อนมากขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น เช่น การศึกษาพฤติกรรมของการปฏิสัมพันธ์ (interactive) ระหว่าง วงจร การศึกษาพฤติกรรมของแผ่น PCB ที่มีหลายชั้น(layer) การข้ามช่องของสัญญาณ(cross talk) เป็นต้น และข้อมูลของการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสัมพันธ์กับรูปร่างลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์จะต้องถูกเพิ่มลงในฐานข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการจำแนกลักษณะของวงจรต่อไป

3. โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบ OFF Line ฉะนั้นจะทำให้ต้องเสียเวลาในการสอนใหม่ทุกครั้งที่มีข้อมูลเข้ามาใหม่จึงไม่สะดวก ดังนั้นจะต้องทำการปรับโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบ ON Line เพื่อความสะดวกในการใช้งานต่อไป

บรรณานุกรม

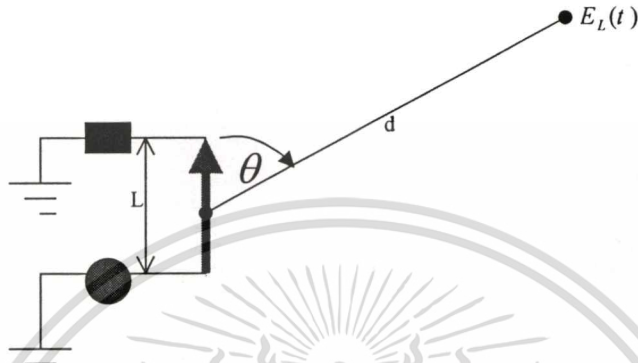
- [1] Y.Ji, J.Chen, T.H.Hubing, J. L. Drewniak, "Application of a Hybrid FEM/MOM Method to a Canonical PCB Problem," IEEE Intern. Symp. EMC, pp 91-96, August 1999.
- [2] Yang-Oink Zhang, Abraham Candle, "Compensatory Neurofuzzy Systems with Fast Learning Algorithms," IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 9, no.1, pp.83-104, 1988.
- [3] A. C. Ludwig, "Near-Field far-field transformations using spherical wave expansions," IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol. AP-15, no.2, pp.214-220, March 1971.
- [4] T.H. Hubing and J.F. Kaufman, "Modeling the Electromagnetic Radiation from Electrically Small Table-Top Products," IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol.31, no.1, pp.74-84, February 1989.
- [5] Martin T. Hagan, and Mohammad B. Menhaj, "Training Feedforward Networks with The Marquardt Algorithm," IEEE Trans. on Neural Networks, vol.5, no.6, pp989-993, November 1994.
- [6] M.Kanda, "Standard probes for electromagnetic field measurements," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol.AP-41, pp.1349-1364, October1993.
- [7] A. Tennant, G. Junkin, P. Anderson, "Antenna far-field predictions from two phaseless cylindrical near-field measurements," Electronic Letters, vol.28, no.23, pp. 2120-2121, November 1992.
- [8] G.J. Burke and A.J. Poggio, "Numerical Electromagnetic Code(NEC) Method of Moments," Naval Electronics Systems Command, Naval Ocean System Center, San Diego CA 92152.
- [9] Andrew Rocznik, Emil M. Petriu, and George I.Costache, "3-D Electromagnetic Field Modeling Based On Near Field Measurements," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. Brussels, Belgium, pp. 890-896, June 1996.
- [10] C. Johnson, H A. Ecker, J, S, Hollis, "Determination of far-field antenna patterns from near-field measurements," Proc. of the IEEE, vol.61, no.12, pp. 1668-1694, December 1973.
- [11] J. D. Osburn and D. R. J.White, "Methodology for Developing Expected Values of Radiated Emissions from Cables," Record of the 1997 IEEE Intern. Symp. on EMC, pp.39-45, October 1979.

- [12] S.Criel, K. Haelvoet, L. Martens, D.De Zutter “Theoretical and Experimental Quantitative Characterization of the Near-Fields of Printed Circuit Board Interconnection Structures,” Proc.1995 IEEE Intern. Symp. EMC, pp.471-474, August1995.
- [13] Takuya Miyashita, Shuichi Nitta, Atsuo Mutoh “Prection of Noise Reduction Effect of Ferrite Beads on Electromagnetic Emission from a Digital PCB,” IEEE Intern. Symp. EMC, pp.866-871, August 1998.
- [14] IPC-D-317A , “Design Guidelines for Electronic Packaing Utilizing High-Speed Techniques,” pp.13-36, January 1995.
- [15] S. Ratnajeevan, H. Hoole, “Artificial Neural Networks in the Solution of Inverse Electromagnetics Field Problems”, IEEE Trans. On Magnetics, Vol.18, No.23, pp.664-669, 1993.
- [16] andrew Roczniak, Emil M. Petriu, and Gorge I. Costach “3-D electromagnetic Field Modeling Based on Near Field Measurements” IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Brussels, Belgium, June, 1996.
- [17] A.Tennant, G.Junkin, P. Anderson, “Antenna Far-Field Predictions From Two Phaseless Cyclindrical Near-Field Measurements” Electronic Letters, Vol.28, No.23, pp.2120-2121, November, 1992.
- [18] A.C.Ludwig, “Near-Field Far_Field Transformations Using Spherical Wave Expansions” , IEEE, Trans.On Antenna and Propagation, Vol.AP-156, No.2, Mach, 1971.
- [19] C.R. Paul, “A Comparision of the Contributions of Common-Mode and Differential-Mode Currents in Radiated Emissions”, IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility, Vol 31, No.2, pp.189-193, May, 1989.
- [20] T.H.Hubilg and J.F. Kaufman, “Modeling the Electromagnetic Radiation form Electrically Compatibility”, Vol.31, No.1, pp.74-84, Feburary, 1989.
- [21] CISPR 16-1, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and method, Amendment 1 , 2002-8.
- [22] CISPR 16-2, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and method, Edition 1.2 1 , 2002-10.
- [23] CISPR 16-4, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and method, Edition 1 , 2002-5.
- [24] CISPR 15, Limit and method of measurement of radio disturbance characteristic of electric lighting and similar equipment, Edition 6.2, 2002-10.

- [25] CISPR 22, Information technology equipment Radio disturbance characteristics Limit and methods of measurement, Amendment 2, 2002-10.
- [26] Shiro Yoshida, Hirokazu Tohya, "Novel decoupling circuit enabling notable electromagnetic noise suppression and high-density packaging in a digital printed circuit board", IEEE symposium, Denver, Colorado, pp.641-646, USA, 1998.
- [27] F. Sabath, H.Garbe, "The analysis of PCB layout using a hybrid MOM-MTL method", IEEE symposium, Denver, Colorado, pp.671-676, USA, 1998.
- [28] Mark I. Montrose, "Time and frequency domain analysis for right angle corners on printed circuit board traces", IEEE symposium, Denver, Colorado, pp.551-556, USA, 1998.
- [29] Norio Matsui, Raj Raghuran, and Dileep Divekar, "SPICE based analysis of radiation from PCBs and related structures", IEEE symposium, Denver, Colorado, pp.320-325, USA, 1997.
- [30] M. Leone, H. Bruns, H. Singer, "Fast EMC analysis for printed circuit boards using an equivalent-wire method of moments", IEEE symposium, Denver, Colorado, pp. 7-12, USA, 1998.
- [31] G. S. Ferreria, A. Raizer, C.Chirstopoulos, "Simulation the effects of printed circuit board layout on current flow and emission", IEEE symposium, Denver, Colorado, pp. 390-395, USA, 1998.
- [32] Bruce Archambeault, Omar M.Ramahi, Colin Brench, "EMI/EMC Computational modeling handbook", Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, USA, 1997.

ภาคผนวก ก. ผลการจำลองทางโปรแกรม

การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากชิ้นส่วนของกระแส

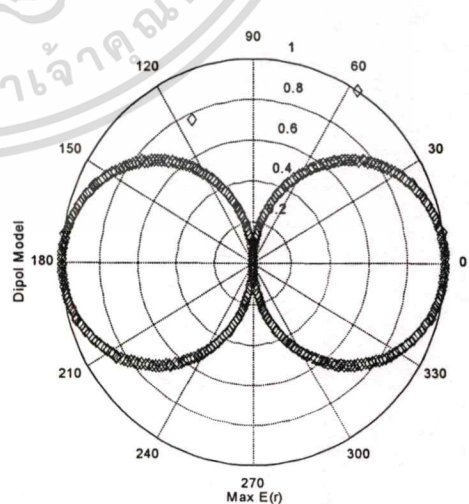
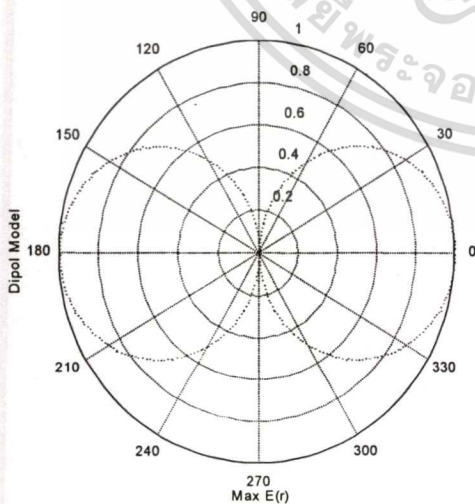


รูปที่ ก.1 แสดงชิ้นส่วนกระแส

$$E_e(t) = E_e(\theta) \cos\left[2\pi f\left(t - \frac{d}{c}\right)\right]$$

$$E_e(\theta) = \frac{Z_0 |I|}{2d} \frac{1}{c} \sin(\theta)$$

$$i(t) = |I| \sin(2\pi ft)$$

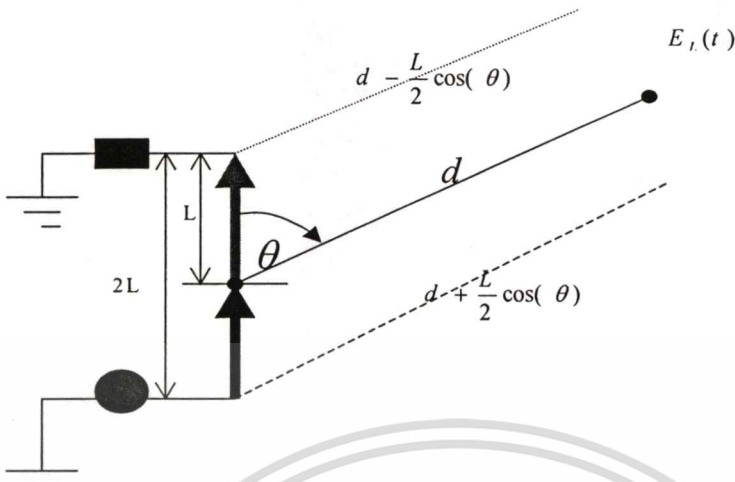


(ก) การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล (ข) การคำนวณโดยการใช้ โครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ ก.2 แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณการแพร่คลื่นจากชิ้นส่วนกระแสและโครงข่าย

เอไอเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเอกสารได้ดำเนินการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งให้ทราบเพื่อปรับปรุงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากชิ้นส่วนของกระแสที่มีความยาวมากขึ้น



รูปที่ ก.3 แสดงชิ้นส่วนกระแสความยาว 2 เท่า

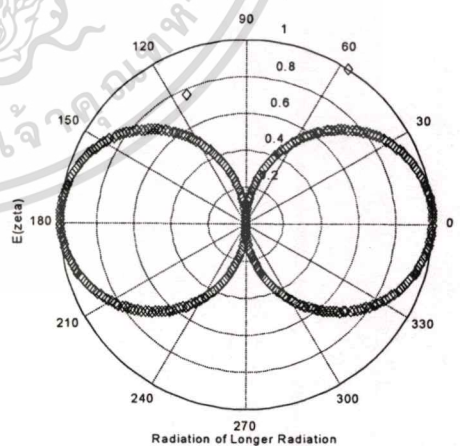
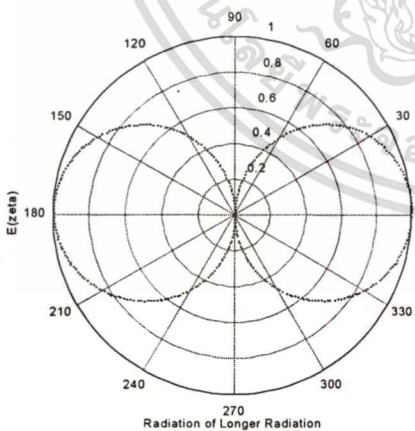
$$E_{2L}(t) = E_{2L}(\theta) \cos\left[2\pi f \left(t - \frac{d}{c}\right)\right]$$

$$E_{2L}(\theta) = 2E_L(\theta) \cos\left[\pi L_{\lambda}(\cos(\theta) - 1)\right]$$

รูปแบบของคลื่น $E_{2e}(\theta)$ ความยาวเป็น 2 เท่าของ E_e ความยาวคือ $2L_{e\lambda}$ เมื่อ $L_{e\lambda} \rightarrow 0$

$$E_{2e}(t) = E_{2e}(\theta) \cos\left[2\pi f \left(t - \frac{d}{c}\right)\right]$$

$$E_{2e}(\theta) = \left(\frac{Z_0 |I| \sin(\theta)}{2\pi d}\right) \sin\left[2L_{e\lambda}\pi(\cos(\theta) - 1)\right] / \cos(\theta - 1)$$

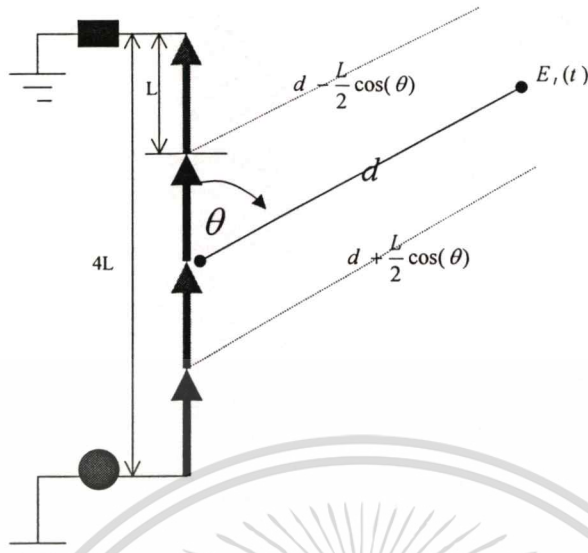


(ก) การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล (ข) การคำนวณโดยการใส่ โครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ ก.4 แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณการแพร่คลื่นจากชิ้นส่วนของกระแสความยาว 2 เท่า และ โครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรที่มีความยาว 4 เท่าของ $E_e(\theta)$, $L_\lambda = 2L_{e\lambda}$

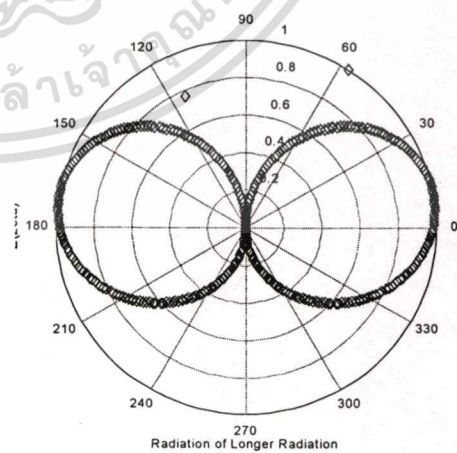
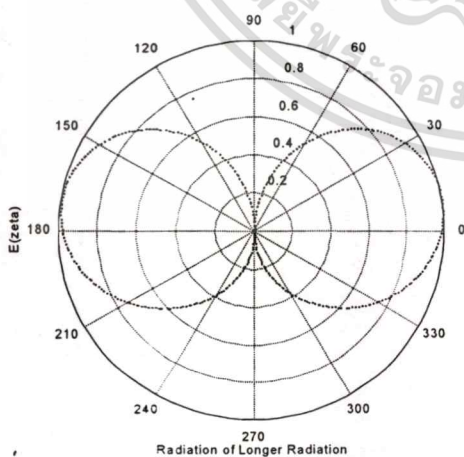


รูปที่ ก.5 แสดงชิ้นส่วนกระแศความยาว 4 เท่า

$$E_{4e}(\theta) = 2E_{2e}(\theta) \cos[2L_{e\lambda}\pi(\cos(\theta) - 1)]$$

$$= 2 \left\{ \frac{E_e(\theta)}{\pi L_{e\lambda}} \sin\left[\frac{2L_{e\lambda}\pi(\cos(\theta) - 1)}{\cos(\theta) - 1} \right] \right\} \cos[2L_{e\lambda}\pi(\cos(\theta) - 1)]$$

$$\left[\frac{E_e(\theta)}{\pi L_{e\lambda}} \right] \sin\left[\frac{4L_{e\lambda}\pi(\cos(\theta) - 1)}{\cos(\theta) - 1} \right]$$



(ก) การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล (ข) การคำนวณโดยการใช้ โครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ ก.6 แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณการแพร่คลื่นจากชิ้นส่วนกระแศความยาว 4 เท่าและ

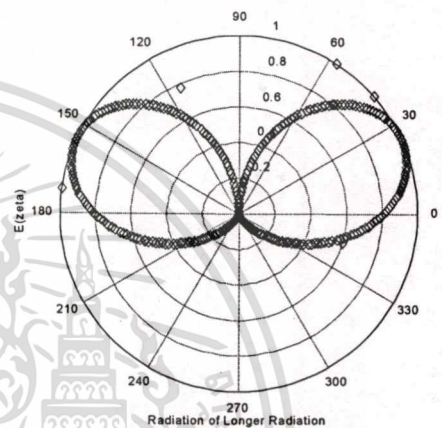
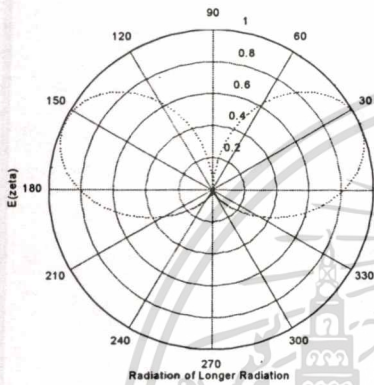
เอกสารนี้เป็โครงการที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรที่มีความยาว 8 เท่าของ $E_e(\theta)$, $L_\lambda = 4L_{e\lambda}$

$$E_{4e}(\theta) = 2E_{e}(\theta) \cos[4L_{e\lambda}\pi(\cos(\theta) - 1)]$$

$$= 2 \left\{ \frac{E_e(\theta)}{\pi L_{e\lambda}} \sin\left[\frac{4L_{e\lambda}\pi(\cos(\theta) - 1)}{\cos(\theta) - 1}\right] \right\} \cos[4L_{e\lambda}\pi(\cos(\theta) - 1)]$$

$$\left[\frac{E_e(\theta)}{\pi L_{e\lambda}} \right] \sin\left[\frac{8L_{e\lambda}\pi(\cos(\theta) - 1)}{\cos(\theta) - 1}\right]$$

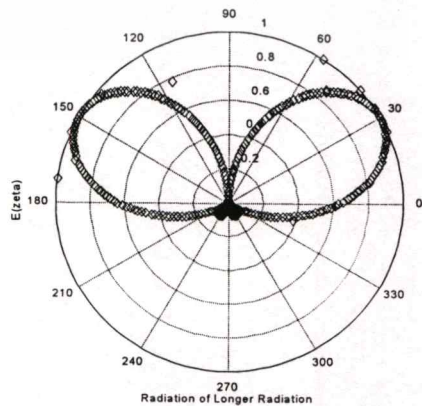
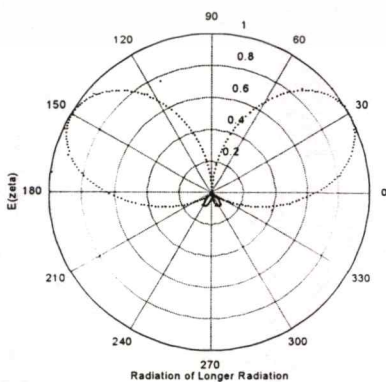


(ก) การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล (ข) การคำนวณโดยการใช้องค์ประกอบประสาทเทียม

รูปที่ ก.7 แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณการแพร่คลื่นจากชิ้นส่วนกระแสดความยาว 8 เท่า และโครงข่ายประสาทเทียม

ดังนั้นชิ้นส่วนกระแสดความยาวต่างๆสามารถคำนวณได้ดังนี้

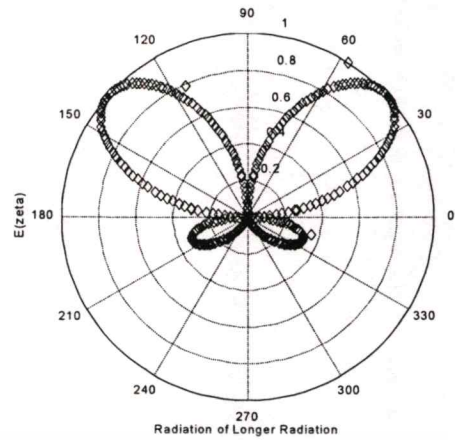
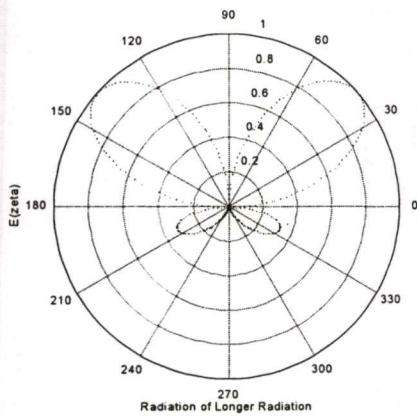
$$E_{Ne}(\theta) = \left[\frac{E_e(\theta)}{\pi L_{e\lambda}} \right] \sin\left[\frac{NL_{e\lambda}\pi(\cos(\theta) - 1)}{\cos(\theta) - 1}\right]$$



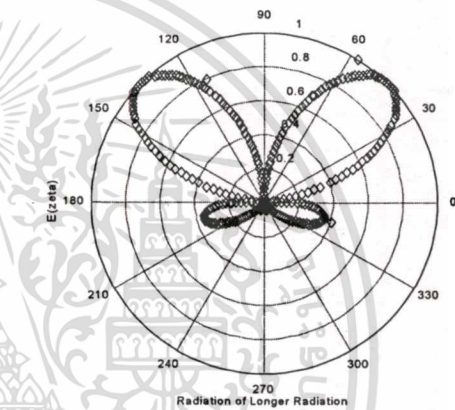
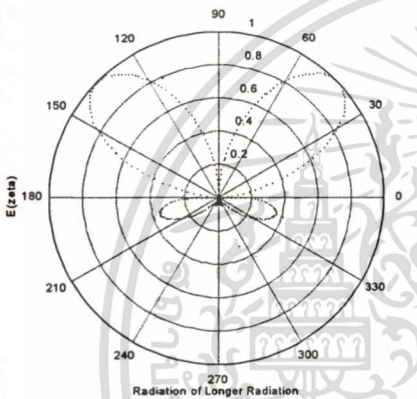
(ก) การแพร่คลื่นของไดโพลยาว 10 เท่า (ข) การคำนวณโดยการใช้องค์ประกอบประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่มีการค้า

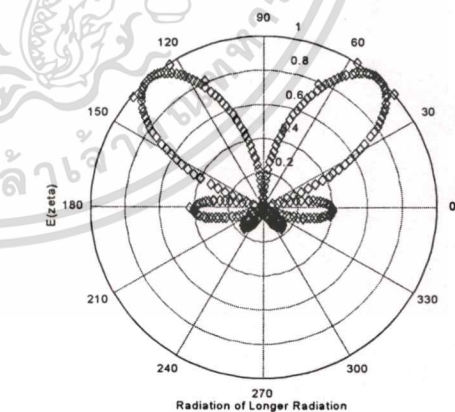
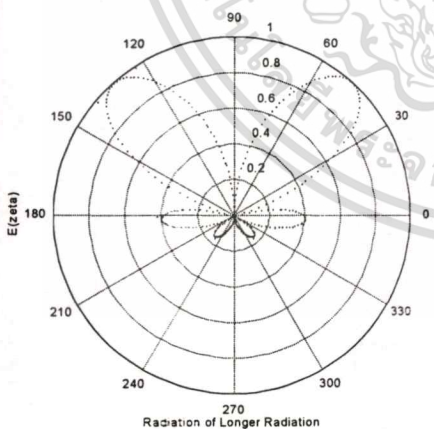
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) การแพร่คลื่นของไดโพลยาว 16 เท่า (ง) การคำนวณโดยการใช้ โคจรข่ายประสาทเทียบ



(จ) การแพร่คลื่นของไดโพลยาว 18 เท่า (ฉ) การคำนวณโดยการใช้ โคจรข่ายประสาทเทียบ

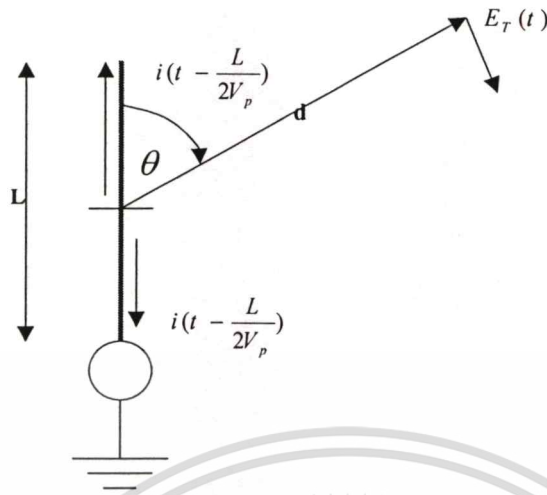


(ช) การแพร่คลื่นของไดโพลยาว 22 เท่า (ซ) การคำนวณโดยการใช้ โคจรข่ายประสาทเทียบ

รูปที่ ก.9 แสดงการแพร่คลื่นของชิ้นส่วนกระที่มีความยาวมากกว่าความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่คลื่นจากชิ้นส่วนกระแสแบบปลายเปิด

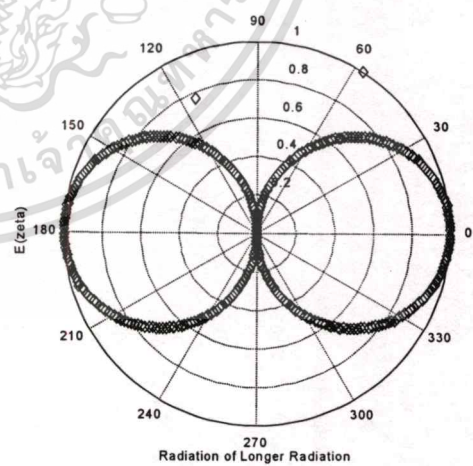
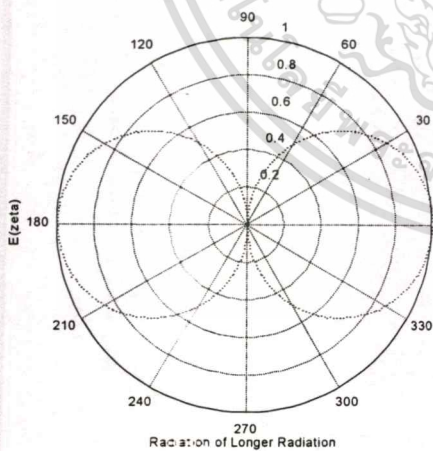


รูปที่ ก.10 แสดงชิ้นส่วนกระแสแบบปลายเปิด

$$E_T(\theta) = \sqrt{E_L^2(\theta) + 2E_L(\theta)E_L(\theta - \pi) \cos(2\pi L_\lambda) + E_L^2(\theta - \pi)}$$

$$E_L(\theta) = \left(\frac{Z_0 |I| \sin(\theta)}{2\pi d} \right) \sin[2L_\lambda \pi (\cos(\theta) - 1)] / \cos(\theta - 1)$$

$$E_N(\theta) = \left(\frac{Z_0 |I| \sin(\theta)}{2\pi d} \right) \sin \left[\frac{NL_\lambda \pi (\cos(\theta) - 1)}{\cos(\theta) - 1} \right]$$

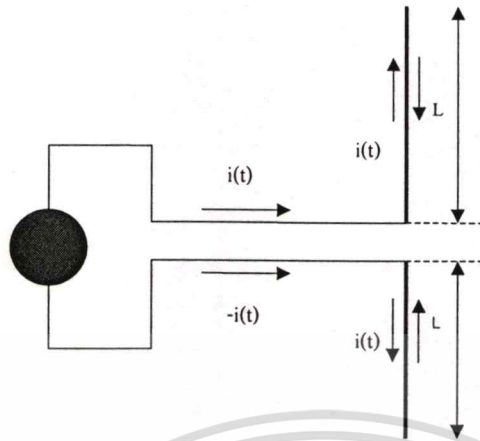


(ก) การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล (ข) การคำนวณโดยการใช่ โครงข่ายประสาทเทียม

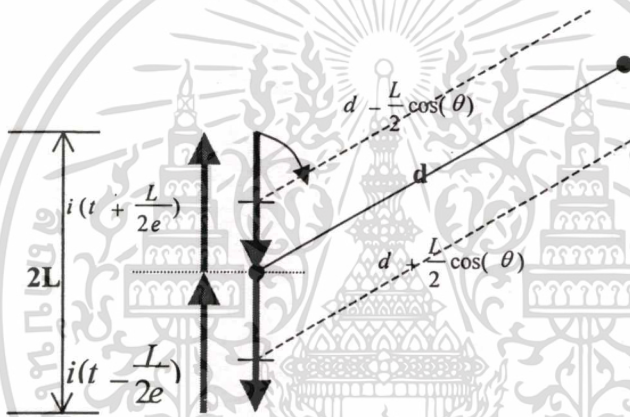
รูปที่ ก.11 แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณการแพร่คลื่นจากชิ้นส่วนกระแสแบบปลายเปิด และ โครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล

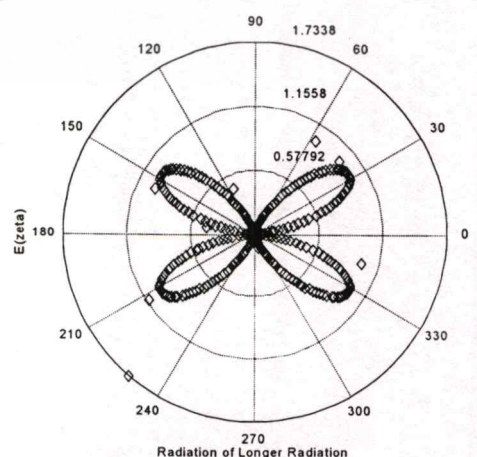
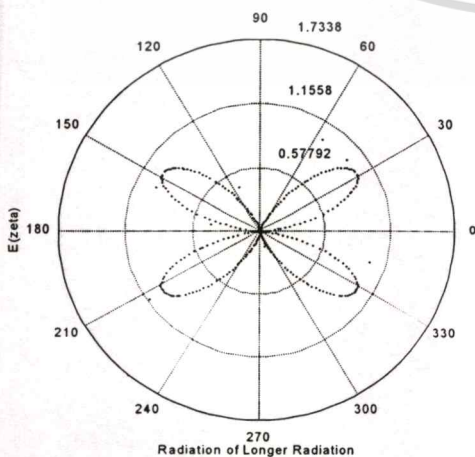


รูปที่ ก.12 แสดงการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล



รูปที่ ก.13 แสดงวงจรมวลย์ของชิ้นส่วนกระแสดของสายอากาศไดโพล

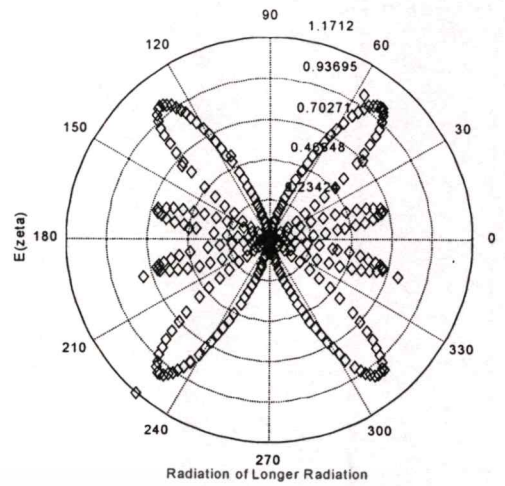
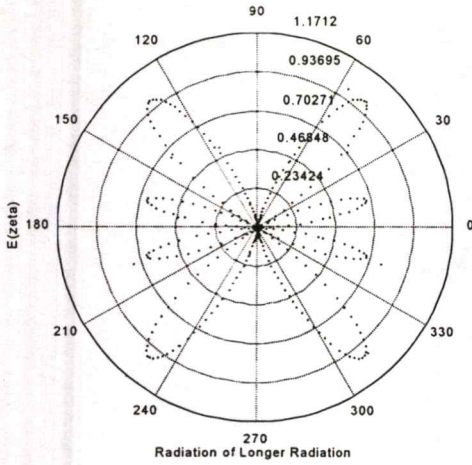
$$E_D(\theta) = \frac{Z_0 | I | \cos(2\pi L_\lambda) - \cos(2\pi L_\lambda \cos(\theta))}{\pi d \sin(\theta)}$$



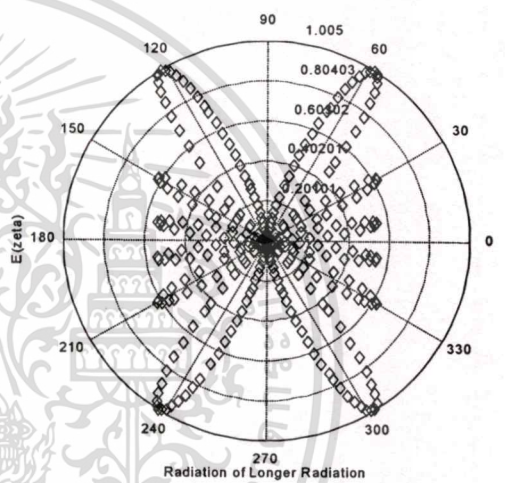
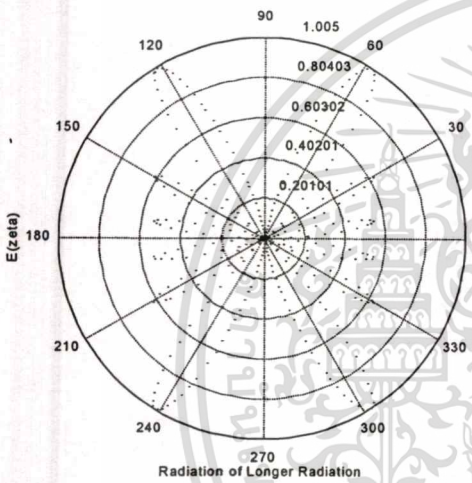
(ก) การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล (ข) การคำนวณโดยใช้ โครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การดูแลของ (ข) การคำนวณโดยใช้ โครงข่ายประสาทเทียม ด้านการค้า

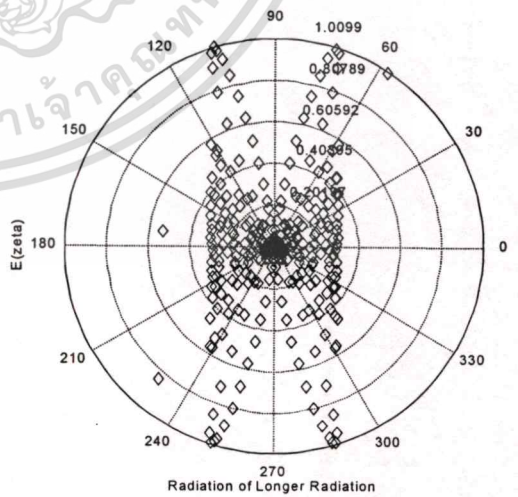
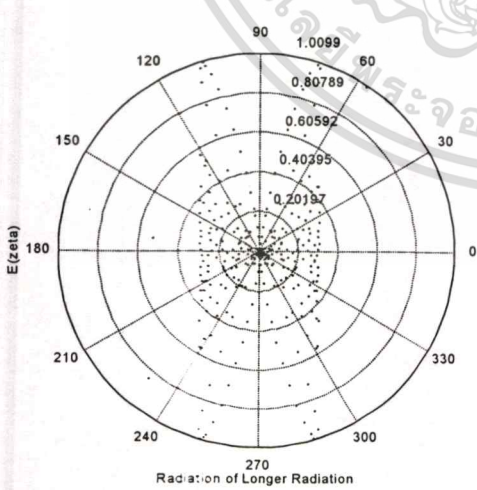
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล (ง) การคำนวณโดยการใช่ โครงข่ายประสาทเทียม



(ค) การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล (จ) การคำนวณโดยการใช่ โครงข่ายประสาทเทียม

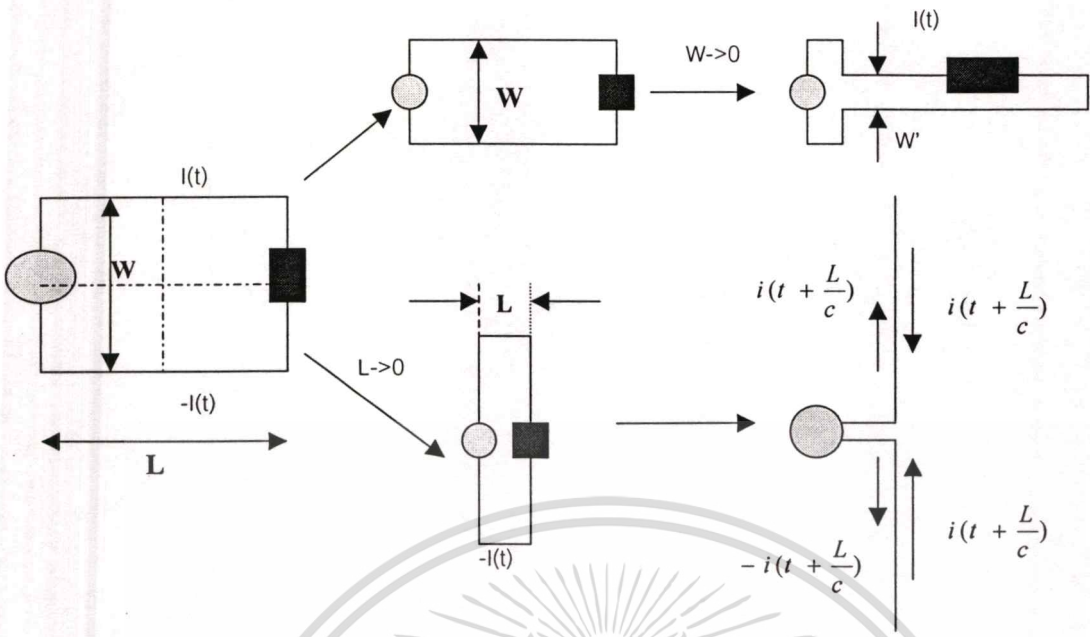


(ข) การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล (ช) การคำนวณ โดยการใช่ โครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ ก.14 แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณการแพร่คลื่นจากชิ้นส่วนกระแสดจากสายอากาศไดโพล

และ โครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความยาวและความกว้างของวงจรกระแส

สำหรับวงจรขนาดเล็ก(Small Circuit)

$$W_\lambda = W \left(\frac{1}{c} \right) \leq \frac{1}{16}$$

$$L_\lambda = L \left(\frac{1}{c} \right) \leq \frac{1}{16}$$

$$\max |E| = \frac{2\pi Z_0 |I| W_\lambda (2L_\lambda + W_\lambda)}{d}$$

สำหรับวงจรขนาดกลาง(Medium Circuit)

$$W_\lambda \leq \frac{1}{16}$$

$$\frac{1}{16} < L_\lambda \leq W_{\lambda/2}$$

$$\max |E| = \frac{Z_0 |I| W_\lambda}{d} \sin[\pi(2L_\lambda + W_\lambda)]$$

สำหรับวงจรขนาดใหญ่(Large Circuit)

$$W_\lambda \leq \frac{1}{16}$$

$$L_\lambda > \frac{1}{4} - W_{(\lambda/2)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\max |E| = \frac{Z_0 |I| W_\lambda}{d}$$

การแพร่คลื่นของวงจรมินิเจอร์

$$\begin{aligned} |E_{xy}(\phi)| &= \frac{Z_0 |I| W_\lambda}{d} \{[\pi(L'_\lambda + W'_\lambda - L_\lambda \cos(\phi))] \cos(\phi) - \pi L_\lambda \sin^2(\phi)\} \\ &= \frac{\pi Z_0 |I| W_\lambda}{d} [(L'_\lambda + W'_\lambda) \cos(\phi) - L_\lambda \cos^2(\phi) - L_\lambda \sin^2(\phi)] \end{aligned}$$

$$= \frac{\pi Z_0 |I| W_\lambda}{d} [(L'_\lambda + W'_\lambda) \cos(\phi) - L_\lambda]$$

$$|E'_{xy}(\phi)| = \frac{\pi Z_0 |I| L_\lambda W_\lambda}{d}$$

$$|E_{xz}(\phi)| = \frac{Z_0 \pi |I| W_\lambda}{d} \sin[\pi(L_\lambda \cos(\xi) - L'_\lambda - W'_\lambda)]$$

$$= \frac{\pi Z_0 |I| W_\lambda}{d} (L_\lambda \cos(\xi) - L'_\lambda - W'_\lambda)$$

$$|E'_{xz}(\xi)| = \frac{\pi Z_0 |I| L_\lambda W_\lambda}{d} \cos(\xi)$$

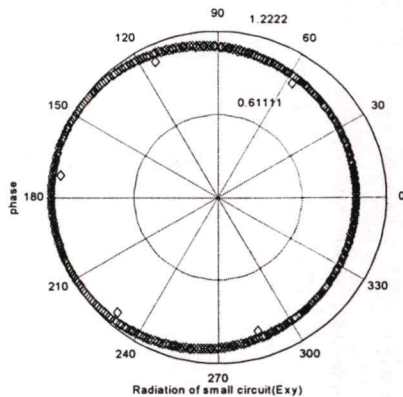
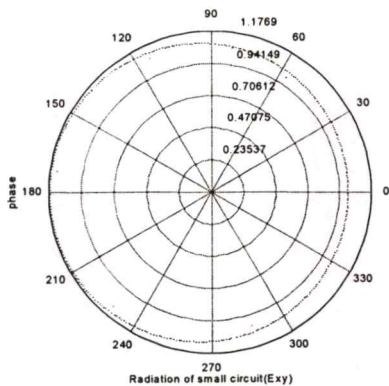
$$|E_{yz}(\theta)| = \frac{Z_0 |I|}{d} \sqrt{\{W_\lambda \cos(\theta) \sin[\pi(W'_\lambda + L'_\lambda)]\}^2 + [L_\lambda \sin(\pi W_\lambda \sin(\theta))]^2}$$

$$= \frac{Z_0 |I|}{d} \sqrt{[\pi W_\lambda (W'_\lambda + L'_\lambda) \cos(\theta)]^2 + (\pi L_\lambda \sin(\theta))^2}$$

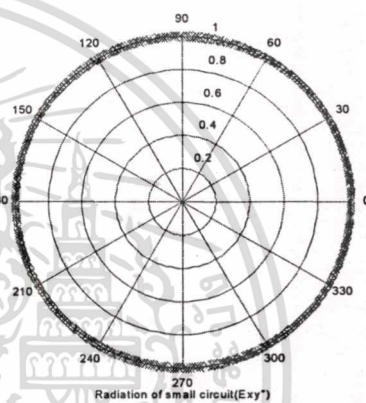
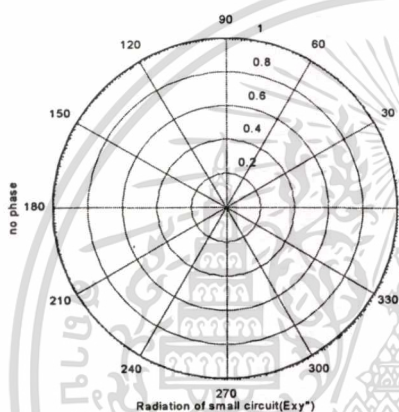
$$= \frac{\pi Z_0 |I| W_\lambda}{d} \sqrt{(W'_\lambda + L'_\lambda)^2 \cos^2(\theta) + L_\lambda \sin^2(\theta)}$$

$$|E_{yz}(\theta)| = \frac{Z_0 |I| L_\lambda W_\lambda}{d} |\sin(\theta)|$$

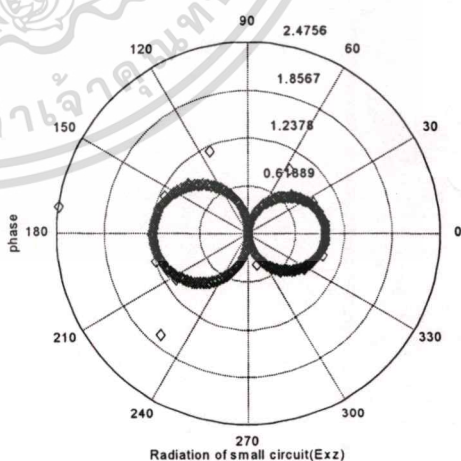
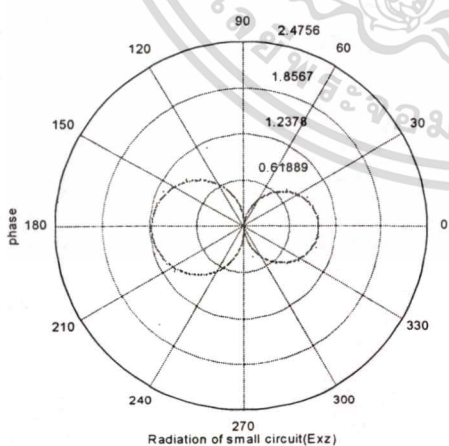
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) การแพร่คลื่นของวงจรขนาดเล็ก (ข) การคำนวณโดยการใช่ โครงข่ายประสาทเทียม

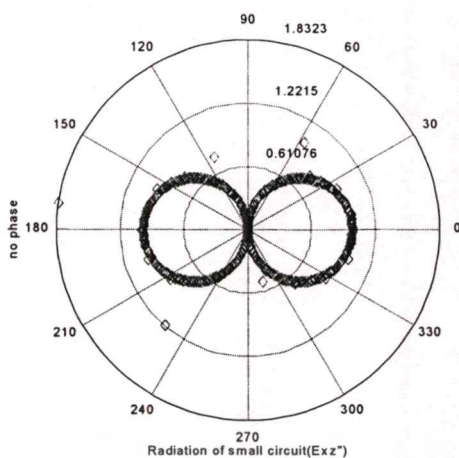
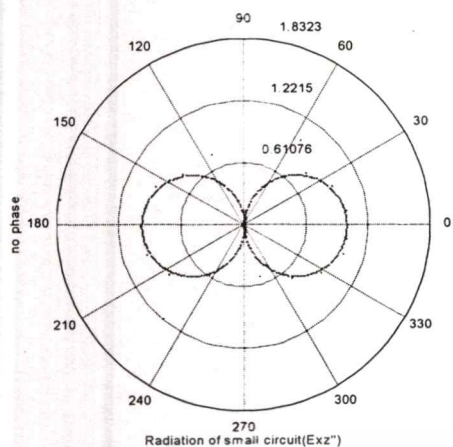


(ค) การแพร่คลื่นของวงจรขนาดเล็ก (ง) การคำนวณ โดยการใช่ โครงข่ายประสาทเทียม

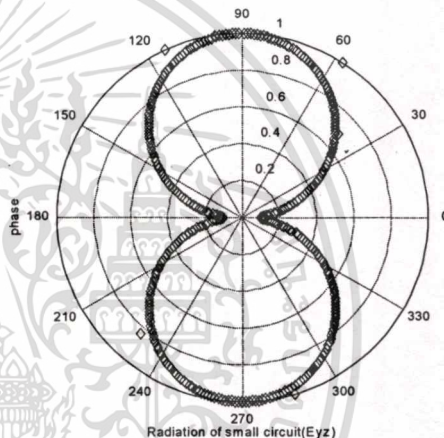
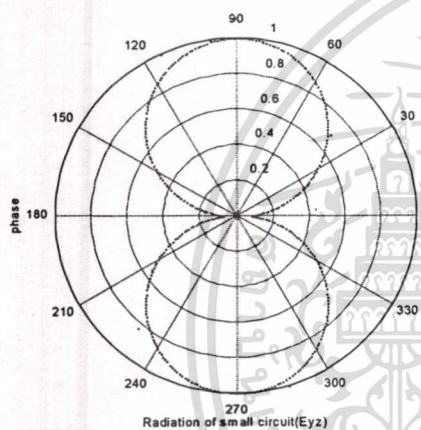


(จ) การแพร่คลื่นของวงจรขนาดเล็ก (ฉ) การคำนวณ โดยการใช่ โครงข่ายประสาทเทียม

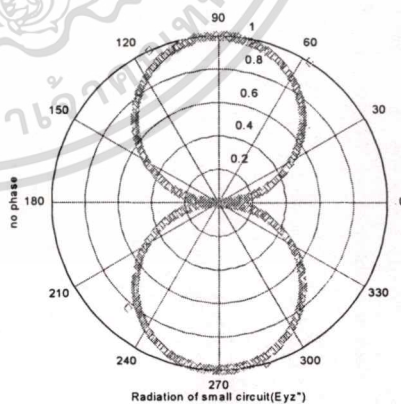
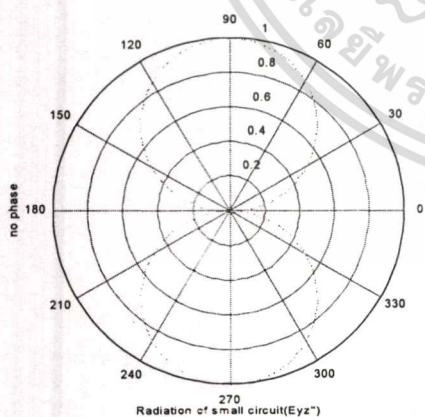
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) การแพร่คลื่นของวงจรขนาดเล็ก (ฉ) การคำนวณโดยการใช่ โครงข่ายประสาทเทียม



(จ) การแพร่คลื่นของวงจรขนาดเล็ก (ฉ) การคำนวณโดยการใช่ โครงข่ายประสาทเทียม



(ช) การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพล (ซ) การคำนวณโดยการใช่ โครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ ก.16 แสดงการเปรียบเทียบการคำนวณการแพร่คลื่นจากวงจรกระแสขนาดเล็กและ

โครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

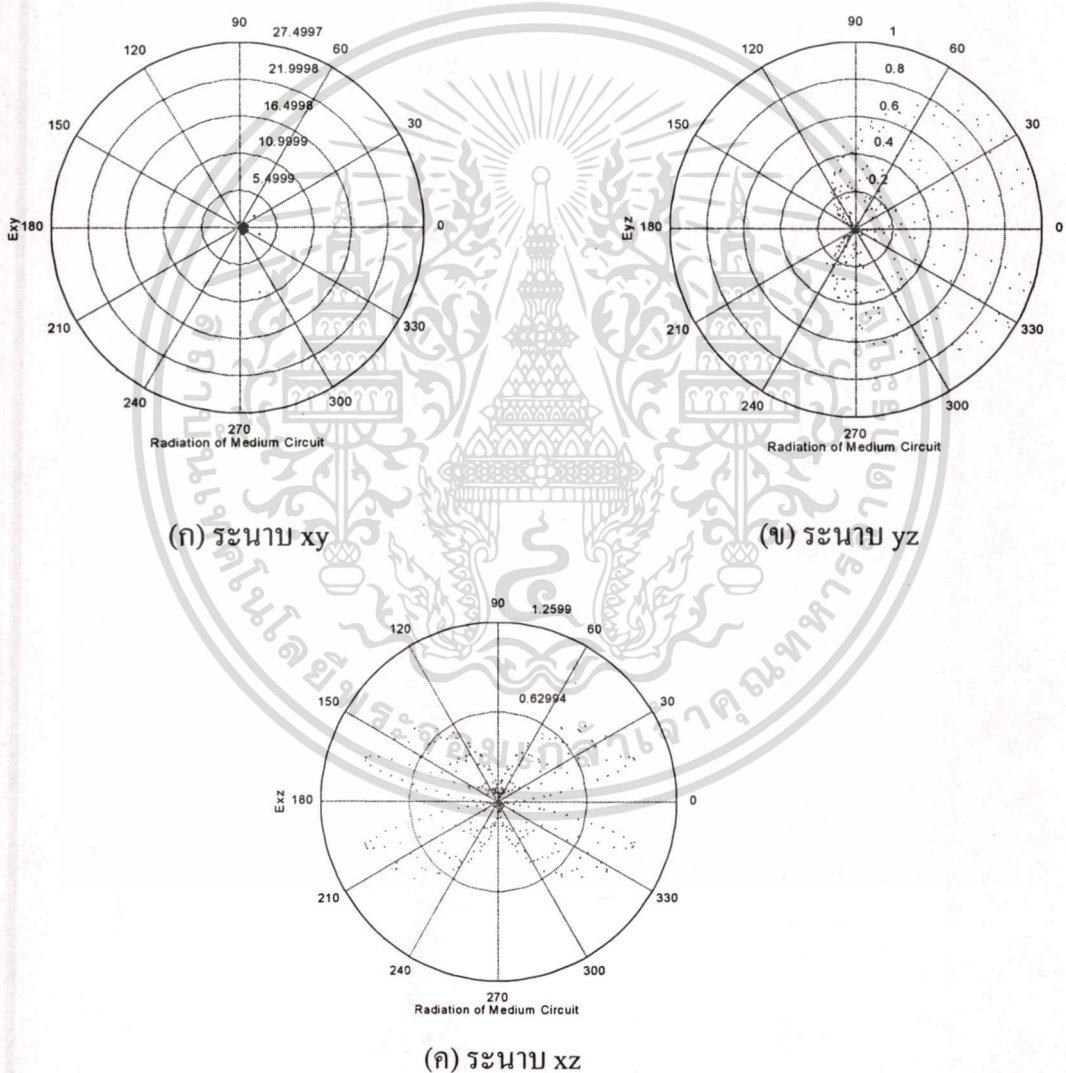
การแพร่คลื่นของวงจรถนาคกลาง

$$V_p = c, L'_\lambda = L_\lambda, W'_\lambda = W_\lambda, W_\lambda \leq \frac{1}{16}, L_\lambda \leq \frac{1}{16}$$

$$E_{xy}(\phi) = 2\{E_w(\phi) \sin[\pi L_\lambda(\cos(\phi) - 1)] - \pi W_{e\lambda} E_L(\phi) \sin(\phi)\}$$

$$E_{xz}(\xi) = 2E_w(\xi) \sin[\pi L_\lambda \cos(\phi) - 1] - \pi W_{e\lambda}$$

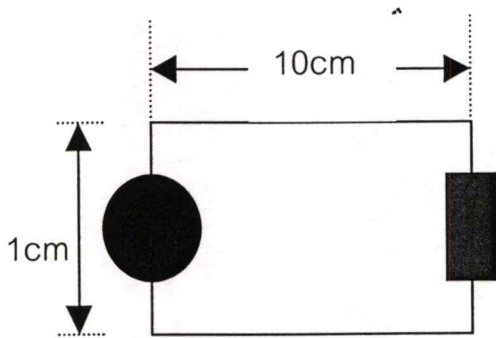
$$|E_{yz}(\theta)| = 2\sqrt{\{E_w(\theta) \sin[\pi(L_\lambda + W_{e\lambda})]\}^2 [\pi W_{e\lambda} E_L(\theta) \sin(\theta)]^2}$$



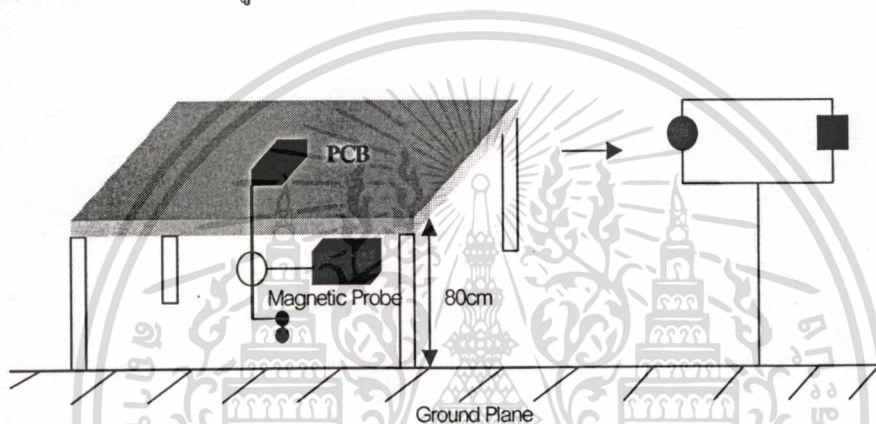
รูปที่ ก.17 แสดงการแพร่คลื่นของวงจรถนาคกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

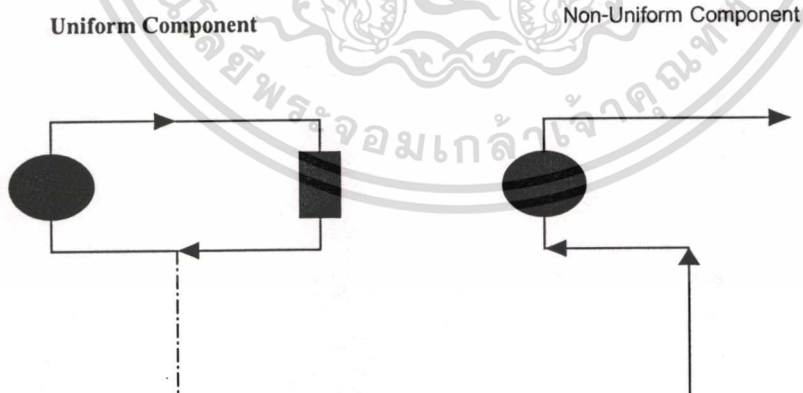
การประยุกต์ใช้วงจรกระแสในวงจรที่ซับซ้อน



รูปที่ ก.18 แสดงวงจรกระแสสมมูล

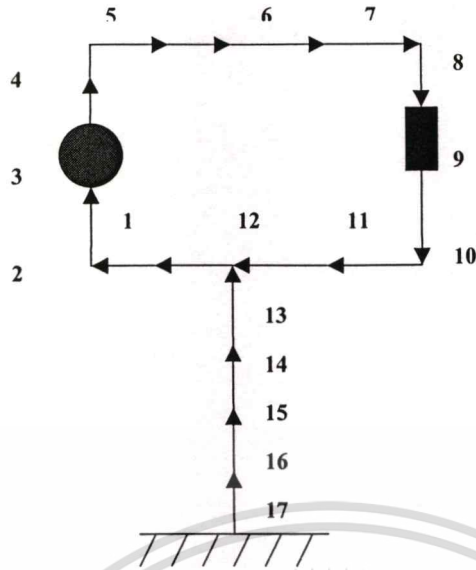


รูปที่ ก.19 แสดงการแปลงการวางจอร์ซับซ้อนเป็นวงจรกระแส

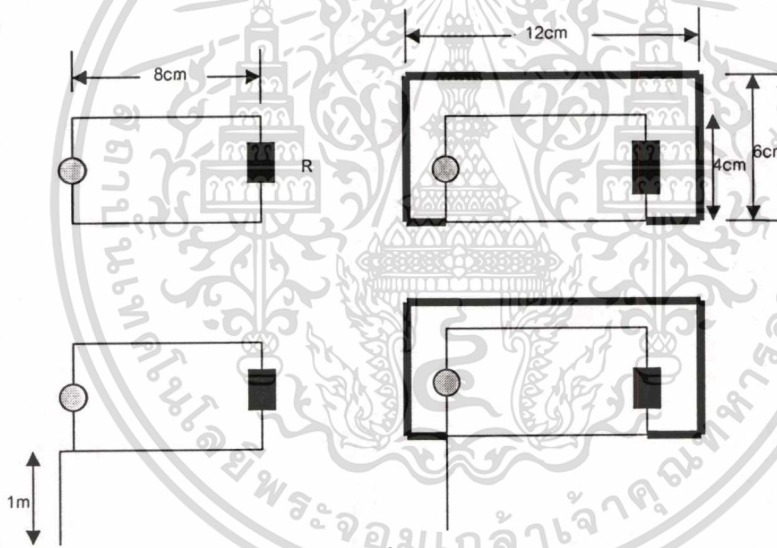


รูปที่ ก.20 แสดงวงจรแบบ Uniform และ Non-uniform

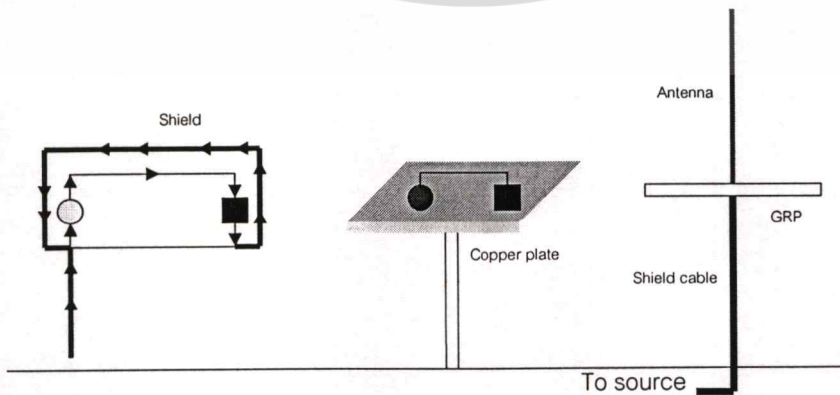
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.21 แสดงตำแหน่งการวัดกระแสและการคำนวณ



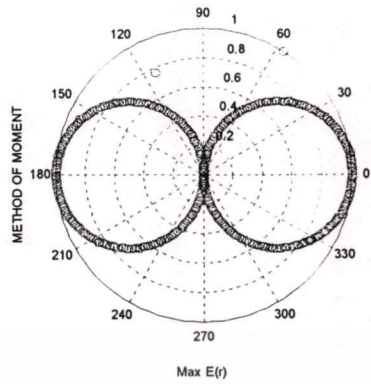
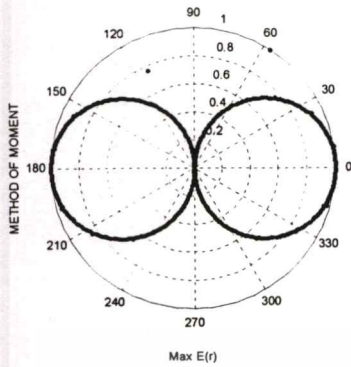
รูปที่ ก.22 แสดงวงจรสมมูลย์ของวงจรกระแสซึ่งมีการชิลด์



รูปที่ ก.23 แสดงการแปลงวงจรซึ่งมีส่วนชิลด์ เป็นวงจรกระแส

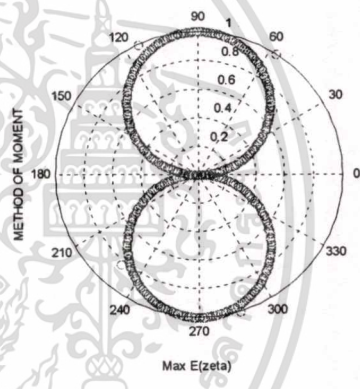
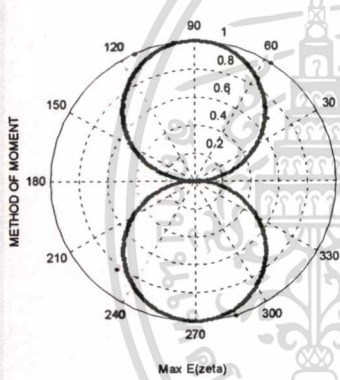
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการแพร่คลื่นโดยการใช่วิธี Moment Method



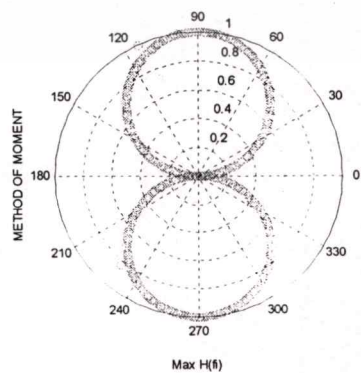
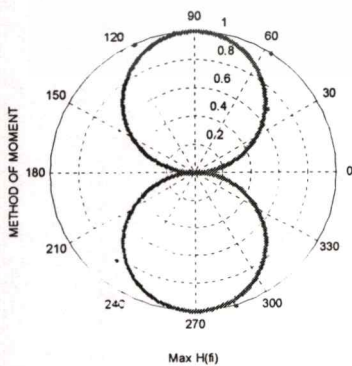
(ก) E_r

(ข) เ้าที่พุดจาก โครงข่ายประสาทเทียม



(ค) E_θ

(ง) เ้าที่พุดจาก โครงข่ายประสาทเทียม



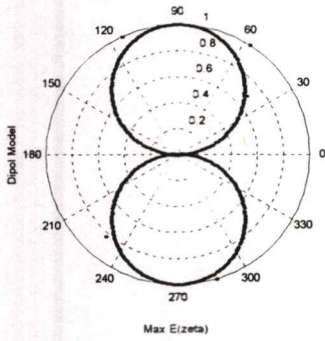
(จ) H_ϕ

(ง) เ้าที่พุดจาก โครงข่ายประสาทเทียม

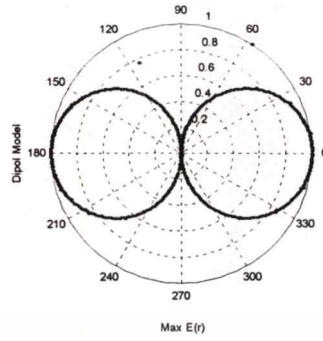
รูปที่ ก.24 แสดงการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลโดยใช้ Moment Method

เอป็นการนำเอาทฤษฎีการแผ่รังสีของสายอากาศไดโพลมาใช้กับโครงข่ายประสาทเทียม โดยไม่จำเป็นต้องใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณที่ซับซ้อนและโครงข่ายประสาทเทียมไม่จำเป็นต้องอาศัยความรู้เชิงคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

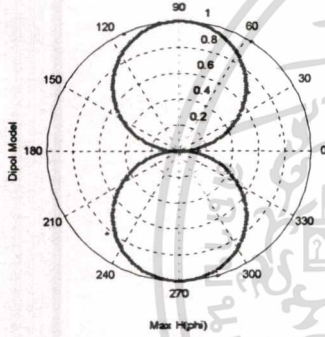
การแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบลูป



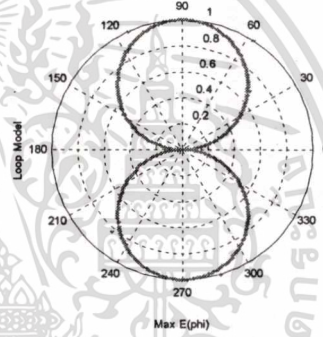
(ก) E_θ



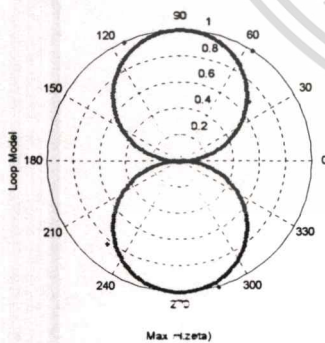
(ข) E_r



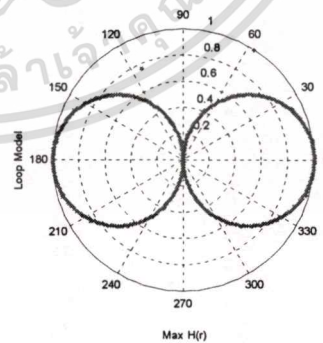
(ค) H_ϕ



(ง) E_ϕ



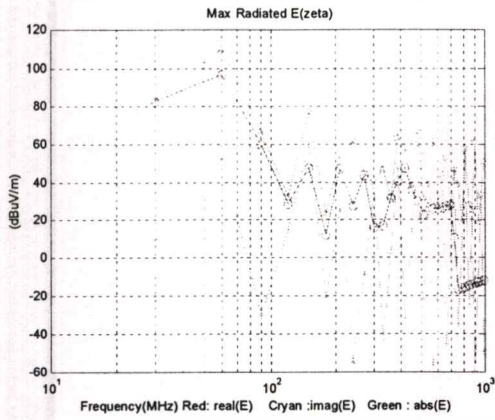
(จ) H_θ



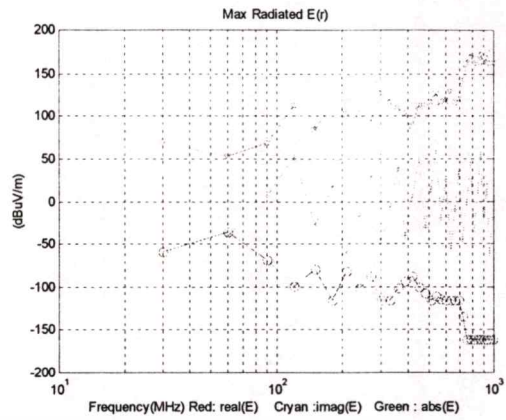
(ฉ) H_r

รูปที่ ก.25 แสดงรูปแบบการแพร่คลื่นของสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบลูป

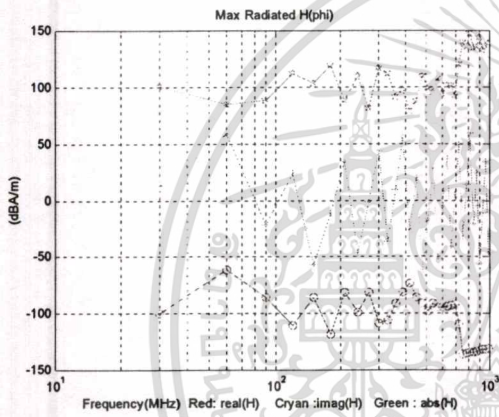
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



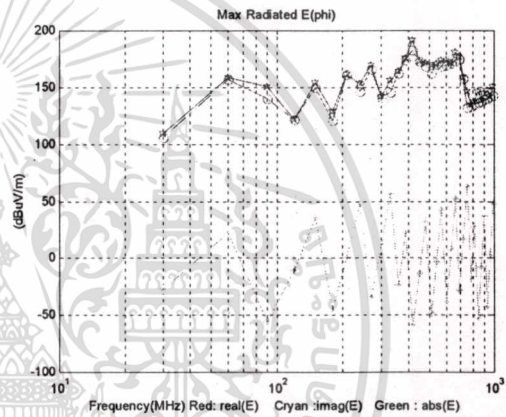
(ก) E_{θ}



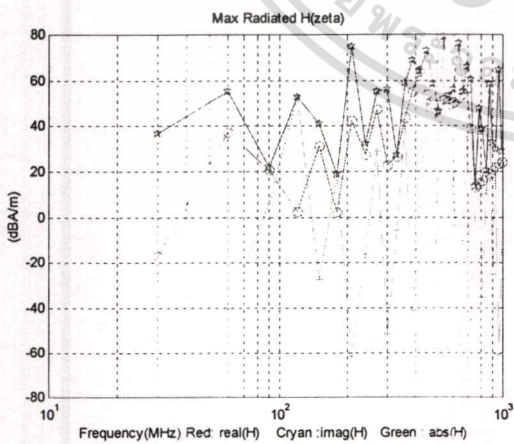
(ข) E_r



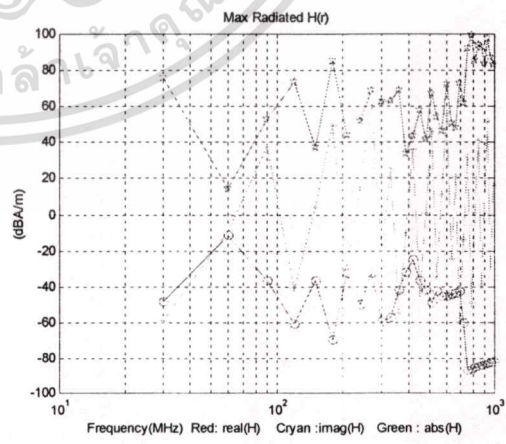
(ค) H_{θ}



(ง) E_{ϕ}



(จ) H_{θ}



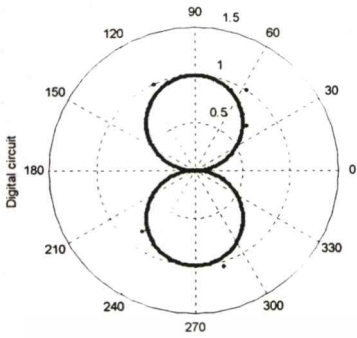
(ฉ) H_r

รูปที่ ก.26 แสดงการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศไดโพลและสายอากาศแบบรูปใน

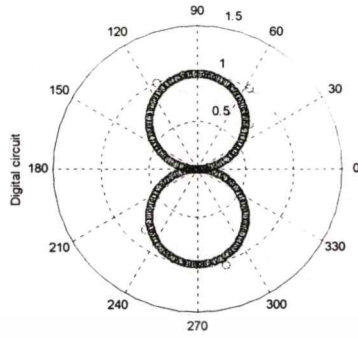
โดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่คลื่นของวงจรดิจิทัล



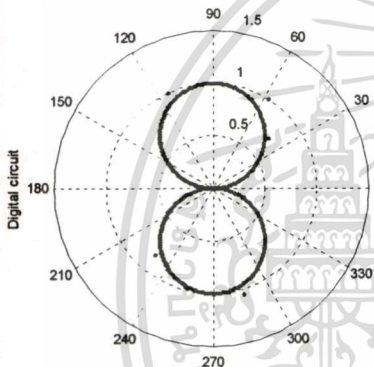
Different Mode Radiation



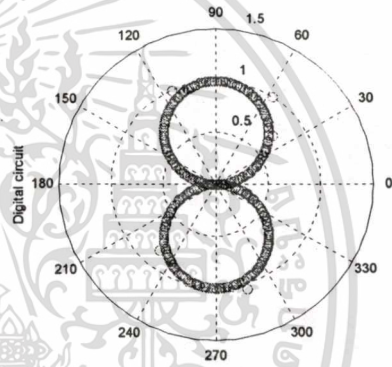
Different Mode Radiation

(ก) Differential mode radiation

(ข) เ้าที่พุดจากโครงข่ายประสาทเทียม



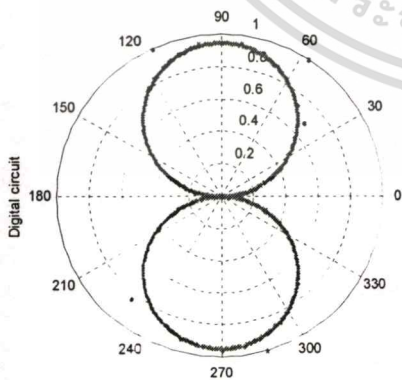
Common Mode Radiation



Common Mode Radiation

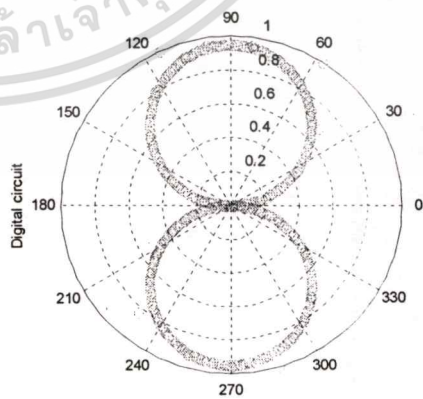
(ค) Common mode radiation

(ง) เ้าที่พุดจากโครงข่ายประสาทเทียม



TOTAL(DM+CM) Radiat

(จ) Total radiation



TOTAL(DM+CM) Radiat

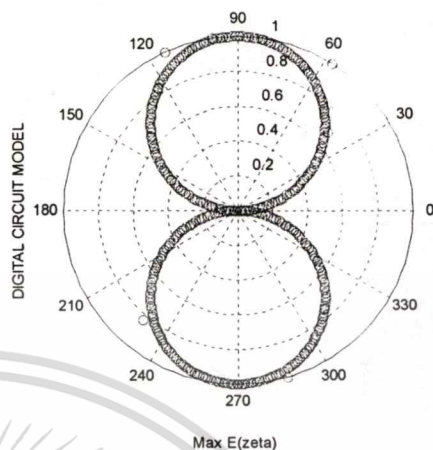
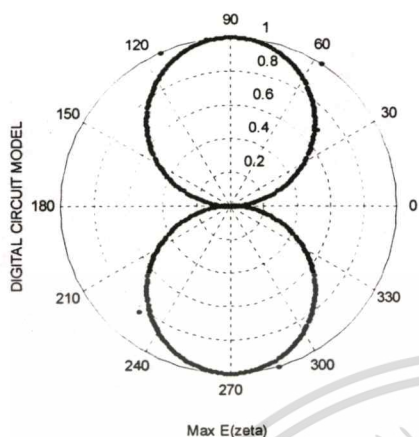
(ฉ) เ้าที่พุดจากโครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ ก.27 แสดงการแพร่คลื่นของวงจรดิจิทัล

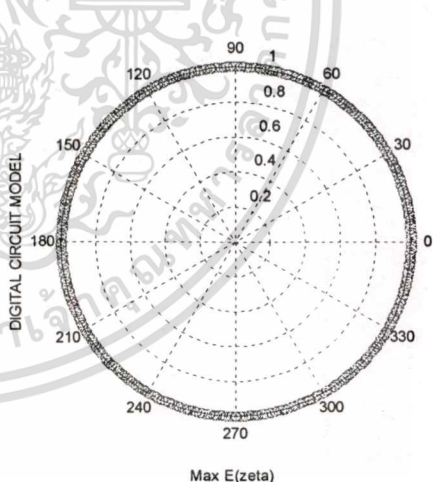
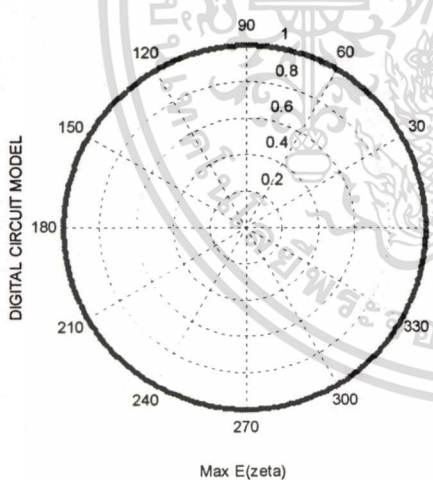
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรดิจิทัล(แบบละเอียด)



(ก) E_θ (ข) เอ้าท์พุตจากโครงข่ายประสาทเทียม

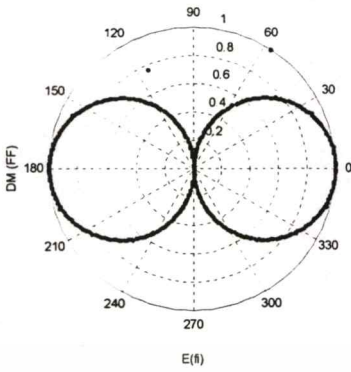


(ค) Max E_θ (ง) เอ้าท์พุตจากโครงข่ายประสาทเทียม

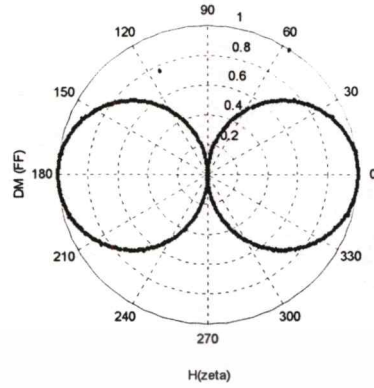
รูปที่ ก.28 แสดงการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวงจรดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

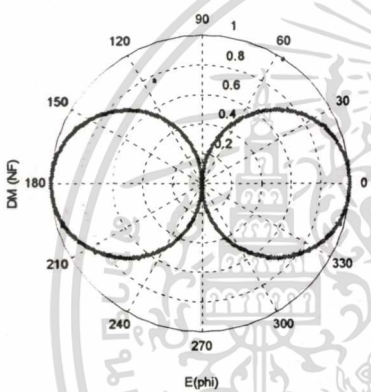
การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่ง



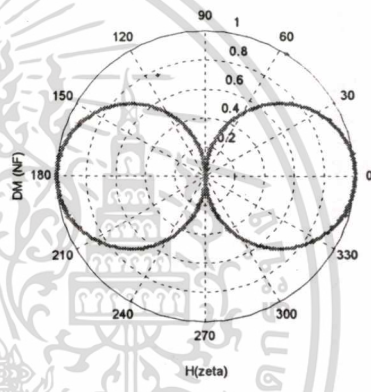
(ก) E_ϕ (DM-FF)



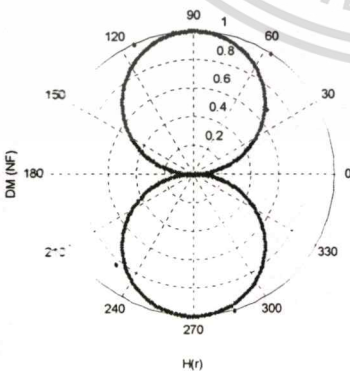
(ข) H_θ (DM-FF)



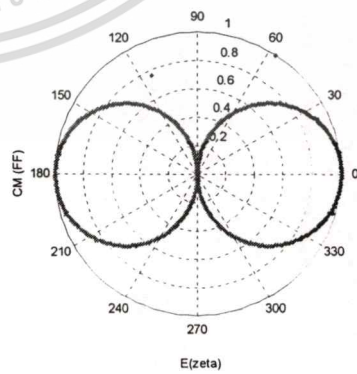
(ค) E_ϕ (CM-NF)



(ง) H_ζ (CM-NF)

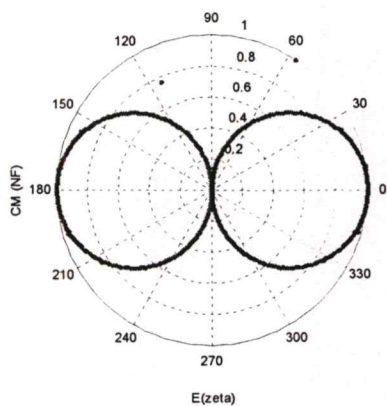
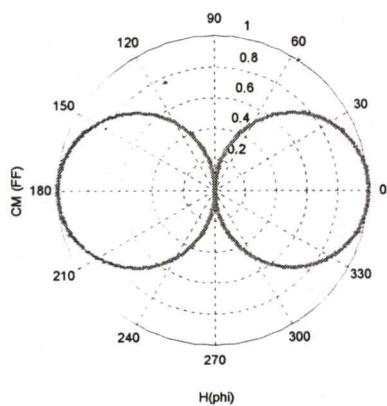


(จ) H_r (DM-NF)



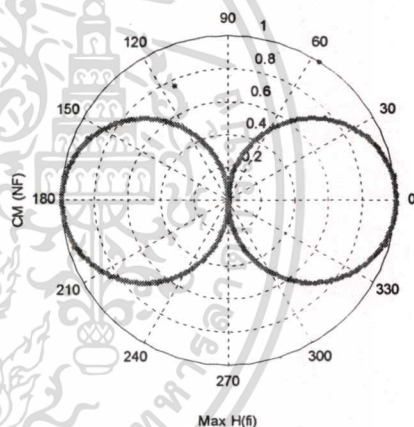
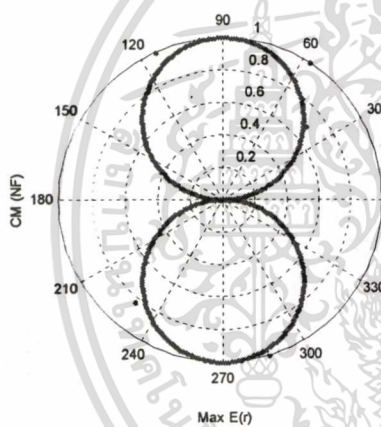
(ฉ) E_ζ (CM-FF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) H_ϕ (CM-FF)

(ข) E_{zeta} (CM-NF)



(ค) E_r (CM-NF)

(ง) H_ϕ (CM-NF)

รูปที่ ก.29 แสดงการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ในการจดจำและจำแนกอุปกรณ์ในการทดสอบจริง

อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้ตามการติดตั้งใช้งานพอจะแบ่งได้หลักๆ ดังนี้ อุปกรณ์แบบตั้งโต๊ะ (Table on top equipment) และอุปกรณ์แบบวางพื้น (Floor standing equipment) อัลกอริทึมของการคำนวณการแพร่คลื่นทั่วไปสามารถนำไปใช้งานกับชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และค่าการคำนวณโดยวิธีต่างๆ เช่น MOM CEM FDTD จะให้ค่าที่ไม่ถูกต้องในกรณีที่เป็นอุปกรณ์ชนิดวางพื้น

ในวิทยานิพนธ์นี้โครงข่ายประสาทเทียมถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจดจำและจำแนกอุปกรณ์แบบตั้งโต๊ะและอุปกรณ์แบบวางพื้น

1. สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์และเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งถูกทำการวัดหลายรุ่น (model) ถูกนำมาป้อนเป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้เรียนรู้และจดจำ จากนั้นสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากอุปกรณ์แบบวางพื้นซึ่งไม่รู้รุ่นของแหล่งกำเนิด (unknown EUT model) ถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายเพื่อทำการจำแนก

2. การจดจำและจำแนกสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกจากอุปกรณ์แบบวางพื้น ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้หุ่นยนต์ขนส่งซึ่งประกอบด้วย วงจรซึ่งเป็นส่วนกำเนิดสัญญาณ แบบอูลตราโซนิก สัญญาณอินฟราเรด ส่วนควบคุมและประมวลผล วงจรควบคุมความเร็วและอื่นๆ เป็นอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ และการทำงานของหุ่นยนต์ในแต่ละโหมดถูกป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเรียนรู้และจดจำ จากนั้นโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกนำมาใช้ในการจำแนกโหมดการทำงานของหุ่นยนต์

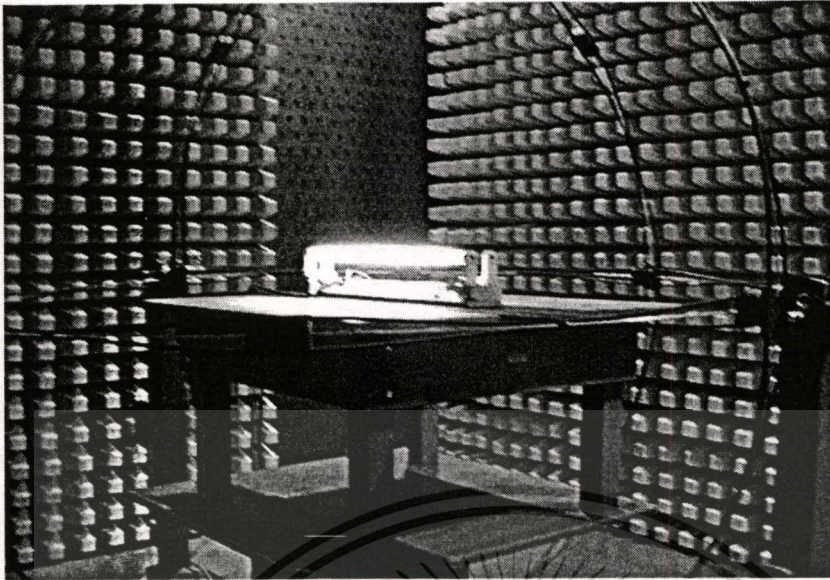
การจดจำและจำแนกสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกจากอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์และคอมพิวเตอร์

การวัดการแพร่สนามแม่เหล็กจากอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์จะใช้อุปกรณ์ในการทดสอบดังนี้

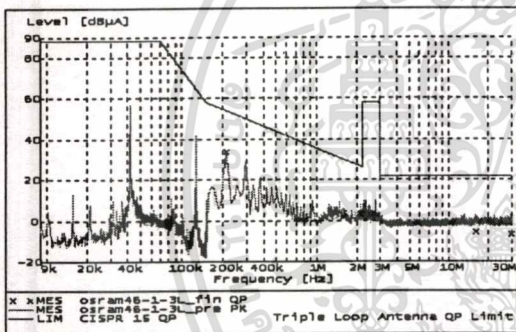
1. ลูปแม่เหล็กแบบ 3 แกน (Magnetic Loop) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ตามมาตรฐาน CISPR 15 [24]
2. เครื่องวิเคราะห์ความถี่ R&S รุ่น ESK-1
3. ห้องปิดกั้นกึ่งไร้คลื่นสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Semi-Anechoic Chamber)

วิธีการวัดสนามแม่เหล็ก

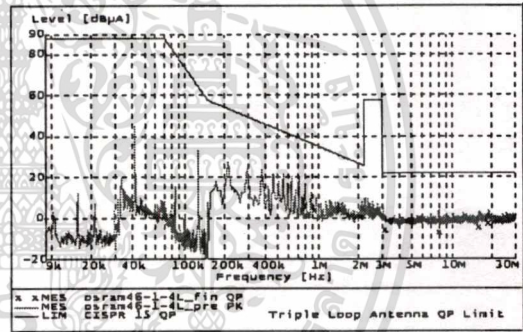
จากรูปลูปแม่เหล็กประกอบด้วยโครงสร้างซึ่งใช้วัดสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ใน 3 ระนาบคือ X Y และ Z สัญญาณที่วัดได้ในแต่ละระนาบจะถูกนำมาประเมินผล โดยจะทำการรวมสัญญาณสูงสุดในแต่ละระนาบและเลือกเฉพาะแอมพลิจูดที่สูงที่สุดในแต่ละความถี่โดยใช้ฟังก์ชัน Max-Hold บันทึกค่าของสัญญาณที่สูงที่สุดที่แพร่ออกมาจากวงจร ผลการวัดสนามแม่เหล็กในช่วงความถี่ 9 kHz ถึง 30 MHz แสดงดังรูป ก.31 (ก) ถึง (ข)



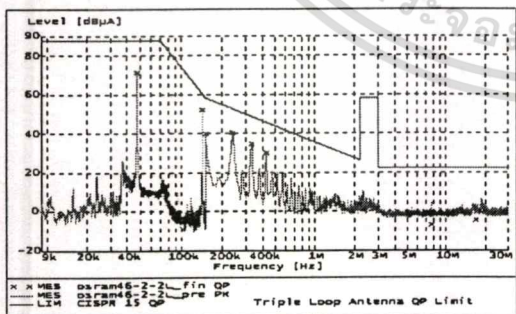
รูปที่ ก.30 แสดงการวัดสนามแม่เหล็กโดยการใช้ลูปแม่เหล็กในห้อง Semi Anechoic Chamber



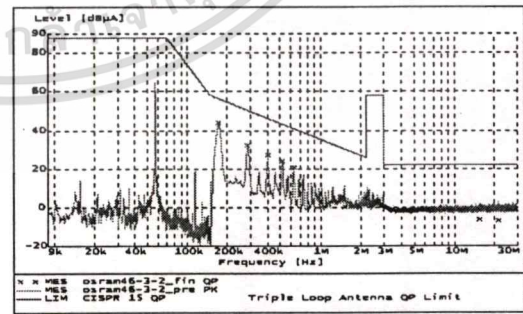
(ก) อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์รุ่น A



(ข) อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์รุ่น B

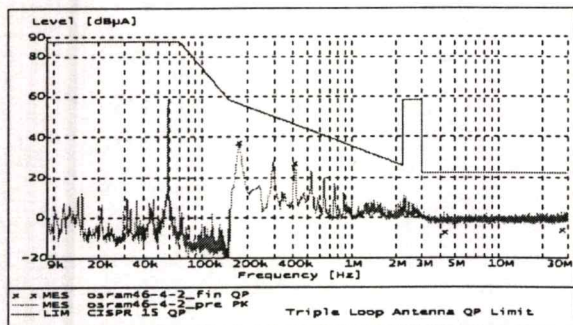


(ค) อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์รุ่น C

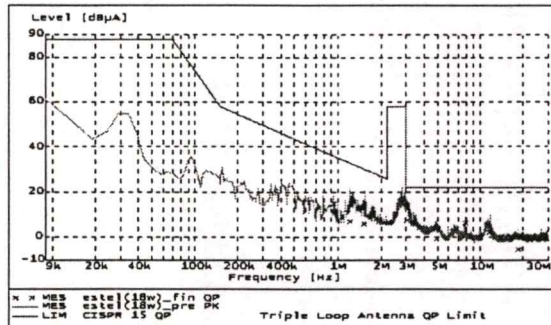


(ง) อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์รุ่น D

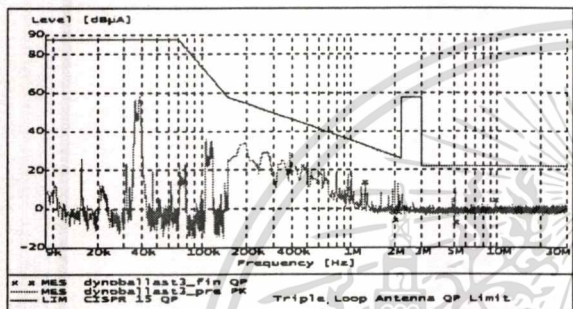
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



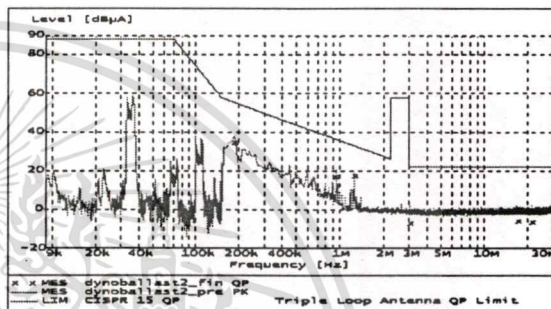
(จ) อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์รุ่น E



(ฉ) อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์รุ่น F



(ช) อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์รุ่น G



(ซ) อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์รุ่น H

รูปที่ ก.31 แสดงสนามแม่เหล็กจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์

จากรูปสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์ ในแต่ละแบบมีลักษณะแตกต่างกันและเป็นประโยชน์กับโครงข่ายประสาทดัดเทียมในการ จัดจำและจำแนกวงจรอิเล็กทรอนิกส์แต่ละแบบ โดยการใช้สนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมา สนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาในแต่ละความถี่จะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการประเมินผลทางสถิติ และถูกนำไปป้อนเป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทดัดเทียม

การวัดสนามไฟฟ้าแพร่ผ่านอากาศของเครื่องคอมพิวเตอร์

การวัดสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากคอมพิวเตอร์จะใช้อุปกรณ์การทดสอบดังนี้

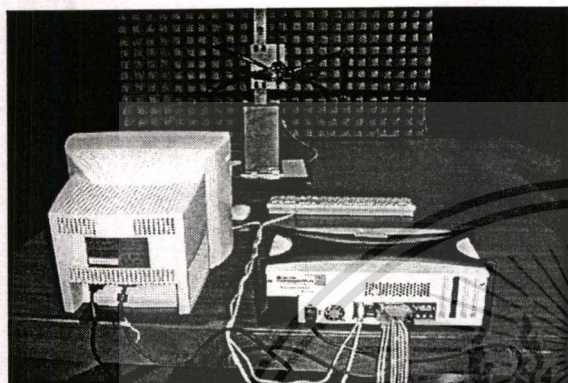
1. สายอากาศแบบ Bi-conical และ Log-Periodic ซึ่งสามารถรับสัญญาณไฟฟ้าในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz
2. เครื่องวิเคราะห์ความถี่ Rhode & Swarz รุ่น ESK-1

เครื่องคอมพิวเตอร์และสายอากาศสำหรับการวัดถูกติดตั้งใน Semi-Anechoic Chamber

โดยกำหนดให้ระยะระหว่างสายอากาศและเครื่องคอมพิวเตอร์เป็น 3 เมตรตามมาตรฐาน CISPR22 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า [] การติดตั้งและจัดวางเครื่องมือทดสอบถูกแสดงในรูปที่ ก.32

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปคอมพิวเตอร์ถูกวางอยู่บนโต๊ะทดสอบซึ่งเป็นฉนวนสูง 80 เซ็นติเมตร โต๊ะทดสอบวางอยู่บนแท่นหมุนรัศมี 1.5 เมตร ในระหว่างการทดสอบสายอากาศซึ่งติดตั้งอยู่บน Antenna Mast จะเคลื่อนที่ขึ้นลงในช่วงความสูง 1 ถึง 4 เมตร แท่นหมุนจะเคลื่อนที่ในระนาบ 0 องศาถึง 360 องศา เพื่อหาตำแหน่งที่คอมพิวเตอร์แพร่สัญญาณออกมามากที่สุด วิธีการวัดสนามไฟฟ้าเป็นไปตามมาตรฐาน CISPR22



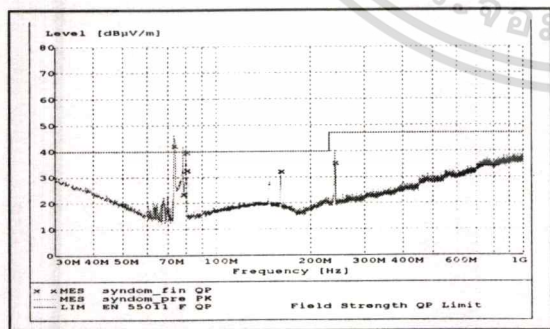
(ก) ด้านหน้า



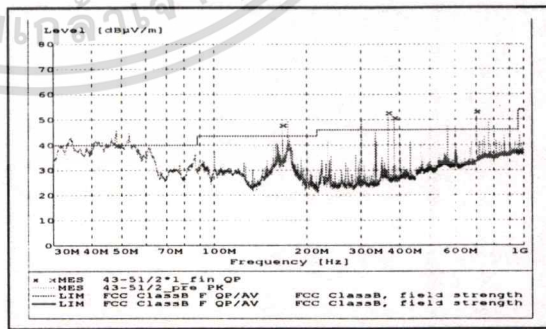
(ข) ด้านหลัง

รูปที่ ก.32 แสดงการจัดวางการวัดสนามไฟฟ้าจากเครื่องคอมพิวเตอร์ตามมาตรฐาน CISPR22

สนามไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละความถี่จะสัมพันธ์กับทิศทางการแพร่คลื่น จะถูกนำมาประเมินผลโดยจะทำการรวมสัญญาณสูงสุดในแต่ละตำแหน่ง การวัดจะใช้ฟังก์ชัน Max-Hold บันทึกค่าของสัญญาณสูงสุดที่แพร่ออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์ ผลการวัดสัญญาณในช่วงความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz แสดงดังรูปที่ ก.33 (ก) ถึง (ฉ)

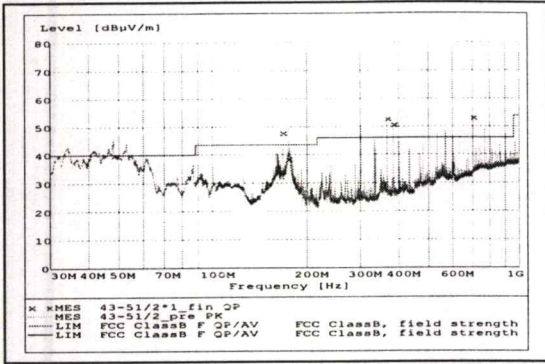


(ก) คอมพิวเตอร์รุ่น A

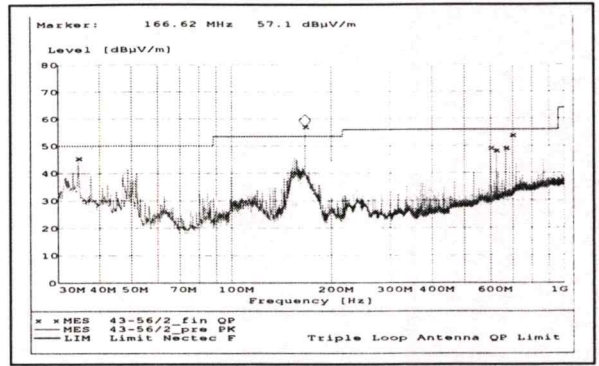


(ข) คอมพิวเตอร์รุ่น B

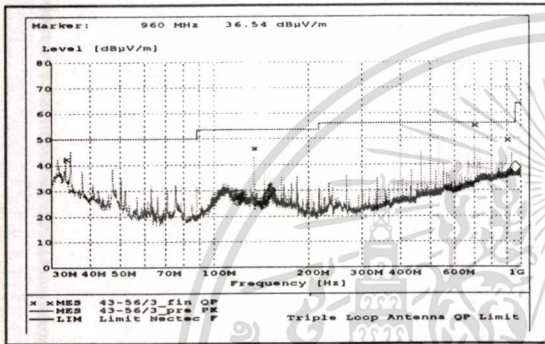
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



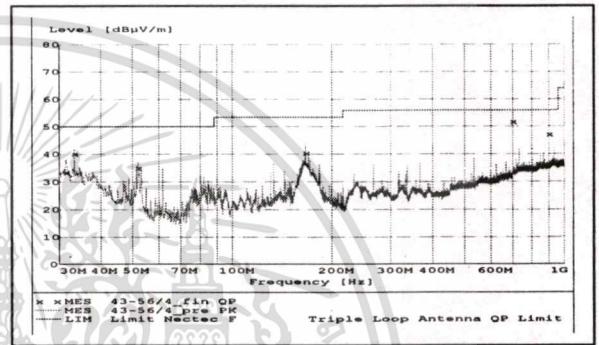
(ค) คอมพิวเตอร์รุ่น C



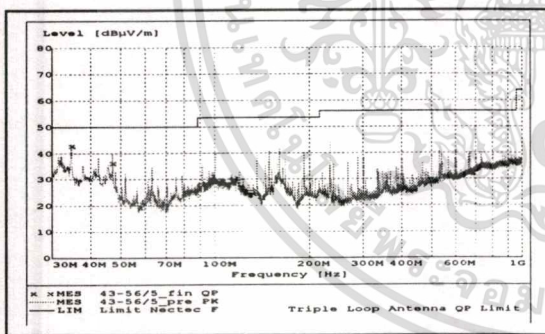
(ง) คอมพิวเตอร์รุ่น D



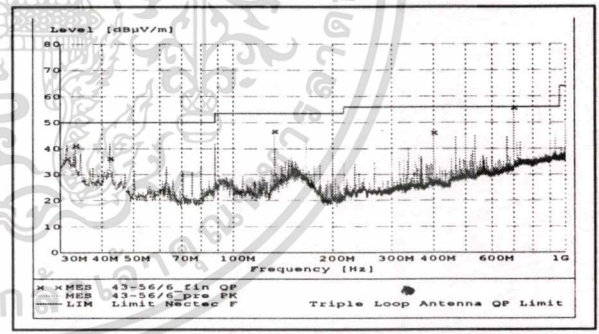
(จ) คอมพิวเตอร์รุ่น E



(ฉ) คอมพิวเตอร์รุ่น F



(ช) คอมพิวเตอร์รุ่น G



(ซ) คอมพิวเตอร์รุ่น H

รูปที่ ก.33 แสดงการแพร่ไฟฟ้าจากเครื่องคอมพิวเตอร์

จากรูปสนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากเครื่องคอมพิวเตอร์ในแต่ละแบบมีลักษณะแตกต่างกัน และเป็นประโยชน์กับโครงข่ายประสาทดัดเทียมในการจดจำและจำแนกคอมพิวเตอร์แต่ละแบบ โดยการใช้สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมา สนามไฟฟ้าที่แพร่ออกมาในแต่ละความถี่จะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการประเมินผลทางสถิติ และถูกนำไปป้อนเป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทดัดเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบด้วย 8 อินพุต โหนด 40 ฮิดเดน โหนด และ 5 เอาพุต โหนด ถูกใช้ในขั้นตอนการเรียนรู้ เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมสามารถจดจำสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่จากเครื่องคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์บัสลาสต์ได้แล้ว สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละแบบจะถูกป้อนเป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำการทดสอบ

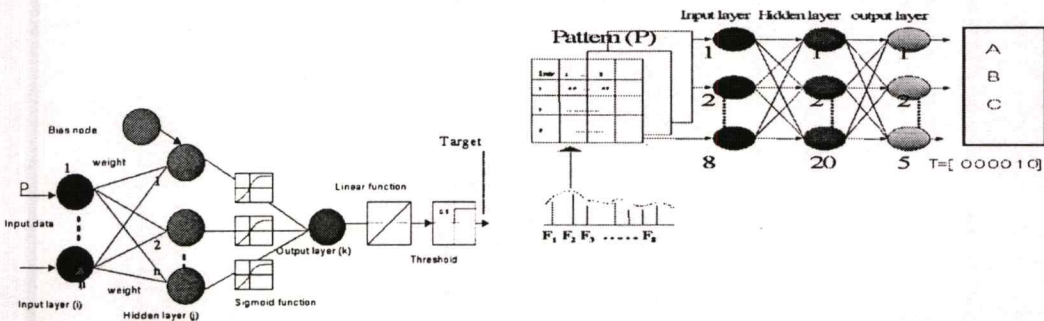
ตารางที่ ก.1 แสดงค่าของการคำนวณทางสถิติของค่ากลาง(Meams) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่าความน่าจะเป็น(Probability) ของสนามไฟฟ้าระยะไกลของคอมพิวเตอร์และสนามแม่เหล็กของวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัสลาสต์ ถูกใช้เป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนเอาท์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมถูกกำหนดให้เป็นสัญญาณดิจิทัลแบบ 5 บิต และถูกใช้ในการจำแนกชนิดของวงจรอิเล็กทรอนิกส์บัสลาสต์และคอมพิวเตอร์แต่ละรุ่น

ค่าเอาท์พุตซึ่งได้จากการคำนวณของโครงข่ายถูกเปรียบเทียบกับค่าเอาท์พุตเป้าหมาย (Target) ค่าการแปลงที่ได้จากเอาท์พุต(Converted Output) ถูกเปรียบเทียบกับค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) ของค่าเอาท์พุตที่ได้จากการคำนวณและผู้ใช้สามารถปรับค่าเทรชโฮลด์ของการคำนวณจาก 0 ถึง 1 ค่า เทรชโฮลด์ในวิทยานิพนธ์นี้ ถูกกำหนดให้มีค่า 0.5 โดยตั้งค่าให้เป็น “1” เมื่อค่าคำนวณได้ ≤ 0.5 และจะมีค่าเป็น “0” เมื่อค่าที่ได้จากการคำนวณ ≤ 0.5

การจำแนกรุ่นของคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์บัสลาสต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมถูกสอนจนสามารถจดจำข้อมูลได้ทั้งหมดแล้ว ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่า ไบอัส (Bias) ถูกกำหนดลงในโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบด้วย โหนดอินพุตจำนวน 8 โหนด 40 ฮิดเดน และ เอาท์พุต 5 โหนด ถูกใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโครงข่ายคือค่าความผิดพลาดมากที่สุด(Maximum Error) ค่าอัตราการเรียนรู้(Learning Rate) และค่าโมเมนตัม(Momentum) ถูกกำหนดให้เป็น 0.00001, 0.001 และ 1 0.6 ตามลำดับ

วิธีการของการจดจำและจำแนกรุ่นของอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ(EUT) จะแสดงในรูปที่ ก. 34



(ก) การสอนโครงข่าย (ข) การจำแนกชนิดของวงจรโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำรูปที่ ก.34 แสดงการนำสัญญาณของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเข้าสู่โครงข่ายเพื่อจำแนกรุ่นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงตัวอย่างในการคำนวณส่วนอินพุตและเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียม

Ballast /Comp. Model		Frequency Interval (Intv.) which input to the NN								NN Target				
		Int.1	Int.2	Int.3	Int.4	Int.5	Int.6	Int.7	Int.8	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Comp A	- μ	39.56	34.36	29.17	27.02	23.56	0.00	0.00	0.00					
	- σ	3.60	2.58	0.82	1.15	1.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0
	-P	0.06	0.08	0.15	0.14	1.00	0.00	0.00	0.00					
Comp B	- μ	33.43	28.74	24.16	22.75	22.43	0.00	0.00	0.00					
	- σ	3.54	1.82	1.41	1.04	0.43	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	1
	-P	0.06	0.10	0.12	0.14	0.17	0.00	0.00	0.00					
Comp C	- μ	55.73	43.57	39.83	0.00	33.95	0.00	0.00	0.00					
	- σ	3.47	2.36	0.69	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0	0	0	1	0
	-P	0.06	0.09	0.15	0.00	1.14	0.00	0.00	0.00					
Comp D	- μ	41.29	39.04	32.70	31.28	26.53	0.00	0.00	0.00					
	- σ	3.90	2.46	1.00	1.00	0.84	0.00	0.00	0.00	0	0	0	1	1
	-P	0.05	0.86	1.00	1.00	0.15	0.00	0.00	0.00					
Ball. A	- μ	39.56	34.36	29.17	27.02	23.56	0.00	0.00	0.00					
	- σ	3.60	2.58	0.82	1.15	1.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0
	-P	0.06	0.08	0.15	0.14	1.00	0.00	0.00	0.00					
Ball. B	- μ	33.43	28.74	24.16	22.75	22.43	0.00	0.00	0.00					
	- σ	3.54	1.82	1.41	1.04	0.43	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	1
	-P	0.06	0.10	0.12	0.14	0.17	0.00	0.00	0.00					
Ball. C	- μ	55.73	43.54	39.83	0.00	33.95	0.00	0.00	0.00					
	- σ	3.47	2.36	0.69	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0	0	0	1	0
	-P	0.06	0.09	0.15	0.00	1.14	0.00	0.00	0.00					
Ball. D	- μ	41.29	39.04	32.70	31.28	26.53	0.00	0.00	0.00					
	- σ	3.90	2.46	1.00	1.00	0.84	0.00	0.00	0.00	0	0	0	1	1
	-P	0.05	0.86	1.00	1.00	0.15	0.00	0.00	0.00					

ตารางที่ ก.2 แสดงผลการคำนวณจากโครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย

Ball./ Comp. Model	Computed output					Converted output				
	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C _{5B}
B.(A)	0.01	-0.59	0.01	0.24	0.18	0	0	0	0	0
B.(B)	0.03	0.45	-0.49	0.09	0.92	0	0	0	0	1
B.(C)	-0.9	0.00	-0.10	0.65	-0.91	0	0	0	1	0
B.(D)	0.39	0.20	-0.47	-0.47	0.87	0	0	0	1	1
C.(A)	-0.01	0.45	-0.56	0.09	0.00	0	0	0	0	0
C.(B)	0.09	-1.00	0.21	0.44	1.00	0	0	0	0	1
C.(C)	0.32	0.01	0.00	0.98	-0.99	0	0	0	1	0
C.(D)	-0.90	0.21	-0.55	0.86	0.91	0	0	0	1	1

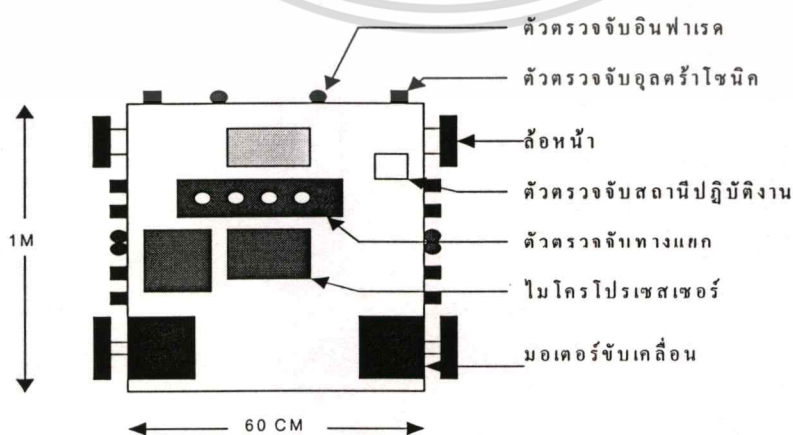
การใช้โครงข่ายประสาทเทียมจดจำและจำแนกสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าของอุปกรณ์ประเภทตั้งพื้น

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้หุ่นยนต์ขนส่ง (Automatic Guidance Vehicle) เป็นอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบ(Equipment Under test) เหตุผลที่ใช้หุ่นยนต์เป็นในการทดสอบเพราะผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบการทำงานของอุปกรณ์ซึ่งผลิตสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาได้หลายรูปแบบ และสามารถตรวจสอบการทำงานของระบบได้

ฟังก์ชันการทำงานของหุ่นยนต์ขนส่งมีการทำงานที่ซับซ้อนกว่า อุปกรณ์ทดสอบอื่นๆ โดยมีส่วนกำเนิดสัญญาณอัลตราโซนิคความถี่ 40kHz ส่วนผลิตสัญญาณอินฟราเรด ส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์ วงจรควบคุมและประมวลผล การควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์จะใช้โครงข่ายประสาทเทียม

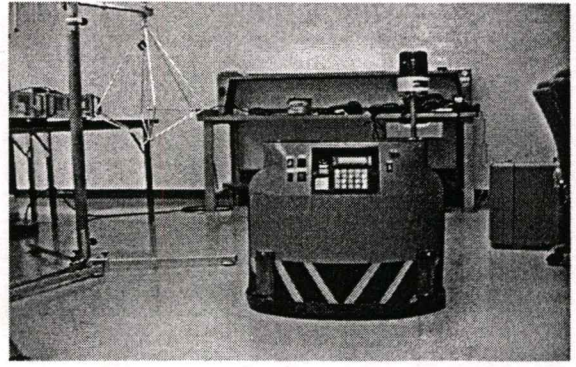
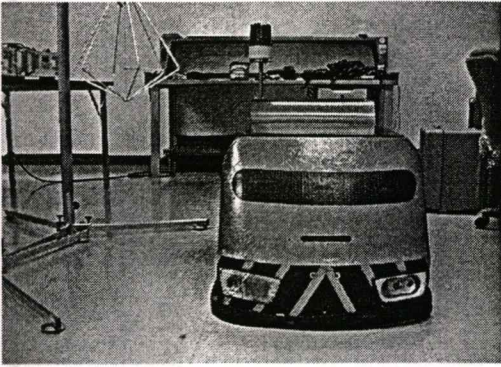
โครงสร้างของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ขนส่งมีขนาดความยาว 1 เมตร กว้าง 60 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร มี 4 ล้อ น้ำหนักรวม 200 กิโลกรัม มีส่วนขับเคลื่อนเป็นมอเตอร์กระแสตรง(DC Motor) ซึ่งเป็นอิสระกัน 2 ตัว ขับเคลื่อนโดยอาศัยหลักการของความเร็วแตกต่าง(Differential Speed) มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ 15 เมตร/วินาที ตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายนอกของหุ่นยนต์มี 40 ตัว ประกอบด้วย ตัวตรวจจับเส้นทางเดินแบบเมตริกซ์ขนาด 4x 4 จำนวน 1 ชุด ตัวตรวจจับทางแยก 4 4 ตัว ตัวตรวจจับสถานีปฏิบัติงาน 8 ตัว ตัวตรวจจับสิ่งกีดขวางแบบอินฟราเรด(Infrared) และอัลตราโซนิค(Ultrasonic)อย่างละ 3 ชุด ตัวตรวจจับบางชนิดกำเนิดสัญญาณได้ทั้งแบบอนาล็อกและดิจิทัล นอกจากนี้หุ่นยนต์ยังมีระบบควบคุมจากระยะไกลโดยการใช้อินฟราเรด และระบบป้องกันของยานขนส่ง เช่นระบบกันชน ระบบปิด เปิด ไฟ และเสียงเตือน ตัวประมวลผลกลางของหุ่นยนต์ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์ 80486 ส่วนของการควบคุมจะใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโมเดลเป็นแบบการแพร่กระจายกลับ (Back-Propagation)



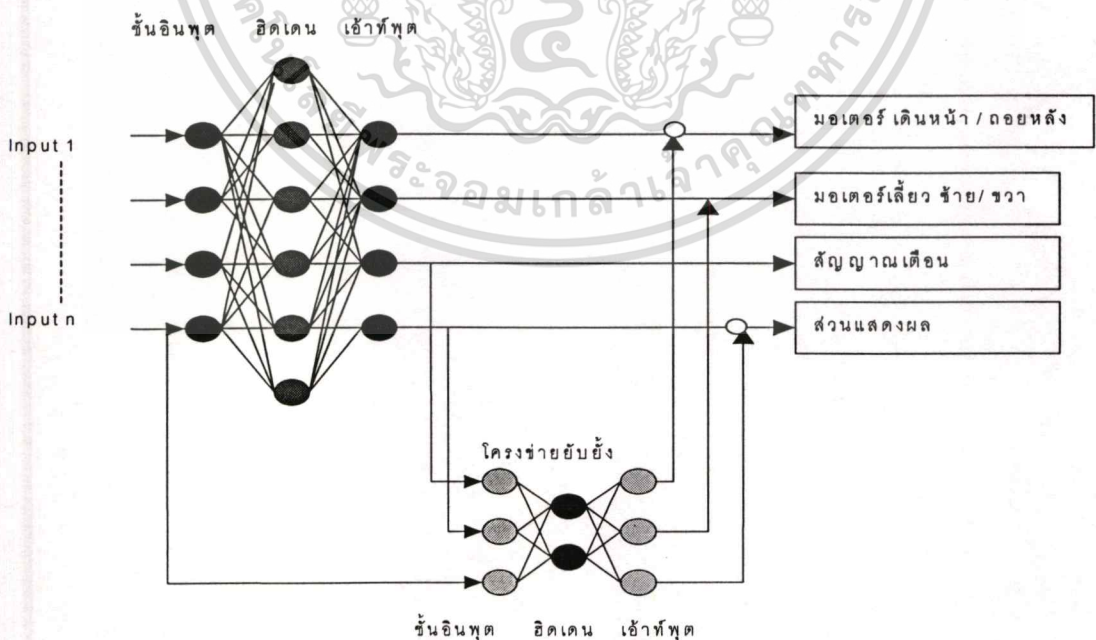
รูปที่ ก.35 แสดงส่วนประกอบของหุ่นยนต์ขนส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของนักศึกษานี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.36 แสดงโครงสร้างของหุ่นยนต์ขนส่ง

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ขนส่งมีโครงสร้างดังรูปที่ ก.37 โครงข่ายประสาทเทียมที่ในงานวิจัยนี้มี 2 แบบคือ โครงข่ายหลัก และโครงข่ายยับยั้ง โครงข่ายหลักมีหน้าที่คำนวณค่าเอาต์พุตที่ต้องการ เมื่อรับข้อมูลจากอินพุตเข้ามา เมื่อได้ค่าเอาต์พุตแล้วจะนำสัญญาณไปควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน 2 ตัวซึ่งจะมีการทำงานคือ เดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา และส่วนสัญญาณเตือนต่างๆ โครงข่ายยับยั้งทำหน้าที่หยุดการทำงานของยานขนส่งในขณะที่มีเหตุการณ์บางอย่างเกิดขึ้นอย่างกะทันหัน เช่น เกิดการชนกับสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนที่เร็วมากจนตัวตรวจจับไม่สามารถตรวจจับได้ทัน โครงสร้างโดยทั่วไปของโครงข่ายยับยั้งนี้จะเหมือนกับโครงข่ายหลักดังรูปที่ ก.37



รูปที่ ก.37 แสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์ขนส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในโอกาสพิเศษเท่านั้น ผู้ใช้ควรปฏิบัติตามเงื่อนไขการใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 แสดงแพทเทิร์นของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์ขนส่ง

Training Pattern																								
Input														Output										
Pat	GL	GR	PL	PR	X1	X2	X3	X4	IF	IL	IR	UF	UI1	UI2	U+1	M1F	M1B	M1R	M1L	MrF	MrB	MrR	MrL	Li
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
10	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1
16	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1
17	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
18	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
19	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
20	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
21	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
22	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
23	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
24	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
26	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
28	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
29	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
33	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
34	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
35	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
36	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามการใช้นานที่เอกสารนี้ถูกเผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้เป็นไปเพื่อประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Pat : แพทเทิร์น
- GL : ตัวตรวจจับทางเดินนำร่องซี่กซ้าย
- GR: ตัวตรวจจับทางเดินนำร่องซี่กขวา
- PL: ตัวตรวจจับทางแยกซี่กซ้าย
- PR: ตัวตรวจจับทางแยกซี่กขวา
- X1: ตัวตรวจจับสถานีปฏิบัติงานตัวที่ 1
- X2: ตัวตรวจจับสถานีปฏิบัติงานตัวที่ 2
- X3: ตัวตรวจจับสถานีปฏิบัติงานตัวที่ 3
- X4: ตัวตรวจจับสถานีปฏิบัติงานตัวที่ 4
- IF: ตัวตรวจจับอินฟราเรดด้านหน้า
- IL: ตัวตรวจจับอินฟราเรดด้านซ้าย
- IR: ตัวตรวจจับอินฟราเรดด้านขวา
- UF: ตัวตรวจจับอุลตราโซนิกด้านหน้า
- UI1: ตัวตรวจจับอุลตราโซนิกด้านซ้ายตัวที่ 1
- UI2: ตัวตรวจจับอุลตราโซนิกด้านซ้ายตัวที่ 2
- Ur1: ตัวตรวจจับอุลตราโซนิกด้านขวาคู่ที่ 1
- Ur2: ตัวตรวจจับอุลตราโซนิกด้านขวาคู่ที่ 2
- M1F: มอเตอร์ซ้ายเดินหน้า
- M1B: มอเตอร์ซ้ายลอยหลัง
- M1R: มอเตอร์ซ้ายเลียขวา
- M1L: มอเตอร์ซ้ายเลียซ้าย
- MrF: มอเตอร์ขวาเดินหน้า
- MrB: มอเตอร์ขวาลอยหลัง
- MrR: มอเตอร์ขวาเลียขวา
- MrL: มอเตอร์ขวาเลียซ้าย
- Li: ไฟฉุกเฉินสำหรับขอทาง

การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากหุ่นยนต์ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

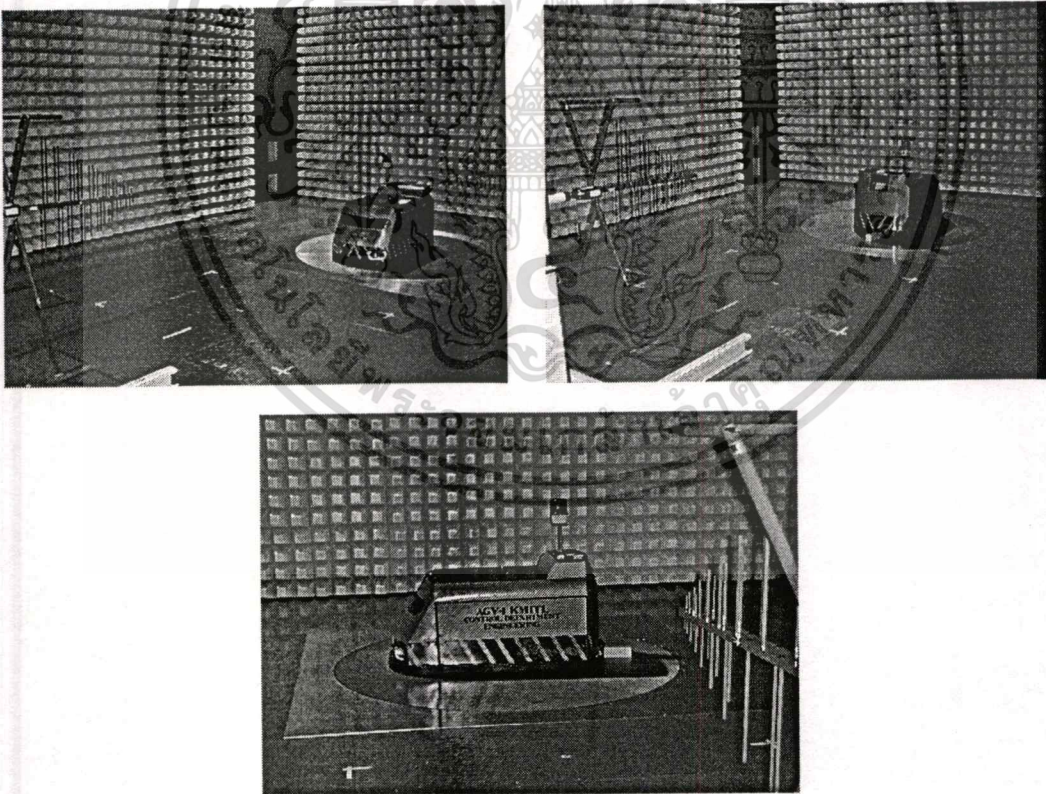
1. การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแพร่ออกมาจากตัวตรวจจับสัญญาณอินฟราเรด (Infrared Sensor) ตัวตรวจจับสัญญาณอุลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor) ส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์ วงจรควบคุมและประมวลผล โดยจะทำการศึกษาพฤติกรรมการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรแต่ละชนิดแยกเป็นส่วนๆ และนำสัญญาณที่ได้ไปทำการวิเคราะห์และจำแนกสัญญาณแต่ละชนิด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า โดยรวมของหุ่นยนต์ คือการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากหุ่นยนต์ซึ่งมีการทำงานของอุปกรณ์ทุกชนิดที่ติดตั้งบนตัวของหุ่นยนต์ และทำการจำแนกการทำงานของอุปกรณ์ในแต่ละเวลา

ในการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าของหุ่นยนต์ ตัวหุ่นยนต์ขนส่งจะถูกวางอยู่บนแท่นหมุนรัศมี 1.5 เมตร การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากหุ่นยนต์ จะใช้สายอากาศแบบ Biconical และ Log-Periodic ซึ่งสามารถรับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 30MHz ถึง 1GHz ใน Semi-Anechoic Chamber. ที่ระยะทดสอบ 3 เมตร ตามมาตรฐาน CISPR22รูปแบบการติดตั้งและจัดวางถูกแสดงในรูปที่ ก.38 ในระหว่างการทดสอบสายอากาศซึ่งติดตั้งอยู่บน Antenna Mast จะเคลื่อนที่ขึ้นลง ในช่วงความสูง 1 ถึง 4 เมตร แท่นหมุนจะเคลื่อนที่ในระนาบ 0 องศาถึง 360 องศาเพื่อหาตำแหน่งที่คอมพิวเตอร์แพร่สัญญาณออกมามากที่สุด

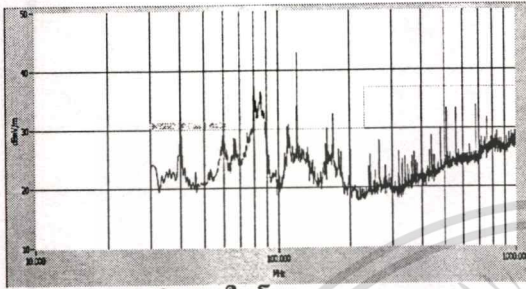
สัญญาณที่วัดได้ในแต่ละความถี่ จะสัมพันธ์กับทิศทางการแพร่คลื่น จะถูกนำมาประเมินผล โดยจะทำการรวมสัญญาณสูงสุดในแต่ละตำแหน่งการวัดจะใช้ฟังก์ชัน Max-Hold บันทึกค่าของสัญญาณสูงสุดที่แพร่ออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์ ผลการวัดสัญญาณในช่วงความถี่ 30MHz ถึง 1GHz แสดงดังรูปที่ ก.39 (ก) ถึง (ข)



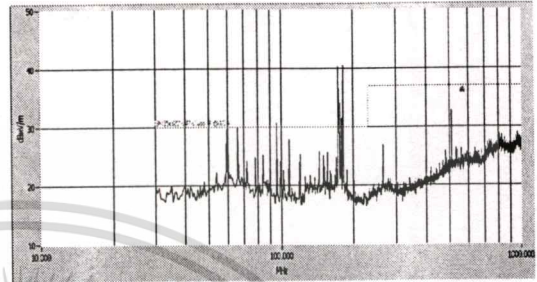
รูปที่ ก.38 การวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าของหุ่นยนต์ใน Anechoic Chamber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

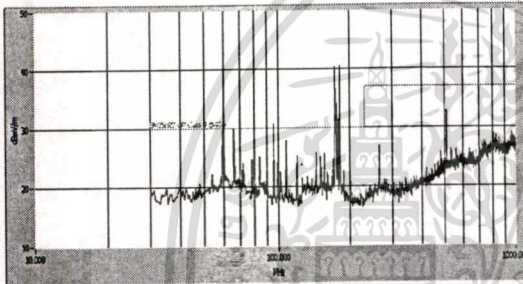
จากรูปสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาจากหุ่นยนต์ขนส่งและอุปกรณ์ตรวจจับในแต่ละแบบมีลักษณะแตกต่างกันและเป็นประโยชน์กับโครงข่ายประสาทเทียมในการจดจำและจำแนกการทำงานของอุปกรณ์แต่ละแบบ โดยการใช้สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมา สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่ออกมาในแต่ละความถี่จะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการประเมินผลทางสถิติ และถูกนำไปป้อนเป็นอินพุต ของโครงข่ายประสาทเทียม



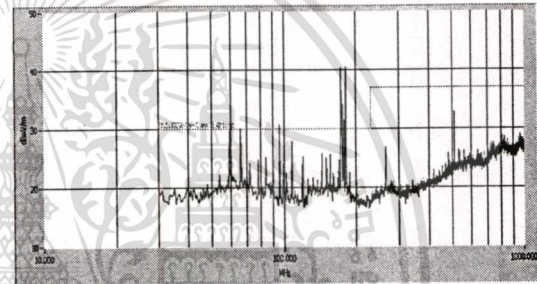
(ก) การทำงานในโหมด A



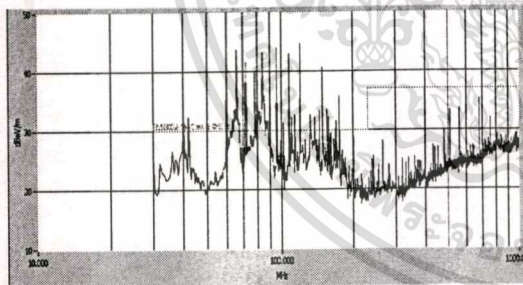
(ข) การทำงานในโหมด B



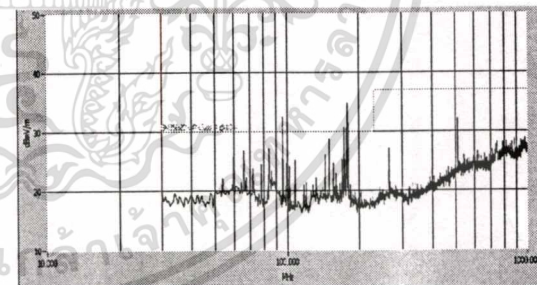
(ค) การทำงานในโหมด C



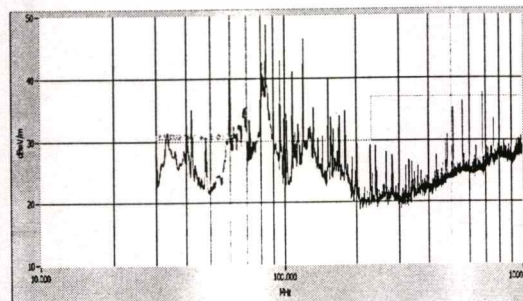
(ง) การทำงานในโหมด D



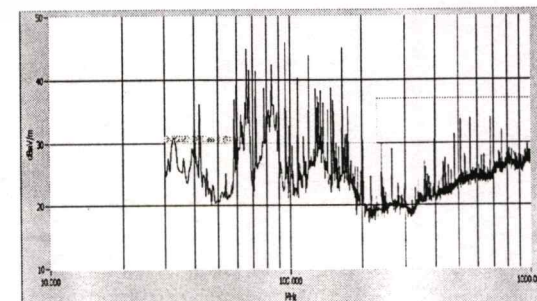
(จ) การทำงานในโหมด E



(ฉ) การทำงานในโหมด F



(ช) การทำงานในโหมด G



(ซ) การทำงานในโหมด H

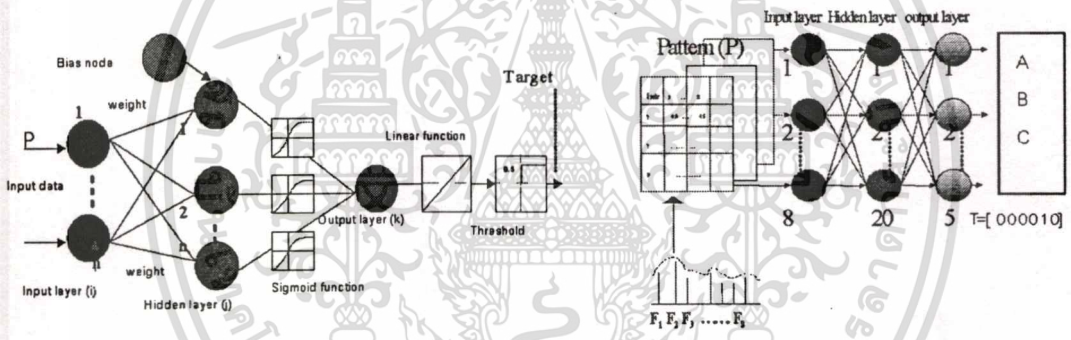
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก.39 แสดงสนามไฟฟ้าที่วัดจากหุ่นยนต์ในโหมดที่แตกต่างกัน
มีความถี่แตกต่างกัน ออกทั้งห้ามมเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบด้วยอินพุต 8 โหนด ฮิดเดน 20 โหนด และเอาต์พุต 5 โหนดสามารถจำแนกชนิดของการทำงานของวงจรของหุ่นยนต์ได้ทั้งหมด

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าของการคำนวณทางสถิติของค่ากลาง(Means) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่าความน่าจะเป็น(Probability) ของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลของวงจรการควบคุมการทำงานและส่วนตรวจจับต่างๆ ของหุ่นยนต์ ซึ่งถูกใช้เป็นอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนอินพุต ของโครงข่ายประสาทเทียมถูกกำหนดให้เป็นสัญญาณดิจิทัลแบบ 5 บิต และถูกใช้ในการจำแนก โหมดการทำงานของหุ่นยนต์ขั้นสูง

ค่าเอาต์พุตซึ่งได้จากการคำนวณของ โครงข่ายถูกเปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุตเป้าหมาย(Target) ค่าการแปลงที่ได้จากเอาต์พุต(Converted Output) ถูกเปรียบเทียบกับค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) ของค่าเอาต์พุตที่ได้จากการคำนวณและผู้ใช้สามารถปรับค่าเทรชโฮลด์ของการคำนวณจาก 0 ถึง 1 ค่าเทรชโฮลด์ในวิทยานิพนธ์นี้ ถูกกำหนดให้มีค่า 0.5 โดยตั้งค่าให้เป็น “1” เมื่อค่าคำนวณได้ ≤ 0.5 และจะมีค่าเป็น “0” เมื่อค่าที่ได้จากการคำนวณ ≤ 0.5



ก) การสอนโครงข่าย (ข) การจำแนกชนิดของวงจรโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

รูปที่ ก.40 แสดงการนำสัญญาณของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเข้าสู่โครงข่ายเพื่อจำแนกรุ่น

การจำแนกโหมดการทำงานของหุ่นยนต์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

เมื่อโครงข่ายประสาทเทียมถูกสอนจนสามารถจดจำข้อมูลได้ทั้งหมดแล้ว ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่า ไบอัส (Bias) ถูกกำหนดลงในโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบด้วย โหนดอินพุตจำนวน 8 โหนด 20 ฮิดเดน และ เอาต์พุต 5 โหนด ถูกใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงข่ายคือค่าความผิดพลาดมากที่สุด (Maximum Error) ค่าอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) และค่าโมเมนตัม (Momentum) ถูกกำหนดให้เป็น 0.00001 , 0.001 และ 10.6 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 แสดงตัวอย่างในการคำนวณส่วนอินพุตและเป้าหมายของโครงข่ายประสาทเทียม

Robot Operation Mode		Frequency Interval (Intv.) which input to the NN								Neural Network Target				
		Int.1	Int.2	Int.3	Int.4	Int.5	Int.6	Int.7	Int.8	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
A	- μ	22.2	25.00	30.00	33.6	31.60	30.20	29.40	28.00	0	0	0	0	0
	- σ	0.77	2.00	2.45	2.75	0.19	1.33	1.51	0.64					
	-P	0.15	0.10	0.08	0.07	0.10	0.13	0.12	0.16					
B	- μ	18.00	22.00	27.30	33.40	20.00	25.80	25.00	25.00	0	0	0	0	1
	- σ	0.63	0.63	1.03	2.87	1.72	2.16	0.63	0.49					
	-P	0.16	0.16	0.14	0.07	0.11	0.09	0.16	0.17					
C	- μ	23.44	30.60	39.05	39.40	27.20	31.00	30.40	29.30	0	0	0	1	0
	- σ	1.08	1.99	2.20	4.05	0.82	1.53	0.83	0.67					
	-P	0.15	0.01	0.09	0.04	0.15	0.11	0.15	0.16					
D	- μ	22.00	31.40	39.80	40.20	28.20	31.00	30.60	27.00	0	0	0	1	1
	- σ	0.63	1.64	2.10	1.87	1.50	1.47	1.40	0.63					
	-P	0.16	0.13	0.09	0.04	0.11	0.12	0.13	0-16					
E	- μ	23.20	30.00	42.60	39.40	27.00	30.20	30.00	27.00	0	0	1	0	0
	- σ	0.82	2.08	0.698	2.13	1.40	1.50	1.45	0.63					
	-P	0.15	0.09	0.16	0.90	0.14	0.12	0.12	0.16					
F	- μ	18.20	21.80	26.80	25.80	23.60	26.80	25.00	22.60	0	0	1	1	1
	- σ	1.45	1.07	1.56	0.53	0.19	1.45	0.63	3.56					
	-P	0.13	0.14	0.17	0.17	0.19	0.13	0.16	0.05					
G	- μ	27.00	34.80	42.80	41.00	29.20	31.00	29.32	27.00	0	1	0	0	0
	- σ	0.63	1.95	1.23	1.43	1.57	1.47	1.58	0.63					
	-P	0.16	0.13	0.13	0.13	0.18	0.12	0.12	0.16					
H	- μ	17.20	20.00	29.80	29.80	29.00	23.60	26.40	25.80	0	1	0	0	1
	- σ	0.76	0.63	1.23	1.97	1.65	1.07	1.76	0.36					
	-P	0.15	0.16	0.13	0.01	0.11	0.14	0.19	0.17					

ตารางที่ ก.5 แสดงผลการคำนวณจากโครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย

E-Ballast Model	Computed Output					Converted Output				
	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
A	0.00	-0.92	0.43	0.07	-0.87	0	0	0	0	0
B	0.04	-0.98	-0.56	0.02	1.00	0	0	0	0	1
C	0.00	0.00	-0.12	0.99	0.08	0	0	0	1	0
D	-1.00	0.09	-0.32	0.56	0.86	0	0	0	1	1
E	0.03	0.43	0.92	-0.98	0.21	0	0	1	0	0
F	0.43	0.00	0.60	0.87	0.76	0	0	1	1	1
G	0.01	0.66	-0.54	-0.32	1.00	0	1	0	0	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัย

ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

1. K.Aunchaleevarapan, K.Paitoonwatanakij, Y.Preampraneerach, Wkhan-ngern, S.Nitta "Classification of PCB Configuration from Radiated EMI by Using Neural Network", Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetic CEEM'2000", May 3-7,2000 Shanghai, China, pp. 105-110.
2. K.Aunchaleevarapan, K.paitoonwatanakij, Y.Preampraneerach, W.Khan-ngern, S.Nitta,"Artificial Neural Network for predicting PCB Configurations from Radiated EMI", 1999 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems ISPACS'99", December 8-10,1999, Phuket, Thailand,pp.773-776.
3. K.Aunchaleevarapan, K.paitoonwatanakij, Y.Preampraneerach,W.Khan-ngern,S.Nitta, "Identification Basic Digital Circuits from Radiated EMI by Using Neural Network", 2000 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, ISPACS 2000", November 5-8,2000,Hawaii, USA,pp.1056-1060.
4. K.Aunchaleevarapan, K.Paitoonwatanakij, Y.Preampraneerach, W.Khan-ngern, S.Nitta, "Radiated EMI Recognitin and Identification for PCB Configurations and Digital Circuit Using a Neural Network", Electromagnetic Compatibility 2001, 14thInternational Zurich symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility", February 20-22,2001, Zurich, Switzerland, pp.567-572.
5. K.Aunchaleevarapan, K.Paitoonwatanakij, W.Khan-ngern, S.Nitta, "Novel Method for Predicting PCB Configurations from Near-Field and Far-Field Radiated EMI Using Neural Network", IEICE Trans. on Communication, Mach 2002, Japan.
6. K.Aunchaleevarapan, K.Paitoonwatanakij, Y.Preampraneerach, W.Khan-ngern, S .Nitta, "A test method for recognizing and identifying the complicated system from radiated EMI by using neura network", International Conference on Electromagnetic Compatibility, Bangkok, Thailand, July,2002, Thailand.
7. K.Aunchaleevarapan, Y.Preampraneerach, W.Khan-ngern, and V.Ungvichian, "Radiated Immunity testing for a low cost robot", International Conference on Electromagnetic

เอกสารนี้ Compatibility, Bangkok Thailand, July,2002, Thailand. นี้ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

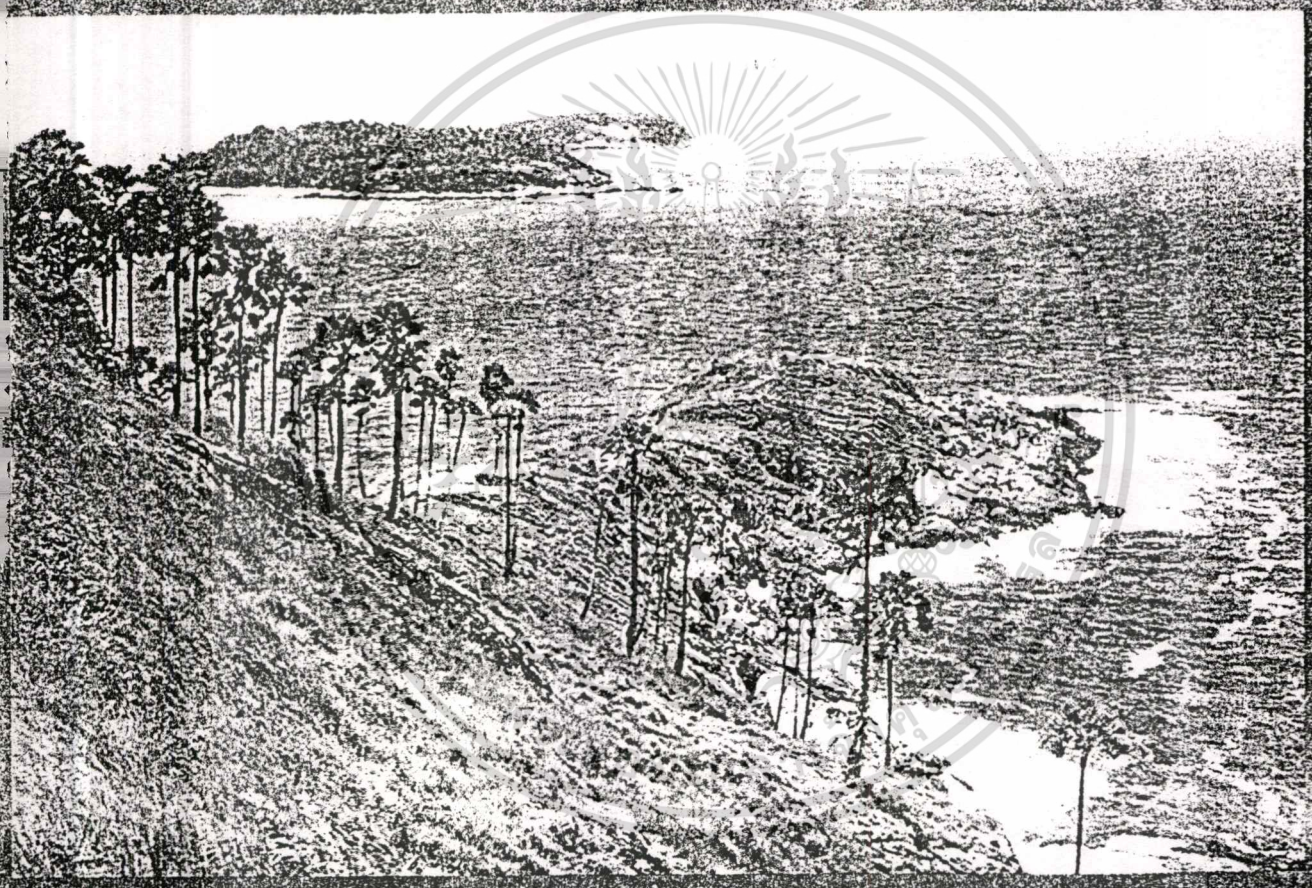
8. K.Aunchaleevarapan, Y.Preampraneerach, W.Khan-ngern, S. Kaophenyai, "Recognition and identification a computer and electronic ballast by radiated EMI using neural network", *Electromagnetic Compatibility*, 2003, 15th International Zurich symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic compatibility, 18-22, Zurich, Switzerland, 2003



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1999 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems **ISPACS'99**



Signal Processing and Communications Beyond 2000

December 8-10, 1999

Phuket Arcadia Hotel & Resort, Phuket, Thailand



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Artificial Neural Networks for Predicting PCB Configurations from Radiated EMI

Kraison Aunchaleevarapan, Kitti Paithoonwatanakij and Yothin Preampraneerach

Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology,
King Mongkut's Institute of Technology Chaokunthaharn, Ladkrabang, (KMITL)

Cha'ngkrung Road, Bangkok, 10520, Thailand Phone (66-2) 739-2190-95 Email yprempa@notes.nectec.or.th

Abstract

In this paper a neural network is used to recognize a PCB configurations from its emission spectrum. The learning process is accomplished by giving the neural network different radiated emission spectrum of seven basic shapes of PCB configurations. The trained neural network is successfully able to predict the PCB configurations.

1. Introduction

In the design of printed circuit boards, there is considerable interest in using layouts which minimize electromagnetic emission. Most printed circuit board (PCB) designs use strip line or microstrip line structures in order to reduce high frequency radiated emissions. The detection and identification of electromagnetic emission can be obtained from radiated field measurement. The identification of EM field source of various PCB configuration has been developed by using Software tools it can calculate radiated fields from electromagnetic system. However, it is very difficult to use and do a poor job of estimating emission levels. This is partly because it is not practical to enter into a computer all the information about a system that plays a rule in the radiated EMI levels. There are several techniques such as the simulated annealing and evolution algorithms can be applied in order to minimize the error between the expected and predicted spectra of the radiated field. However, there are a few disadvantages, for example:

1. consisting of several complicated calculations which require very long computation time;
2. unable to work with unknown parameters of the system.

In this paper the neural network approach is applied in order to recognize whether frequency spectra of radiated electric field are produced by different PCB configurations. The learning process is accomplished by using computation results referring to simulation models of different PCB layouts. The trained neural network is tested on measured radiated spectra functions, such as correct summing and produce an output voltage which is sigmoid function of total input to the node. This sigmoid input-output behavior is typical of operational amplifiers. The output of a processor is also referred to as its activity level. Processor is connected to other via conducted elements which propagate signal between processors. The conductance value determines the connectivity pattern in the network. Its value is adaptively adjusted during the learning process.

2. Structured Hierarchical Network Model for the Analysis of EM Field radiated from PCB configurations

In the analysis of EM field from PCB configurations with a layered network, we adopted a neural network (NN) model

that handles a series of behavior patterns. Figure 1 shows the structure hierarchical network.

The neural network developed procedure consists in the following 4 steps. First, the neural network input is the characterized PCB emission spectrum. Second, the sample parts of the spectrum are computed for neural network training configurations. Third, NN weight are learned through the training process. Finally, the NN is used for new spectra identifications.

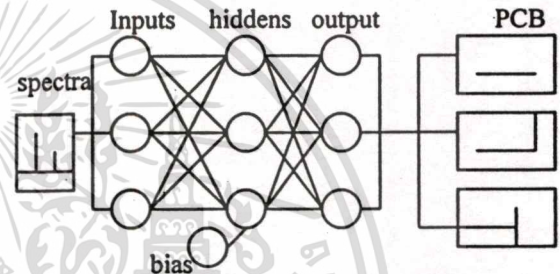


Fig. 1 Structured hierarchical network model

3. PCB Configurations

The several microstrip PCB configurations are shown in Figure 2. Each microstrip is formed either by a single, T-shaped, H-shaped, U-shaped, L-shaped, X-shaped and 7-shaped tracks. The track configurations are adjusted to match the characteristic resistance of 50 Ω at both the terminals and the branch points (see Fig.3). The geometrical parameters of each PCB layout are shown in Table 1.

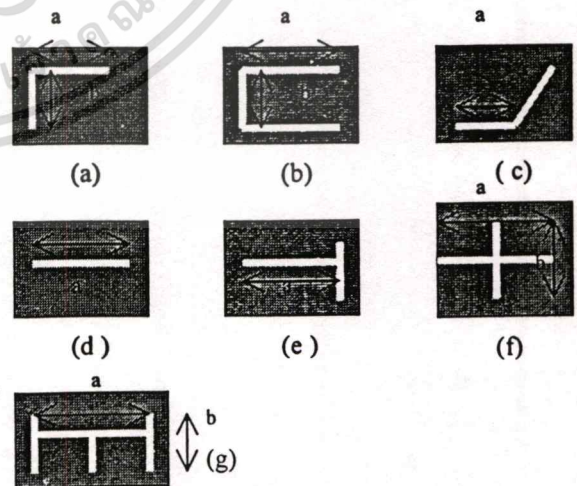


Fig 2. Geometrical configurations of single track (a) L-shaped, (b) U-shaped, (c) 7-shaped, (d) I-shaped, (e) T-shaped, (f) I-shape, (g) H-shape

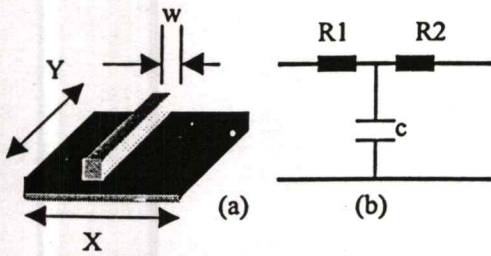


Fig.3 Details of I-shaped track configuration
(a) configuration of PCB (b) equivalent circuit

Table 1. Geometrical of PCB layouts.

PCB shaped	Dimension (cm)		Track width (cm)	Track long (cm)	
	X	Y		a	b
L	17cm	22cm	1cm	12cm	18cm
U	17cm	22cm	1cm	12cm	18cm
7	17cm	22cm	1cm	7cm	17cm
I	17cm	22cm	1cm	18cm	0cm
T	17cm	22cm	1cm	15cm	18cm
X	17cm	22cm	1cm	18cm	18cm
H	17cm	22cm	1cm	15cm	18cm

The former is designed to have the characteristic resistance of 50Ω, in the latter the center track and H-shaped track are designed to have the characteristic resistance of 100Ω and 200Ω, respectively.

4. The Experiment

In this paper both near field and far field of the EM radiation of the PCB were measured in order to compare outputs spectrum 10MHz up to 1GHzHz frequency. Each PCB configurations are placed on 1-m high metallic-free table inside the Semi-anechoic chamber (see Fig.4). Both near -field of the EM radiation of the PCB were measured in order to compare the output spectrum from 10MHz to 1 GHz. In far-field measurement only horizontal E-fields were measured by using a biconical antenna (for the frequency 30MHz to 200MHz) and a log-periodic antenna (for the frequency 200MHz to 1GHz) placing on the antenna mast at the distance of 3m and at the height of 1 m. In near-field measurement (see Fig.5) a small loop antenna was used for the frequency 10 MHz up to 500MHz.

Source and load impedance were put into the concerned segments. The parameter of insulation dielectric and conductor loss are not included in this model. The Pulse generator is digital signal were a train of square wave pulse, having 30 MHz frequency, 0.5 duty cycle and 4 ns rise time.

The envelope detector program of the spectrum analyzer is used to identify the characteristic of the PCB emission spectrum. Figure 6 and Figure 7 show the measured spectrum together with their envelope from the far-field and near-field measurement, respectively. In the case of far-field measurements, the spectrum of all configurations are very similar at low frequency (30-200 MHz). However, in high frequency (200 MHz to 1 GHz), the spectrum of all configurations are different. Figure 6 (a) and (b) show

the example of the far-field spectrum at low and high frequency, respectively. The spectrum from the far-field measurement are therefore unsuitable for the neural network input, because it is too difficult to classified the PCB Configurations at lower frequency. Figure 7 (a) to (d) show that the near-field spectrum of all configurations are different. Therefore, they were chosen to be the input of neural network.

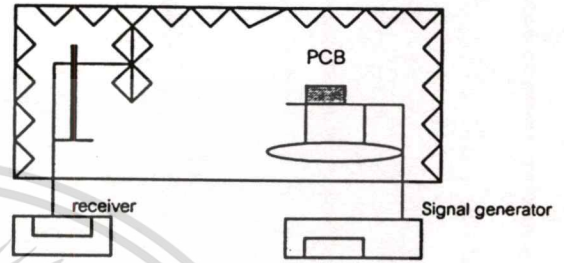


Fig. 4 Far-field measurement

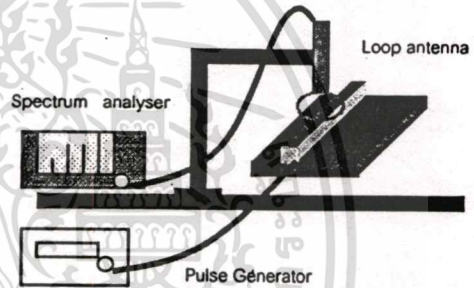


Fig.5 Near-field measurement

5. Preparing the electric-field spectrum for the neural network input

All amplitude value of the entire envelope cannot be put directly into the neural network because it has too many frequency points for the NN input. Therefore, we reduce the number of the frequency points by sampling only 8 frequencies from 10 MHz to 500 MHz. The sampling frequencies were obtained by using the following equation:

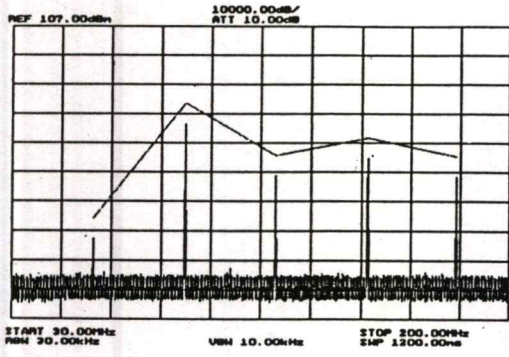
$$F_{(N+1)} = F_{(N)} / 1.5 \quad n=1,2,\dots,8 \quad (1)$$

According to equation 1, the sampling frequencies of the near-field spectrum (10-500 MHz) are 29.25, 43.88, 65.88, 98.72, 148.15, 222.23, 333.39 and 500 MHz. Table 2 shows the amplitude in dBμV/m at each sampling frequency of the input spectra and the PCB configurations. Table 3 shows the target output of learning patterns in the NN for each PCB configuration.

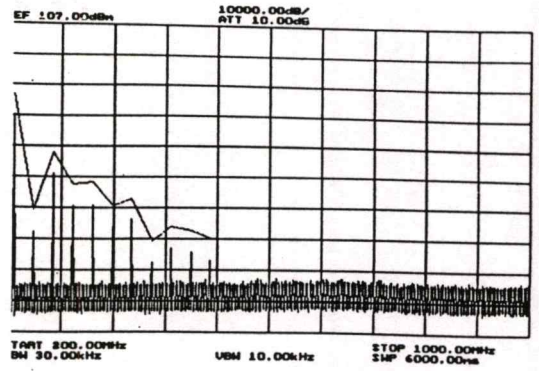
6. Results and Discussion

The calculated and converted NN outputs are shown in Table 4. The converted output is the threshold value of the calculated output. With 8 inputs, 1 bias, 10 hidden and 3 output nodes, the neural network can successfully identify all the seven PCB configurations.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

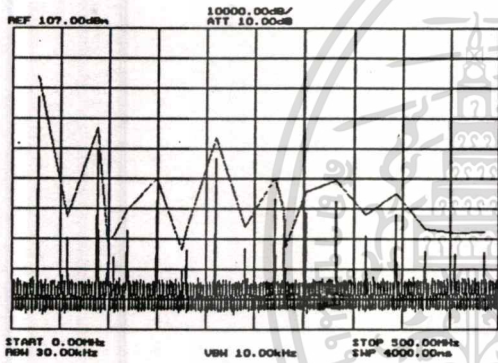


(a) I-shaped track 30MHz to 200MHz

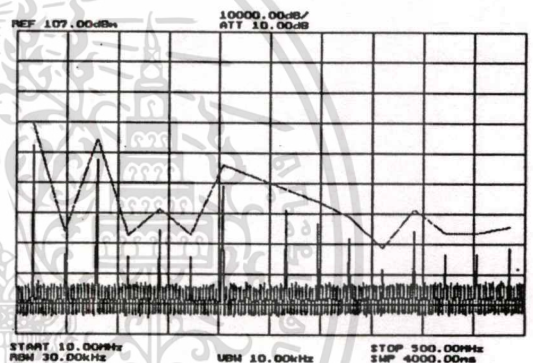


(b) I-shaped track 200MHz to 1GHz

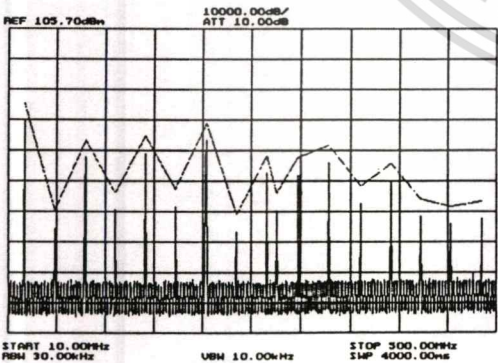
Fig. 6 Results of far-field measurements (from 30MHz to 1GHz)



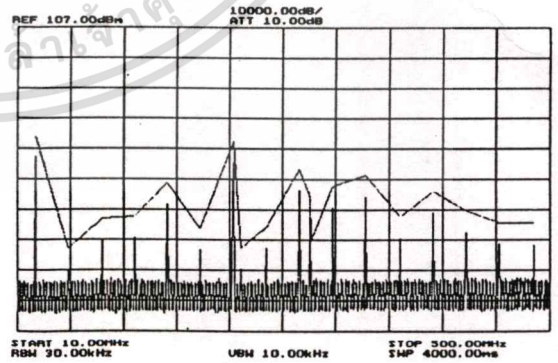
(a) 7-shape track 10MHz to 500MHz



(b) I-shaped track 10MHz to 500MHz



(c) U-shaped track 10MHz to 500MHz



(d) H-shaped track 10MHz to 500MHz

Fig. 7 Results of near-field measurements (from 10MHz to 500MHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2 Sampling frequencies of each PCB configuration.

Shape	Amplitude of input spectrum at each sampling frequencies (dB μ V)							
	29.25MHz	43.88MHz	65.88MHz	98.72MHz	148.15MHz	222.23MHz	333.39MHz	500MHz
7	65.0	60.0	40.0	31.0	48.0	50.0	48.5	33.0
I	52.0	40.0	50.0	49.0	40.0	55.0	37.0	35.0
U	52.0	50.0	50.0	55.0	64.0	49.0	60.0	42.0
H	50.0	31.0	32.0	36.0	47.0	30.0	47.0	36.0
L	60.5	43.0	51.0	28.0	46.0	47.0	45.0	38.0
X	50	38.0	45.0	30.0	37.0	41.0	56.0	30.0

Table 3 Target output of learning patterns of each PCB configuration.

Shape	Target output of learning pattern		
	Node 1	Node 2	Node 3
7	0	0	0
I	0	0	1
U	0	1	0
H	0	1	1
L	1	0	0
X	1	0	1

Table 4 Calculation outputs from NN program of each PCB configurations.

Shape	Calculated outputs			Converted outputs		
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 1	Node 2	Node 3
7	-0.986	-0.990	-0.997	0	0	0
I	-0.944	-0.996	0.999	0	0	1
U	-1.000	0.999	-0.879	0	1	0
H	-0.999	0.984	0.985	0	1	1
L	0.983	-0.999	-0.989	1	0	0
X	0.983	-0.999	0.989	1	0	1

One of the disadvantages of this NN is that it spends a long time in learning process. However, the number of the NN-layer, input, hidden and output nodes, and sampling frequencies can be adjusted to reduce the learning time.

7. Conclusions

This work aims to use the neural network to recognize a PCB configuration from its emission spectrum. Two layer neural network were trained by using the envelope of the far-field (30MHz-1GHz) and near-field (10-500MHz) emission spectrum of seven PCB configurations. The neural network is successfully able to identify all PCB configurations from their near-field radiated emission spectrum.

References

- [1] Yang-Oing Zhang, Abraham Kandel., "Compensatory Neurofuzzy Systems with Fast Learning Algorithms," IEEE Trans. on Neural Networks, VOL.9 NO.1, pp.83-104., 1988.
- [2] Gaetano Giunta, Alessandro Neri. "Neural Correlation Based on the IPFM Model," IEEE Trans. on Systems, Vol.20, No.1, pp.262-268, 1990.

[3] S.W.Leung, Wan Lixi.A, "Mathematical Model for Cross-Talk Prediction in PCB Layouts," IEEE Symposium on EMC 1998, USA, pp.780-789, 1998.

[4] S.Ratnajeevan, H.Hoole, "Artificial Neural Networks in the Solution of Inverse Electromagnetic Field Problems," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.29, No.2, pp.1931-1934, 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROCEEDINGS

Asia-Pacific Conference on
Environmental Electromagnetics
CEEM' 2000



EIC



**EMC
SOCIETY**

May 3-7, 2000

Shanghai, China

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Classification of PCB Configurations from Radiated EMI by Using Neural Network

Aunchaleevarapan K., Paithoonwatanakij K., Preampraneerach Y., Khan-ngern W. and Nitta S.*
Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology,
King Mongkuts Institute of Technology Chaokunthaharn, Ladkrabang, (KMITL), Thailand Phone (66-2) 739-2190-95
Email yprempa@notes.nectec.or.th *Tokyo University of Agriculture & Technology, Japan

Abstract

This Paper presents a method of classifications of printed circuit board (PCB) with having several configuration by using neural network to recognized its spectrum. The learning process is accomplished by giving the neural network the different radiated emission spectrum of 22 PCB configurations. The trained neural network is successfully able to predict the PCB configurations.

1. Introduction

Radiated emission from printed circuit boards can be influenced by component and shape variations. This is particularly true for high speed digital circuit. Change in length, angle, shape and the number of PCB-trace may have a significant effect on the radiated characteristics of a real system. EMC modeling techniques and algorithm do not directly predicted the behavior of these conditions under the specified accuracy of measurement, temperature of envelopment, the location placing of PCB and other variable which make the operation of predicted PCB configuration mistake.

In this paper, the neural network (NN) approach is applied in order to recognize whether frequency spectra of radiated electric field are produced by different PCB configurations. The NN algorithm can be able to work with unknown parameters of the system and can work in order to solve problem of measurement error data.

2. Neural Network Model for the Analysis of EM Field radiated from PCB configurations

In the analysis of EM field from PCB configurations with a layered network, the authors adopted a neural network model that handles a series of behavior patterns. Figure 1 show using the neural network to

recognized PCB configurations it consist of input, hidden, bias and output node

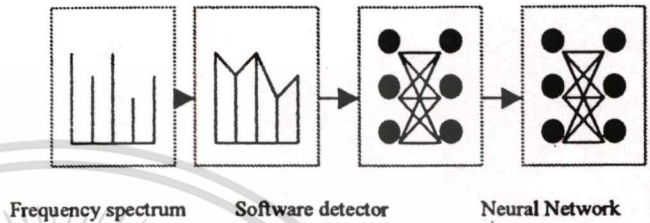


Fig. 1 Structured hierarchical network

The learning process is accomplished by using computation results referring to simulation models of different PCB layouts. The trained neural network is tested on measured radiated spectra functions, such as correct summing and produce an output voltage which is activated function of total input to the node. The choice of the activation functions depends on the type of problem to be modeled. In this paper, the 'tansig' and 'purelin' function toolbox in Math Lab are used to the activated functions of hidden and output layer, respectively show in Fig 2. This activated input-output behavior is typical of operational amplifiers. The output of a processor is also referred to as its activity level. Processor is connected to other via conducted elements which propagate signal between processors. The conductance value determines the connectivity pattern in the network. Its value is adjusted during the learning process. The target value of network is constituted by one coefficient, which is a digital value between 0 and 1. The maximum error value is a difference value between computed outputs and the target value, it is used to stop the learning process.

When the learning process is conclude, the unknown weight and bias are obtained and the final structure of the neural network is defined. The neural network is used to

compute the outputs corresponding to inputs related to the spectrum of the electric field which radiated from a PCB configuration

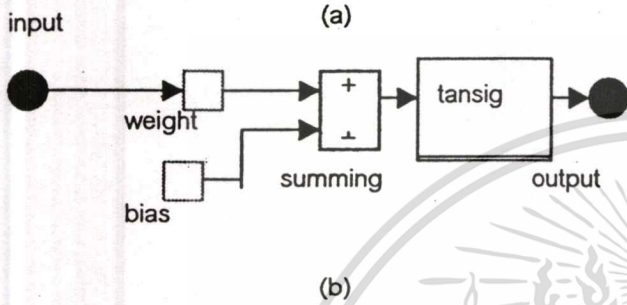
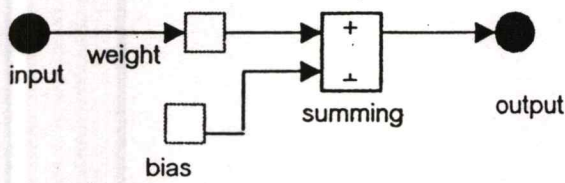


Fig 2 The models of activate function
 (a) purelin function
 (b) tansig function

3. PCB Configurations

The microstrip PCB which different configurations are prepared for testing in example, varying shape ,length,angle and number of PCB trace. The geometrical parameters of each PCB layout are shown in Table 1.

Table 1. Geometrical of PCB layouts

PCB configuration	Dimension (cm)	Track Width (cm)
Varying length I - Pattern (with 10,15,20, 25, 30,35 cm length) (Fig.4(a))	17cm x 22cm	1cm
Varying angle L- Pattern (with 30, 45, 60, 120, 135, 150 degree) (Fig.4(b))	17cm x 22cm	1cm
Varying number of trace I-pattern (with 2,3,4,5 line) (Fig.4 (c))	22cm x 35 cm	1cm
Varying shape Different -Pattern (L,U,7,I,T,X,H) (Fig.4(d))	17 cm x 22 cm	1cm

The several microstrip PCB configurations are shown in Figure 3. The trace of PCB configurations are adjusted to match the characteristic resistance of 50 Ω at both the terminals and the branch points (see Fig.3). The former is designed to have the characteristic resistance of 50Ω, in the latter the center track and H-shaped track are designed to have the characteristic resistance of 100Ω and 200Ω, respectively.

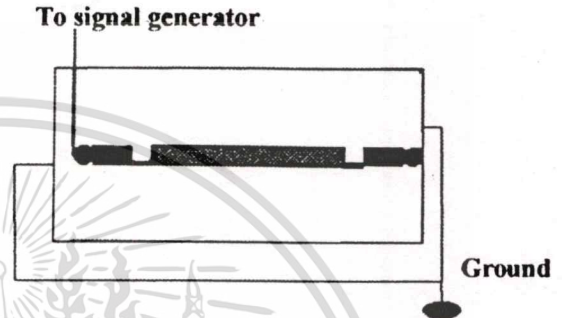


Fig.3 Geometrical configurations adjusted to match 50 Ohm resistor

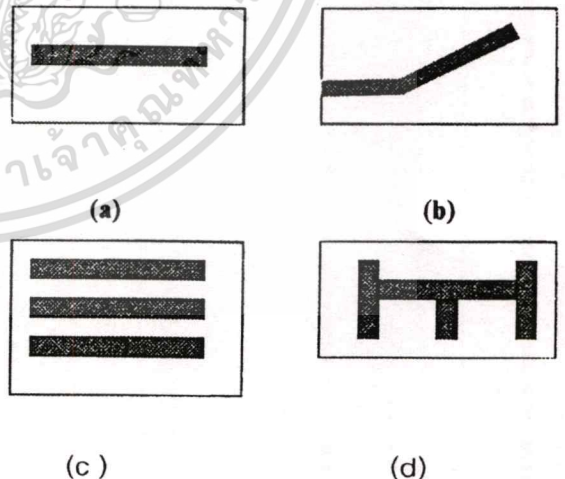


Fig 4. Geometrical configurations of PCB
 (a) I-shaped with different length 10,15,20,25,30,35 cm
 (b) L-shaped with different angle 30°,45°, 60°, 120°, 135°, 150°
 (c) I-shape with 2,3,4,5 line
 (d) PCB with different shape 7,I,U,H,L,X,

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. The Experiment

In this paper, the near field EM radiation of the PCB are measured in the range of 10MHz up to 500MHz by small loop antenna. Each PCB configurations are placed on 1-m high metallic-free table

Source and load impedance are put into the concerned segments. The parameter of insulation dielectric and conductor loss are not included in this model. The Pulse generator is digital signal were a train of square wave pulse, having 30 MHz frequency, 0.5 duty cycle and 4 ns rise time shown in Fig 5. .. The method of near-field measurement is shown in Fig 6.

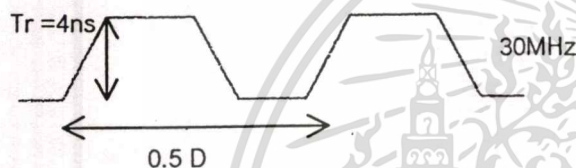


Fig 5. Shown the geometrical of input signal

The envelope detector program of the spectrum analyzer is used to identify the characteristic of the PCB emission spectrum.

Figure 8 show the measured spectrum envelope from the near-field measurement from 10MHz up to 500MHz. Figure 8(a), (b),(c),(d),(e)and (f) show the radiated field emitted from PCB having different configuration for instant, L-shape 45°, L-shape 120°, I-shape 10cm I-shape 25cm, U-shape track ,H-shape trace pattern.

The radiated fields are likelihood in the case of the same length PCB for example, 10, 15, 20, 25,30 and 35 cm and in the case of different angle for example, 30°, 45°, 60°, 120°, 135° and 150° and in case of different number of PCB trace for example, 2, 3, 4and 5 line are difficult to separate. However the spectra is separated by the amplitude of the radiated field. Therefore, they are chosen to be the input of neural network.

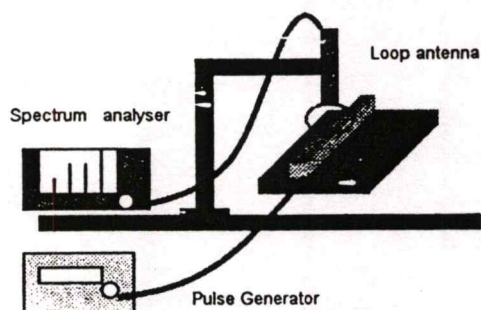


Fig.6 Near-field measurement

5. Preparation of the electric-field spectrum for the neural network input

The outputs spectrum from the PCB are input to the envelope detector software. All amplitude value of the entire envelope cannot be put directly into the neural network because it has too many frequency points for the NN input. Therefore, we reduce the number of the frequency points by sampling only 8 frequencies from 10 MHz to 500 MHz. The sampling frequencies are obtained by using the Eq. (1):

$$F_{(N+1)} = F_{(N)} / 1.5 \quad n=1,2,\dots,8 \quad (1)$$

$$\bar{X}_{n+1} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \quad (2)$$

$$X_{data} = X_i - \bar{X} \quad (3)$$

When, $F_{(N+1)}$ is a frequency at $N+1$

$F_{(N)}$ is a stop frequency(500MHz)

\bar{X} is a average of all amplitude in each Frequency

X_{data} is a different value of X_i and \bar{X} average at $(N+1)$ frequency

According to the Eq. (1), the sampling frequencies of the near-field spectrum (10-500 MHz) are 29.25, 43.88, 65.88, 98.72, 148.15, 222.23, 333.39 and 500 MHz. Table 2 shows the example of the amplitude measured by small loop antenna in $\text{dB}\mu\text{V/m}$ at each sampling frequency of the input spectra and the PCB configurations. An average of all amplitude at each frequency are computed by using the Eq.(2), and the difference of amplitude at each frequency

between X_i and average value shown is Eq. (3). The different value of amplitude (X_{data}) is used to the input of the neural network.

Table 2. Examples of spectrum were measured by small loop antenna at sampling frequency.

PCB	Amplitude of input spectrum at each sampling frequency (dB μ V)							
	29.25 MHz	43.88 MHz	65.88 MHz	98.72 MHz	148.15 MHz	222.23 MHz	333.39 MHz	500 MHz
2L	47.0	46.0	44.0	36.0	32.0	33.0	37.0	38.0
3L	51.5	50.5	48.0	40.0	32.0	31.0	46.5	36.0
4L	59.0	58.0	57.0	42.0	33.0	34.5	38.0	38.0
10cm	46.0	39.2	44.0	42.5	44.5	40.0	46.0	29.0
15cm	46.0	44.0	43.0	42.0	44.5	40.0	46.0	29.0
20cm	53.0	52.0	48.5	41.5	38.0	40.0	34.5	31.0
30°	48.0	36.0	50.5	46.0	34.5	40.5	42.5	38.0
45°	45.0	37.0	35.0	36.0	39.5	39.0	46.5	35.0
60°	46.0	36.0	45.0	44.0	41.5	39.5	40.0	30.0
7	65.0	60.0	40.0	31.0	48.0	50.0	48.5	33.0
U	52.0	31.0	32.0	36.0	47.0	30.0	47.0	36.0
H	50.0	31.0	32.0	36.0	47.0	30.0	47.0	36.0
L	60.5	43.0	51.0	28.0	46.0	47.0	45.0	38.0
X	50.0	38.0	45.0	30.0	37.0	41.0	56.0	30.0

6. The learning of Neural Network Model

In this paper, Toolbox in Math Lab Software is used for the learning process of neural network. The network with having 8 input, 30 hidden, 30 bias and 5 output node is used in learning process. The maximum error and learning rate are 0.000001 and 0.01, respectively. The computed outputs are compared with the expected ones. The maximum error is defined as the ratio of the number of checking input/output pairs. The error of computed output is shown in Fig. 7

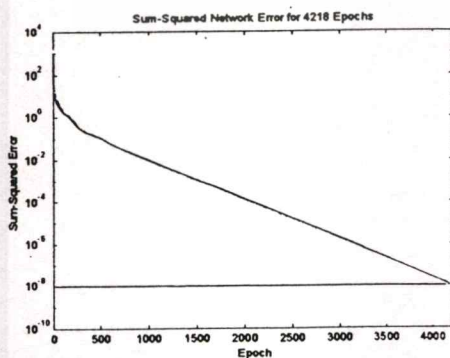


Figure. 7 Shown the decreasing error of neural network during learning process

7. Results and Discussion

The calculated and converted NN outputs are shown in Table 4. The converted output is the threshold value of the calculated output. After the learning process is complete. The authors random PCB radiated form all configurations include the noise. The Neural Network with 8 inputs, 30 bias, 30 hidden and 5 output nodes can successfully identify all the twenty-two PCB configurations. The important advantage of neural network is can identify PCB spectrum with noise.

One of the disadvantages of this NN is that it spends a long time in learning process. However, the number of the NN-layer, input, hidden and output nodes, and sampling frequencies can be adjusted to reduce the learning time.

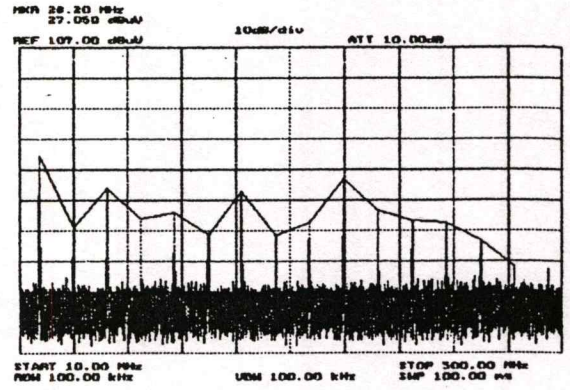
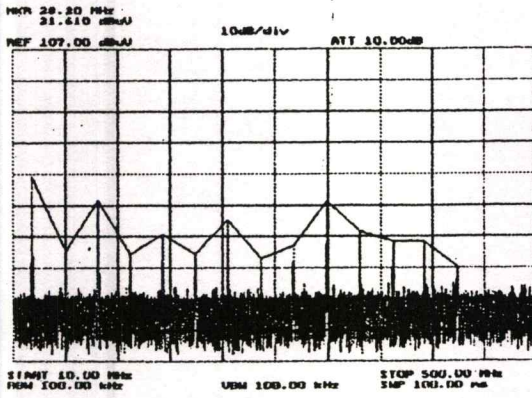
8. Conclusions

This work aims to use the neural network to recognize a PCB configuration from its emission spectrum. Two layer neural network were trained by using, as inputs, relevant parameters that describe the shape of the envelope of near-field (10-500MHz) emission spectrum of twenty-two PCB configurations. The five bits digital output is considered, expressing the likelihood that the radiating source is the PCB with having different configurations. The neural network is successfully able to identify all PCB configurations from their near-field radiated emission spectrum with noise.

References

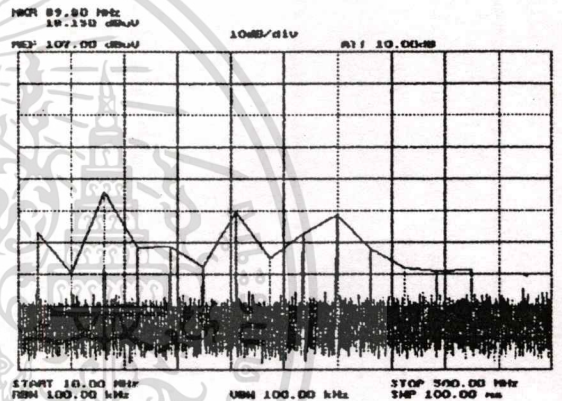
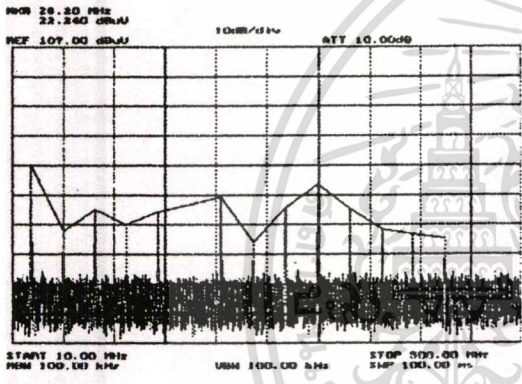
- [1] Yang-Oing Zhang, Abrham Kandel., "Compensatory Neurofuzzy Systems with Fast Learning Algorithms," IEEE Trans. on Neural Network s. VOL.9 NO.1, pp.83-104., 1988.
- [2] Gaetono Giunta, Alessandro Neri. "Neural Correlation Based on the IPFM Model," IEEE Trans. on Systems, Vol.20, No.1, pp.262-268, 1990.
- [3] S.W.Leung, Wan Lixi.A, "Mathematical Model for Cross-Talk Prediction in PCB Layouts," IEEE Symposium on EMC 1998, USA, pp.780-789, 1998.
- [4] S.Ratnajeewan, H.Hoole, "Artificial Neural Networks in the Solution of Inverse Electromagnetic Field Problems," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่วากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



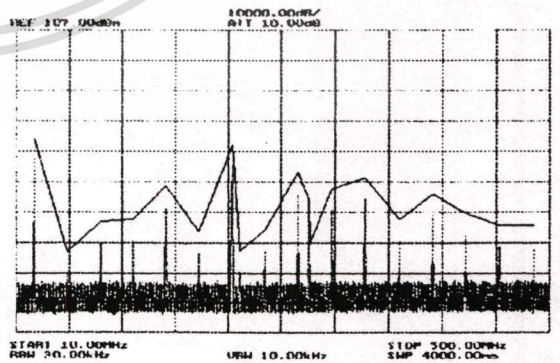
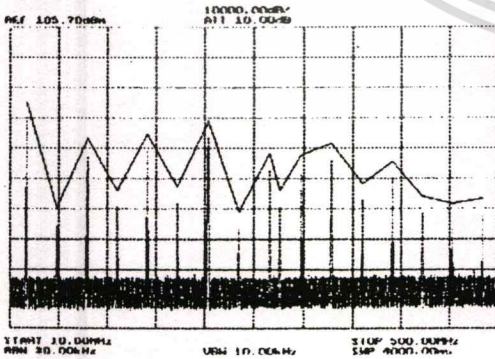
(a) L-shape 45 degree 10MHz to 500 MHz

(b) L-shape 120 degree 10MHz to 500 MHz



(c) I-shape 10 cm 10MHz to 500MHz

(d) I-shape 25cm 10 MHz to 500MHz



(e) U-shaped track 10MHz to 500MHz

(f) H-shaped track 10MHz to 500MHz

Fig.8 Results of near-field measurements(from 10MHz to 500 MHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 Sampling frequencies of each PCB configuration.

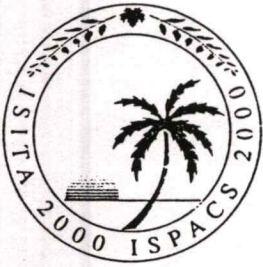
PCB config.	Amplitude of input spectrum at each sampling frequency (dB μ V)								Target				
	29.25 (MHz)	43.88 (MHz)	65.88 (MHz)	98.72 (MHz)	148.15 (MHz)	222.23 (MHz)	333.39 (MHz)	500 (MHz)	B1	B2	B3	B4	B5
2L	-3.21	3.06	-3.11	-6.39	-9.14	-7.80	-6.00	-3.77	0	0	0	0	0
3L	1.29	7.56	0.89	-2.39	-9.14	-9.80	-2.50	2.23	0	0	0	0	1
4L	8.79	15.06	9.89	-0.39	-5.14	-6.30	-13.00	-3.77	0	0	0	1	0
5L	0.79	8.56	4.89	2.61	3.36	-2.80	-4.00	2.23	0	0	0	1	1
10cm	-4.21	-3.74	-3.11	0.11	3.36	-2.80	1.50	12.23	0	0	1	0	0
15cm	-4.21	1.06	-4.11	-0.39	-5.14	-0.80	3.00	-4.77	0	0	1	0	1
20cm	2.79	9.06	1.39	-0.89	-3.14	-1.30	3.00	-2.77	0	0	1	1	0
25cm	-3.71	-11.94	5.89	5.11	-6.64	-0.80	-6.50	-2.77	0	0	1	1	1
30cm	-10.21	-6.94	3.39	3.61	7.36	-0.30	-0.50	4.23	0	1	0	0	0
35cm	0.79	3.06	9.89	11.61	-6.64	9.20	-4.50	-3.77	0	1	0	0	1
30°	-0.51	-8.44	-2.11	0.61	-1.64	-2.80	-3.50	-3.77	0	1	0	1	0
45°	-5.21	-5.94	-12.11	-6.39	0.36	-1.80	3.50	1.23	0	1	0	1	1
60°	-4.21	-6.94	-2.11	1.61	4.86	-1.30	-3.00	-3.77	0	1	1	0	0
120°	1.79	1.06	4.89	6.61	-0.64	1.20	4.00	-5.77	0	1	1	0	1
135°	-0.71	0.06	3.39	7.61	-5.14	2.20	-1.00	5.23	0	1	1	1	0
150°	-8.71	-8.94	-3.11	2.61	-5.14	-1.30	-6.00	-3.77	0	1	1	1	1
7	14.79	17.06	-7.11	-11.39	6.86	9.20	5.50	-0.77	1	0	0	0	0
I	1.79	-2.94	2.89	6.61	-1.14	14.20	-6.00	1.23	1	0	0	0	1
U	1.79	7.06	2.89	12.61	22.86	8.20	17.00	8.23	1	0	0	1	0
H	-0.21	-11.94	-15.11	-6.39	5.86	-10.80	5.00	2.23	1	0	0	1	1
L	10.29	0.06	3.89	-14.36	4.86	7.20	2.00	4.23	1	0	1	0	0
X	-0.21	-4.94	-2.11	-12.39	-4.14	0.20	13.00	-3.77	1	0	1	0	1

Table 4. Sample calculation outputs from NN program of each PCB configurations.

shape	Calculated outputs					Converted outputs***				
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5
2L	-0.1719	0.1396	0.2355	0.0352	-0.2944	0	0	0	0	0
3L	0.0106	-0.0068	-0.0118	0.0099	1.0184	0	0	0	0	1
10 cm	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0	0	1	0	0
30 cm	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0	1	0	0	0
45°	-0.0026	1.0023	-0.0003	1.0000	1.0005	0	1	0	1	1
60°	0.0140	1.1162	0.9197	0.0995	0.1337	0	1	1	0	0
7	0.9982	0.0022	0.0019	-0.093	0.0025	1	0	0	0	0
H	0.9997	-0.0001	-0.0066	1.0001	0.9999	1	0	0	1	1

***IF Node X \geq 0.5 Node X=1 Else Node X=0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2000 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems

ISPACS 2000



Proceedings
Volume II

Sheraton Waikiki Hotel, Honolulu, Hawaii, U.S.A.
November 5-8, 2000

Challenges for THE NEW MILLENNIUM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายได้

ไปว่ากรณีใดที่สิ่งนี้คือสิ่งที่มีคุณค่าและมีประโยชน์ และต้องระวังถึงสิ่งที่มีคุณค่าและมีประโยชน์

D8-2 Sigma-Delta Modulators

2000/11/8 10:10-11:50

Chairs: Kwong S. Chao (Texas Tech Univ., USA) and Akira Hyogo (Science Univ. of Tokyo, Japan)

- D8-2-1** A Novel Mash-Kind Third-Order $\Sigma\Delta$ Converter Structure
C. Caduff, R. Caillet, A. Heubi, P. Balsiger and F. Pellandini (Electronics and Signal Processing Lab., Institute of Microtechnology, Switzerland)..... 1018
- D8-2-2** Design of Optimal and Narrow-Band Laguerre Filters for Sigma-Delta Demodulators
Xue Yao and Saman S. Abeysekera (School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological Univ., Singapore) 1022
- D8-2-3** A Multi-Bit Sigma-Delta Modulator with High Order Noise Shaped Integrator Leakage
L. Fang (Texas Instruments Inc., USA) and K. S. Chao (Department of Electrical Engineering, Texas Tech Univ., USA) 1028
- D8-2-4** Oversampling Sigma-Delta Modulator Stabilized by Local Nonlinear Feedback Loop Technique
Chian C. Ho and Chung K. Kuo (Dept. Electrical Engineering, National Chung Cheng Univ., Taiwan).....1033
- D8-2-5** SDH/SONET Desynchroniser Design Using the Concept of Phase Filtering
Saman S. Abeysekera (School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological Univ., Singapore) 1039
-
- D8-3** Neural Net and Others
- 2000/11/8 13:20-15:20
- Chair: Takafumi Aoki (Tohoku Univ., Japan)
- D8-3-1** A Fault Tolerant Learning Algorithm Considering the Worst-Case Fault of Neural Networks
Masakatsu Nishigaki, Teruyasu Tsuzuki (Shizuoka Univ., Japan), Masakazu Soga (Iwate Prefectural Univ., Japan), Tadanori Mizuno (Shizuoka Univ., Japan).....1045
- D8-3-2** Implementation RBF Network for Complex Volatile Chemicals Classification Using Conducting Polymer Sensor Array
Hyung-Gi Byun, Nam-Yong Kim, Jeong-Do Kim (Samchok National Univ., Korea) and Krishna C. Persaud (UMIST, UK).....1051
- D8-3-3** Identification Basic Digital Circuits from Radiated EMI by Using Neural Network
K. Aunchaleevarapan, K. Paithoonwatanakij, Y. Preampraneerach, W. Khan-ngern (ReCCIT, KMITL. Thailand) and Shuichi Nitta (The Univ. of Tokyo, Japan) 1056
- D8-3-4** A Three-Dimensional Cellular Neural Network Circuit System Using a ν -MOS Circuit
Masamichi Akazawa, Takanobu Fujiwara and Yoshihito Amemiya (Dept. of Electrical Engineering, Hokkaido Univ., Japan) 1061

Identification Basic Digital Circuits from Radiated EMI by Using Neural Network

Aunchaleevarapan K., Paithoonwatanakij K., Preampraneerach Y., Khan-ngern W. and Shuichi N.

Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology,
King Mongkuts Institute of Technology Chaokunthaharn, Ladkrabang, (KMITL)

Chalongkrung Road, Bangkok, 10520, Thailand Phone (66-2) 739-2190-95 Email yprempa@notes.nectec.or.th

Abstract

The neural network is applied to recognize and identify basic digital circuits by using its radiated emission spectra. The learning process is accomplished by giving the neural network different radiated emission spectra of 8 basic digital circuit (AND, OR, INV, NAND, NOR, EX-OR, R-S F/F and D F/F). The trained neural network is able to predict all those basic digital circuits.

1. Introduction

Radiation from PCBs, IC packages and related structures has increased considerably as clock frequencies have increased. There are several ways to calculate the radiation from such structures, for example, the Method of Moments, Finite Elements, Finite Difference Time Domain (FDTD). However, they are computationally intensive and suitable only for passive linear structures [1],[3] because they cannot predict the behaviors of nonlinear circuit elements such as transistors and ICs. Moreover, there are several variables, for example, the temperature and the location of components on the PCBs which introduce errors in the calculation.

We propose the fast and effective way to predict the radiation from the PCBs by using Neural Network (NN). The NN algorithm is able to work with unknown parameters of the system and under the error of measurement [2]. In this work, we applied the NN to 8 different basic digital circuits on the PCBs.

2. Neural Network Model for the Analysis of EM Field Radiated from basic digital circuits

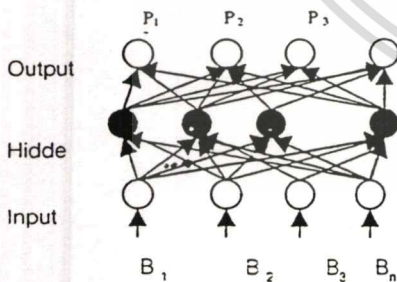


Fig. 1 Structured hierarchical network

In the analysis of EM field from basic digital circuit with a layered network, we adopted a neural network model that handles a series of behavior patterns. Figure 1 shows the neural network model which consists of input, hidden, bias and output node.

The learning process is accomplished by using computation results referring to simulation models of different circuits. The trained neural network is tested on measured radiated spectra functions, such as correct summing and produce an output voltage which is activate function of total input to the node. The choice of the activation functions depends on the type of problem to be modeled. In this paper, the 'tansig' and 'purelin' function toolbox in MATLAB are applied to the activate functions of hidden and output layer, respectively, as shown in Fig 2. This activated input-output behavior is a typical operational amplifiers. The output of a processor is also referred to as its activity level. Processor is connected to others via conducted elements which propagate signal between processors. The conductance value determines the connectivity pattern in the network. Its value is adjusted during the learning process. The target value of network is constituted by one coefficient, which is a digital value between 0 and 1. The maximum error value is a difference value between computed outputs and the target value, and used to stop the learning process.

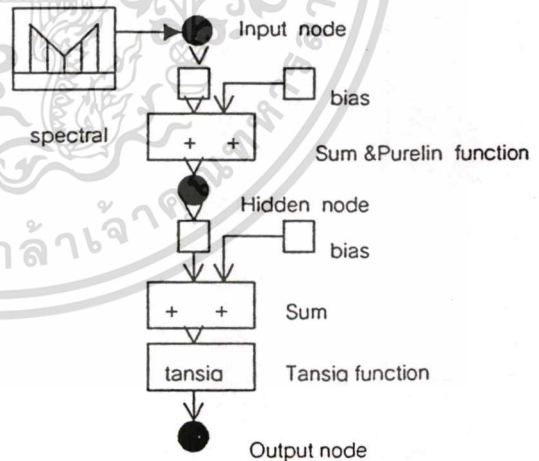


Fig 2 A model of activate function

When the learning process concludes, the unknown weight and bias are obtained and the final structure of the neural network is defined. The neural network is used to compute the outputs corresponding to the inputs related to

the spectrum of the electric field radiated from a digital circuits.

3. PCB Configurations and its experiment

In order to recognize and identify radiated emission spectra of basic digital circuits which have different configurations such as, AND, OR, INV, NAND, NOR, EX-OR, R-S F/F and D F/F. (see Fig.5) are used to generate radiated emission signal. Source and load impedance were put into the concerned segments. The insulation dielectric and conductor loss are not included in this model. The INV gate has only one input. The R-S F/F and D F/F gates have 2 inputs: triggered signals and pulse clock. The AND, OR, NAND, NOR and EX-OR gates have three inputs: input₁, input₂ and control logic. The test board also includes a simple 5V DC supply and 0.01 μf capacitor for circuit load. The geometrical configurations of PCB circuits are shown in Fig.3.

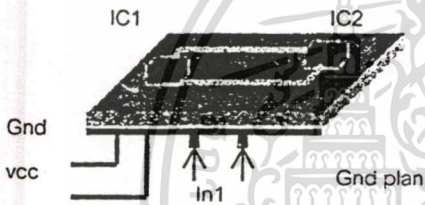


Fig.3 Geometrical configurations of PCB

The near field EM radiation from the PCBs were measured at the frequency range 10-500MHz. Each PCB was placed on the 1-m high metallic-free table. The input pulse signal is 30 MHz, 50% duty-cycle and 4 ns rise time as shown in Fig 4.

The near-field measurement set-up is shown in Fig 6. A spectrum analyzer and a high frequency probe (10-500MHz) were used in the measurement. The tip of the probe was touched to the signal trace on the test circuit board, and the measured spectrums are shown in Fig.5. The antenna factor of the probe are not included in this measurement. Spectra plots were made by using the peak detector function in a shown signal. The measurements was carried out three times using: Peak, Quesi-Peak, and Average detectors. ...

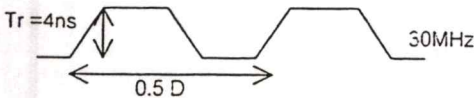
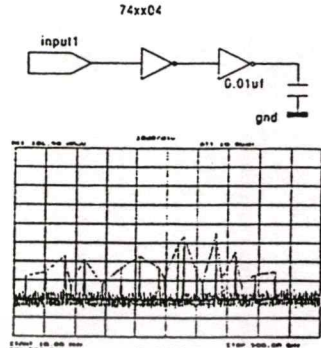
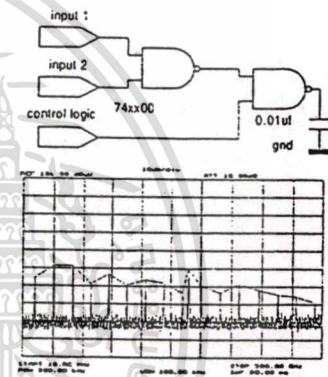


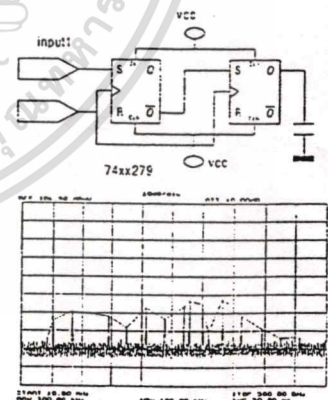
Fig 4 . waveform of input signal



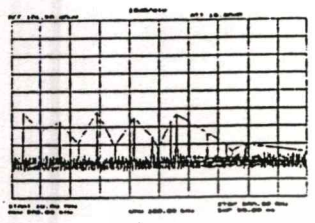
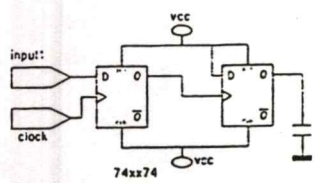
(a)



(b)



(c)

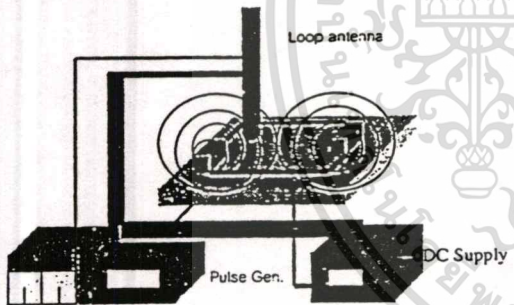


(d)

Fig 5. Schematic diagram and its spectra of PCB

- (a) INV gate (74xx04)
- (b) NAND gate (74xx00)
- (c) R-S Flip-Flop(74xx279)
- (d) D Flip-Flop(74xx7)

Fig. 5 shows the measured spectra when a 30 MHz clock and input signals are input into circuits. Plots a, b, c and d show the spectra from 10 MHz to 500 MHz of INV, EX-OR, NAND, R-S F/F and D F/F gates respectively. Each horizontal division is 50MHz. The vertical scale is 10 dBμV per division.



Spectrum analyser

Fig.6 Near-field measurement configurations

The amplitude of fundamental frequency of INV at 30 MHz is 32 dBμV and the spectra of other harmonics are shown in fig.5(a). The peak signal is 54 dBμV appear at 333 MHz and the minimum amplitude is 20 dBμV. In the case of NAND gate, the peak signal and minimum appearing at 275 MHz are 50.0 dBμV and 31.0 dBμV respectively. The spectra in each frequency of AND, OR, EX-OR, NOT, NOR and R-S F/F and D F/F gates are different to each other..

The radiated spectra from all circuits are used to identify PCB circuits. Since the radiated spectra of all circuits are a continuous, they were put into the software detector to build an spectra envelope. The envelope

detector of the spectrum analyzer was used to identify the characteristic of the PCB circuits emission spectra.

5. The preparation the electric-field spectra for the neural network input

All amplitude value of the entire envelope cannot be put directly into the neural network because it has too many frequency points for the NN input. Therefore, the authors reduce the number of the frequency points by sampling only 8 frequencies from 10 MHz to 500 MHz. The sampling frequencies were obtained by using the following equation1:(1)

$$F_{(N+1)} = F_{(N)} / 1.5 \quad n=1,2,...,8 \quad (1)$$

When $F_{(N+1)}$ is a frequency at N+1
 $F_{(N)}$ is a stop frequency (500MHz)

An average of all amplitude at each frequency are computed by using equation (2), and the different of amplitude at each frequency between X_i and average value shown in Table 3.

$$X_{(N+1)} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \quad (2)$$

$$X_{data} = X_i - X \quad (3)$$

And X is an average of all amplitude in each frequency
 X_{data} is a different value of X_i and X average at (N+1) frequency

According to equation 1, the sampling frequencies of the near-field spectrum (10-500 MHz) are 29.25, 43.88, 65.88, 98.72, 148.15, 222.23, 333.39 and 500 MHz. Table 2 shows the example of the amplitude with were measured by small loop antenna in dBμV/m at each sampling frequency of the input spectra and the PCB circuits.

Table 2. shows example of spectrum were measured by small loop antenna at sampling frequency

PCB	Amplitude of input spectrum at each sampling frequency (dBμV)							
	29.25 MHz	43.88 MHz	65.88 MHz	98.72 MHz	148.15 MHz	222.23 MHz	333.39 MHz	500 MHz
INV	46.8	50.0	51.0	48.0	48.5	42.5	36.5	20.0
AND	47.5	47.0	41.0	26.0	48.0	38.0	29.0	20.0
OR	33.0	33.5	42.0	30.0	28.0	39.5	54.0	20.0
NAND	48.0	52.0	45.0	44.0	39.0	58.0	47.0	20.0
NOR	44.0	48.0	43.0	38.0	43.0	40.5	37.0	24.0
EX-OR	44.0	46.0	48.0	49.5	49.3	28.0	52.0	20.0
R-S F/F	42.0	39.5	41.5	38.0	48.0	38.0	36.0	26.0
D F/F	29.0	30.0	40.0	40.0	38.0	40.0	48.0	26.0
Avg.	40.3	43.2	43.9	39.4	41.7	40.56	42.43	21.5

Table 3. shows the different of amplitude in each frequency

PCB	Amplitude of input spectrum at each sampling frequency (dBuV)							
	25.25 MHz	43.88 MHz	65.88 MHz	98.72 MHz	148.15 MHz	222.23 MHz	333.39 MHz	500 MHz
INV	5.49	6.75	7.67	8.75	5.78	1.94	-5.93	-1.5
AND	6.99	3.75	-2.93	-11.43	5.28	-2.56	-13.43	-1.5
OR	-7.51	-9.75	-1.93	-9.43	-14.72	-1.06	11.57	-1.5
NAND	7.49	8.75	1.87	4.57	-3.72	17.44	4.57	-1.5
NOR	3.49	4.75	-8.93	-1.43	8.28	-8.86	-5.43	4.5
EX-OR	3.49	2.75	4.87	18.87	6.58	-12.56	9.57	-1.5
R-S F/F	1.49	-3.75	-2.43	-1.43	5.28	-2.56	6.43	4.5
D F/F	-28.51	-13.25	-3.93	8.57	-4.72	-8.56	5.57	-1.5

6. The learning of Neural Network Model

The different values of amplitude (X_{data}) from Table 3. used to the input of the Neural Network. The Back-Propagation model Tool box in Math Lab was used in learning process. 5 bits binary signal are used for a target of the network. The number of the NN-layer, input, hidden and output nodes, and sampling frequencies can be adjusted. In this paper the network with 8 input, 30 hidden, 30 bias and 5 output node are used in learning process. The maximum error and learning rate are 0.000001 and 0.01, respectively. The computed outputs were compared with the expected ones. The maximum error was defined as the ratio of the number of checking input/output pairs. The error of computed output is shown in Fig.7.

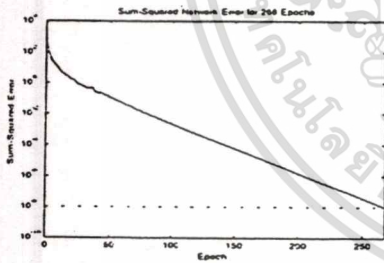


Figure. 7 shown decreasing error of neural network during learning process

6. Results and Discussion

The calculated and converted NN outputs are shown in Table 4. The converted output is a threshold value of the calculated output. The user can adjust threshold value of the network from 0.00 up to 1.00 in real number. In this paper the threshold value of the calculation is 0.50 (If the

calculated value ≥ 0.50 the converted output is "1" else the calculated value is "0").

When the learning process is concluded all weight of the network are recorded in data base. The 100 samples unknown digital circuit PCBs and include noise digital circuits PCBs are used to identify the digital circuits. The Neural Network with 8 inputs, 30 bias, 30 hidden and 5 output nodes can identify 98 percentage circuits.

One of the disadvantages of this NN is that it spends a long time in learning process. However, the number of the NN-layer, input, hidden and output nodes, and sampling frequencies can be adjusted to reduce the learning time and incase an accuracy of the network.

7. Conclusions

In this work, the neural network is used to recognize and identify basic digital circuits (AND, OR, NOT, NAND, EX-OR, NOR, R-S F/F and D F/F) from their emission spectra. Two layer neural network were trained by using as the inputs, the relevant parameters that describe the shape of the envelope of near-field (10-500MHz) emission spectrum of 8 digital circuits. The five bits digital output is considered, expressing the likelihood that the radiating source is the PCB with having different configurations.

The neural network is able to identify 98 percentages of all unknown digital circuits from their near-field radiated emission spectrum. The mistakes in identification come from several parameters for an instant, a location of PCB, a temperature, a point of measurement.

In future work, the neural network will be used to recognize complicated circuits and the finally, software for identification circuits will be generated.

References

- [1] Yang-Oink Zhang, Abraham Candle., "Compensatory Neurofuzzy Systems with Fast Learning Algorithms," IEEE Trans. on Neural Network s.VOL.9 NO.1, pp.83-104., 1988.
- [2] Gaetono Giunta, Alessandro Neri. "Neural Correlation Based on the IPFM Model," IEEE Trans. on Systems, Vol.20, No.1, pp.262-268, 1990.
- [3] S.W.Leung, Wan Lixi.A, "Mathematical Model for Cross-Talk Prediction in PCB Layouts," IEEE Symposium on EMC 1998, USA, pp.780-789, 1998.
- [4] M.D' Amore, Fellow "A Neural Network Approach for Identification of EM Field Sources: Analysis of PCB Configuration" IEEE Symposium on EMC 1998, USA, pp. 664 - 669, 1998.

Table 2 Sampling frequencies of each PCB configuration.

PCB config.	Amplitude of input spectrum at each sampling frequency (dB μ V)								Target				
	29.25 (MHz)	43.88 (MHz)	65.88 (MHz)	98.72 (MHz)	148.15 (MHz)	222.23 (MHz)	333.39 (MHz)	500 (MHz)	B1	B2	B3	B4	B5
INV	5.49	6.75	7.07	8.75	5.78	1.94	-5.93	-1.5	0	1	1	1	0
AND	6.99	3.75	-2.93	-11.43	5.28	-2.56	-13.43	-1.5	0	1	1	1	1
OR	-7.51	-9.75	-1.93	-9.43	-14.72	-1.06	11.57	-1.5	1	0	0	0	0
NAND	7.49	8.75	1.07	4.57	-3.72	17.44	4.57	-1.5	1	0	0	0	1
NOR	3.49	4.75	-0.93	-1.43	0.28	-0.06	-5.43	4.5	1	0	0	1	0
EX-OR	3.49	2.75	4.07	10.07	6.58	-12.56	9.57	-1.5	1	0	0	1	1
R-S F/F	1.49	-3.75	-2.43	-1.43	5.28	-2.56	6.43	4.5	1	0	1	0	0
D F/F	-20.51	-13.25	-3.93	0.57	-4.72	-0.56	5.57	-1.5	1	0	1	0	1

Table 3. Sample calculation outputs from NN program of each PCB configurations.

Shape	Calculated outputs					Converted outputs				
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5
INV	-0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0	1	1	1	0
AND	-0.000	1.000	1.000	1.000	1.006	0	1	1	1	1
OR	1.000	0.000	-0.000	-0.000	0.000	1	0	0	0	0
NAND	1.000	-0.000	0.000	0.000	1.000	1	0	0	0	1
NOR	1.000	0.000	-0.000	1.000	-0.000	1	0	0	1	0
EX-OR	1.000	-0.000	0.000	1.000	1.000	1	0	0	1	1
R-S F/F	1.000	-0.000	0.999	-0.000	0.000	1	0	0	0	0
D F/F	1.000	-0.001	0.999	-0.000	1.000	1	0	0	0	1



committed to scientific and technical excellence

electromagnetic compatibility 2001

**14th International Zurich Symposium
and Technical Exhibition on
Electromagnetic Compatibility
February 20–22, 2001**

Radiated EMI Recognition and Identification for PCB Configurations and Digital Circuit Using a Neural Network

K.Aunchaleevarapan*, K. Paithoonwatanakij*, Y.Preampraneerach**, W.Khan-ngern* and S. Nitta.***

*Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology, Thailand, **National Electronics and Computer Technology Center, Thailand, ***Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan
(Principal contact: kaunchal@notes.nectec.or.th)

Abstract: In this paper the application of the neural network in EMI radiation measurement is proposed to recognize and identify the basic PCB configuration and digital circuits using its radiated emission spectra. The learning process is accomplished by giving the neural network different radiated emission spectra of 50-basic PCB configurations such as various width, length, angle, shape, radius and digital circuits. Two layers neural network is trained as the inputs and the relevant parameters that describe the shape of the envelope of near-field (10 MHz - 1 GHz) emission spectrum of 50 PCB configurations. The five bits digital output is considered and expressed the likelihood that the radiating source of the PCB have different configurations. The neural network can identify 98 percentages of all unknown digital circuits from their near-field radiated emission spectrum. The trained neural network is able to predict all those basic digital circuits shown in the experiment. The error in identification is also discussed.

1. Introduction

Radiation from PCBs, IC packages and related structures have increased considerably as clock frequencies increasing. There are several ways to calculate the radiation from such structures, for example, the Method of Moments, Finite Elements, and Finite Difference Time Domain (FDTD). However, they are computationally intensive and suitable only for passive linear structures [1], [3] because they cannot predict the behaviors of nonlinear circuit elements such as transistors and ICs. Moreover, there are several variables, for example, the temperature and the location of components on the PCBs which introduce errors in the calculation. The fast and effective way to predict the radiation from the PCBs by using Neural Network (NN) is proposed. The NN algorithm is able to work with unknown parameters of the system and under the error of measurement [2]. For this study, the NN is applied to recognize 50 kinds of PCB configurations.

2. PCB configurations and their experimental implementation

Fifty basic PCB configurations with various configurations of width, length, angle, shape, radius and basic digital circuits AND, OR, INV, NAND, NOR, EX-OR,

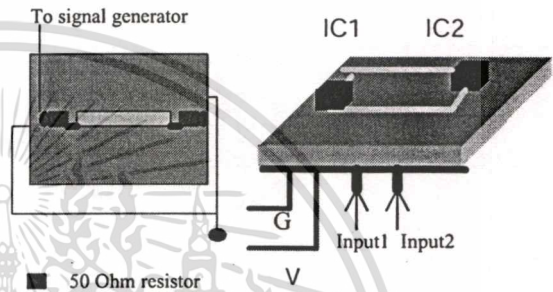


Fig. 1: Geometrical configurations adjusted to match 50 Ohm resistor and digital circuit configuration.

R-S F/F and D F/F are used for generating radiated emission signals. Source and load impedance are put into the PCB circuits. The insulation dielectric and conductor losses are not included in this model. The micro-strip PCBs with different configurations in shape, length, angle and number of PCB trace is prepared. The various micro-strip PCB configurations are shown in Fig. 2. The traces of PCB configurations are adjusted to match the characteristic resistance of 50 Ω at both the terminals and the branch points (shown in Fig.1). The resistance is previous designed to have the

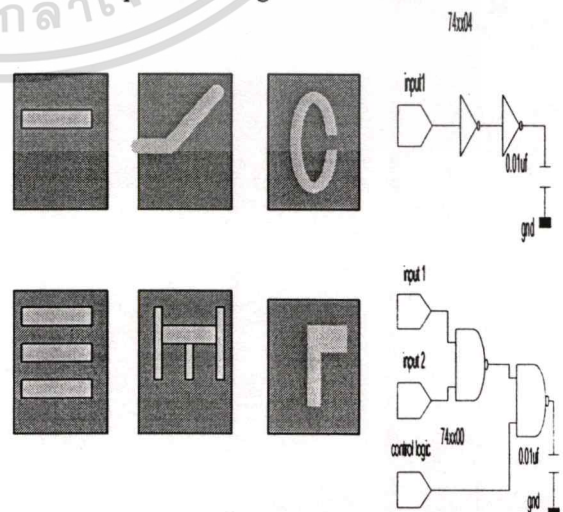


Fig. 2: Geometrical configuration of PCB with various width, length, angle, radius, number of PCB traces, shape and basic digital circuit.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

characteristic resistance of 50 Ω while the center track and H-shaped track are designed to have the characteristic resistance of 100 Ω and 200Ω respectively. The INV gate has one input while, the R-S F/F and D F/F gates have 2 inputs: triggered signals and pulse clock. The AND, OR, NAND, NOR and EX-OR gates have three inputs: input₁, input₂ and control logic. The test board also includes a simple 5V DC supply and 0.01 μF capacitor for circuit load. The geometrical configurations of PCB circuits are shown in Fig.2. The parameters of each PCB layout are shown in Table 1.

Table 1: Parameters of PCB layouts.

PCB configuration	Dimension (cm)	Width (cm)
Various length I – Pattern (with 10,15,20, 25, 30,35 cm length)	17 x 22	1
Various angle L-Pattern (with 30, 45, 60, 120,135,150 degree)	17 x 22	1
Various number of trace I-pattern (with 2,3,4,5 line)	22 x 35	1
Various width of PCB trace	17 x 22	0.5,1,2,5,10, 20mm
Various shape Different –Pattern (L,U,7,I,T,X,H)	17 x 22	1
Various radius 1.5,2.5,5.5,7.5cm	17 x 22	
Various Basic digital circuits AND,OR,NOT,N AND, EX-OR,D-F/F, R-S F/F	17 x 22	0.5mm

3. The experiments

The near field EM radiation from the PCBs is measured in the frequency range 10 MHz - 1 GHz. Each PCB is placed on a 1-m high metallic-free table in a shielded room. The input pulse signals are 30, 60 and 90 MHz, 50% duty-cycle and 4 nanosecond rise time as shown in Fig 3. The near-field measurement set-up is shown in Fig 4. A spectrum analyzer and a high frequency probe (10-1 GHz) are used in the measurement. The tip of the probe is touched to the signal trace on the test circuit board, and the measured spectra are shown in Fig. 5 and Fig. 6. The antenna factor of the probe is not included in this measurement. Spectra plots are made by the peak detector function. The measurement is carried out

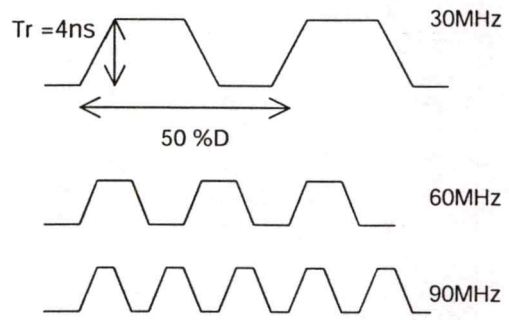


Fig .3: Input signal waveform

using peak, quasi-peak, and average detectors. The shape of the radiated spectrum depends on the characteristics of the clock signal, that is the clock frequency, the rise time and the duty cycle. The electric field spectrum radiated from the PCB is a discrete one. High accuracy is not a key feature, since the requested information are the shape of the radiated spectra, and not the precise values at some frequency.

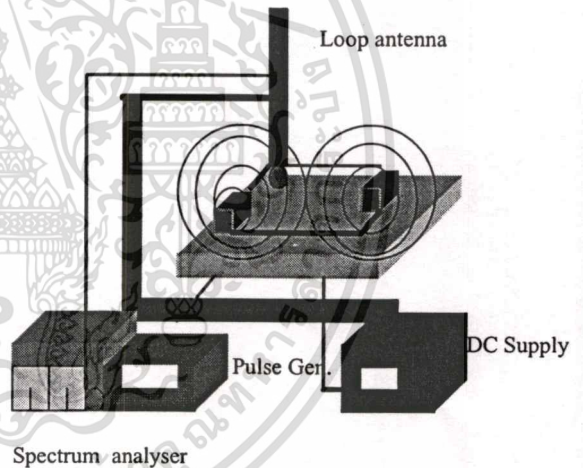


Fig.4: Near-field measurement configuration.

Fig. 5 shows the spectra measured from 10 to 500 MHz when a 30 MHz clock and input signals are injected into the PCB test configuration with 1.5cm radius. Fig.6 show the spectra of 7404 digital logic; each horizontal division is 50 MHz. The vertical scale is 10 dBμV per division. The amplitude at the fundamental frequency of the 1.5 cm radius curve PCB is 75 dBμV and the spectral amplitude of higher harmonics are 45, 65, 50 and 53 respectively, as shown in Fig. 5.

In case of 7404 digital logic the amplitude of the fundamental frequency is 56 dBμV and the other harmonics are shown in Fig.6. The amplitude of 10 cm x 10 cm L-shape is 70.1 dBμV and the other harmonics are shown in Fig.7. The spectra in each frequency of PCB configurations with various width, length, angle, radius, shape, number of PCB trace and basic digital circuits are different. Fig.8 shows several PCB configu-

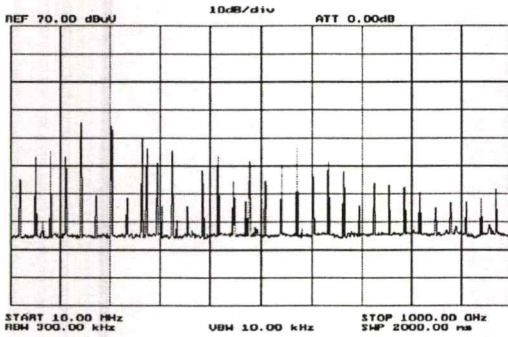


Fig.5: The spectra of 1.5cm radius curve PCB.

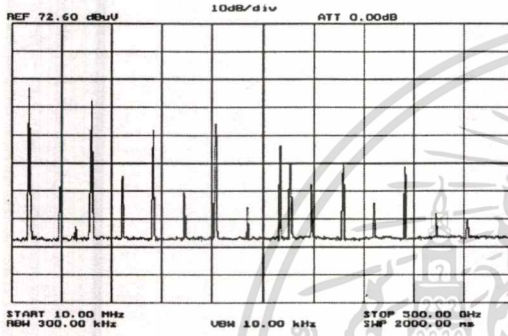


Fig. 6: The spectra of 7404 digital logic.

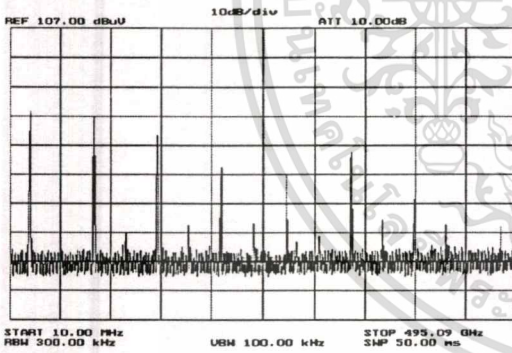


Fig. 7: The spectra of 10cm x 10cm L pattern

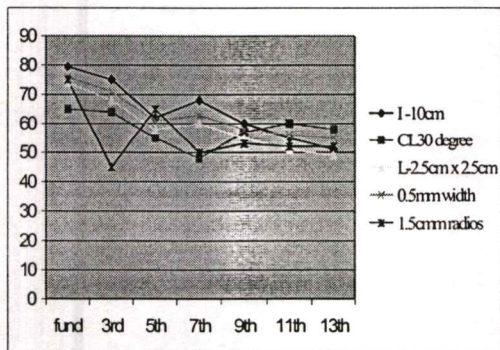


Fig. 8: The amplitude at each harmonic of different PCB configurations.

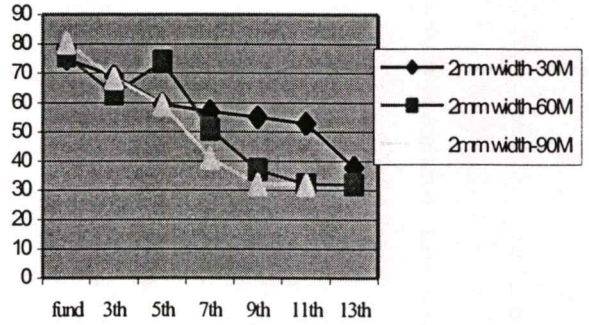


Fig.9: The amplitude at each harmonic of 2mm width PCB with 30, 60 and 90MHz input.

rations with 30MHz input. The amplitude at each frequency of all PCB configurations is also different. Fig.9 shows plots of 2 mm width PCB with various clock frequencies from 30, 60 and 90 MHz. In this case, the amplitude of each frequency of 2 mm width PCB with 90 MHz is less than of those 60 MHz and 30 MHz. The amplitude of the fifth harmonic of 60 MHz is greater than of those 30 and 90MHz. The odd harmonics of the spectrum analyzer was used to identify the characteristic from the PCB configuration emission spectra.

4. The back-propagation Neural Network model for the analysis of EM fields radiated from basic digital circuits

The analysis of EM field from basic digital circuit with a layered network is adopted a neural network model that handles a series of behavior patterns. Fig 10 shows the neural network model which consists of input, hidden, bias and output node.

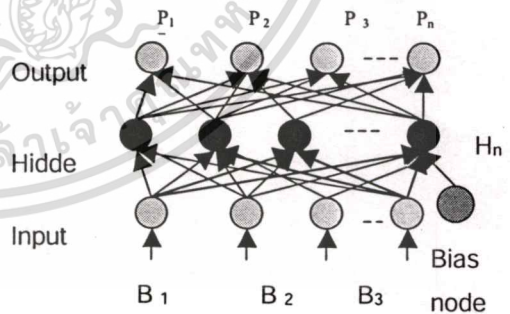


Fig. 10: Structured hierarchical network model

The learning process is accomplished using computation results referring to simulation models of different circuits. The trained neural network is tested on measured radiated spectra functions, such as correct summing and produce an output voltage which is activate function of total input to the node. The choice of the activation functions depends on the type of problem to be modeled. In this paper, the 'tansig' and 'purelin' function toolbox in MATLAB are applied to the activate function of hidden and output layer, respectively, as shown in Fig. 11. This activated input-output behavior is a typical operational amplifier. The

output of a processor is also referred to as its activity level. Processor is connected to others via conducted elements which propagate signal between processors. The conductance value determines the connectivity pattern in the network. This value is adjusted during the learning process. The target value of network is constituted by one coefficient, which is a digital value between 0 and 1. The maximum error value is a margin between computed outputs and the target value, and used for stopping the learning process.

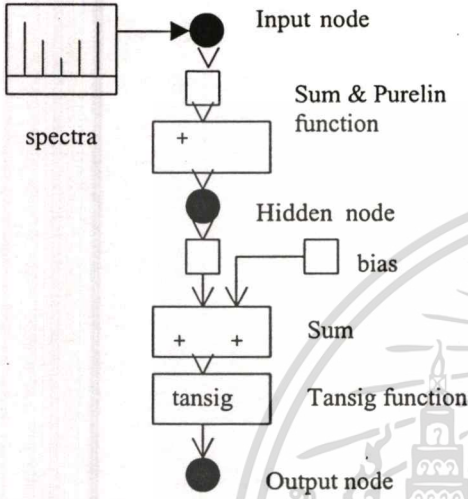


Fig. 11: A model of activate function.

When the learning process go to the conclusion, the unknown weight and bias are recorded in a database.

5. The preparation of the electric-field spectra for the Neural Network input

All amplitude values of the PCB configurations cannot be put directly into the neural network because it has too many frequency points for the NN input. Therefore, the authors reduce the number of the frequency points using only odd harmonics frequencies from 10 MHz to 1 GHz. The harmonics frequency of 30, 60 and 90 MHz (from 10 MHz up to 1 GHz) are set and shown in table 2. The frequency shift does not represent a big problem, because the NN is trained to consider different geometrical configurations.

Table 2: The harmonic spectra of 30, 60 and 90 MHz.

Harmonics Number	Frequency (MHz)		
F ₁	30	60	90
F ₃	90	180	270
F ₅	150	300	450
F ₇	210	420	630
F ₉	270	540	810
F ₁₁	330	660	990
F ₁₃	390	780	1170
F ₁₅	450	900	1350
F ₁₇	510	1020	1530

An average of all amplitudes at each frequency is computed using equation (1), and the amplitude at each frequency of 30 MHz input signal as shown in table 3.

$$X_{(N+1)} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \tag{1}$$

$$X_{data} = X_i - X \tag{2}$$

where X is an average of all amplitudes at each frequency

X_{data} is a difference value of X_i and X average at (N+1) frequency

6. The learning of the Neural Network model

The different values of amplitude (X_{data}) from Fig.12 are used as the input of the Neural Network. A two-layer Back-propagation Neural Network is used to identify whether measured electric field spectrum comes from a PCB. In particular, the number of inputs, B and dimension H hidden and output must be chosen. This constitutes a key-step in the procedure since the NN performance, that is its generalization capability and accuracy in the calculation, depends strictly on the values of input, hidden and output nodes. The Back-propagation model tool box in MATLAB is used in learning process, when a 5 bits binary signals are used for a target of the network. The number of the NN-layer, input, hidden and output nodes, and sampling frequencies can be adjusted. For this purpose, several NN architectures with different numbers of input and hidden neurons are trained and tested, by using different training and checking sets, provided by the software simulations. In this paper the network with 8-input, 40-hidden, 40-bias and 5-output nodes are used in learning process. The maximum error and learning rate are 0.0001 and 0.01, respectively. The computed outputs are compared with the expected results. The maximum error is defined as the ratio of the number of checking input/output pairs. The error of computed output is shown in Fig.13.

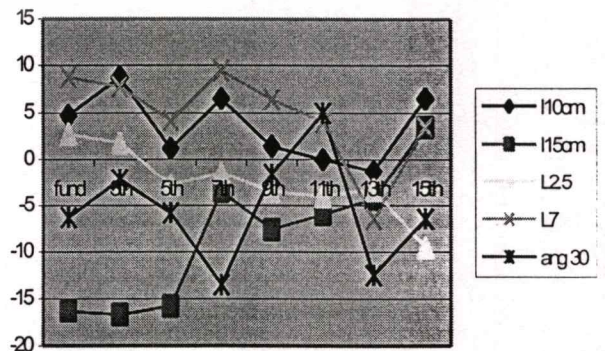


Fig. 12: The various value of amplitude (X_{data}) which are calculated by equation(1),(2).

Table 3: Example of measured spectrum by small loop antenna at harmonics frequency.

PCB Shape	Amplitude of input spectrum at each sampling frequency							
	(dB μ V)							
	F ₁	F ₃	F ₅	F ₅	F ₇	F ₉	F ₁ 1	F ₁ 3
10cm	75.9	75	62	68	60	55	51	0
15cm	55	49.5	45	58	51	49	48	0
2.5L	74	68	58	60	55	51	49	35
7L	80	74	65	71	65	59	55	48
30°	65	64	55	48	57	60	58	38
45°	78	68	56	62	56	58	54	32
0.5mm width	76	71	61	63	58	56	55	38
1mm width	74	69	58	61	58	55	54	59
1.5cm radius	75	45	65	50	53	0	0	0
2.5cm radius	76	70	59	61	55	48	47	38
7404	56	66	65	57	56	49	45	45
7408	70	75	69	79	80	68	57	54

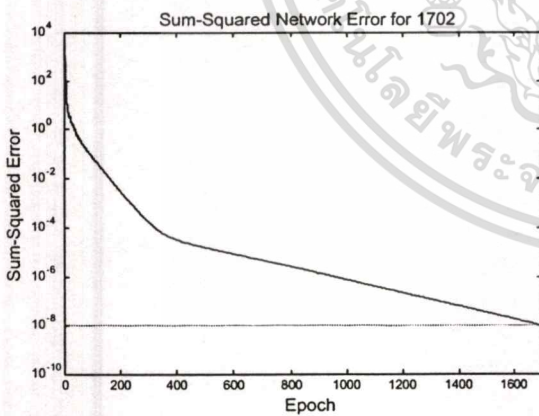


Figure 13: The decreasing error of neural network during learning process.

7. Results and discussion

When the training processes is conclude, the unknown weights and bias are obtained and the final structure of the neural network is defined. In the testing process, the spectra of the known PCB configuration with various in shape, width, length, angle and digital circuit are put into the neural network for identify the correct the PCB

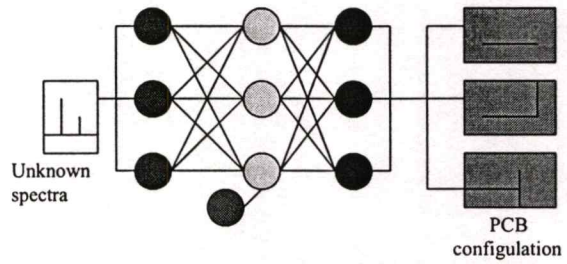


Fig.14 The testing process of neural network

configuration. In the finally, the spectra of the unknown PCB configuration and spectra of the known PCB configuration include the making radiated noise are put into the neural network for identify. The testing process of the neural network is shown in Fig.14. The calculated output of the neural network are used for compared with the output target. In this paper, the five bit of binary digital(0 or 1) are used for the output target. The user can be defined the number of the calculated output node and the output target node. The converted output is defined to the output target in same values. The calculated and converted NN outputs are shown in Table 4. The converted output is a threshold value of the calculated output. The user can adjust threshold value of the network from 0.0 up to 1.0 in real number. In this paper the threshold value of the calculation is 0.5 (If the calculated value ≥ 0.5 the converted output is "1" otherwise the calculated value is "0").

In this paper, the 100 samples of known and unknown radiated spectra of the PCB configurations and digital circuits are input to the neural network for identifying the PCB configuration. The Neural Network with 8-inputs, 40-bias, 40-hidden and 5-output nodes can identify 98 percentage of the PCB configurations.

One of the disadvantages of this NN is that it spends a long time in learning process (about 30 minute, for Pentium- II 500MHz processor). However, the number of the NN-layer, input, hidden and output nodes, and sampling frequencies and processor unit can be adjusted for reducing the learning time and the accuracy of the network.

8. Conclusions

In this work, the neural network is used for recognizing and identifying basic PCB configurations such as various length, width, angle, shape, number of PCB trace and basic digital circuit (AND, OR, NOT, NAND, EX-OR, NOR, R-S F/F and D F/F) from their emission spectra. Two layer neural network are trained using as the inputs, the relevant parameters that describe the shape of the envelope of near-field (10MHz-1GHz) emission spectrum of 50 PCB configurations. The five bits digital output is considered, expressing the likelihood that the radiating source is the PCB with having different configurations. The neural network can identify 98 percentages of all unknown digital circuits from their near-field radiated emission spectrum. The error in identification may come from several param-

Table 4: Sample calculation outputs from NN program of each PCB configurations.

Shape	Calculated outputs					Converted outputs(Output Target)				
	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4	Node 5
10cm length	-0.083	0.472	-0.323	-0.353	-0.002	0	0	0	0	0
2.5 x 2.5 L	-0.540	0.005	0.1754	0.959	-1.259	0	0	0	1	0
30 degree	0.029	-0.910	1.543	0.087	0.000	0	0	1	0	0
0.5mm width trace	-0.332	-0.001	1.228	0.856	0.120	0	0	1	1	0
1.5 cm radius	0.430	0.675	0.001	0.008	0.001	0	1	0	0	0
7404	-0.019	0.776	0.1245	0.996	-1.34	0	1	0	1	0
7408	-0.991	0.650	0.766	-0.551	-0.994	0	1	1	0	0
7432	0.881	0.882	0.090	-0.107	0.570	1	1	0	0	1
7473	0.652	-0.854	0.756	0.873	-0.769	1	0	1	1	0
1cm x 1cm L- shape	0.870	0.589	-0.760	-0.997	0.000	1	1	0	0	0
10cmx 10cm L-shape	0.751	0.988	0.869	0.000	0.011	1	1	1	0	0

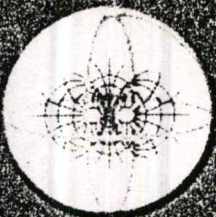
meters for an instant, a location of PCB, a temperature and a point of measurement. In the future work, the neural network will be used for recognizing for more complicated circuits. Finally, an improved software will be generated.

9. Acknowledgment

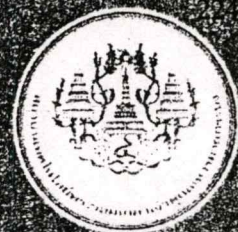
The authors would like to thank The Electrical and Electronic Products Testing Center (PTEC) and National Electronics and Computer Technology Center for making their shielded room and 3-m chamber available for radiated EMI measurements.

10. References

- [1] Yang-Oink Zhang, Abraham Candle., "Compensatory Neurofuzzy Systems with Fast Learning Algorithms," IEEE Trans. On Neural Networks, Vol. 9 No.1, pp. 83-104., 1988.
- [2] Gaetono Giunta, Alessandro Neri. "Neural Correlation Based on the IPFM Model," IEEE Trans. on System, Vol. 20, No.1, pp.262-268, 1990.
- [3] S.W. Leung, Wan Lixi. A, " Mathematical Model for Cross-Talk Prediction in PCB Layouts," IEEE Symposium on EMC 1998, USA, pp.780-789, 1998
- [4] S.Ratnajeevan, H.Hoole, "Artificial Neural Networks in the solution of Inverse Electromagnetic Field Problem," IEEE Trans. on Magnetic, Vol.18, No.23, pp.664-669, 1993.
- [5] High Frequency Measurements and Noise in Electronic Circuits, Douglas C. Smith, Van Nostrand Reinhold, pp.165-167., 1993.
- [6] K. Aunchaleevarapan and Y. Preampraneerach, "Artificial Neural Networks for Predicting PCB Configuration from Radiated EMI", 1999 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Thailand, pp. 773-776, 1999.
- [7] K. Aunchaleevarapan, K. Paithoonwatanakij, Y. Preampraneerach, W. Khan-ngern and S. Nitta "Classification of PCB Configurations from Radiated EMI using Neural Network", Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics CEEM'2000, China, pp.105-110, 2000.



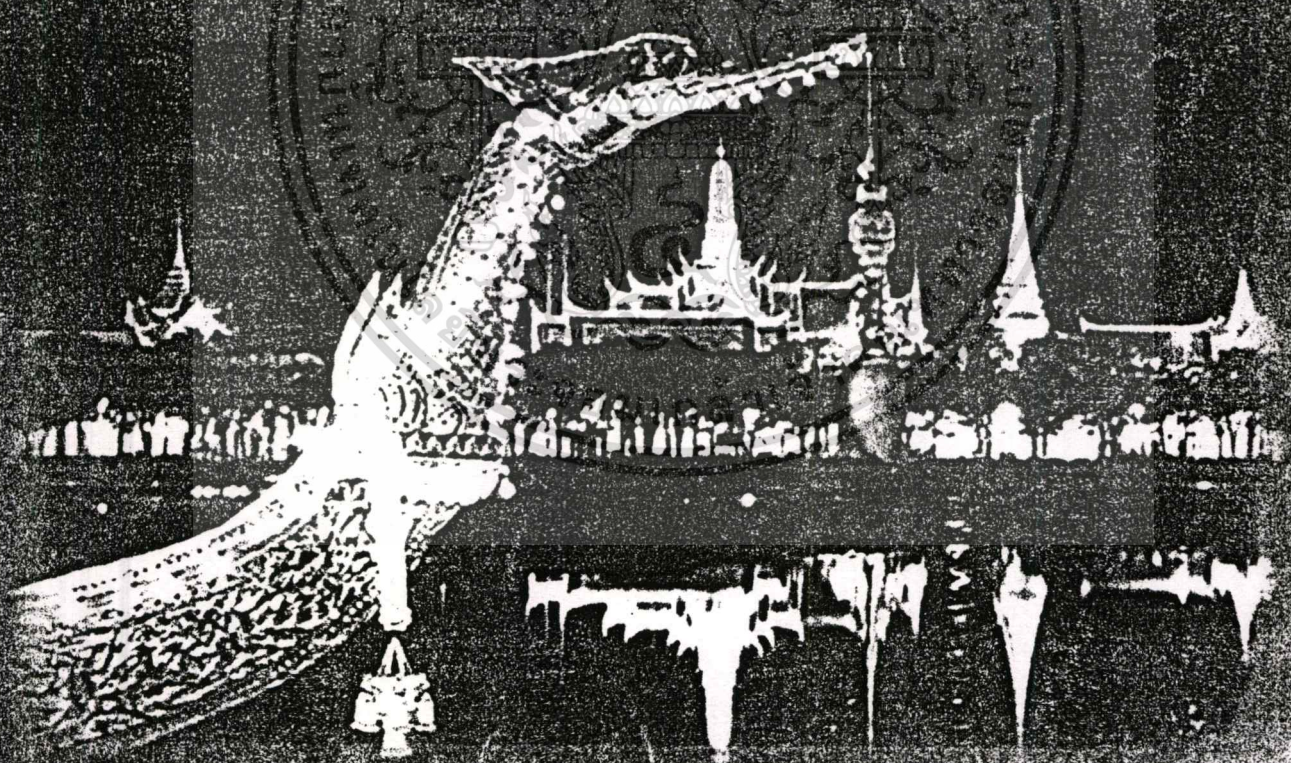
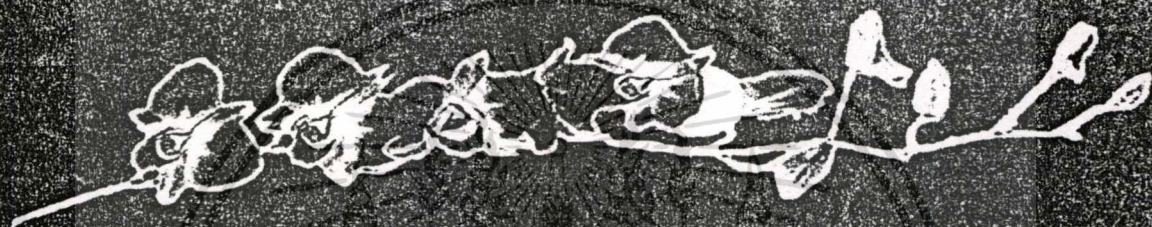
2002



*International Conference on
EMC 2002 Electromagnetic Compatibility
Bangkok, Thailand*

KMITTC

Proceeding



July 24-27, 2002, The Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand



มีการค้า

และการบริการนำใบใช้

A TEST METHOD FOR RECOGNIZING AND IDENTIFYING THE COMPLICATED SYSTEM FROM RADIATED EMI BY USING NEURAL NETWORK

K. AUNCHALEEVARAPAN[†], K. PAITHOONWATANAKIJ[†], W. KHAN-NGERN[†],
Y. PREAMPRANEERACH, and S. NITTA^{**}

[†]Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology, Electrical and Electronic Product Testing Center, King Mongkut's Institute of Technology, Thailand,

^{**}Salegain Polytechnic, Igusa Suginami, Tokyo, Japan. Email: kaunchal@hotmail.com

Abstract

In this paper, A three layer feed forward neural network (NN) with marquardt-levenberg learning law is applied to recognize radiated EMI which emit from complicated circuit. A mobile robot is a complicated circuit, it which can be operate in several modes is used as the radiating EMI source. The process is detected through the monitoring of spectra's amplitude frequency emit from the robot. The statistical calculation is applied to reduce the generalization capability of the NN by using a few sample of the envelope of radiate EMI. The trained NN is then applied to identify operating-mode of the robot. For experimental result, the NN can identify all of those operation-mode from their radiated EMI.

Keywords: Neural Network, identify, recognize, EMI,

1. Introduction

Radiation emission from circuit can be influenced by component variations. Changes in resistors, capacitors, inductors, transmission lines, and integrated circuit chips may have a significant effect on the radiation characteristic of a real system. There are many ways in which they can be applied in order to minimize the error between the expected and predicted spectra of the radiated field, such as: the Method of Moment (MOM), Finite Elements Method (FEM), and Finite Elements Time Domain (FDTD). They, however, are computationally intensive and suitable only for basic structures because they cannot predict the behaviors of complicated circuits which consists of PCB-traces, ICs, and Micro-Processors. Moreover, the calculating results from all those methods aren't accurate when the model which used in the calculate racks of some an unknown parasitic variable of the circuit.

The fast and effective way to identify and predict the radiation from the complicated circuits by using a NN is purposed in this research.

For this research, the NN is applied to recognize twenty operation modes of a mobile robot from their radiated EMI. The learning process is accomplished by using computation results which base on an actual measured results of different circuits. The trained NN are tested by fed the known spectra of the robot for identify the robot operation mode. The NN is successful in identification of the operation modes from their radiated EMI. In addition, the radiated spectra produced by the robot included artificially radiated noise that was put into the trained NN to identify the predicted mode.

2. Robot

Robots are already used in many industrial applications. Their use probably will soon expand into office, home, hospitals and other areas. Robot under test (Fig.1) is Automatic Guidance Vehicle (AGV-1) type and it has an on-board micro-controller for two continuous motors (Fig.2). Two optical incremental encoders are inserted on motor axes, which allow going back to cover trajectory. Proximity sonar sensors are on robot; vehicle controller, through them, can realize whether unexpected obstacles intercept the running path. The top of robot is closed by a Plexiglas support on which you may lay loads to be transported.

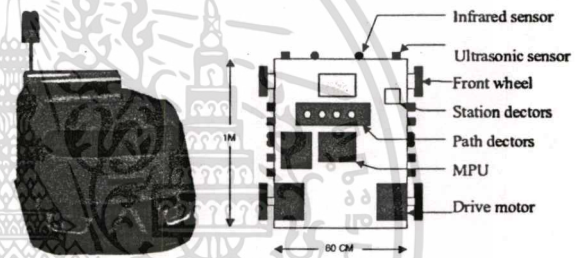


Fig.1. Mobile Robot (AGV-1)

An interface card, provided by constructor manages proximity system and encoders. AGV-1 has to be power by a 24V supply voltage; its current level has to be between some milli-amps till 20A. Two stabilized batteries 12V,50A guarantee this supply.

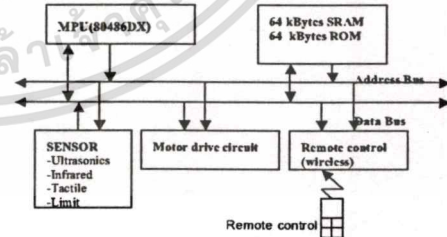


Fig.2. Robot control circuit.

Twelve sensors are used to monitor the internal conditions and the changes in the environment. Two types of ultrasonic sensor are placed on the front and the two side of the robot. The ultrasonic sensors can be set for transmission or reception at different frequencies. Infrared sensors receive the radiation from infrared light-emitting diodes (LEDs) reflect from obstacles. Infrared LEDs have a higher directivity

Table 1. Operation mode of Robot (1:ON, 0:OFF)

Mode	Training Pattern											Buzzer	Light		
	Input					Output									
	Guide path		Infrared			Ultrasonic			Motor left		Motor right				
	left	right	left	right	mid.	1	2	3	4	5	forward	backward	forward	backward	
(1) A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(2) B	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
(3) C	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
(4) D	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
...
(20) T	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1

than ultrasonic transmitters. The direction of an infrared LED can be determined more precisely. In addition, tactile sensors on the front and rear of the skirt sense contact with walls and obstacles. The operation mode of the robot and its specification is shown in table 1 and 2, respectively.

operation mode. The characteristic of amplitude-peak or spectra of each operation mode relate to the control pattern of the robot and there are advantage for NN for recognizing and identifying the operation mode of the robot.

Table 2 Robot specification.

Maximum speed	15 m/s
MPU	80486 Dx 100
Sensor	
-Infrared	6
-Ultrasonic	6
-Path reader	16
Dimensions	1 m x 60 cm x 40 cm
Weight	100 kg
Power supply	Two 12V batteries

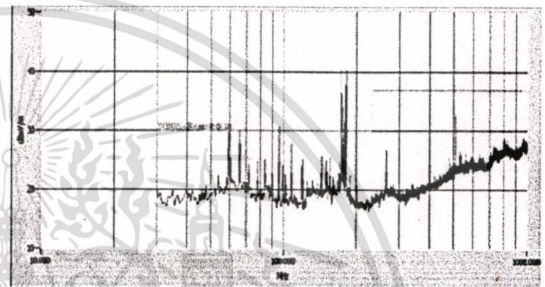


Fig.4. Radiated emission form mode B operation

3. Far-Field Measurements

Electromagnetic radiation from the robot are measured from 30 MHz up to 1 GHz. The robot is located on a 1.5 meters diameter turn-table. The radiated field is collected by an antenna located 3m away from the EUT, at a height of 1-4 m inside the semi Anechoic chamber. The measurement for both horizontal and vertical polarization E-fields are measured by using a Bi-Log antenna (for the frequency 30 MHz to 1 GHz). The geometrical configuration setup is shown in Fig.3.

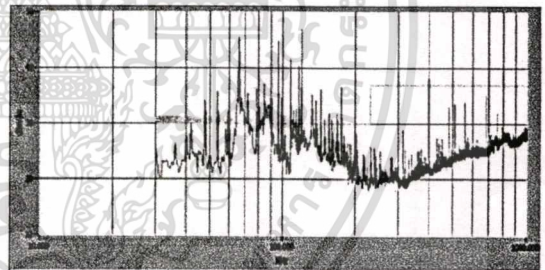


Fig.5. Radiated emission form mode C operation

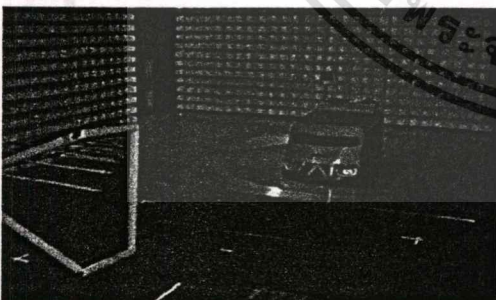


Fig.3. The far-field measurement configuration.

Fig.4-5 show the measured results compared to the CISPR limit of the mode B and mode C operation. The vertical scale is dBuV/m and the horizontal is frequency (MHz). The measured results at low frequencies (30 MHz to 200 MHz) of mode B and C are different, but quite different at high frequencies (200 MHz to 1GHz). Fig.6 illustrates the comparison spectra of different

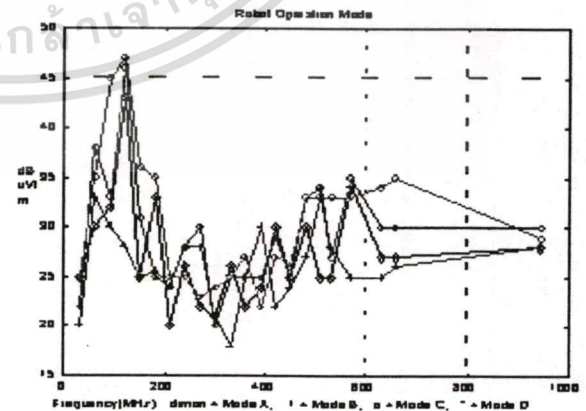


Fig.6. The comparison of different operation mode .

4. NN Training Process

A two-layer feed forward NN which consists of one hidden layers was developed for identifying the function of robot by using its radiated EMI. The NN architecture (as shown in Fig.7), which consists of an input (the i layer), a hidden (the j layer), and an output (the k layer), is adopted to implement the proposed application.

The network can be thought of as a converter having many inputs and outputs. The network converts input signals according to connection weights. During learning, connection weights are adjusted until the network outputs the desired signals. The process begins with random connection weights. And, initially, outputs differ from the desired outputs. The network compares the actual and the desired outputs, and adjusts the connection weights to reduce the difference between them. This is basically how a back-propagation-type neural network learns.

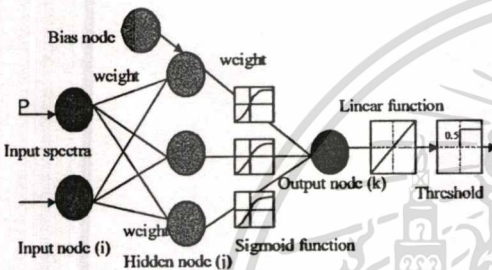


Fig.7. The NN architecture.

The parameters to be used as inputs of the NN should characterize the shape (envelope) of the magnetic spectrum near field and radiated spectrum far field. To implement the envelope spectra, each measured spectra in each frequency produced by AGV difference mode operations are plotted by using interpolation technique. A very long time learning for the case that used all data form envelop spectra. A good compromise is to divide the spectrum envelope in to 8 intervals: 32 MHz/ 62 MHz/ 115 MHz/ 198 MHz/ 310 MHz/ 448 MH/ 615 MHz/ 808 MHz/ 1000 MHz using Eqs.1. The envelope spectra in each interval in Fig 8 is quantized .

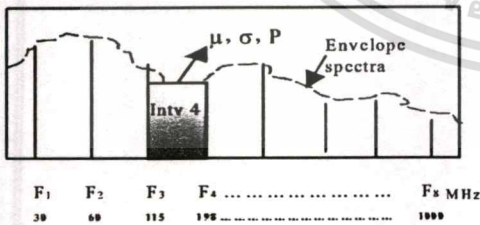


Fig.8 The sample of envelope spectra.

The 8 boundary frequencies defining these interval are obtained by using the following expression:

$$F_{upper}(n+1) = 2F_{lower}(n) + 20\log_2 8 \quad n=1,3,, 8 \quad (1)$$

where $F_{upper}(n+1)$ is the upper boundary frequency(n+1), and $F_{lower}(n)$ is the lower boundary frequency, $F_{lower}(n)$ is equal to 30 MHz, where n =1. The obtained results in each interval is shown in Table 2 .

Table 2. Divided intervals of envelope spectra

Interval	1	2	3	4	5	6	7	8
$F_{lower}(\text{MHz})$	32	60	115	198	310	448	615	808
$F_{upper}(\text{MHz})$	60	115	198	310	448	615	808	1000

To feed the data into the NN inputs, the statistical method is applied. The means (μ), standard deviation (σ) and probability value(P) in each interval in Fig.8 are calculated. The Normal (Gaussian) distribution(P) is defined by the following expressions:

$$P(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

where μ the mean value of distribution and σ the standard deviation.

In this manner, the x variable in the Eqs.(2) can be represented by a pair of two real numbers with the actual value of the parameter occurring at a random deviation having the normal probability distribution as shown in Eqs.(2). As discussed, a randomly selected value of the x parameter is given by Eqs.(3)

$$x = u + y_1 \sigma \sqrt{\frac{-2\ln(y_1^2 + y_2^2)}{(y_1^2 + y_2^2)}} \quad (3)$$

where y_1 and y_2 are both independently and randomly chosen variables between -1 and 1.

The five bit output are used as the NN target and to identify the robot operation mode(see Table 3). The input of the NN are the means, standard deviation and probability value calculated using Eqs.(2) and (3).

5.Results Analysis

In the testing, the radiated far-field, from the different operation mode of robot, are used as the trained NN input for identifying the operation mode. The threshold values are used for converting the computed-outputs to the NN targets. The radiated emission of the mode "A" of robot shows a "0" in all targets.(Table.4). Mode B for the case that all of binary bit are reset (0) except the fifth bit are set (1). It is assumed that computed outputs greater(smaller) than the threshold value of 0.5 characterize the robot with different operation-mode.

For demonstrate an ability of the NN in identification source of radiation (AGV operation modes), the percentage of error in identification (PEI) is defined. The PEI is the ratio of the number of fault in predicting case / number of training data sets.

The trained NN consist of 24-input nodes, 40-hidden nodes, and 5 output nodes is successfully in identification operation mode of AGV by using its envelope spectra in 8 intervals. The computed-outputs and the NN targets are in good agreement and are shown in table 4.

In addition, the radiated spectra produced by normal mode operation as shown in Table 1 included artificially impulse noise are put into the trained NN to identify the operation mode. The NN, however, can identify the operation modes by give PEI 5 %. It is show that the NN can applied to identify the more complicated circuit using only the radiated EMI.

6. Conclusions

The applied NN, for recognizing and identifying the operation-mode of the complicated circuit from their radiated EMI is presented. The three layer NN is trained using the inputs which are the relevant parameter that describe the statistical values of the radiated emission spectra envelope(30MHz-1GHz) for different operation-mode of mobile robot. The five bit digital output is considered by the value of the radiating source, which depend on different operation-modes of the robot. The NN can identify all of operation-mode of the complicated circuit from their radiated EMI.

7.Reference

[1] Yang-Oink Zhang, Abraham Candle, "Compensatory Neurofuzzy Systems with Fast Learning Algorithms," IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 9, no.1, pp.83-104, 1988.
 [2]K.Aunchaleevarapan, K. Paitoonwatanakij, Y. Pream-praneerach, W.Khan-ngern, S.Nitta "Classification of PCB Configuration from Radiated EMI by Using Neural Network", Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics CEEM'2000", May 3-7,2000 Shanghai,China, pp.105-110.
 [3] K. Aunchaleevarapan, K. Paitoonwatanakij, Y. Preampra-neerach, W.Khan-ngern, S. Nitta, " Radiated EMI Recognition and Identification for PCB Configurations and Digital Circuit Using a Neural Network", Electromagnetic Compatibility 2001, 14th International Zurich symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility", February 20-22,2001, pp. 567-572.
 [5]S. Ratnajeevan, H. Hoole, "Artificial Neural Networks in the Solution of Inverse Electromagnetic Field Problems", IEEE Trans. On Magnetics, Vol.18, No.23, pp.664-669,1993.

Table.3. An example of the NN inputs and target in the learning process.

Pattern (n)	Mode	Sta.	Intval 1	Intval 2	Intval 3	Intval 4	Intval 5	Intval 6	Intval 7	Intval 8	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
1	A	-μ -σ -P	22.2 0.77 0.15	25.00 2.00 0.10	30.00 2.45 0.08	33.6 2.75 0.07	31.60 0.19 0.10	30.2 1.33 0.13	29.40 1.51 0.12	28.00 0.64 0.16	0	0	0	0	0
2	B	-μ -σ -P	18.00 0.63 0.16	22.00 0.63 0.16	27.30 1.03 0.14	33.4 2.877 0.07	20.00 1.72 0.11	25.80 2.16 0.09	25.00 0.63 0.16	25.00 0.49 0.17	0	0	0	0	1
....
20	T	-μ -σ -P	22.00 0.63 0.16	31.40 1.64 0.13	39.80 2.10 0.09	40.20 1.87 0.04	28.20 1.50 0.11	31.00 1.47 0.12	30.60 1.40 0.13	27.00 0.63 0.16	0	0	0	1	1

Table.4. The calculated outputs(C_n) when compared with the NN target, or Converted Outputs(O_n) (If O_n ≥ 0.5 then C_n = "1" else C_n = "0").

Pattern (n)	Mode	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅
1	A	0	0	0	0	0	0.00	-0.92	0.43	0.07	-0.87
2	B	0	0	0	0	1	0.04	-0.98	-0.56	0.02	1.00
....
20	T	0	0	0	1	1	-1.00	0.09	-0.32	0.56	0.86

RADIATED IMMUNITY TESTING FOR A LOW COST ROBOT

K. Aunchaleevarapan[†], Y. Preampraneerach^{††}, W. Khan-Ngern^{††}, and V. Ungvichian^{*}

^{*}Electrical and Electronic Products Testing Center (PTEC)

[†]Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology, Thailand, Email: kaunchal@hotmail.com

^{††}Florida Atlantic University, USA

Abstract

In this paper, a low cost technique are applied for testing and monitoring a low cost industrial robot under interference field is purpose. The circuit used for monitoring the movement-function of the robot under the EM field is presented. The monitoring technique is detected the changing of position from desired path, the changing of velocity form setting speed, and fault-detected of sensors from normal operation. The test method was performed using the standard EN 61000-4-3. The high level EM field from 26 MHz to 1GHz are emitted to the robot during the test. Then, the designed circuit is applied to monitoring the robot operation under the EM field. The low cost circuit is successfully in detection the operation of the robot under interference field.

Keywords: EM field, EN standard, mobile robot

1. Introduction

Robot are currently used in many industrial application and will expand use in office, home, hospitals and etc., in the future. In the Industrial area, which high level electromagnetic disturbance (due to intentional and non-intentional source, like power line generation and distribution, control system, RF and MW heating, arc soldering) may cause effect to the robot's operation. For the above reasons, in order to guarantee the safety and profitable use in industrial application, the feasibility, efficiency and reliability of the robot system need to be systematically and extensively investigated. IEC 61000-4-3 regulated the radiated susceptibility method for testing and the defined the decision phenomena of the EUT are applied for testing.

Normally, robot which used in the industrial application or local made robot are not already included software and tools for monitoring phenomena of the EUT when disturbed by radiated field, if any, the cost of the monitoring system are very expensive and suitable only for own system. Moreover, it is very difficult for the testing engineers in the case that the EUT is a multiple inputs and multiple outputs system, because they cannot monitoring all of sensors during the test.

In this purpose, the designed circuit for monitoring the function of the robot under EM field is applied. The several sensors, which included in the AGV by various in field strength are tested. Finally, the paper shows some results obtained with this test, performing the test

on a robot, also using the signal producing by the transmitter antenna: the effect of the disturbance inside and outside operation band of the sensors.

2. Robot

Fig.1 shows a structure of Automated Guidance Vehicle (AGV), a mobile robot that use several sensory modules. It is a four-wheel vehicle with two independently motor at rear wheel and two free casters at the front. Two incremental encoders is attached at the back wheels on motor axes, which allow going back to cover trajectory. The robot is equipped with two different perception sensor systems. Five standard ultrasonic transducers are positioned around the vehicle circumference. Aspect sensor is mounted in the front of the robot to get a better view in the drive direction, and three infrared sensor, providing the more directivity, is mounted on a platform overlooking the robot. Proximity sensor is the robot; vehicle controller, through them, can realize whether unexpected obstacles, intercept the running trajectory. A metal plate for laying loads to be transported closes the top of robot. An on-board computer system executes different modular navigation tasks is located inside the mobile robot. AGV has to be power by 24 supply voltage; its current level has to be between some milli-amps till 20A. Two stabilize batteries 12V, 50A guarantee this supply. The operation mode of the robot and its specification is shown in Table (1) and (2).

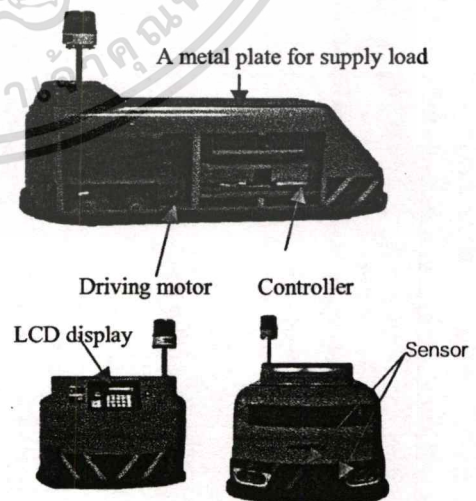


Fig.1 Robot under test (AGV)

Table 1. Robot specification

Maximum speed	15m/s
MPU	80486 Dx 100
Sensor	
-Infrared	3
-Ultrasonic	5
-Path reader	16
Dimensions	1m x 60cm x 40cm
Weight	100 kg
Power supply	Two 12V batteries

Table 2. Robot operation mode for radiated emission testing (1:ON, 0:OFF)

Training Pattern															
Pattern	Input					Output									
	Guide path		Infrared			Ultrasonic					Motor left		Motor right		Buzzer
left	right	Left	right	mid.	1	2	3	4	5	forward	backward	forward	backward		
(1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(2)	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
(3)	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
(4)	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
...
(20)	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1

3. Monitoring Circuit description

The functionality of the robot under interference was observed by monitoring sensors, the velocity profile, and trajectory drawing, which could be realized using introduce points co-ordinates where the robot has to pass through.

To observed the function of the robot under EM field the circuit which shown in Fig.5 is applied. The velocity of the robot can be found using the incremental encoder which are attached at the rear driving-motors.

The resolution of a quadrature incremental encoder is usually specified as a number of lines. This number indicates the number of cycles of the output signal for each complete shaft resolution. For example, an N-line encoder generate N cycles of its output signals during each complete shaft revolution. By definition, two signal that are in quadrature are 90° out of phase, when considered together, channels A and B(see Fig.2) traverse four distinct digital states during each full cycle of either channel. Each state transition represents one count of shaft motion. The leading channel indicates the direction of shaft rotation. Each line, therefore, represents one cycle of the output signals, and each cycle represents four encoder counts.

$$\left(N \frac{\text{cycles}}{\text{revolution}}\right) \times \left(4 \frac{\text{counts}}{\text{cycle}}\right) = 4N \frac{\text{counts}}{\text{revolution}} \tag{1}$$

Sampling of actual shaft position occurs at a fixed frequency, the reciprocal of which is the system sample period is the unit of time upon which shaft acceleration and velocity are based.

$$T_s = 2048 \times \left(\frac{1}{f_{\text{clock}}}\right) \text{sample} \tag{2}$$

The position and velocity of the robot motion can be found using Eq.(1) to (3).

$$P = (E_i \times 4) \times D_p \tag{3}$$

$$V = R \times T_s \times D_p \tag{4}$$

when P: the position of the robot,

E_i : pulse of encoder line, and

D_p : disired number of revolutions.

The output of the encoder are two channels 90 degree lag square pulses. The first channel signal pulses from encoder are fed to the 16 bit digital counter for converting the pulse to the velocity. The velocity from the encoder are displayed by using an oscilloscope. For motoring the position of the robot, the two pulse signal from the encoder are fed into the up/down counter and the output of the counter is fed into the digital to analog converter(DAC). The actual position difference from the desired point is measured by using an oscilloscop.The user can setting start point and end point co-ordinates for the robot movement. When the user, have finished to define path the robot ready to move to the end point.

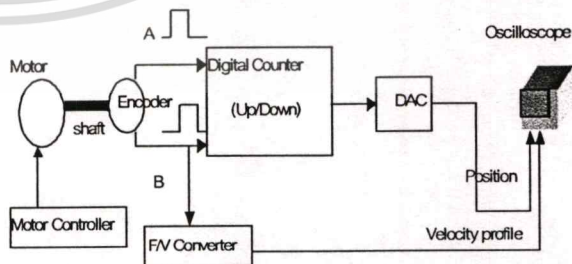


Fig.2 Block diagram of position monitoring

The velocity and position co-ordinate of the robot movement is assigned for the robot and illustrated in Fig.

(5). For monitoring functionality of the robot under interference, the robot is move to position 1,2,3,4, and 5, respectively. The velocity of the robot in each coordinate are adjusted from the start point to the end point and shown in Fig.3.

In this paper, the functionality of the robot under interference was observed by measuring the actual velocity and actual position compared with the desired velocity and the desired position. The different in position of the robot with and without interference field is shown in Fig.5 . The position of the robot under disturbed by E field can be found using Eq.(5) to (7).

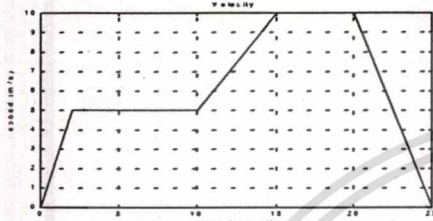


Fig.3. Velocity profile

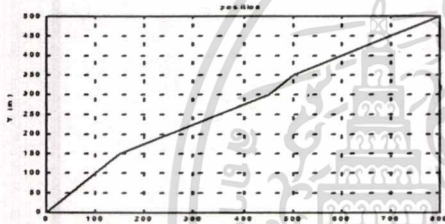


Fig.4. Position profile

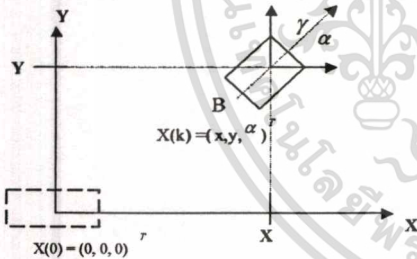


Fig. 5. AGV system geometry

The AGV operate within a two-domain(2-D)cartesian environment. Its state $x = [x \ y \ \alpha]^T$ is reference with respect to an origin set in the global coordinated system $[X \ Y]^T$. α is the baring of the vehicle. The control input to the AGV, $\mu(k)$, consists of two components; the AGV's velocity and the steering-wheel angle $\mu = [V \ \gamma]$. The system's model is

$$x'(t) = V \cos[\alpha(t) + \gamma] \quad (5)$$

$$y'(t) = V \sin[\alpha(t) + \gamma] \quad (6)$$

$$\alpha(t) = \frac{V}{B} \sin \gamma \quad (7)$$

Where B is the baseline of the vehicle.

4. Test setup Configuration

The radiated field strength emit from the transmitter antenna was located at 3 m away from the EUT, at height of 1.5m inside the Medium Compact Diagnostic Chamber(MCDC). The testing was conducted for both horizontal and vertical polarization E-field by using a Bi-Log antenna(from 26-1000 MHz). The technical standard EN 61000-4-1(General Norm on Immunity in Industrial Environment) recommends to test the device using a 1V/m, 3V/m and 10V/m radiated field sweeping from 26 to 1000MHz and modulated in amplitude by a 1 kHz signal(80% modulation).

The amplitude of the electrical field is set constantly in a plane in front of the EUT(16 points of field uniformity). The configuration setup according to IEC 61000-4-3 is shown in Fig.6. The radiated field generated from the transmitter antenna was measured by using isotropic probe. The E field measured by the probe which generate from the power amplifier are shown in Fig.7.

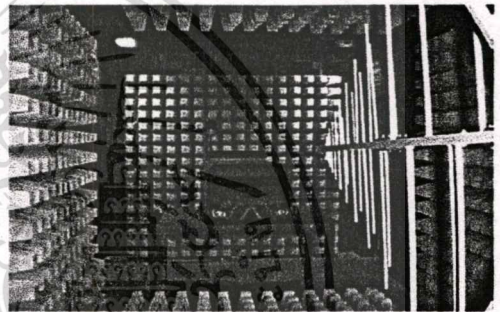


Fig. 6. The testing configuration.

The AGV was located in a MCDC, in the position shown in Fig.6, with back (drive) wheels elevated by jack stands. The robot is driven from the start point to the finish point in fixed path, in order to follow a prefixed trajectory without interference and under the interference solicitation.

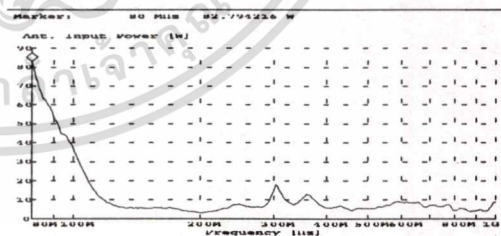


Fig. 7. Field strength of 10V/m from amplifier

5. Results

During the application of each disturbing signal, the robot is driven from the fixed path, in order to follow a desired path (continuous line in the following figures 8): under the interference solicitation the robot follows an actual (|), and the differences between them. Fig. 9 report the comparison between the settled and the followed path in the case of a standard excitation (EN

61000-4-3): the equivalent field level is chosen according to the regulation higher level, 1V/m to 30V/m. Various susceptible effect were found in the robot. They include motor running rough and stop, LCD displays dimming, brightening, disappearing or flashing. All of these effect occurred at relatively with E-field strengths from 3V/m to 30V/m. Table 3 lists a sample of the effect that were observed.

The testing is separated in two bands which depend on the sensor operation, the first "out band testing and other, "in band testing (40 kHz for ultrasonic sensors, and 100 MHz for infrared sensors).

The first, the signal sweeping from 26 MHz up to 1GHz except 40 kHz and 100 MHz according to the EN 61400-4-1 and modulated by a 1kHz signal (80% modulation deep) are emitted to the robot. The robot can operate under disturbed by 3 V/m EM field and fail in operation when the field is increased to 10 V/m. The error of the position is 5 cm add from the desired path, especially, at curve(P1 and P2). The ultra sonic sensor can not detect the obstacle under 10 V/m EM interference. The LCD display is blinked at 30 MHz and increase to flashing when the frequency of the EM field is increased to 40 MHz. The error in operation may be come from the EM field pass into front of robot which made of plastic.

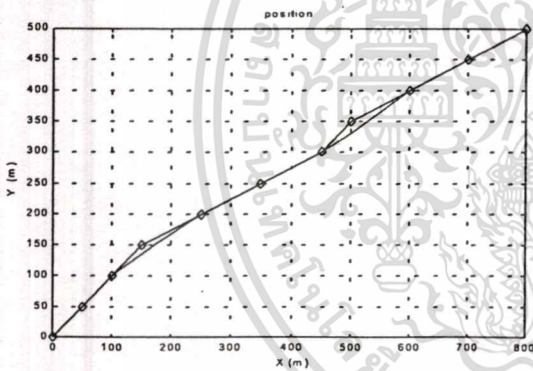


Fig.8. The profile of the robot movement

Finally, the transmitting frequency fixed at 40kHz (for ultrasonic sensor) and 100 MHz (for infrared sensor) are tested. The ultrasonic sensor failed in detection at 400 MHz. Then, the robot moved away from the desired path, because the control- program detect the wrong signal. In the case of the infrared sensor, the fault in operation appeared at 100 MHz and the EM level is 10 V/m. The velocity of the robot changed under disturbed by 10 V/m EM field at 150 MHz and 600 MHz, respectively. The all operation mode of robot are wrong in case that the EM field is increased to 30 V/m. The result in this testing shown that the ultra sonic sensor and infrared sensor in this purpose is weak by EM field. The using robot in the industry area must consider the EM environment.

6. Conclusion

The low cost technique for testing and monitoring the functionality of the robot under interference radiated field was presented. The parameter which was used for monitoring the phenomena are sensors, velocity and position. The radiated field is applied to the robot considering the operation of the robot. The desired circuit successful in applied for monitoring the robot under EM interference.

7. Reference

- [1] R.De Leo, V. Mariani, D.Ottaviani, "A test method for immunity of radio-linked automation systems", pp.489-494
- [2] Michel Mardignian, "Electromagnetic Control in Components and devices" Volume 5, Interference Control Technologies, Inc. Gainesville, Virginia 1988.
- [3] Chingchi Chen and Xingyi Xu , " Modeling the conducted EMI emission of an electric vehicle(EV) Traction drive" pp-796-801.

Table.3 Result of susceptible Effects in Robot

Freq. MHz)	Velocity	Position	Sensors		LCD Display	E(V/m)
			Ultrasonic	Infrared		
26	No change	Error	No change	No change	No change	10V/m
30	Error	Error	No change	No change	Blink	3V/m
40	Error	Error	Error	No change	Flashing	10V/m
100	Error	No change	No change	No change	Flashing	10V/m
150	No change	Error	No change	Error	No change	3V/m
300	No change	No change	No change	Error	No change	30V/m
500	No change	No change	No change	No change	No change	10V/m
600	Error	Error	Error	Error	No change	10V/m
800	No change	No change	No change	No change	No change	10V/m

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS
DENSHI-JOHO-TSUSHIN-GAKKAI

Re: paper no.2002EBP3009,

Novel Method for Predicting PCB Configuration for Near-Field and Far-field Radiated EMI Using
a Neural Network

by Kraison AUNCHALEEVARAPAN, Kitti PAITHOONWATAKIJ, Weracheat KHAN-NGERN,
Shuichi NITTA

Dear Authors:

It is my pleasure to inform you that your above-referenced manuscript has been accepted for
publication in the IEICE Transactions on Communications.



Toru Uno
Editor of IEICE Transaction con Communications
Professor
Department of Electrical and Electronics Engineering
Tokyo University of Agriculture and Technology
t-uno@m.ieice.org

Kikai-Shinko-Kaikan Bldg., 5-8
Shibakoen 3 chome
Minato-ku, TOKYO, 105 JAPAN
Phone : + 81 3 3433 6691
Fax : + 81 3 3433 6659
E-mail : office@ieice.or.jp

JC Bldg., 6-22, Shibakoen 3 chome
Minato-ku, TOKYO, 105 JAPAN
Phone : + 81 3 3433 6692
Telefax : + 81 3 3433 6616
E-mail : shuppan@ieice.or.jp

Please Reply To :
Kikai-Shinko-Kaikan Bldg., 5-8
Shibakoen 3 chome
Minato-ku, TOKYO, 105 JAPAN
Phone : + 81 3 3433 6691
Telefax : + 81 3 3433 6659
E-mail : office@ieice.or.jp

Recognition and Identification a Computer and Electronic Ballast by Radiated EMI Using Neural Network

[†] K. Aunchaleevarapan, [†] S. Kaophenyai, ^{**} W. Khan-NGERN, and ^{**} Y. Prempraneerach

[†]Electrical and Electronic Products Testing Center, NECTEC, NSTDA, Thailand

^{**}Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology, Thailand, kaunchal@hotmail.com

Abstract: The Neural Network (NN) is applied to recognize different model of computer and Electronic Ballast using its magnetic spectra and radiated far-field emission. The learning process is accomplished by using the computed spectra of the radiated field from EUT having different model. The anomaly is detected through the monitoring of the spectra's amplitude frequency emit from the EUT. The trained NN is then applied to the identification of EUT from radiated emission measurements. The trained NN can identify all of those EUT model from the magnetic spectra and the radiated far-field EMI.

1. Introduction

Electromagnetic radiation is often caused by time-varying currents, current traveling distances, the geometry of the paths they follow, the frequencies, and the amplitudes of the sinusoidal component [4]. All electrically small antenna and basic shape PCBs can be represented as a short dipole, a small loop, or a combination of the two [3]. The fields radiated by currents flowing on a simple structure configuration can be grounded by modeling them as a short dipole (or short monopole). The fields from more complex structure can be found by the superposition of the fields of a series by a connected array of short dipoles. There are several ways in which they can be applied in order to minimize the error between the expected and predicted spectra of the radiated field, such as: the Method of Moments (MOM), and the Finite Elements (FE), the Finite Element Time Domain (FDTD), and the Current Element Model (CEM). They, however, are computationally intensive and suitable only for basic structures because they cannot predict the behaviors of nonlinear elements which consist of PCB-traces, ICs, resistor, capacitor, and Micro-processor. In addition to this, all of the models cannot be used to analyze more complicated products, and floor-standing products because they have several unknown parameter include in the calculation model. The fast and effective way to identify and predict the radiation from the circuit by using a Neural Network (NN) is proposed.

For this research, the NN is applied to recognize different computer models and different model of Electronic Ballast from their radiated EMI. The learning process is accomplished by using computation results which base on an actual measured results of different circuits. The trained NN is tested by fed the known spectra of computers and the electronic ballast for identify the EUT model. The NN is successful in identification of the EUT models from their radiated EMI. In addition, the radiated spectra produced by the EUT included artificially radiated noise that was put into the trained NN to identify the predicted mode.

2. Equipment Under Test (EUT)

In this research, a ten different models of personal computer (PC) and a ten models of electronic ballast (E-Ballast) are used as a radiated source. The Electronic Ballast was used as an EUT, was operated at 20-100 MHz switching frequency. The magnetic radiation of the EUT is setup according to CISPR15 testing standard and shown in Fig.1. The computer, was a Pentium III processor 750 MHz with 64 MB memory. All of operation functions of the computer were operated during the test, such as: floppy disk, CD-ROM, and monitor display, etc,.. All of the output port of the computer are terminated by the corrected resistance. The setup configuration for radiated far-field testing is shown in Fig.5.

3. Measurement for Electronic Ballast and Computer

The magnetic radiation from the Electronic Ballast are measured from 9 kHz to 30 MHz using a three axis magnetic loop. The EUT are located at center of the magnetic loops and placed inside Semi-Anechoic Chamber. The measurement is carried out using a Quasi-Peak detector with a 100 kHz resolution bandwidth and are recorded using computer controller.

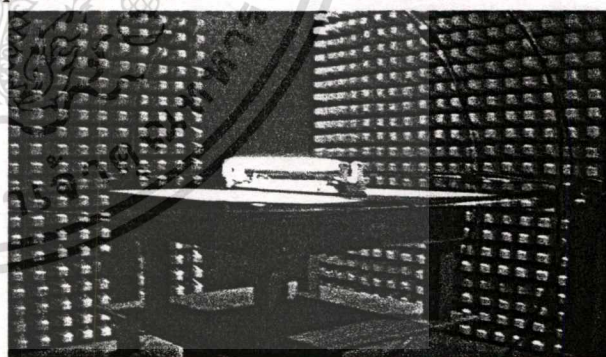


Fig.1 Magnetic measurement for E-Ballast

Figures 2, 3, and 4 shows the measured results compared to the CISPR 15 limit of the model A, B, and model C Electronic Ballast, respectively. The vertical scale is dBuA/m and the horizontal is frequency (MHz) from 9 kHz to 30 MHz. The measured results at low frequencies (9 kHz to 30 MHz) of model A and B are different, but quite different at high frequencies (2 MHz to 30 MHz). The magnetic spectra of E-Ballast model A and C are different from 9 kHz to 30 MHz. The magnetic spectra of E-Ballast model C at low frequency is highest when compared with

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

another model. The characteristic of amplitude-peak or spectra of each model relate to its operation frequency and there are advantage for NN for recognizing and identifying the E-Ballast model.

frequencies (30 MHz to 100 MHz) of model B and C are quite different, but many different at higher frequencies (100 MHz to 1GHz). The radiated spectra of computer model A is close to the CISPR limit form 9 kHz to 30 MHz. The characteristic of amplitude-peak or magnetic spectra of computer in each model are advantage for NN for recognizing and identifying the computer model.

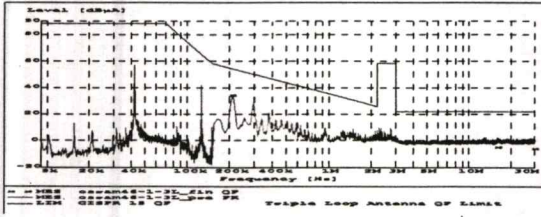


Fig. 2 Magnetic emission form E-Ballast model A

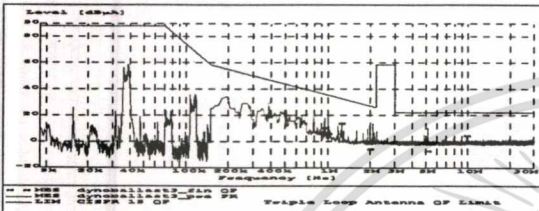


Fig.3 Magnetic emission form E-Ballast model B

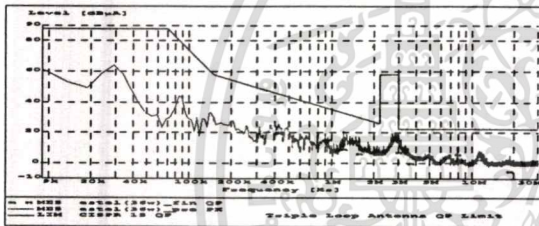


Fig.4 Magnetic emission form E-Ballast model C.

The electromagnetic radiation from the computer is measured from 30 MHz up to 1 GHz. The EUT is placed on an 80 cm high non-metallic table. The radiated field is collected by an antenna located at a 3 m distance from the EUT, at a height of 1-4 m inside the semi anechoic chamber. The measurement for both horizontal and vertical polarization E-fields are measured by using a bi-conical antenna (for the frequency 30 MHz to 300 MHz) and a log-periodic antenna (for the frequency 200 MHz to 1 GHz). The EMI receiver is located outside the semi anechoic chamber.

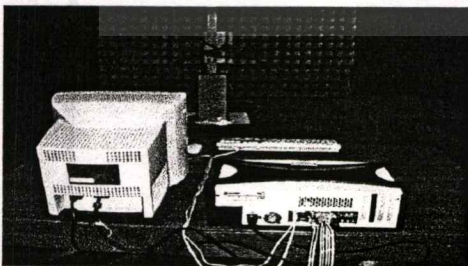


Fig.5 The computer measurement configuration.

Figure 6, 7 and 8 shows the measured results compared to the CISPR 22 limit of the computer model A, B and model C, respectively. The vertical scale is dBuV/m and the horizontal is frequency (MHz). The measured results at low

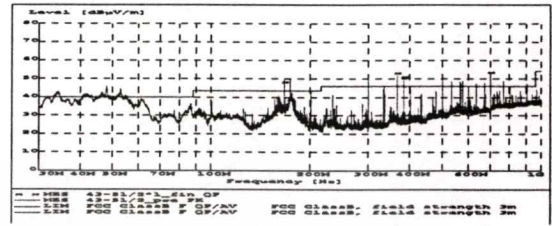


Fig.6 Radiated emission form computer model A

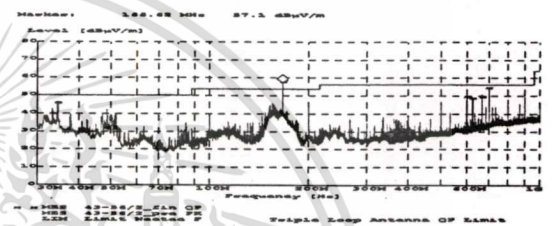


Fig.7 Radiated emission form computer model B

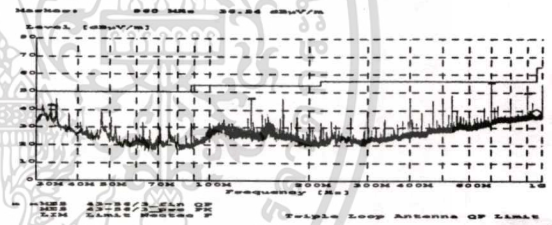


Fig.8 Radiated emission form computer model C

4. The NN Model for the Analysis EM Fields from PCB Configurations

A neural network can be considered as a matrix function that provides an approximate model of a system. The approximation model of this function is define a priori, and depends on the type of application (identification, classification, pattern recognition, etc.) [6].

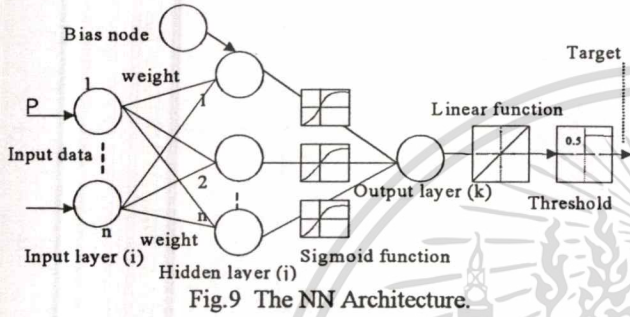
A three-layer NN, (shown in Fig.9), which consists of an input (the i layer), a hidden (the j layer), and an output (the k layer), is adapted to implement the proposed application. The capability and accuracy in the estimation depends on the number of input nodes, hidden nodes, and output nodes, etc..

Back-Propagation (BP) learning:

The BP network can be thought of as a converter having many inputs and outputs. The learning process begins with feeding the input data into the NN input layer, and

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

assigning the NN target for the output layer. Then, the initial connection weights and bias nodes at the hidden layer and the output layer are set randomly. The maximum error, the learning rate, and the momentum are set for the NN, respectively. The network converts the input data according to connection weights. The calculated output in each hidden node is converted to the output layer using the Sigmoid function. The summation of each sigmoid function in the hidden layer is the calculated output node. The calculated result from the output layer is converted to the output data and used for comparing with the NN target using the linear activation function and the threshold function, respectively. From this point, the sum-square error is obtained and used for stopping the learning process.



The BP process begins when the sum-square error is greater than the maximum error. The output data in the output node is back propagated to the hidden layer and the input layer, respectively. During propagation, connection weights are adjusted until the network sum-square error is less than the maximum error. When the learning process is finished, the weights are obtained and the NN architecture is defined. The trained NN is ready to identify or predicted outputs related to the input data.

In this paper, the NN is applied for identifying the computer model using its radiated far-field and applied for identifying the Electronic Ballast using its magnetic emission.

To implement the envelope spectra, the measured spectra in each frequency is produced by the different computer models that is interpolated and plotted using a curve interpolation technique. The parameters to be used as inputs of the NN should characterize the shape (envelope) of the magnetic spectrum and radiated far-field spectrum, thus, providing qualitative features rather than quantitative ones.

The input data of the NN could be all the samples that constitute the obtained envelope or only a few. If all the points of the envelope spectra are inputted, the training process may require a long time for learning and may not have successful system recognition because of the huge amount of training-data sets. A possible choice would be to represent the envelope in a more concise representation using only a few samples.

A good compromise is to divide the spectrum envelope of computer and Electronic Ballast into 8 intervals using Equ. (1) and Equ.(2), respectively. The 8 boundary frequencies defining these interval of computer are obtained

by using the following expression:

$$F_{upper}(n+1) = 2F_{lower}(n) + 20\log_2 \frac{n}{8} \quad n=2,3,\dots,8 \quad (1)$$

$$F_{upper}(n+1) = F_{lower}(n) * 1.5 \quad n=2,3,\dots,8 \quad (2)$$

where n is an interval number, $F_{upper}(n+1)$ is the upper boundary frequency(n+1), and $F_{lower}(n)$ is the lower boundary frequency, $F_{lower}(1)$ is the start frequency and is equal to 30 MHz for computer and 9 kHz for E-Ballast. The obtained results in each interval are shown in Table 1 and 2.

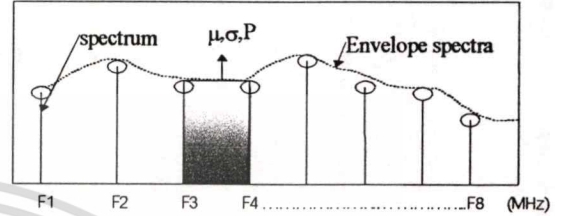


Fig. 10 The sample of envelope spectra.

Table 1. Divided intervals of envelope spectra of computer

Interval	1	2	3	4	5	6	7	8
$F_{lower}(MHz)$	30	62	115	198	310	448	615	808
$F_{upper}(MHz)$	62	115	198	310	448	615	808	1000

Table 2. Divided intervals of envelope spectra of E-Ballast

Interval	1	2	3	4	5	6	7	8
$F_{lower}(kHz)$	9	13	20	30	45	68	102	230
$F_{upper}(kHz)$	13	20	30	45	68	102	230	300

To feed the data into the NN inputs, the statistical method is applied for minimizing the number of the NN input nodes. The mean (μ), standard deviation (σ) and probability value (P) in each interval in Fig. 10 are calculated. The Normal (Gaussian) distribution is defined by the following expression:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2} \quad (3)$$

where μ the mean value of distribution and σ the standard deviation.

In this manner, the x variable in the Eq. (3) can be represented by a pair of two real numbers with the actual value of the parameter occurring at a random deviation having the normal probability distribution. As discussed, a randomly selected value of the x parameter is given by Eq. (4).

$$x = u + y_1 \sigma \sqrt{\frac{-2\ln(y_1^2 + y_2^2)}{(y_1^2 + y_2^2)}} \quad (4)$$

where y_1 and y_2 are both independently and randomly chosen variables between -1 and 1. These latter variables may be expressed in terms of the random deviation of the interval [0-1], which is denoted by Z_1 and Z_2 , as shown in Eq. (5)

$$y_1 = 2Z_1 - 1, \quad y_2 = 2Z_2 - 1. \quad (5)$$

The obtained values in each interval (μ, σ, P), referring to envelope spectra of the EUT are fed into the NN input. The target of the NN consists each of five coefficients that

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

can assume any real value between 0 and 1 (see Table 5 and 6). The value represents the likelihood that the considered spectrum is produced by a different model of the EUT. For the EUT with different model, the five bit outputs are equal to "1" or "0". The NN model for training and identifying EUT model is shown in Fig.11. The training-data set is comprised of n pairs of input and target output vectors as following:

$pattern_set(n) = \{ \{I^{(1)}, T^{(1)}\}, \dots, \{I^{(8)}, T^{(8)}\} \}$ where $n=10$ (patterns number), I is a input vector and T is a target vector. for example:

$$I^{(1)} = \{ \{ \mu_1, \sigma_1, P_1 \}, \dots, \{ \mu_8, \sigma_8, P_8 \} \},$$

$$T^{(1)} = \{ T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, \}$$

where $I^{(1)}$ is the set of the mean (μ), the standard deviation (σ) and probability (P) in each interval of pattern 1, $T^{(1)}$ is the five bit target of the NN of pattern 1. The input of the NN for the computer model A is

$Computer_{Model-A} = \{ \{38.12, 9.01, 0.01\}, \dots, \{36.09, 7.18, 0.98\} \}$ (see Table 5). The target for the

$Computer_{Model-A}$ is $T = [1, 0, 0, 0, 1]$. The input of the NN for the E-Ballast model A is

$E-Ballast_{Model-A} = \{ \{10.02, 4.45, 0.01\}, \dots, \{0.45, 4.32, 0.32\} \}$ (see Table 4). The target for the

$E-Ballast_{Model-A}$ is $T = [0, 0, 0, 0, 1]$. The pairs of input and target output vectors for the NN in the learning process is shown in Table 5 and 6, respectively.

Identifying EUT with the NN:

The trained NN is used to compute the output from the input of the magnetic spectra (electric far-field spectra) generated from a different EUT. The model of the NN used for identifying the EUT model from the magnetic spectra and radiated far-field spectra is shown in Fig.11.

The calculated results of the NN are represented as a five-coefficient value in real numbers from 0 to 1, and used for comparison with the NN target. Therefore, the calculated results of the NN (O_n) are converted to the five bit coefficient (C_n) (Table 5).

For this purpose, it is assumed that computed results greater (smaller) than the threshold value of 0.5 characterizes EUT with a different model (If $O_n \geq 0.5$ then $C_n = "1"$ else $C_n = "0"$). This value represents the likelihood that the EUT with a different model produces the considered spectrum.

5. Analysis of the obtained results

When the training process is finished the unknown weights are obtained and the final architecture of the NN is defined. The trained NN is ready to identify the different EUT from the magnetic spectra and radiated far-field spectra. The computed outputs of the NN are compared with the NN target.

To show the performance of the NN in identifying EUT, the percentage of error in identification (PEI) is defined. The PEI is the ratio of the number of fault-case-identification x 100 / number of training-data sets (n).

For this propose, the Back-propagation NN with a different number of input nodes, hidden nodes, and output nodes, are trained and tested by using the training-data set, which is provided by our program simulations. To adjust the NN's performance in identification, several variation parameters of the NN are selected and tested:

The means (μ), the standard deviations (σ), and the probability values (P) are computed in the eight frequency intervals of the magnetic spectra and radiated far-field spectra in Table 5, 6 and are considered as the NN inputs. The three layers of the NN, as shown in Fig.11, which consist of 24-input nodes, 50-hidden nodes and 5-output nodes is applied. The maximum error, the learning rate, and the momentum values are obtained as 0.0001, 0.001 and 0.6, respectively. Then, magnetic spectra and electric far-field spectra, which are produced by the computer and Electronic Ballast, are fed into the NN for identification of the EUT model. The NN gives a PEI of 3.0% and uses 2 hours for the learning process (see Table 3). The computer, which was used in the learning process, was a Pentium III 750 MHz with 64 MB of memory. The radiated spectra of the computer model A shows a "0" in the second bit, the third bit, and the fourth bit, respectively (see Table 7). The magnetic near-field spectra of the E-Ballast model A for the case that the fifth bit is set to "1" and the other bits are reset to "0". The converted outputs and the NN targets are in good agreement and are shown in Table 4 and 7.

For short time learning, the number of hidden nodes is reduced from 50 nodes to 10 nodes, while the number of input-nodes and output-nodes are fixed. The same training-data sets are fed into the NN for learning. The trained NN, then, is used for identifying EUT models, the PEI is increased to 10% and uses 0.5 hours for learning, in the case of 10 hidden nodes (see Table 3). Moreover, the PEI increase by more than 30% when the number of hidden nodes are reduced from 50 to 5.

Finally, to reduce the number of input and output pairs for the NN, only the means (μ) and the standard deviations (σ) are computed in the eight intervals, which are then fed into the NN inputs. Therefore, the number of input nodes is reduced to 16 nodes and the number of hidden nodes and output nodes are not changed (see Table 5 and 6). The trained NN uses 16-input nodes, 40-hidden nodes, and 6-output nodes for the learning process. The maximum error, learning rate, and momentum value are fixed. The NN is not successful in the learning process when the number of hidden nodes is reduced to 10. The optimal number of NN

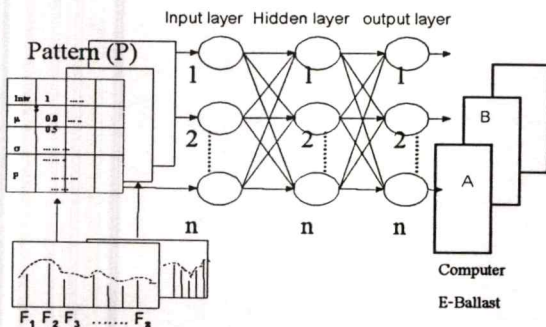


Fig. 11 The NN training process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nodes for identification is based on an acceptable learning time and a small PEI.

The results from the previous section suggest that the NN consisting of 24-input nodes, 40-hidden nodes, and 6-output nodes is successful in identifying EUT models by using the means, the standard deviations, and the probability values with 3.5% PEI, while using a learning time of about 2 hours.

Table 3 The NN results in training and identifying process.

No	Number of NN node (nodes)			Statistical Parameter	PEI (%)
	Input	Hidden	Output		
1	24	50	6	μ, σ, P	3.0
2	24	40	6	μ, σ, P	3.5
3	24	30	6	μ, σ, P	5.4
4	24	20	6	μ, σ, P	8.5
5	24	10	6	μ, σ, P	10.0
6	16	40	6	μ, σ	20.0
7	16	30	6	μ, σ	28.0
8	16	20	6	μ, σ	44.0
9	16	10	6	μ, σ	-

Identify EUT model with Noise

To test the NN reliability for identification, the training-data sets of the EMI spectra are produced by the EUT as shown in Table 5 and 6. This includes random and artificial impulse noise (30 MHz to 1 GHz, 1 V peak-to-peak amplitude) and is fed into the NN input. The PEI in this case is 40% and uses 4 hours for learning. The error in identification may come from several variables, for example, the number of frequency intervals related to the NN nodes, ambient noise, and the number of NN nodes. The user can adjust the frequency interval number, and the number of NN nodes to gain higher accuracy in the identification.

To improve the performance of the NN in the identification process, the number of sample intervals are deduced from dominant characteristic shapes of different EUT models. The spectra amplitude of computer range from 300 MHz to 1 GHz (310 MHz/ 448 MHz/ 615 MHz/ 808 MHz/ 1 GHz) and are fed into the NN inputs. The NN with 5-input nodes related to the odd harmonic spectra from 300 MHz to 1 GHz, the 40-hidden nodes, and the 6-output nodes are trained and tested. The NN is successful in identifying all of the computer models using their main dominant characteristic spectra and gives a 2 % PEI and used 0.5 hours for the learning.

6. Conclusions

The applied NN, for recognizing and identifying the computer models and Electronic Ballast models from their emission spectra, is presented. The three layer neural network is trained using the inputs which are the relevant parameters that describe the statistical values of the near-field and far-field emission spectra envelope for twenty kinds of EUT model. The five bit digital output is considered by the values of the radiating source, which depends on the model of the EUT. The NN can identify the EUT model from their magnetic spectra and radiated far-field spectra. Using the smallest computational effort and high accuracy in calculation are the main advantages of this proposed NN. A short calculation time is also required by the trained NN to recognize and identify the EUT. Further developments of this research will be devoted to the analysis of more complex system and to the treatment of multiple radiated sources.

References

- [1] Y.Ji, J.Chen, T.H.Hubing, J. L. Drewniak, "Application of a Hybrid FEM/MOM Method to a Canonical PCB Problem", IEEE Intern. Symp. EMC, pp 91-96, August 1999.
- [2] Yang-Oink Zhang, Abraham Candle, "Compensatory Neurofuzzy Systems with Fast Learning Algorithms", IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 9, no.1, pp.83-104, 1988.
- [3] A.C. Ludwig, "Near-Field far-field transformations using spherical wave expansions", IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol. AP-15, no.2, pp.214-220, March 1971.
- [4] T.H. Hubing and J.F. Kaufman, "Modeling the Electromagnetic Radiation from Electrically Small Table-Top Products", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol.31, no.1, pp.74-84, February 1989.
- [5] Martin T. Hagan, and Mohammad B. Menhaj, "Training Feed forward Networks with The Marquardt Algorithm", IEEE Trans. on Neural Networks, vol.5, no.6, pp.989-993, November 1994.
- [6] G. Antonini, S.Cristina, "Performance analysis of electromagnetic shields using neural networks", Proc. 13th Int. Zurich Symp. And Tech. Exhibition on EMC, Febr. 16-18, 1999.

Table 4 The calculated results, the converted output and are compared with the NN target of E-Ballast. (If $O_n \geq 0.5$ then $C_n = "1"$ else $C_n = "0"$).

EB Model	NN calculated resultd (O_n)					Converted Output ($O_n \geq 0.5$)					NN Target				
	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
A	0.01	0.40	-0.98	0.32	0.87	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
B	0.00	-0.56	0.43	0.75	-0.97	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
...
J	0.86	-0.97	-1.00	0.43	0.43	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 5 The training-data sets of the NN for learning process E-Ballast

Pattern (n)	EB Model		Input data for the NN								NN Target				
			$I^{(n)} = \{\{\mu_1, \sigma_1, p_1\}, \dots, \{\mu_8, \sigma_8, p_8\}\}$								$T^{(n)} = [T_1, T_2, T_3, T_4, T_5]$				
			Intval 1	Intval 2	Intval 3	Intval 4	Intval 5	Intval 6	Intval 7	Intval 8	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
1	A	-μ -σ -P	10.02 4.54 0.01	15.97 4.32 0.32	15.36 3.43 0.09	20.02 5.43 0.36	20.03 32.1 0.08	0.02 1.68 0.01	0.32 2.13 0.32	0.45 4.32 0.32	0	0	0	0	1
2	B	-μ -σ -P	9.08 4.32 0.03	13.40 5.43 0.93	22.41 2.41 0.09	20.32 6.78 0.43	15.43 6.90 0.07	0.92 4.37 1.00	0.24 1.32 0.93	0.45 7.54 0.02	0	0	0	1	0
.....	
10	J	-μ -σ -P	9.43 8.65 0.01	40.23 12.43 0.05	21.30 4.53 0.03	19.43 6.87 0.41	13.21 5.67 0.01	15.34 8.65 0.08	7.85 3.21 0.03	0.32 7.45 0.14	1	0	0	0	0

Table 6 The training-data sets of the NN for learning process for computer

Pattern (n)	PC Model		Input data for the NN								NN Target				
			$I^{(n)} = \{\{\mu_1, \sigma_1, p_1\}, \dots, \{\mu_8, \sigma_8, p_8\}\}$								$T^{(n)} = [T_1, T_2, T_3, T_4, T_5]$				
			Intval 1	Intval 2	Intval 3	Intval 4	Intval 5	Intval 6	Intval 7	Intval 8	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
1	A	-μ -σ -P	38.12 9.01 0.01	31.09 8.08 0.32	35.60 12.10 0.5	31.20 10.15 0.43	29.87 8.20 0.08	38.10 5.21 0.23	39.07 4.53 0.45	36.09 7.18 0.98	1	0	0	0	1
2	B	-μ -σ -P	35.50 11.20 0.03	25.00 9.32 0.04	30.12 4.56 0.03	37.80 9.67 0.07	27.20 7.65 0.03	33.43 3.45 0.16	42.00 3.44 0.11	36.00 7.20 0.02	1	0	0	1	0
.....	
10	J	-μ -σ -P	30.10 4.54 0.80	23.20 6.39 0.50	28.15 9.68 0.10	31.67 4.21 0.05	24.65 5.65 0.34	31.16 9.58 0.42	32.01 11.42 0.42	36.00 10.37 0.08	1	1	1	0	1

Table 7 The calculated results, the converted output and are compared with the NN target of computer. (If $O_n \geq 0.5$ then $C_n = "1"$ else $C_n = "0"$).

PC Model	NN calculated resultd (O_n)					Converted Output ($O_n \geq 0.5$)					NN Target				
	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
A	1.00	-0.32	0.42	0.43	0.56	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
B	0.91	0.03	0.01	0.50	-0.75	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
...
J	1.00	0.98	0.87	-0.56	0.75	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายไกรสร อัญชลีวรพันธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 25 มกราคม พ.ศ.2513 ที่จังหวัด ฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัด พิษณุโลก ปีการศึกษา 2534 ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2539



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้