



การศึกษาเทคนิคการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศโดยอาศัยผลการวัด

กระแสไหลมดผลรวมสำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

A STUDY OF RADIATED EMI PREDICTIONS FROM MEASURED COMMON-MODE
CURRENTS FOR POWER ELECTRONIC SYSTEMS

วราเทพ ผดุงถิ่น

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

A STUDY OF RADIATED EMI PREDICTIONS FROM MEASURED COMMON-MODE
CURRENTS FOR POWER ELECTRONIC SYSTEMS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING
(Electrical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาเทคนิคการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศโดยอาศัยผลการวัด

กระแสใหม่ดผลร่วมสำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ของ

วราเทพ ผดุงถิ่น

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์)

ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา)

ชื่อเรื่อง

ผู้วิจัย

วราเทพ ผดุงถิ่น

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ปีการศึกษา

2563

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์

งานวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (radiated electromagnetic interference) ได้แก่ วิธีแรกนำเสนอโดย Henry W. Ott วิธีที่สองโดย Clayton R. Paul และวิธีสุดท้ายนำเสนอโดย Shaowei Deng ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถหาได้จากกระแสไหลวนรวม (CM current) ที่วัดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน โดยในงานวิจัยนี้แหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซึ่งจำลองเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน จากนั้นวิธีการคาดการณ์ทั้งหมดที่กล่าวมาจะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้มาตรฐาน เพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิผลของการคาดการณ์ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวิธีการคาดการณ์ที่นำเสนอโดย Shaowei Deng มีความเหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้งาน เพื่อประมาณค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ เนื่องจากผลลัพธ์จากการคาดการณ์มีความใกล้เคียงกับผลวัดจริงในช่วงย่านความถี่ต่ำประมาณ 30 MHz ถึง 55 MHz แต่ในย่านความถี่ที่นอกเหนือจากนี้ยังคงมีผลลัพธ์จากการคาดการณ์ที่สูงกว่าผลวัดจริงมากเกินไป อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวนี้นี้ยังคงต้องปรับปรุงความแม่นยำในการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศในย่านความถี่สูง

คำสำคัญ : กระแสไหลวนรวม, ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า, สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า, การรบกวนทางอากาศ, แหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์

Title	A STUDY OF RADIATED EMI PREDICTIONS FROM MEASURED COMMON-MODE CURRENTS FOR POWER ELECTRONIC SYSTEMS
Author	WARATHEP PADUNGTHIN
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Vuttipon Tarateeraseth

In this thesis, the prediction methods proposed by Henry W. Ott, Clayton R. Paul and Shaowei Deng for estimating radiated electromagnetic interference (EMI) from measured common-mode currents for switching power supply as a noise source are evaluated. Then, the proposed radiated EMI prediction methods are compared with the standard radiated EMI testing results in a standard semi-anechoic chamber in order to verify their effectiveness. From the experimental results, it can be concluded that the procedure to predict the radiated EMI of the proposed method of Shaowei Deng was the most appropriate for preliminary estimation because the predicted results from this method are close to the measured results in the low frequency range from 30 MHz - 55 MHz. However, it still overestimated the high frequency range from 55 MHz - 1 GHz.

Keyword : Common-mode current, EMC, EMI, radiated emission, switching power supplies.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์ สำหรับความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงให้คำชี้แนะ คำปรึกษาด้านต่าง ๆ ทั้งในเรื่องการศึกษา การทำปริญญานิพนธ์และอุปสรรคต่าง ๆ ตลอดการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต ซึ่งสิ่งเหล่านี้หล่อหลอมให้ผู้วิจัยสามารถสำเร็จการทำปริญญานิพนธ์ได้เป็นพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์บุคลากร ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความรู้และให้ความช่วยเหลือด้านสถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์รวมถึงเอกสารต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับมหาบัณฑิต

ขอขอบคุณนายภาณุวัฒน์ สุธรรมจรรยา และนายธนวัฒน์ ผู้สัมฤทธิ์เลิศ สำหรับข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย และขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคนอื่นที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้สำหรับกำลังใจและคำปรึกษาด้านต่าง ๆ ตลอดการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนในการเข้าร่วมงานประชุมวิชาการ ECTI-CON 2020 และคอยให้คำแนะนำถึงข้อสงสัยต่าง ๆ ในการส่งเอกสารทุกครั้ง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษา ข้าพเจ้าหวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่ได้อ่านและผู้ที่นำไปศึกษาต่อไม่มากนักน้อยสิ่งที่สร้างประโยชน์จากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้เป็นชื่อเสียงและเกียรติยศของผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทั้งหมดโดยไม่มีข้อกังขาใด ๆ ทั้งสิ้น

วราเทพ ผดุงถิ่น

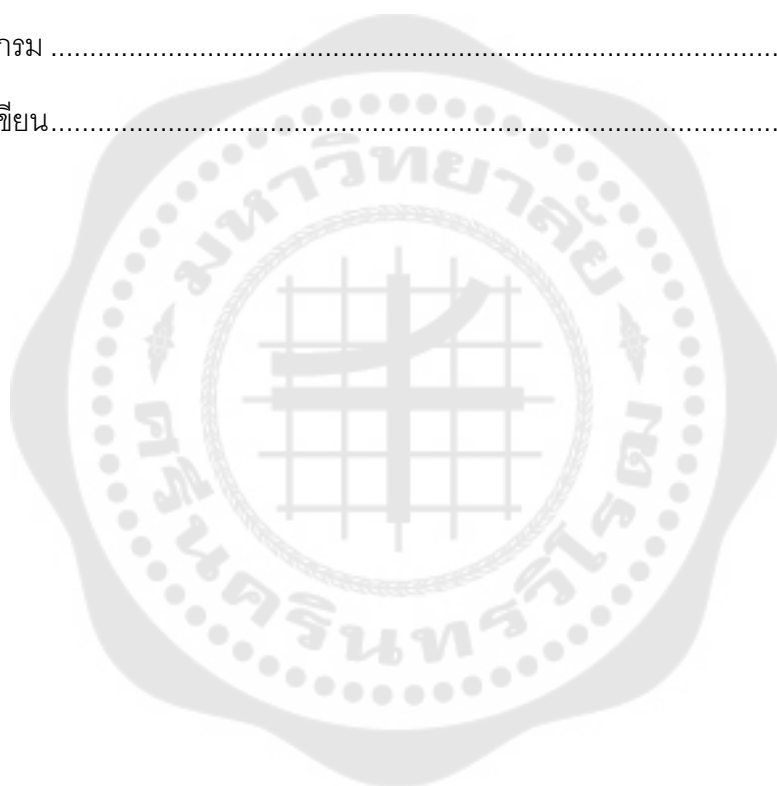
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	16
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	16
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	18
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	18
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	18
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.1 บทนำ.....	20
2.2 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	20
2.2.1 ย่านความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz.....	21
2.2.2 ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz.....	21
2.2.3 ย่านความถี่ 0 Hz ถึงประมาณ 2 kHz เป็นความถี่ต่ำ.....	21
2.3 ลักษณะการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์	21
2.4 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	23
2.4.1 สนามระยะไกล (far-field)	25
2.4.2 สนามระยะใกล้ (near-field)	25

2.8.6 การโพลาไรซ์หรือการแยกขั้วคลื่น (polarization).....	37
2.8.6.1 โพลาไรเซชันเชิงเส้น.....	37
2.8.6.2 โพลาไรเซชันวงกลม	38
2.8.6.3 โพลาไรเซชันวงรี	38
2.9 สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ.....	39
2.9.1 สายอากาศไดโพล (dipole antenna).....	39
2.9.2 ไดโพลอุดมคติ	40
2.10 การรีโซแนนซ์ในไดโพล.....	40
2.11 ส่วนประกอบสายอากาศชนิดไดโพล (elemental dipole antennas)	40
2.11.1 ไดโพลไฟฟ้า	41
2.11.2 ไดโพลแม่เหล็ก	42
2.12 การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล.....	44
2.13 สายอากาศอาเรย์ (antenna array).....	45
2.14 การรบกวนทางอากาศโหมดผลต่างในแผ่นวงจรพิมพ์ (DM radiated emission)	47
2.15 การรบกวนทางอากาศโหมดผลรวมในแผ่นวงจรพิมพ์ (CM radiated emission)	48
2.16 การเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง.....	50
2.17 โพรบกระแสและอิมพีแดนซ์ในการส่งผ่าน (current probe and transfer impedance) 50	
2.18 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC standards).....	53
2.18.1 มาตรฐาน FCC (FCC standards)	54
2.18.2 มาตรฐาน CISPR (CISPR standards).....	54
2.18.3 มาตรฐานทางการทหาร (military standards)	54
2.18.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.).....	55
2.19 การทดสอบการแพร่ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC testing)	55

2.19.1 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและโทรคมนาคม	55
2.19.2 การทดสอบในห้องปิดกั้นคลื่นสนามไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อน (semi-anechoic chamber)	55
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	57
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าทางอากาศ (fundamental of the radiated emission)	57
3.2 วิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศโดย Henry W. Ott	59
3.3 วิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศโดย Clayton R. Paul	60
3.4 วิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศโดย Shaowei Deng	62
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	66
4.1 แผนการทดลองวัดผลการคาดการณ์สัญญาณรบกวนทางอากาศในแต่ละรูปแบบ	66
4.2 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อวัดกระแสไหลรวม	68
4.3 รูปแบบการทดลองการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ	69
4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศในแต่ละกรณี	70
4.4.1 กรณีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของ Henry W. Ott	71
4.4.2 กรณีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของ Clayton R. Paul	72
4.4.3 กรณีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของ Shaowei Deng	73
4.4.4 กรณีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศโดยของทั้ง 3 วิธี	74
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	75
5.1 อภิปรายผลการทดลอง	75

5.1.1 ผลจากการทดลองด้วยวิธีการคาดการณ์ของ Henry W. Ott.....	75
5.1.2 ผลจากการทดลองด้วยวิธีการคาดการณ์ของ Clayton R. Paul.....	76
5.1.3 ผลจากการทดลองด้วยวิธีการคาดการณ์ของ Shaowei Deng.....	76
5.2 สรุปผลการทดลอง.....	77
5.3 ข้อเสนอแนะ	77
5.4 งานในอนาคต.....	78
บรรณานุกรม	79
ประวัติผู้เขียน.....	83



สารบัญตาราง

หน้า

No table of figures entries found.



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	21
ภาพประกอบ 2 การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดและอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบ ..	23
ภาพประกอบ 3 รูปแบบการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	24
ภาพประกอบ 4 อิมพีแดนซ์ของคลื่นในระยต่าง ๆ	24
ภาพประกอบ 5 หน้าที่ของสายอากาศ.....	27
ภาพประกอบ 6 สายส่งที่เป็นลวดตัวนำสองเส้น	28
ภาพประกอบ 7 เมื่อเริ่มการลวดตัวนำออก.....	28
ภาพประกอบ 8 เมื่อลวดตัวนำทั้งสองกางออกจนทำมุมเป็น 180°	28
ภาพประกอบ 9 การแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กรอบ ๆ แท่งสายอากาศ	29
ภาพประกอบ 10 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศ	30
ภาพประกอบ 11 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	30
ภาพประกอบ 12 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ	31
ภาพประกอบ 13 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบไอโซทรอปิก	32
ภาพประกอบ 14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบมีทิศทาง.....	33
ภาพประกอบ 15 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว.....	33
ภาพประกอบ 16 พูชนิตต่าง ๆ บนแบบรูปการแผ่พลังงานในสามมิติแบบเชิงขั้ว	35
ภาพประกอบ 17 พูคลีนของแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	35
ภาพประกอบ 18 การโพลาไรซ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า	38
ภาพประกอบ 19 ลักษณะของการโพลาไรซ์	39
ภาพประกอบ 20 สายอากาศไดโพล	39

ภาพประกอบ 21 ความยาวคลื่นของกระแสในไดโพลรูปแบบต่าง ๆ.....	40
ภาพประกอบ 22 ไดโพลไฟฟ้า	41
ภาพประกอบ 23 ไดโพลแม่เหล็ก	43
ภาพประกอบ 24 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล	45
ภาพประกอบ 25 การพิจารณาสนามที่เกิดขึ้น 2 ตำแหน่งในระยะสนามระยะไกล.....	47
ภาพประกอบ 26 การแพร่สัญญาณรบกวนทางอากาศเนื่องจากแผ่นวงจรพิมพ์ในโหมดผลต่าง 48	
ภาพประกอบ 27 การแพร่สัญญาณรบกวนทางอากาศเนื่องจากแผ่นวงจรพิมพ์ในโหมดผลรวม 49	
ภาพประกอบ 28 สาเหตุในการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง..	50
ภาพประกอบ 29 โพรบกระแสที่ใช้งานจริง	51
ภาพประกอบ 30 หลักการทำงานพื้นฐานของโพรบกระแส.....	51
ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงผลการวัดอิมพีแดนซ์ในการส่งผ่านจากผู้ผลิต	52
ภาพประกอบ 32 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละส่วนของการทดสอบ อุปกรณ์.....	53
ภาพประกอบ 33 ตัวอย่างสัญลักษณ์ของมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	54
ภาพประกอบ 34 ห้องปิดกั้นคลื่นสนามไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อน	56
ภาพประกอบ 35 การใช้โพรบกระแสเพื่อวัดค่ากระแสโหมดผลรวม	58
ภาพประกอบ 36 ผังงานแสดงขั้นตอนการคาดการณ์ค่าสนามไฟฟ้าของ Henry W. Ott (16)	60
ภาพประกอบ 37 ผังงานแสดงขั้นตอนการคาดการณ์ค่าสนามไฟฟ้าของ Clayton R. Paul (18) 62	
ภาพประกอบ 38 ผังงานแสดงขั้นตอนการคาดการณ์ค่าสนามไฟฟ้าของ Shaowei Deng (17) . 65	
ภาพประกอบ 39 แผนผังการทดลอง	67
ภาพประกอบ 40 แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อวัดกระแสโหมดผลรวมจากสาย เคเบิลที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง	68
ภาพประกอบ 41 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อวัดกระแสโหมดผลรวมจากสายเคเบิลที่ เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง.....	68

ภาพประกอบ 42 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องทดสอบ	69
ภาพประกอบ 43 การวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลัง สวิตช์ในห้องทดสอบจริง.....	70
ภาพประกอบ 44 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Henry W. Ott เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวนอน.....	71
ภาพประกอบ 45 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Henry W. Ott เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวตั้ง.....	71
ภาพประกอบ 46 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Clayton R. Paul เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวนอน.....	72
ภาพประกอบ 47 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Clayton R. Paul เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวตั้ง.....	72
ภาพประกอบ 48 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Shaowei Deng เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวนอน.....	73
ภาพประกอบ 49 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Shaowei Deng เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวตั้ง.....	73
ภาพประกอบ 50 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของทั้ง 3 วิธี เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวนอน.....	74
ภาพประกอบ 51 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของทั้ง 3 วิธี เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวตั้ง.....	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

อุตสาหกรรมในยุคปัจจุบันมีการนำระบบใหม่ ๆ ที่ทันสมัยเข้ามาใช้งานเพื่อเข้ามาช่วยอำนวยความสะดวกสบายไม่ว่าจะเป็น ด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ สื่อบันเทิง การสื่อสาร ระบบความปลอดภัย เป็นต้น เห็นได้ชัดว่าอุปกรณ์ในทุกวันนี้มีฟังก์ชันในการทำงานที่มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก เช่น เชื่อมต่อผ่านระบบไร้สาย อีกทั้งยังมีขนาดเล็กกระทัดรัดสามารถพกพาไปได้ทุกสถานที่ ซึ่งองค์ประกอบข้างในของอุปกรณ์ดังกล่าวทั้งหมดนี้อาจเกิดจากการรวมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลาย ๆ ชนิดเข้าด้วยกัน เช่น พาวเวอร์ซัพพลาย มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อน มอเตอร์ไฟฟ้า ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น การสวิตชิงของอุปกรณ์ในวงจรนำไปสู่พฤติกรรมที่เป็นการรบกวนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ (unintentional emission) ส่วนใหญ่มักเกิดจากการใช้งานแผ่นวงจรพิมพ์ (printed circuit board, PCB) ที่ความถี่สูง (high frequency) (1) ดังนั้นในการที่จะให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ องค์ประกอบในแผ่นวงจรพิมพ์ จะประกอบไปด้วยหลาย ๆ ระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการก่อให้เกิดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference, EMI) ออกมาทำให้เกิดผลกระทบกับอุปกรณ์ข้างเคียง (2, 3) การเกิดในลักษณะดังกล่าวนับว่าเป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหายใหม่ ๆ ในระบบไฟฟ้าไม่ว่าจะเกิดจากการที่อุปกรณ์มีองค์ประกอบภายในที่ก่อให้เกิดเป็นการรบกวนกันเองภายในระบบ (intra system) หรือการรบกวนดังกล่าวเกิดขึ้นตั้งแต่สองระบบขึ้นไป ซึ่งเป็นการรบกวนไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เชื่อมต่อถึงกัน เรียกว่าเป็นการรบกวนกันระหว่างระบบ (inter system) ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นเรื่องที่สำคัญและต้องถูกพิจารณาก่อนที่จะสามารถวางจำหน่ายสู่ท้องตลาดได้ ในหลาย ๆ ประเทศได้จัดตั้งมีองค์การเพื่อควบคุมเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic compatibility, EMC) เพื่อที่จะแสดงขีดความสามารถของอุปกรณ์แต่ละชิ้น โดยทำงานได้อย่างปกติภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ปกติแล้วการผลิตอุปกรณ์ขึ้นมาเพื่อจำหน่ายในหลาย ๆ ประเทศ จะต้องผ่านมาตรฐานเหล่านี้ (4) ถ้าหากประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลงเนื่องจากสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามักจะเป็นปัญหา ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงการออกแบบไม่ผ่านมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC standard) และเป็นปัญหาต่อผู้ออกแบบที่จะต้องมาแก้ไขจนกว่าจะผ่านมาตรฐาน (5) ส่งผลทำให้เกิดการเสียเวลาและงบประมาณต่าง ๆ ในช่วงของการออกแบบ

ถ้าหากผู้ออกแบบสามารถคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า จากอุปกรณ์ทดสอบได้ล่วงหน้าในช่วงระหว่างการออกแบบ จะช่วยให้ระบุได้ว่าอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบนั้นมีแนวโน้มที่จะผ่านการทดสอบตามมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไม่ ทั้งหมดนี้ก็เพื่อให้การออกแบบผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และช่วยลดข้อเสียข้างต้น

ปกติแล้วการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถใช้เครื่องมือสำเร็จรูปที่เป็นโปรแกรมจำลองสำหรับการใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ปัญหาสนามไฟฟ้าจากแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งมีพื้นฐานจากหลากหลายวิธี เช่น วิธีของโมเมนต์ (method of moments) (6) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) (7, 8) เป็นต้น เนื่องจากว่าในการใช้โปรแกรมหาดังกล่าวจะต้องทราบองค์ประกอบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ อย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเป็นระยะ ความกว้าง ความยาว ค่าของวัสดุ จากแผ่นวงจรพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งมีหลาย ๆ วิธีได้นำเสนอวิธีการหาค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (radiated emission) (9-11) วิธีดังกล่าวมีความแม่นยำสูงในการหาค่าสนามไฟฟ้า แต่ปัญหาคือมีความยุ่งยากในการใช้งานเพราะเนื่องจากต้องสร้างการจำลอง (modelling) ที่เป็นแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น 3 มิติ และต้องใช้ซอฟต์แวร์เฉพาะทางในการจำลอง (12-14) ซึ่งการทำงานที่แม่นยำกลับส่งผลในเรื่องระยะเวลาในการคำนวณ (computational time) และใช้ทรัพยากร (resource) เป็นจำนวนมาก

ในทางกลับกันมีการคำนวณที่สามารถคำนวณได้อย่างไม่ซับซ้อน (15) ซึ่งมีงานวิจัยที่ได้นำเสนอการคำนวณเพื่อหาค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจากการวัดกระแสโหมดผลรวม (common-mode current) ด้วยโพรบวัดกระแส (current probe) (16-18) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจที่จะศึกษาวิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจากการวัดกระแสโหมดผลรวม โดยนำวิธีการคาดการณ์ที่มีการนำเสนอมาแล้ว 3 วิธี มาประยุกต์เพื่อใช้ในการคำนวณหาสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศภายใต้เงื่อนไขเดียวกันทั้งหมดตามมาตรฐาน CISPR 22 class B ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการจำลองแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนโดยใช้แหล่งจ่ายกำลังสวิตช์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เกิดจากการทำงานจริงของอุปกรณ์มาพิจารณาในการคาดการณ์ จากนั้นได้ทำการตรวจสอบผลลัพธ์จากการคาดการณ์โดยการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่ได้จากการวัดอุปกรณ์จริงในห้องทดสอบ พร้อมทั้งสรุปผลและแนะนำวิธีการที่เหมาะสมที่สุดต่อการใช้อุปกรณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตช์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาสาเหตุการเกิดและการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง

1.2.2 เพื่อศึกษาขั้นตอนและวิธีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจากงานที่มีอยู่ในปัจจุบัน

1.2.3 เปรียบเทียบวิธีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของแต่ละวิธีเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในเรื่องของความแม่นยำที่ดีที่สุด

1.2.4 ประยุกต์ใช้งานจริงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อค้นหาวิธีที่เหมาะสมในการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง ในย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz

1.3.2 คาดการณ์ผลสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ จากการวัดกระแสโหมดผลรวมและโหมดผลต่างที่เกิดจากจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง

1.3.3 ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจากงานวิจัยก่อนหน้าอย่างน้อย 3 วิธี

1.3.4 ทำการเปรียบเทียบผลสัญญาณรบกวนทางอากาศกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) พร้อมทั้งวัดผลการทดสอบในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3.5 วิเคราะห์ผลลัพธ์จากวิธีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่มีความเหมาะสมที่สุด ในการคาดการณ์สัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เรียนรู้ถึงการเกิดและวิธีการวัดค่าของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ ที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง

1.4.2 เข้าใจกระบวนการและวิธีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.4.3 สามารถทำการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศได้เบื้องต้น โดยการประยุกต์ใช้จริงในงานอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1.4.4 แก้ปัญหาเรื่องการออกแบบที่เสียเวลาและสิ้นเปลืองงบประมาณโดยไม่จำเป็น ด้วย
วิธีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาที่ไปและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงความน่าสนใจในเรื่องของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากมีแนวโน้มของการใช้งานอุปกรณ์ที่พัฒนาไปไกล และฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายมากกว่าเดิม ซึ่งลักษณะกลไกการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกจำแนกออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดผลร่วม (common-mode, CM) และโหมดผลต่าง (differential-mode, DM) โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่อยู่ในช่วงย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz

2.1 บทนำ

โดยจากทฤษฎีจำแนกการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้เป็น 2 รูปแบบ คือ สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ (conducted EMI) และสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ (radiated EMI) สำหรับการศึกษการเกิดสัญญาณรบกวนทางสายตัวนำได้มีหลาย ๆ งานวิจัยที่ได้ศึกษา และสามารถแก้ปัญหาเพื่อให้ผ่านมาตรฐาน ไม่ว่าจะเป็นการแก้ไขการออกแบบตั้งแต่แรกเริ่ม หรือแก้ปัญหาโดยใช้วงจรกรองสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) ซึ่งสามารถช่วยลดทอนสัญญาณรบกวนที่เกิดทางสายตัวนำได้ (19) แต่ในทางกลับกันการแก้ปัญหการเกิดสัญญาณรบกวนทางอากาศยังคงเป็นปัญหาที่ต้องแก้ไขกันอยู่ เนื่องจากยุคสมัยนี้มีแนวโน้มในการใช้งานอุปกรณ์ทางไกลกันอย่างแพร่หลาย (telecommunication device) รวมทั้งมีการใช้งานเทคโนโลยีไร้สาย (wireless technology) ที่เพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นและให้ความสนใจในการเกิดปัญหาของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศเป็นหลัก

2.2 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ในความเป็นจริงแล้วอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลาย ๆ ชนิด จะถูกใช้งานในย่านความถี่ (frequency bands) ที่แตกต่างกัน ซึ่งความถี่แต่ละย่านจะต้องไม่กวนซึ่งกันและกัน โดยย่านความถี่ที่ใช้งานแต่ละแบบจะแสดงอยู่ในภาพประกอบที่ 1 และงานวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะย่านความถี่ที่เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic disturbance) หรือการรบกวนความถี่วิทยุ (radio frequency disturbance) จัดอยู่ในการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้งานความถี่สูงตั้งแต่ 150 kHz ถึง 1 GHz

2.2.1 ย่านความถี่ตั้งแต่ 150 kHz ถึง 30 MHz

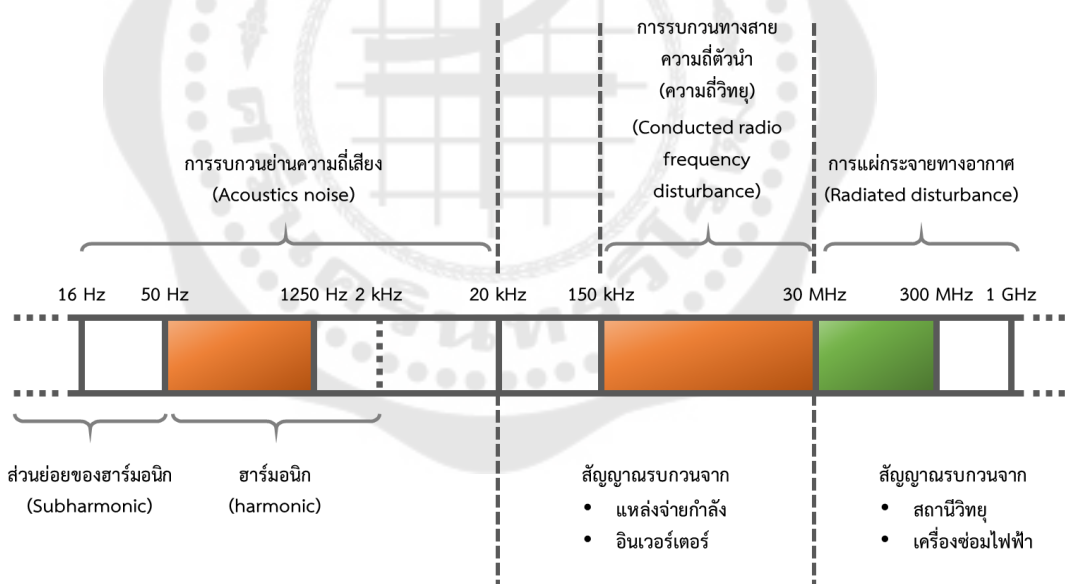
ย่านความถี่นี้เป็นการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางสายตัวนำ ซึ่งจะถูกวัดค่าสัญญาณรบกวนในรูปของแรงดัน (voltage) หรือกระแสไฟฟ้า (current)

2.2.2 ย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 1 GHz

ย่านความถี่นี้จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ ซึ่งจะทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนในรูปของความเข้มสนามไฟฟ้า (electric field intensity) หรือความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity) หรือคลื่นระนาบ (plane wave) ที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างระยะห่างต่อความยาวคลื่น (r/λ)

2.2.3 ย่านความถี่ 0 Hz ถึงประมาณ 2 kHz เป็นความถี่ต่ำ

ความถี่ในย่านนี้ส่งผลทำให้เกิดคลื่นสัญญาณของแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง มีลักษณะของคลื่นสัญญาณที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (non-sinusoidal wave form) เรียกว่า “ฮาร์โมนิกส์” (harmonics) และยังเพิ่มความสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย (20)

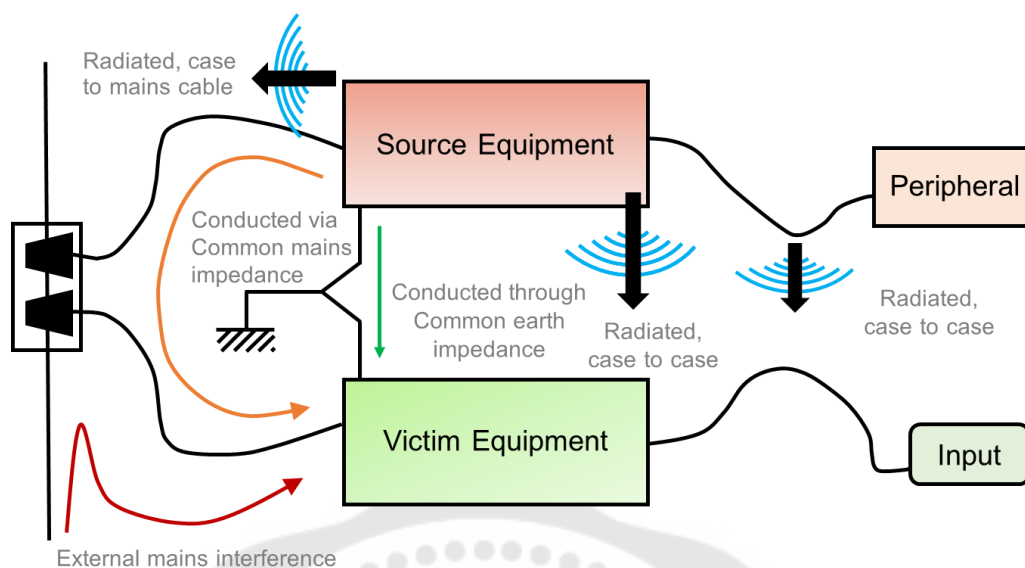


ภาพประกอบ 1 ย่านความถี่ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3 ลักษณะการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ เกิดขึ้นจากการทำงานอุปกรณ์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไป โดยมีอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (noise sources) ออกไป และอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนดังกล่าว (noise victims) ซึ่ง

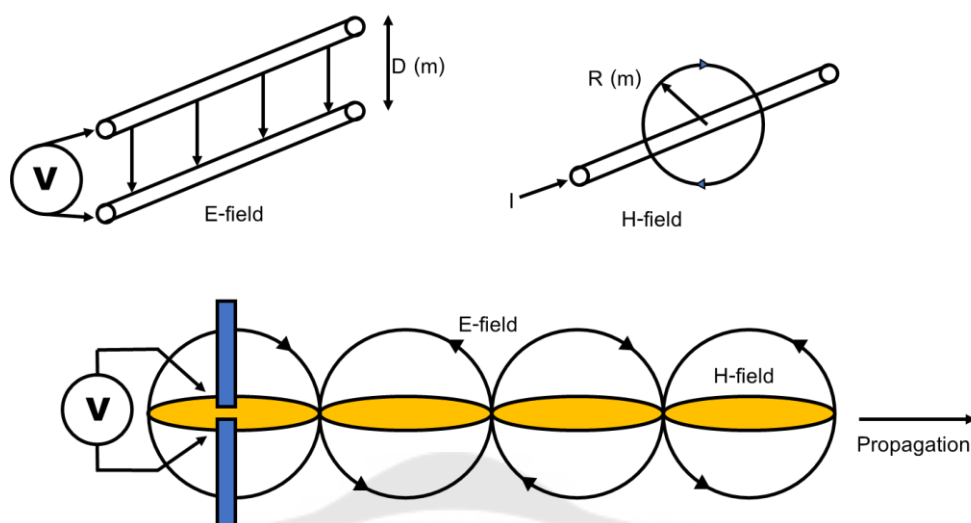
แหล่งกำเนิดสามารถก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศได้จากการทำงานของวงจรที่มีโครงสร้างหรือองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในวงจรที่ก่อให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำแฝง (parasitic inductance) และค่าความจุแฝง (parasitic capacitance) ซึ่งหากในวงจรมีค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้แรงดันและกระแสตามลำดับ มีค่าที่สูงจนเกิดเป็นสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ในกรณีที่แรงดันและกระแสแปรเปลี่ยนตามเวลา (time-varying) นอกจากนั้นการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวหากมีการใช้งานที่ย่านความถี่สูง ๆ ความสามารถในการนำไฟฟ้าของวงจรจะมีพฤติกรรมเป็นสายอากาศ ส่งผลทำให้อุปกรณ์ดังกล่าวเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศแพร่ออกไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบให้มีความทำงานที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิมได้ โดยทั่วไปแล้ววงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันสามารถก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทั้งทางสายตัวนำ และทางอากาศ จนในบางครั้งอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบก็อาจทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าไปรบกวนระบบอื่น ๆ ได้เช่นเดียวกัน หากดูจากภาพประกอบที่ 2 จะแสดงการเกิดการรบกวนระหว่างกันของสองระบบ จะเห็นได้ว่าเมื่อไหร่ที่อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดและอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบวางอยู่ด้วยกันโดยมีระยะห่างระหว่างกัน เช่น การส่งสัญญาณทางไกล (telecommunications) ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่มักจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่มีพฤติกรรมเป็นสายอากาศ (antenna) อย่างเช่น สายเคเบิล (cable) ลายทองแดง (trace) การเชื่อมต่อภายใน (internal wiring) และโครงสร้างกลไกทางกล (mechanical structures) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้สามารถส่งพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้า (electric field) สนามแม่เหล็ก (magnetic field) หรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic field) อย่างโดยไม่ได้ตั้งใจและทำให้เกิดการเชื่อมต่อ (coupling) ร่วมกับวงจรอื่น ๆ ซึ่งในสถานการณ์ดังกล่าวนี้ สามารถก่อให้เกิดการรบกวนได้ทั้งภายในระบบและภายนอกระบบ โดยการรบกวนดังกล่าวจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยมักจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่างไม่ว่าจะเป็น ความยาวสาย (lengths) ความใกล้ชิด (proximity) รวมถึงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ (dielectric constant) (21) ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องเข้าใจลักษณะกลไกการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อที่จะเข้าใจการแก้ปัญหาในวงจรต่าง ๆ และทำให้อุปกรณ์ในระบบสามารถใช้งานร่วมกันได้อย่างสมบูรณ์ตามหลักการของ EMC



ภาพประกอบ 2 การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดและอุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบ

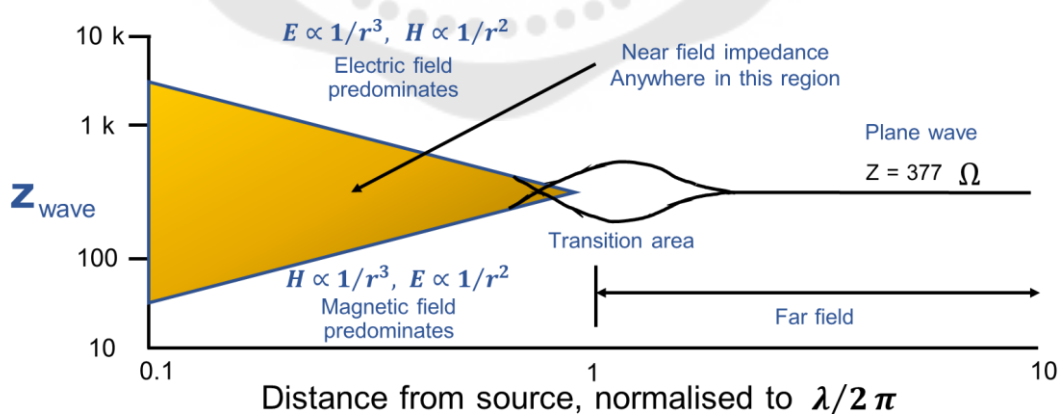
2.4 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ส่วนใหญ่แล้วการเกิดสนามไฟฟ้ามักเกิดจากตัวนำสองตัวที่มีความต่างศักย์ต่างกัน โดยที่มีแรงดันจ่ายไปยังตัวนำทั้งสอง โดยมีระยะห่างกันซึ่งกันและกันระหว่างตัวนำดังกล่าว และสนามไฟฟ้าจะมีเป็นหน่วย โวลต์ต่อเมตร (V/m) สำหรับสนามแม่เหล็ก จะเกิดจากตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำดังกล่าว สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นจากกระแสหารด้วยระยะทางของตัวนำซึ่งจะมีหน่วยเป็น แอมป์ต่อเมตร (A/m) เมื่อไหร่ที่มีแรงดันสร้างกระแสเกิดขึ้นผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดการรวมกันของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายไปตามตัวนำ ซึ่งจะถูกระบุว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังภาพประกอบที่ 3 ในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความเร็วที่วิ่งในตัวกลางในกรณีที่เป็นอวกาศว่าง (free space) ซึ่งความเร็วจะเท่ากับความเร็วของแสง (3×10^8 m/s) โดยค่าของสนามนี้จะขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กทริกและความซึมซาบได้ของวัสดุ โดยทั่วไปแล้วสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นจากคลื่นวิทยุ (radio) ไมโครเวฟ (microwave) เรดาร์ (radar) ไลดาร์ (lidar) เป็นต้น



ภาพประกอบ 3 รูปแบบการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการพิจารณาเรื่องอิมพีแดนซ์ของคลื่น (wave impedance) ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (E/H) ดังภาพประกอบที่ 4 ซึ่งอิมพีแดนซ์ของคลื่นคือ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการหาประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างตัวนำต่าง ๆ ที่ใช้ส่งผ่านสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือแม้กระทั่งตัวนำที่ใช้ในการป้องกันคลื่นสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ที่เข้ามารบกวนจากภายนอก ดังนั้นการพิจารณาการรบกวนทางอากาศจะจำแนกระยะของสนามออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้



ภาพประกอบ 4 อิมพีแดนซ์ของคลื่นในระยะต่าง ๆ

2.4.1 สนามระยะไกล (far-field)

ในบริเวณของสนามระยะไกลจะถูกกำหนดเงื่อนไขว่าระยะของแหล่งกำเนิดและจุดที่พิจารณาเป็นระยะ $d > \lambda / 2\pi$ ซึ่งคลื่นในบริเวณนี้จะถูกพิจารณาว่าเป็นคลื่นระนาบ ซึ่งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะอยู่ในระดับที่เท่ากัน ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของคลื่นในกรณีที่อยู่ในอวกาศว่างจึงเป็นค่าคงที่ ดังสมการที่ 2.1

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377 \Omega \quad (2.1)$$

เมื่อ	Z_0	คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่นในอวกาศว่าง (Ω)
	μ_0	คือ ค่าความซึมซาบในอวกาศว่าง $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)
	ϵ_0	คือ ค่าความต้านทานในอวกาศว่าง 8.85×10^{-12} (F/m)

2.4.2 สนามระยะใกล้ (near-field)

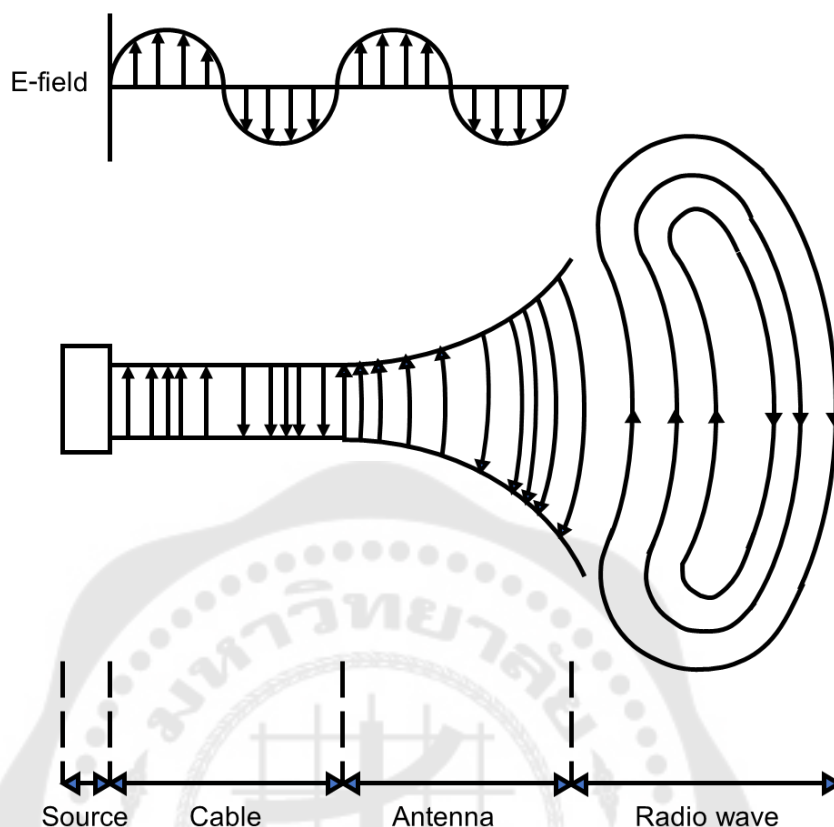
ในบริเวณของสนามระยะใกล้จะถูกกำหนดเงื่อนไขว่าระยะของแหล่งกำเนิดและจุดที่พิจารณาเป็นระยะ $d < \lambda / 2\pi$ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์จะถูกกำหนดจากลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิด โดยการแบ่งของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิด ตัวอย่างเช่น แท่งตัวนำที่มีค่ากระแสต่ำและแรงดันของตัวกระจายสัญญาณมีค่าสูง จะกำเนิดสนามไฟฟ้าที่ค่าอิมพีแดนซ์สูง ในทางกลับกันหากแท่งตัวนำมีค่ากระแสสูงและแรงดันที่ตัวกระจายสัญญาณต่ำ จะทำให้เกิดลูป (loop) ของสนามแม่เหล็กที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ซึ่งในบางกรณีอาจมีค่าของอิมพีแดนซ์ประมาณ 377Ω ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัตถุที่แตกต่างกันออกไป ทำให้บางกรณีสามารถเกิดคลื่นระนาบในบริเวณสนามระยะใกล้ได้

2.5 พื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศ (basic of antenna)

มาตรฐานจากสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์นานาชาติ (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) ได้ให้คำจำกัดความของสายอากาศเอาไว้ว่า “เป็นอุปกรณ์สำหรับการแพร่กระจายคลื่นหรือรับคลื่นวิทยุ” (22) หรือสรุปง่าย ๆ ว่า สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งพลังงานในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ซึ่งจะเริ่มจากแหล่งที่ต้องการส่งข้อมูลไปยังแหล่งที่รับข้อมูล โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการส่งผ่าน มักจะเรียกลักษณะการทำงานนี้ว่าการเชื่อมต่อแบบไร้สาย (wireless) ตามปกติแล้วสายอากาศเกิดขึ้น

จากตัวนำที่มีวัสดุทำจากโลหะ ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นลวดหรือท่อทรงกระบอกกลวง โดยตัวนำที่จะนำมาใช้เป็นสายอากาศถูกป้อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวนำดังกล่าว จากนั้นสายอากาศนั้นจะสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่วิทยุ ซึ่งคลื่นดังกล่าวนี้จะประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ที่เคลื่อนที่ในอากาศจากสายอากาศของเครื่องส่ง (transmitter) ไปยังสายอากาศของฝั่งเครื่องรับ (receiver) โดยคลื่นวิทยุที่มาถึงนั้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปยังเครื่องรับ ภาพประกอบที่ 5 จะแสดงให้เห็นถึงหน้าที่ของสายอากาศ

หากมองถึงความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศเป็นองค์ประกอบหลักในการทำงานของระบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถเกิดการส่งสัญญาณได้ทั้งแบบตั้งใจและไม่ได้ตั้งใจ สายอากาศที่เกิดขึ้นอย่างโดยตั้งใจ (intentional antenna) คือระบบที่เข้ามาช่วยอำนวยความสะดวกในการส่งสัญญาณทางไกล ซึ่งพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน เช่น การทำงานของคลื่นวิทยุระบบเอเอ็ม (amplitude modulation, AM) คลื่นวิทยุระบบเอฟเอ็ม (frequency modulation, FM) และเรดาร์ (radar) เป็นต้น ในทางกลับกันหากมองถึงผลเสียที่ตามมาสายอากาศดังกล่าวนี้ เป็นตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และก่อให้เกิดผลกระทบในการทำงานต่าง ๆ ที่เป็นปัญหามากมาย ในอีกด้านหนึ่งสายอากาศที่เกิดขึ้นอย่างโดยตั้งใจนั้นยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดการแพร่คลื่นผ่านอากาศของผลิตภัณฑ์จากห้องทดสอบ เพื่อวัดผลว่าผลิตภัณฑ์ดังกล่าวผ่านข้อกำหนดด้านการรบกวนต่าง ๆ เป็นไปตามมาตรฐานสากลก่อนถูกส่งออกขายในท้องตลาด สำหรับสายอากาศที่เกิดขึ้นอย่างโดยไม่ได้ตั้งใจ (unintentional antenna) จะเกิดขึ้นจากการแพร่การรบกวนทางอากาศ โดยเกิดขึ้นจากการทำงานปกติของอุปกรณ์ที่ส่งสัญญาณแพร่ออกมาอย่างไม่ได้ตั้งใจ ที่อาจเกิดจากองค์ประกอบภายในของอุปกรณ์ดังกล่าว ซึ่งการรบกวนดังกล่าวนี้สามารถรู้ผลได้จากการวัดผลโดยใช้เสาอากาศในห้องทดสอบ (18)

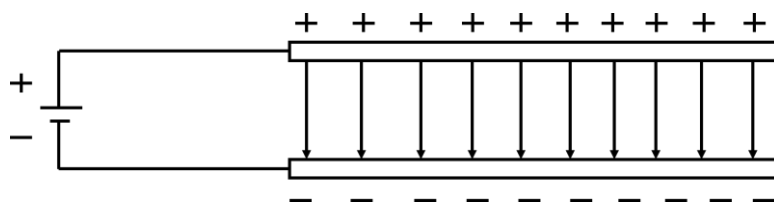


ภาพประกอบ 5 หน้าทีของสายอากาศ

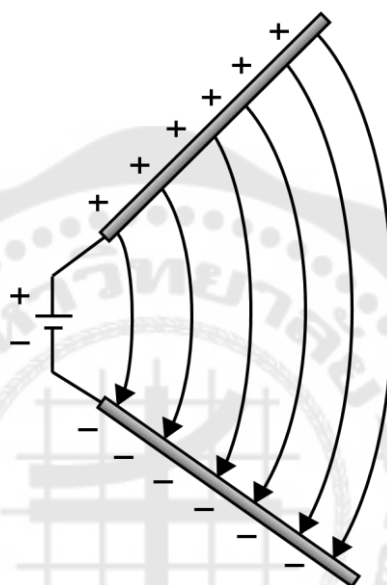
2.6 หลักการของสายอากาศ

โดยปกติแล้วในสายอากาศจะมีพลังงานที่เป็นคลื่นไฟฟ้า (electrical wave) เข้ามาซึ่งประกอบด้วย คลื่นแรงดัน (voltage wave) และคลื่นกระแส (current wave) ลักษณะการทำงานเหมือนกับสายส่ง (transmission line) หากพิจารณาความยาวที่จุดรีโซแนนซ์ (resonant) จะทำให้คลื่นแรงดันและคลื่นกระแสดังกล่าว เปลี่ยนมาอยู่ในรูปแบบของแม่เหล็กไฟฟ้าและกลายเป็นสนามที่แผ่ขยายออกไปในบริเวณว่างเปล่า โดยลักษณะการเกิดจะอยู่ในรูปของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

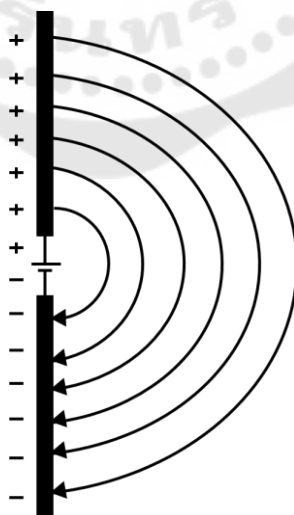
หากพิจารณาโดยการป้อนแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับสาย จะพบว่าที่ตัวนำด้านที่เชื่อมต่อกับไฟขั้วบวกจะมีประจุบวก และตัวนำที่ด้านที่เชื่อมต่อกับไฟขั้วลบจะมีประจุลบดังภาพประกอบที่ 6 ในลักษณะนี้จะมีเส้นแรงกระทำระหว่างประจุบวกและประจุลบเกิดขึ้น ซึ่งมีทิศทางจากฝั่งขั้วบวกไปยังฝั่งขั้วลบ เมื่อมีเส้นแรงหลาย ๆ เส้นจะถูกเรียกว่าสนามไฟฟ้า และจากนั้นเมื่อกางเส้นตัวนำทั้งสองออกจากกันทำมุมเป็น 180° ดังภาพประกอบที่ 7 จะพบว่าสนามไฟฟ้ายังคงอยู่เช่นเดิม ดังภาพประกอบที่ 8



ภาพประกอบ 6 สายส่งที่เป็นลวดตัวนำสองเส้น



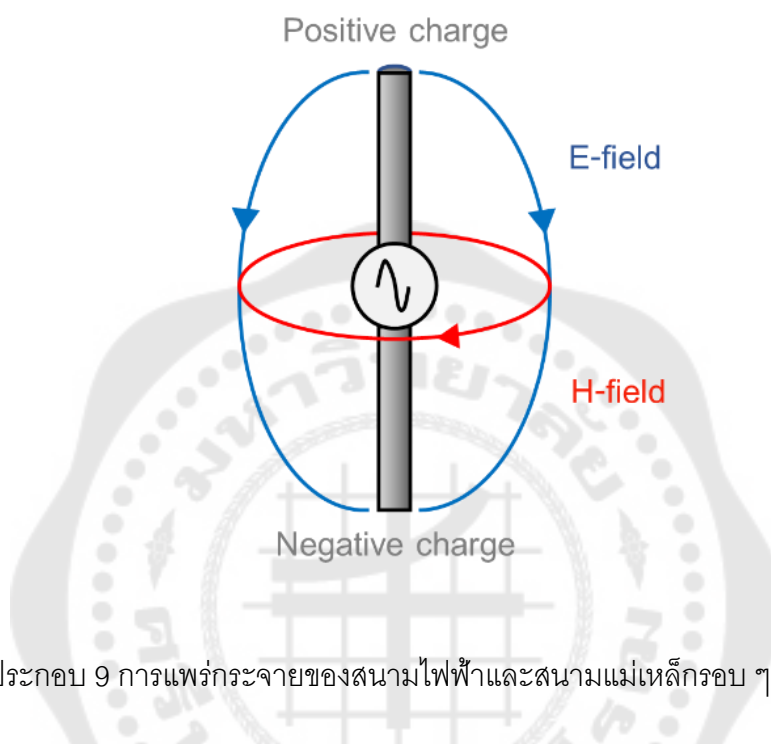
ภาพประกอบ 7 เมื่อเริ่มกางลวดตัวนำออก



ภาพประกอบ 8 เมื่อลวดตัวนำทั้งสองกางออกจนทำมุมเป็น 180°

2.7 การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายอากาศ

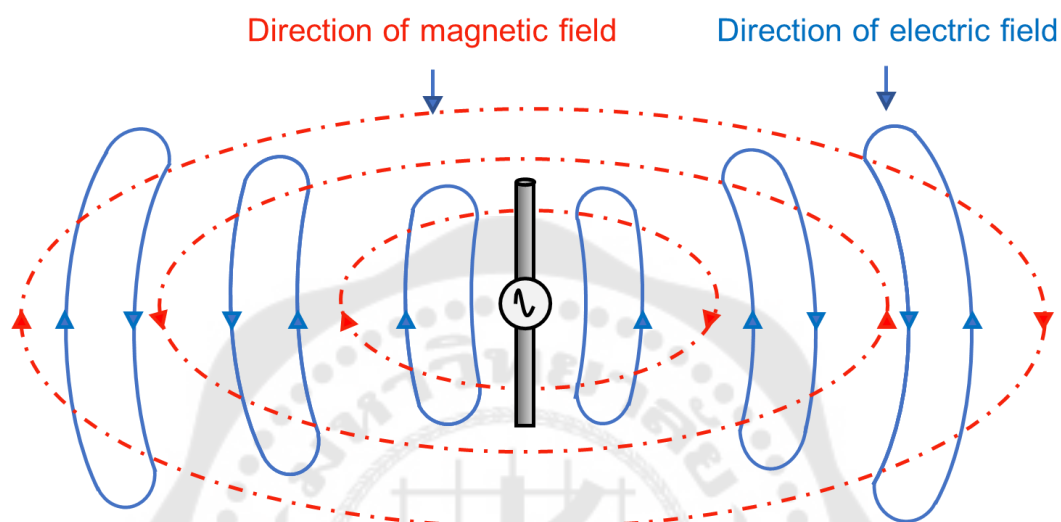
การแพร่กระจายนี้สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากการแพร่กระจายของพลังงานหรือสนามไฟฟ้าออกไปสู่อวกาศว่าง (free space) แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 9



ภาพประกอบ 9 การแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กรอบ ๆ แท่งสายอากาศ

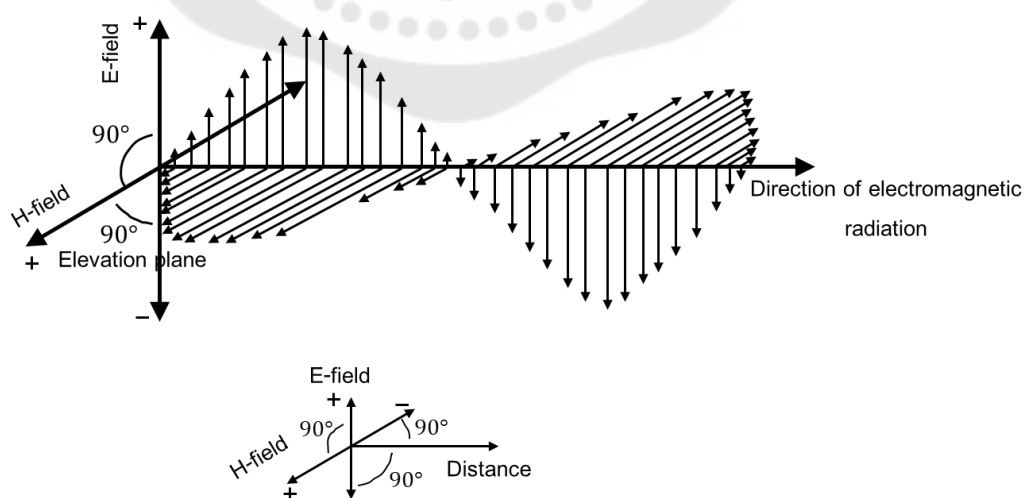
หากจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับแท่งสายอากาศ ดังภาพประกอบที่ 10 จะก่อให้เกิดการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเทียบกับเวลา หากพิจารณาในเวลาชั่วขณะ ณ คาบเวลาใด ๆ จะพบว่าปลายสายด้านบนสุดของสายอากาศที่มีประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งอยู่มากที่สุดในขณะเดียวกันปลายด้านล่างสุดของสายอากาศก็จะมีประจุไฟฟ้าชนิดตรงกันข้ามรวมอยู่มากที่สุดเช่นกัน ซึ่งใน 1 คาบเวลาหรือ 1 ลูกคลื่นสัญญาณจะเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ 2 ครั้ง ในการพิจารณาจะสมมติให้ปลายด้านบนสุดของสายอากาศ จะเห็นได้ว่าในเวลาชั่วขณะที่พิจารณานี้มีประจุบวกมากที่สุดและปลายด้านล่างของสายอากาศมีประจุลบมากที่สุด ดังภาพประกอบที่ 10 ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางพุ่งออกจากประจุบวกเข้าสู่ประจุลบ ขณะเดียวกันทิศทางของกระแสจะเคลื่อนที่จากประจุบวกไปยังประจุลบเป็นผลให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ แท่งสายอากาศ โดยมีทิศทางเป็นไปตามกฎมือขวาของสกรู (right hand screw rule) เมื่อพิจารณาว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นแบบกระแสสลับ และเวลาของปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้นเป็นช่วงเวลาใด ๆ เป็นสาเหตุให้การแพร่กระจายหรือการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าจะมีทิศทางสลับกันไปมา ซึ่งการกลับทิศทางจะเป็นไปตามความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้กับ

สายอากาศ จึงมีผลให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเกิดการเหนี่ยวนำ มีทิศทางสลับกันไปด้วย ดังนั้นการอธิบายที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังกล่าวนี้ จะใช้ในกรณีของสนามที่เกิดขึ้นรอบ ๆ สายอากาศเท่านั้น ดังภาพประกอบที่ 10



ภาพประกอบ 10 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศ

คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อวิเคราะห์จะเห็นว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะทำมุมตั้งฉากกันและทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ดังแสดงดังภาพประกอบที่ 11

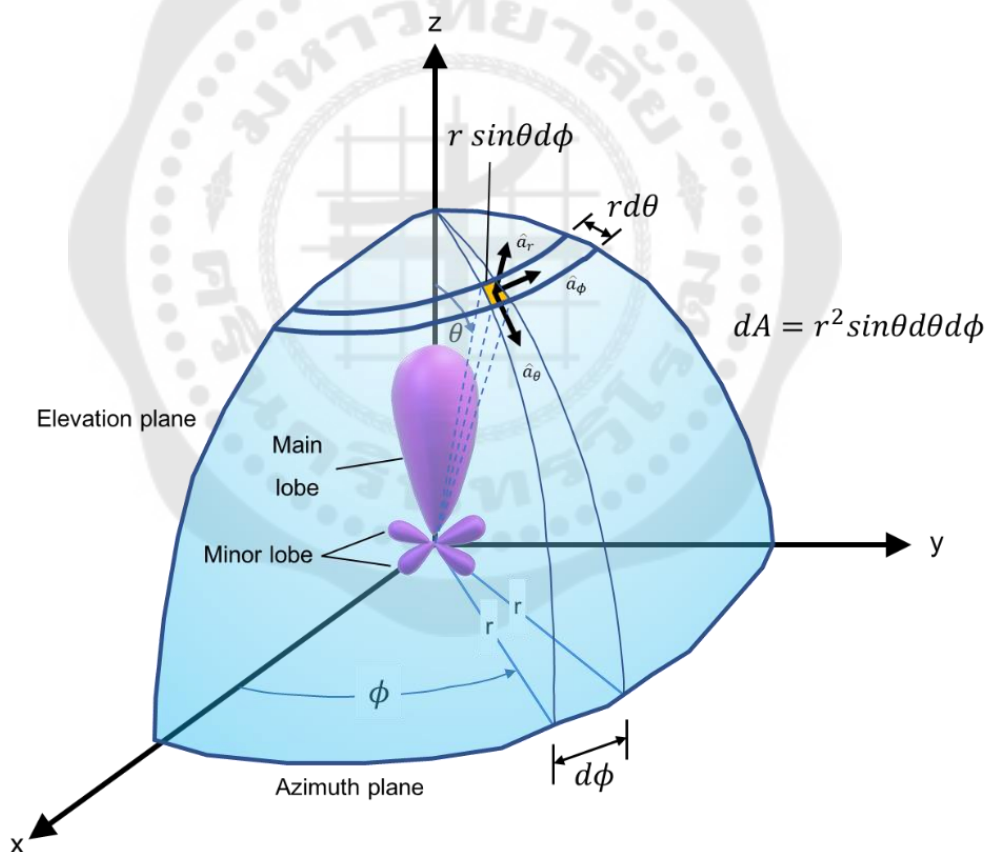


ภาพประกอบ 11 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.8 พารามิเตอร์พื้นฐานในการวิเคราะห์สายอากาศ

2.8.1 แบบรูปการแผ่พลังงาน

แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) หรือแบบรูปสายอากาศ (antenna pattern) ได้ถูกนิยามว่า “เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อนำเสนอ คุณสมบัติในการแผ่พลังงานของสายอากาศ โดยอยู่ในรูปฟังก์ชันพิกัดระยะห่าง (space coordinate) ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (far field region) เท่านั้น และจะถูกนำเสนอในรูปแบบของฟังก์ชันพิกัดทิศทาง (directional coordinate) เสมอ” (23) คุณสมบัติของการแผ่พลังงานสามารถที่จะแสดงในรูปของการกระจายพลังงานในแต่ละตำแหน่ง และแสดงทิศทางที่เป็นได้ทั้งแบบสองมิติและสามมิติ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 12



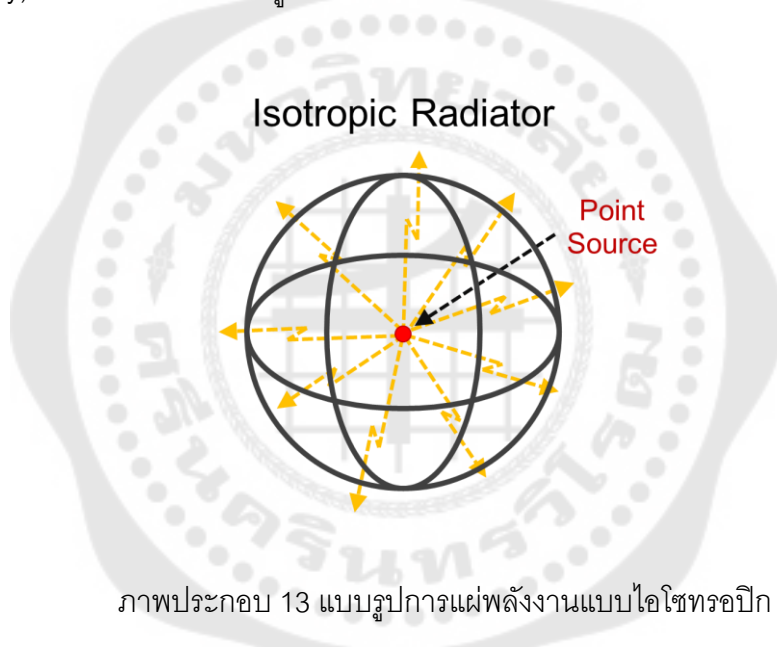
ภาพประกอบ 12 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

จากรูปจะเห็นได้ว่าหากกวาดเส้นของพลังงานที่รับได้ ณ ตำแหน่งรัศมีคงที่จะถูกเรียกว่า แบบสนาม (field pattern) และจะถูกเรียกว่า แบบรูปสนามเชิงขนาด (amplitude field

pattern) แต่ในทางปฏิบัตินั้นแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสามมิติ มักจะถูกวัดค่าและบันทึกผลอยู่ในรูปของแบบรูปสองมิติโดยการพล็อตรูปตามฟังก์ชันของมุม θ และ ϕ ให้สัมพันธ์และต่อเนื่องกัน (24)

2.8.1.1 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบไอโซทรอปิก (isotropic pattern)

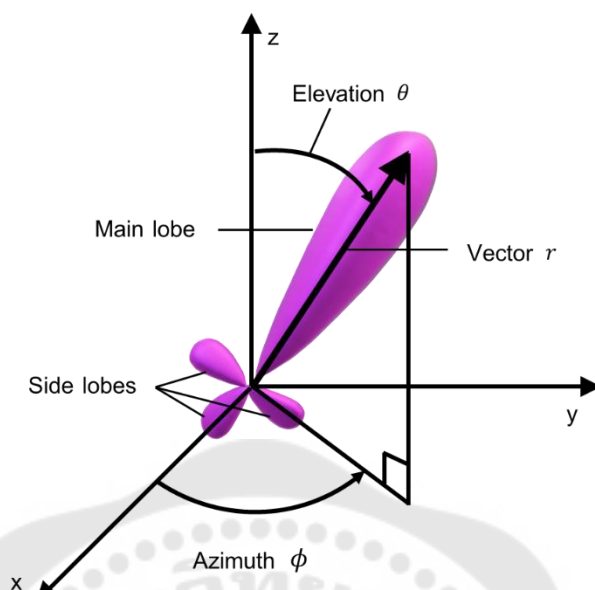
ตัวแผ่กำลังแบบไอโซทรอปิก (isotropic radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นมาว่าไม่มีการสูญเสียภายในตัวเองและมีการแผ่พลังงานออกมาเท่ากันทุกทิศทาง ดังภาพประกอบที่ 13 ถึงแม้ว่าตัวแผ่พลังงานในลักษณะนี้จะไม่จริงในทางปฏิบัติ แต่ก็มีประโยชน์ในการนำมาศึกษาเพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการอ้างอิงเพื่อหาคุณสมบัติของสภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) ของสายอากาศที่มีอยู่จริง



ภาพประกอบ 13 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบไอโซทรอปิก

2.8.1.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบมีทิศทาง (directional pattern)

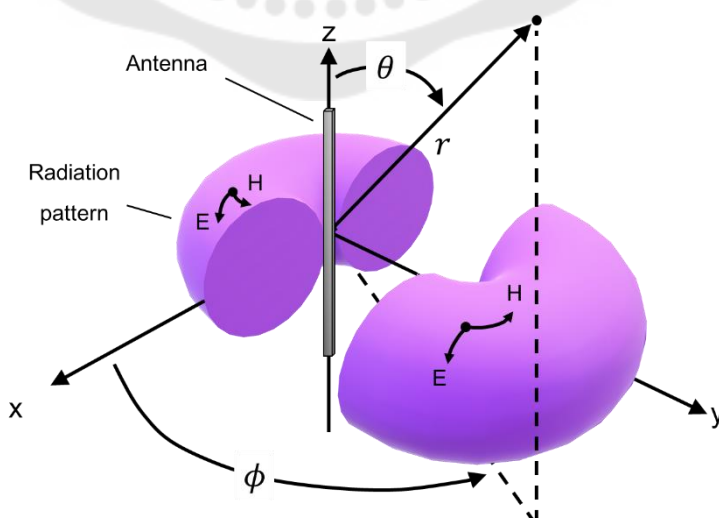
สำหรับสายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) คือ สายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่พลังงานหรือรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ ดังภาพประกอบที่ 14 ซึ่งเหมาะกับการใช้งานสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (maximum directivity) มากกว่าการใช้งานสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่น (half-wave dipole)



ภาพประกอบ 14 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบมีทิศทาง

2.8.1.3 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (omnidirectional pattern)

แบบรูปการเกิดในลักษณะนี้ คือ สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ ซึ่งในที่นี้คือมุมกวาด (azimuth) และระนาบที่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบมีทิศทางในกรณีนี้คือมุมเงย ดังภาพประกอบที่ 15



ภาพประกอบ 15 แบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว

ในทางปฏิบัติแล้วแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานในระนาบด้านใดด้านหนึ่ง สามารถวัดได้ โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้น ในขณะที่ระดับของพลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายพลังงานที่ถูกต้องควรจัดสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสายอากาศที่ต้องการวัดให้ปราศจากวัตถุใด ๆ ที่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

2.8.2 พูคลิ้นของแบบรูปการแผ่พลังงาน

พูคลิ้นของแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern lobes) คือ สัดส่วนของแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็นบริเวณในแต่ละฝั่ง (25) โดยพูของแบบรูปนี้จะแบ่งย่อยออกเป็น ดังนี้

2.8.2.1 พูคลิ้นหลัก (main lobe)

เป็นพูที่อยู่ในทิศทางที่มีการแผ่พลังงานแรงที่สุดตามภาพประกอบที่ 16 มีพูคลิ้นหลักอยู่ในทิศทางที่ $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีพูคลิ้นหลักมากกว่าหนึ่งพู เช่น สายอากาศแยก빔 (split beam antenna) เป็นต้น

2.8.2.2 พูคลิ้นเล็ก (minor lobe)

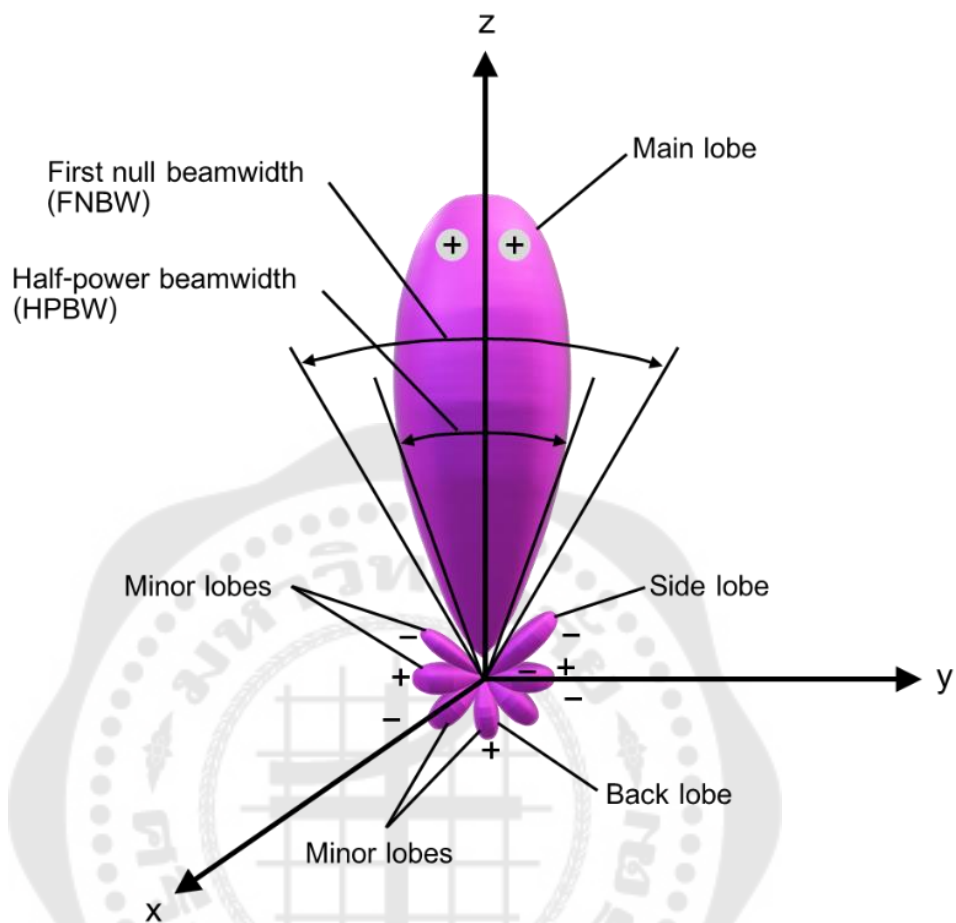
เป็นพูอื่น ๆ ทำหน้าที่นอกเหนือจากพูคลิ้นหลัก

2.8.2.3 พูข้าง (side lobe)

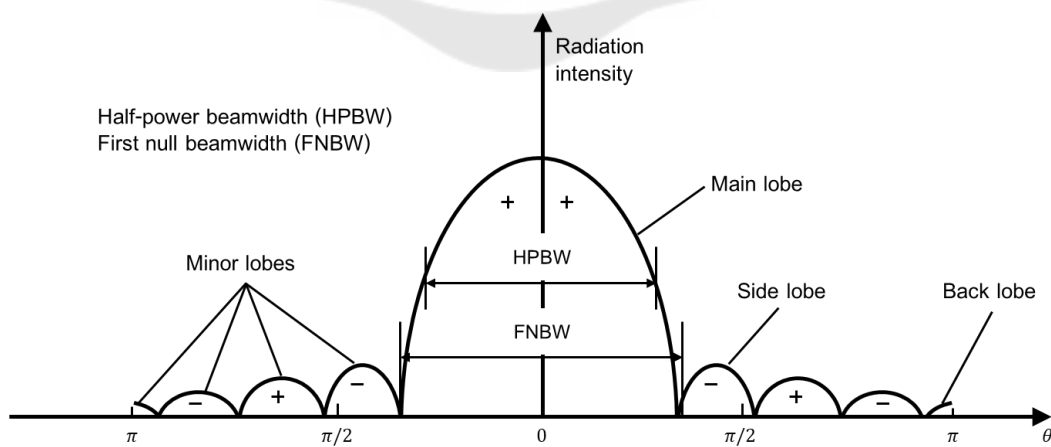
เป็นพูคลิ้นเล็กที่อยู่ติดกับพูคลิ้นหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับพูคลิ้นหลัก

2.8.2.4 พูหลัง (back lobe)

เป็นพูคลิ้นเล็กที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับคลิ้นหลัก ปกติแล้วพูคลิ้นเล็กมักจะเกิดการแผ่พลังงานของคลิ้นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีต้องกำจัดพูเหล่านี้ให้มีน้อยที่สุด โดยระดับของพูคลิ้นเล็กมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในพูที่กำลังคิด ต่อความหนาแน่นของพลังงานพูคลิ้นหลักซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของพูข้าง (side lobe ratio) หรือระดับของพูข้าง (side lobe level, SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไป มักจะต้องการให้ระดับของพูข้างมีค่าน้อยกว่า -20 dB



ภาพประกอบ 16 พูชนิตต่างๆ บนแบบรูปการแผ่พลังงานในสามมิติแบบเชิงขั้ว



ภาพประกอบ 17 พูคลื่นของแบบรูปการแผ่พลังงาน

2.8.3 ความกว้างลำคลื่น

ความกว้างลำคลื่น (beamwidth) ของสายอากาศ เป็นสิ่งที่สำคัญมาก ๆ ในการบ่งบอกถึงลักษณะการทำงานของสายอากาศ นอกจากนั้นความกว้างลำคลื่นยังเป็นที่ใช้ในการแยกความแตกต่างระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันได้ ซึ่งจะมีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ระบบของเรดาร์ (radar system) ความกว้างลำคลื่นนั้นจะมีการพิจารณาโดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

2.8.3.1 ความกว้างลำคลื่นศูนย์แรก

ความกว้างลำคลื่นศูนย์แรก (first null beamwidth, FNBW) ของสายอากาศ คือ รัศมีหนึ่ง ๆ ของแบบรูปที่ประกอบไปด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุด และมีมุมอยู่ระหว่างสองทิศทาง ซึ่งความเข้มของการแผ่พลังงานจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ณ ตำแหน่งแรกเมื่อเทียบกับค่าสูงสุด

2.8.3.2 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half-power beamwidth, HPBW) ของสายอากาศ คือ สิ่งที่สามารถอธิบายได้ว่าในรัศมีหนึ่ง ๆ ที่ประกอบด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุดและมีมุมซึ่งอยู่ระหว่างสองทิศทาง ซึ่งจะมีความเข้มของการแผ่พลังงานที่มีค่าลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุดของมัน และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง มักจะใช้อธิบายถึงความกว้างของลำคลื่นที่มีค่า 3 dB เสมอ

2.8.4 ความกว้างแถบ

ความกว้างแถบของสายอากาศ (bandwidth) ได้ถูกนิยามว่า ย่านความถี่ในสภาวะที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้ ซึ่งสภาวะดังกล่าวนี้นี้จะถูกพิจารณาจากคุณสมบัติของสายอากาศ จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด โดยความกว้างแถบของสายอากาศนี้จะถูกพิจารณาในย่านความถี่ที่ต่ำกว่าและสูงกว่าย่านความถี่กลาง (center frequency) ซึ่งสายอากาศนี้จะต้องทำงานได้ตามปกติ สำหรับความกว้างแถบของสายอากาศจะถูกจำแนกออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

2.8.4.1 สายอากาศแถบกว้าง (broadband antennas)

ความกว้างแถบในรูปแบบนี้จะถูกแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดที่สายอากาศสามารถทำงานได้

2.8.4.2 สายอากาศแถบแคบ (narrowband antennas)

สำหรับความกว้างแถบในรูปแบบนี้มักจะแสดงอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ของผลต่างความถี่ โดยเทียบกับความถี่กลางของความกว้างแถบ

2.8.5 อัตราขยาย

อัตราขยาย (gain) คือ ความสามารถในการรับ-ส่งคลื่นของสายอากาศ ซึ่งมีหน่วยเป็นเดซิเบล (decibels, dB) โดยจะเป็นอัตราส่วนของค่าความเข้มของการแผ่พลังงาน U ในทิศทางที่กำหนดให้กับค่าความเข้มการแผ่พลังงานที่สายอากาศนั้นได้รับ ในทางปฏิบัติแล้วสายอากาศจะมีอัตราขยายมากเพียงพอตามที่ต้องการหรือไม่ จะมีปัจจัยหลาย ๆ ประการเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นผลให้การส่งพลังงานจากเครื่องส่งไปยังสายอากาศมีค่าลดลงได้ โดยค่าอัตราขยายของสายอากาศ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณี (26) คือ

2.8.5.1 อัตราขยายสัมบูรณ์

อัตราขยายสัมบูรณ์ (absolute gain) หมายถึง อัตราส่วนความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มการแผ่พลังงานที่ได้รับเข้ามา

2.8.5.2 อัตราขยายสัมพัทธ์

อัตราขยายสัมพัทธ์ (relative gain) หมายถึง อัตราส่วนของกำลังขยายพลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายพลังงานของอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยพลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว

2.8.6 การโพลาไรซ์หรือการแยกขั้วคลื่น (polarization)

ในการทำงานของสถานีโทรทัศน์ที่มีการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นวิทยุออกจากสายอากาศ โดยที่ให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด จะต้องมีการทำให้โพลาไรซ์ของสายอากาศฝั่งเครื่องรับอยู่ในทิศทางเดียวกันกับโพลาไรซ์ของคลื่นที่ออกมาจากสถานีส่ง (27) ดังนั้นการโพลาไรซ์ คือ การอธิบายคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีขนาดสัมพัทธ์ และทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาตลอดทิศทางของการแผ่พลังงานออกไป การแบ่งชนิดโพลาไรเซชันสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ โพลาไรเซชันเชิงเส้น (linear polarization) โพลาไรเซชันวงกลม (circular polarization) และโพลาไรเซชันวงรี (elliptical polarization) ดังภาพประกอบที่ 18 โดยแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับลักษณะการหมุนของยอดเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ถ้าหากเวกเตอร์ของสนามดังกล่าวที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใด ๆ ในอวกาศ มีการชี้เป็นเส้นตรงเสมอจะเรียกว่าโพลาไรเซชันเชิงเส้น

2.8.6.1 โพลาไรเซชันเชิงเส้น

การส่งคลื่นสัญญาณเป็นแบบเชิงเส้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ การโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง (vertical polarization) และการโพลาไรซ์แบบแนวนอน (horizontal polarization) เพื่อให้การส่งสัญญาณที่มีความถี่เหมือนกันสามารถทำการส่งสัญญาณได้พร้อม

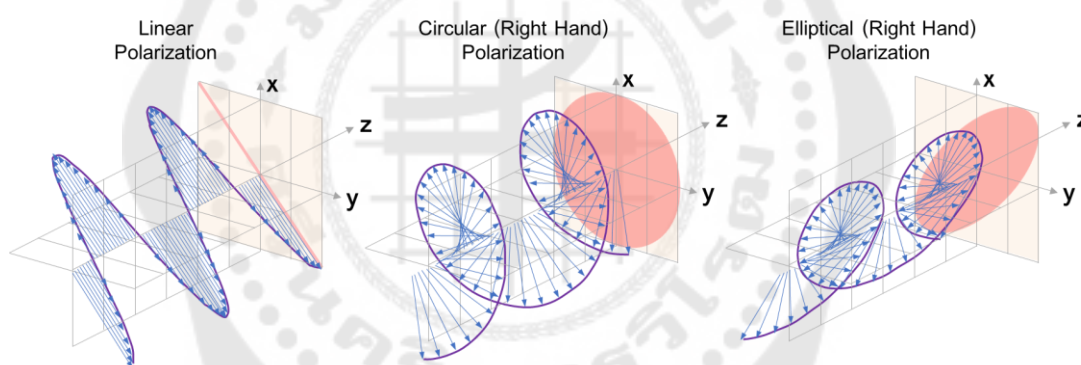
กัน 2 แนว หากต้องการส่งและรับสัญญาณได้ดีที่สุดโดยที่ไม่เกิดการรบกวนระหว่างกัน จะต้องทำการหมุนขั้วคลื่นให้รับสัญญาณได้ตรงตามแนวการส่ง

2.8.6.2 โพลาริเซชันวงกลม

หากต้องการรับสัญญาณของคลื่นที่ถูกส่งจากการโพลาริเซชันแบบวงกลมให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจะต้องใช้โครงสร้างของโพรบ (probe) เป็นแบบวงกลมและมีลักษณะของรูปคลื่นหมุนเป็นเกลียวด้วยเช่นกัน โดยถูกแบ่งการหมุนของรูปคลื่นออกเป็น 2 รูปแบบคือ แบบที่มีคลื่นหมุนทางขวา (right hand circular polarization) และแบบที่มีคลื่นหมุนทางซ้าย (left hand circular polarization) (28)

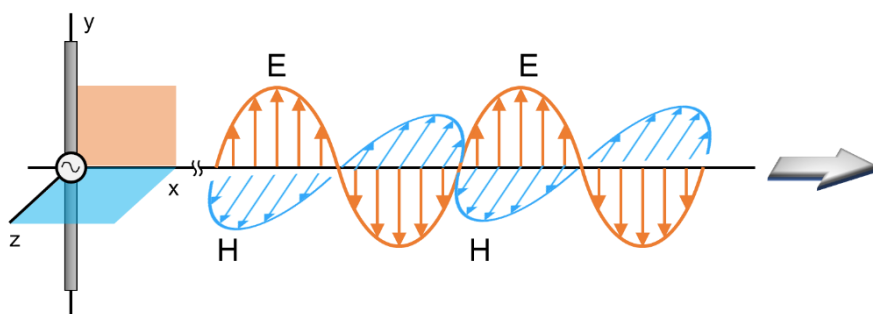
2.8.6.3 โพลาริเซชันวงรี

การเกิดในลักษณะนี้จะเกิดจากขนาดของคลื่นสนามไฟฟ้าในแนวแกนนอนทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน ดังภาพประกอบที่ 18



ภาพประกอบ 18 การโพลาริเซชันของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า

การโพลาริเซชันจะถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ โดยแบบแรกคือ การโพลาริเซชันตาม (co-polarization) จะแสดงถึงการโพลาริเซชันของสายอากาศที่ตรงกับการโพลาริเซชันในการรับ-ส่ง และแบบที่สองคือ การโพลาริเซชันไขว้ (cross-polarization) โดยรูปแบบนี้จะแสดงถึงการโพลาริเซชันที่ตั้งฉากกับการโพลาริเซชันตาม จากภาพประกอบที่ 19 จะแสดงให้เห็นถึงการเดินทางของคลื่นสนามไฟฟ้าและคลื่นสนามแม่เหล็ก

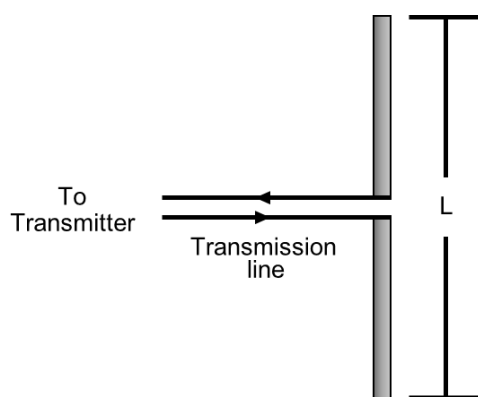


ภาพประกอบ 19 ลักษณะของการโพลาไรซ์

2.9 สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ

2.9.1 สายอากาศไดโพล (dipole antenna)

สายอากาศไดโพลหรือเรียกกันอีกอย่างว่า สายอากาศแบบเฮิร์ตซ์ (dipole or hertz antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศอย่างง่ายที่มีองค์ประกอบเป็นแท่งโลหะสองแท่งวางเป็นแนวเส้นตรงที่มีความยาว L ดังภาพประกอบที่ 20 โดยจุดกึ่งกลางของสายอากาศไดโพลจะต่อเข้ากับเครื่องส่งโดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อ หลักการทำงานรูปนี้คือ เครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ และกระแสของสัญญาณนี้จะไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพล ดังภาพประกอบที่ 20 ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามจากกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล ดังนั้นการกระจายของกระแส (current distribution) จะแสดงให้เห็นถึงขนาด (magnitude) ของสัญญาณกระแสสลับที่เกิดขึ้นตามความยาวของสายอากาศไดโพลซึ่งจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยจะเป็นศูนย์ที่ปลายทั้งสอง แต่จะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่น ๆ บนตัวไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพล (L) และความถี่ (f) ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง



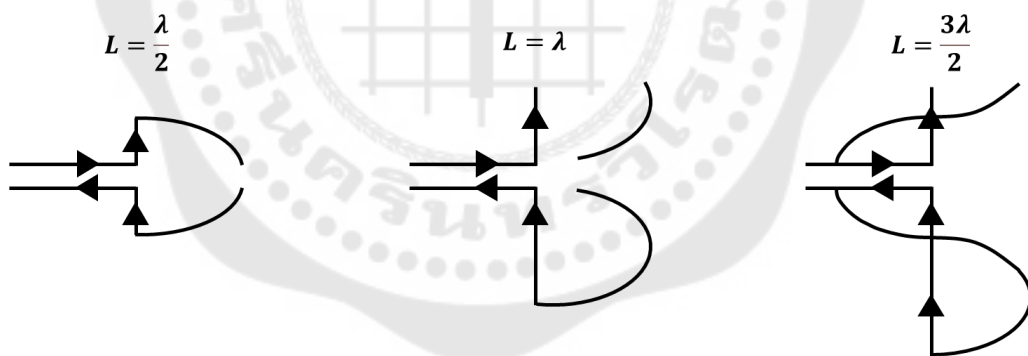
ภาพประกอบ 20 สายอากาศไดโพล

2.9.2 ไดโพลอุดมคติ

ไดโพลอุดมคติ (ideal dipole) จะถูกเปรียบเสมือนว่าเป็นสายอากาศสมมติ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการศึกษาของสายอากาศชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะถูกพิจารณาให้เป็นองค์ประกอบเล็ก ๆ ของความยาวไดโพล (infinitesimal dipole) ที่มีการกระจายของกระแสโดยมีลักษณะที่เท่ากันตลอด ดังนั้นคุณลักษณะทางทฤษฎีของไดโพลอุดมคติ จะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็ก ๆ

2.10 การรีโซแนนซ์ในไดโพล

การรีโซแนนซ์ในไดโพล (resonant dipole) ที่กระจายตามความยาวของกระแสในไดโพล จะไม่มีรูปแบบที่ตายตัว แต่พบว่าจะมีค่าเป็น 0 ที่ปลายสายและบางที่อาจจะมีค่าสูงที่จุดกึ่งกลางหรือจุดอื่น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากตัวส่ง ดังภาพประกอบที่ 21 ได้แสดงกระจายตามความยาวกระแสในไดโพลที่มีความยาว $\lambda/2$ λ และ $3\lambda/2$ โดยมีทิศทางของกระแสที่แสดงตามทิศทางของลูกศร ซึ่งขนาดและหัวของกระแสจะมีความแตกต่างกันตามแบบไดโพล โดยจะมีลักษณะเป็นเส้นแบบคลื่นไซน์ (sine wave)



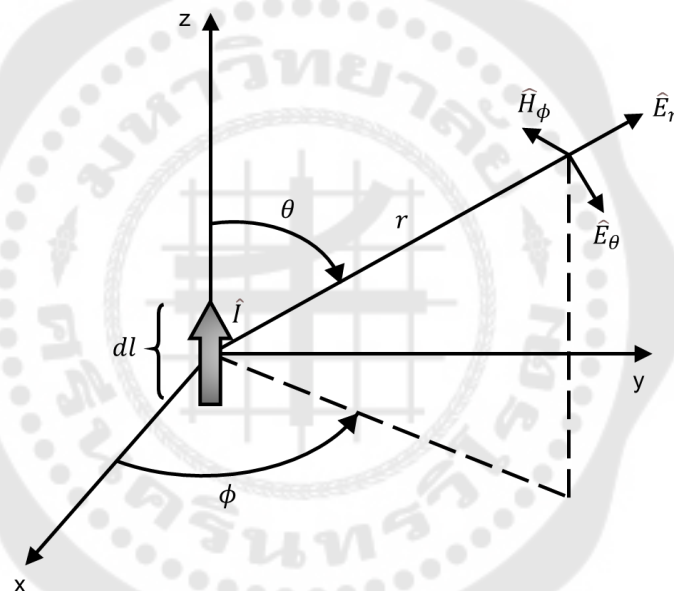
ภาพประกอบ 21 ความยาวคลื่นของกระแสในไดโพลรูปแบบต่าง ๆ

2.11 ส่วนประกอบสายอากาศชนิดไดโพล (elemental dipole antennas)

หากทราบถึงการกระจายของกระแสบนพื้นผิวของสายอากาศ ก็จะสามารถหาค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่ออกมาทางอากาศได้โดยการหาอินทิกรัล (integral) ของการกระจายของกระแส แม้ว่าจะหาผลลัพธ์ตามทฤษฎีได้แต่ในทางปฏิบัติจริงยังมีความยุ่งยากเกิดขึ้น

2.11.1 ไดโพลไฟฟ้า

ไดโพลไฟฟ้า (electric or hertzian dipole) เกิดจากองค์ประกอบกระแสขนาดเล็ก ๆ ที่มีความยาว dl ซึ่งจะมีกระแสเฟสเซอร์ (phasor current, $\hat{I}$) ที่มีขนาดและเฟส เหมือนกันไปตลอดทุก ๆ จุดตามความยาวไดโพล ดังภาพประกอบที่ 22 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของแต่ละจุดในระบบพิกัดจะประกอบไปด้วยระยะรัศมี (radial distance, r) จากจุดกำเนิดไปยังจุดที่สนใจ ตำแหน่งเชิงมุมของเส้นในแนวแกน z ซึ่งทำมุม θ ไปยังระนาบ xy และการทำมุม ϕ ในระนาบ xy กับเส้นแกน x ซึ่งจะมีทิศทางตามเวกเตอร์ 1 หน่วย $\hat{a}_r$ $\hat{a}_\theta$ $\hat{a}_\phi$ จากนั้นจะได้องค์ประกอบเวกเตอร์ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 2.2



ภาพประกอบ 22 ไดโพลไฟฟ้า

$$\hat{H}_r = 0 \quad (2.2ก)$$

$$\hat{H}_\theta = 0 \quad (2.2ข)$$

$$\hat{H}_\phi = \frac{\hat{I}dl}{4\pi} \beta_0^2 \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} \right) e^{-j\beta_0 r} \quad (2.2ค)$$

ในทำนองเดียวกัน องค์ประกอบเวกเตอร์ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีรูปแบบดังสมการที่ 2.3

$$\hat{E}_r = 2 \frac{\hat{I} dl}{4\pi} \eta_0 \beta_0^2 \cos \theta \left(\frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) e^{-j\beta_0 r} \quad (2.3ก)$$

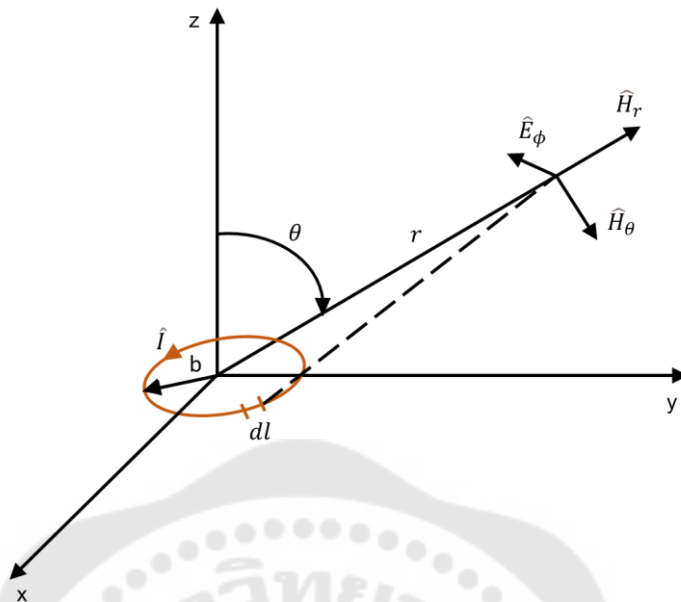
$$\hat{E}_\theta = \frac{\hat{I} dl}{4\pi} \eta_0 \beta_0^2 \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) e^{-j\beta_0 r} \quad (2.3ข)$$

$$\hat{E}_\phi = 0 \quad (2.3ค)$$

เมื่อ	$\hat{E}$	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
	$\hat{H}$	คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m)
	dl	คือ ความยาวขององค์ประกอบกระแสขนาดเล็ก ๆ (m)
	$\hat{I}$	คือ กระแสเฟสเซอร์ (A)
	η_0	คือ อิมพีแดนซ์อินทรีนสิกของตัวกลางในอากาศว่าง $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$
	β_0	คือ ค่าคงตัวเฟส $\beta_0 = 2\pi / \lambda_0$
	θ	คือ มุมระหว่างแนวตั้งฉากของแหล่งกำเนิดกับตำแหน่งที่วัด
	r	คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับตำแหน่งที่วัด (m)

2.11.2 ไดโพลแม่เหล็ก

ไดโพลแม่เหล็ก (magnetic dipole) มักจะเป็นสิ่งที่คู่กับไดโพลไฟฟ้าหรือเรียกว่าลูปกระแส (current loop) ดังภาพประกอบที่ 23 รูปขนาดเล็กที่เกิดขึ้นนั้นจะมีรัศมียาว b อยู่บนระนาบ xy ซึ่งลูปดังกล่าวจะมีกระแสเฟสเซอร์ $\hat{I}$ และถูกมองว่าลูปดังกล่าวมีเส้นรอบวงขนาดเล็กมาก ๆ ทางไฟฟ้า ($2\pi b < \lambda / 10$) โดยลูปนี้จะประกอบไปด้วยไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic dipole moment) ดังสมการที่ 2.4



ภาพประกอบ 23 ไดโพลแม่เหล็ก

$$\hat{m} = \hat{I} \pi b^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ $\hat{m}$ คือ ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก ($A \cdot m^2$)

$\hat{I}$ คือ กระแสเฟสเซอร์ (A)

πb^2 คือ พื้นที่วงปิดของลูป (m^2)

และสำหรับในกรณีที่เกิดขึ้นในลักษณะที่เป็นแบบลูปนี้ จะมีองค์ประกอบเวกเตอร์ความเข้มของสนามไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.5

$$\hat{E}_r = 0 \quad (2.5ก)$$

$$\hat{E}_\theta = 0 \quad (2.5ข)$$

$$\hat{E}_\phi = -j \frac{\omega \mu_0 \hat{m} \beta_0^2}{4\pi} \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} \right) e^{-j\beta_0 r} \quad (2.5ค)$$

และองค์ประกอบเวกเตอร์ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 2.6

$$\hat{H}_r = j2 \frac{\omega \mu_0 \hat{m} \beta_0^2}{4\pi \eta_0} \cos \theta \left(\frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) e^{-j\beta_0 r} \quad (2.6ก)$$

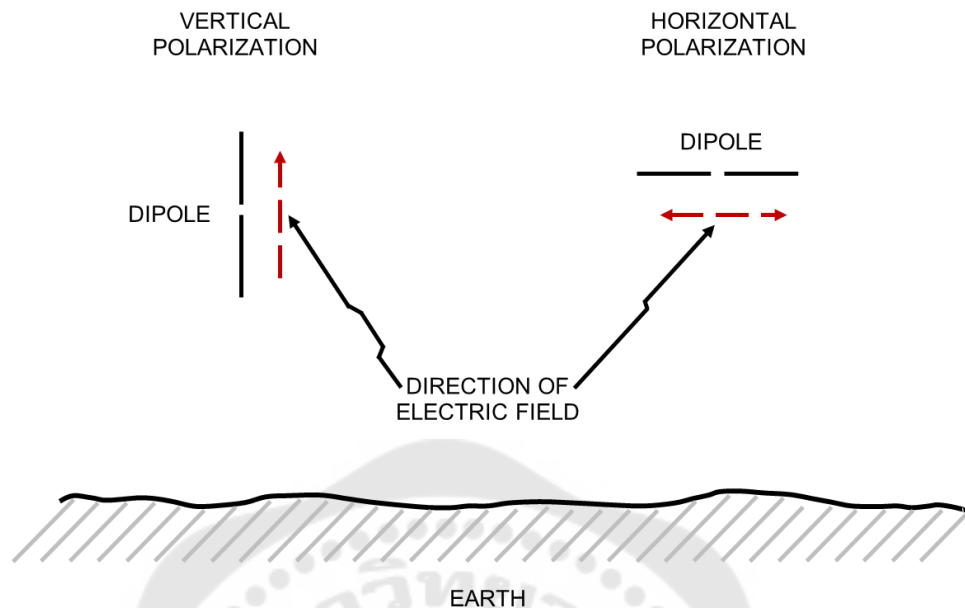
$$\hat{H}_\theta = j \frac{\omega \mu_0 \hat{m} \beta_0^2}{4\pi \eta_0} \sin \theta \left(j \frac{1}{\beta_0 r} + \frac{1}{\beta_0^2 r^2} - j \frac{1}{\beta_0^3 r^3} \right) e^{-j\beta_0 r} \quad (2.6ข)$$

$$\hat{H}_\phi = 0 \quad (2.6ค)$$

เมื่อ	$\hat{E}$	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
	$\hat{H}$	คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A/m)
	ω	คือ ความถี่เชิงมุม (rad/s)
	μ_0	คือ ค่าความซึมซับในอวกาศว่าง $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)
	$\hat{m}$	คือ ไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก ($A \cdot m^2$)
	η_0	คือ อิมพีแดนซ์อินทรีนสิกของตัวกลางในอวกาศว่าง $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$
	β_0	คือ ค่าคงตัวเฟส $\beta_0 = 2\pi / \lambda_0$
	θ	คือ มุมระหว่างแนวตั้งฉากของแหล่งกำเนิดกับตำแหน่งที่วัด
	r	คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับตำแหน่งที่วัด (m)

2.12 การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล

การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล (dipole antenna polarization) จะใช้ในการอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศในทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุด และวัดได้ในสนามระยะไกล การที่สายอากาศจำนวนมากจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น นั่นคือในหนึ่งรอบเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และยังถูกแบ่งออกเป็นการโพลาไรซ์แนวตั้ง และการโพลาไรซ์แนวนอน ดังภาพประกอบที่ 24



ภาพประกอบ 24 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล

2.13 สายอากาศอาร์เรย์ (antenna array)

ในการพิจารณาเสาอากาศสองเสาที่มีการแพร่กระจายรอบทิศทาง ดังภาพประกอบที่ 25 องค์ประกอบของกระแสในแนวแกน x จะมีทิศทางชี้ขึ้นไปตามแนวแกน z ซึ่งจะถูกแยกออกจากกันและมีระยะ d โดยมีระยะที่เท่ากันจากจุดกำเนิด เมื่อพิจารณาดำแหน่งของสนาม ณ ตำแหน่ง P ในช่วงสนามระยะไกล สนามไฟฟ้าของเสาอากาศแต่ละตัวที่เกิดที่ตำแหน่ง P จะมีรูปแบบดังสมการที่ 2.7

$$\hat{E}_{\theta 1} = \frac{\hat{M}I \angle \alpha}{r_1} e^{-j\beta_0 r_1} \quad (2.7ก)$$

$$\hat{E}_{\theta 2} = \frac{\hat{M}I \angle 0}{r_2} e^{-j\beta_0 r_2} \quad (2.7ข)$$

โดยที่ กระแสเฟสเซอร์ $\hat{I}_1 = I \angle \alpha$ และ $\hat{I}_2 = I \angle 0$ ซึ่งจะกำหนดว่ากระแสมีขนาดที่เท่ากันแต่มีเฟสที่แตกต่างกันออกไป โดยที่กระแสเฟสเซอร์ $\hat{I}_1$ จะมีเฟสนำกระแสเฟสเซอร์ $\hat{I}_2$ อยู่ α สำหรับตัวแปร $\hat{M}$ จะมีค่าเท่ากับ $\hat{M} = j\eta_0\beta_0(dl/4\pi)\sin\theta$ หากพิจารณาสถานที่เกิดขึ้นบนระนาบ xy ซึ่งกำหนดให้ $\theta = 90^\circ$ ค่าของสนามรวมที่จุด P จะมีค่าดังสมการที่ 2.8

$$\hat{E}_\theta = \hat{E}_{\theta 1} + \hat{E}_{\theta 2} \quad (2.8ก)$$

$$\hat{E}_\theta = \hat{M}I \left(\frac{e^{-j\beta_0 r_1}}{r_1} e^{j\alpha} + \frac{e^{-j\beta_0 r_2}}{r_2} \right) \quad (2.8ข)$$

$$\hat{E}_\theta = \hat{M}I e^{j\alpha/2} \left(\frac{e^{-j\beta_0 r_1} e^{j\alpha/2}}{r_1} + \frac{e^{-j\beta_0 r_2} e^{-j\alpha/2}}{r_2} \right) \quad (2.8ค)$$

ในการลดรูปสมการให้ง่ายขึ้น จะมองว่าจุด P มีระยะห่างไกลจากจุดกำเนิดมาก ๆ ดังนั้น เวกเตอร์ระยะห่าง r_1 และ r_2 จะมีลักษณะที่ขนานกันซึ่ง $r_1 \cong r_2 \cong r$ จากนั้นการพิจารณา ดังกล่าวสามารถประมาณค่าเฟสของคลื่นได้ดังภาพประกอบที่ 25 และเป็นไปดังสมการที่ 2.9

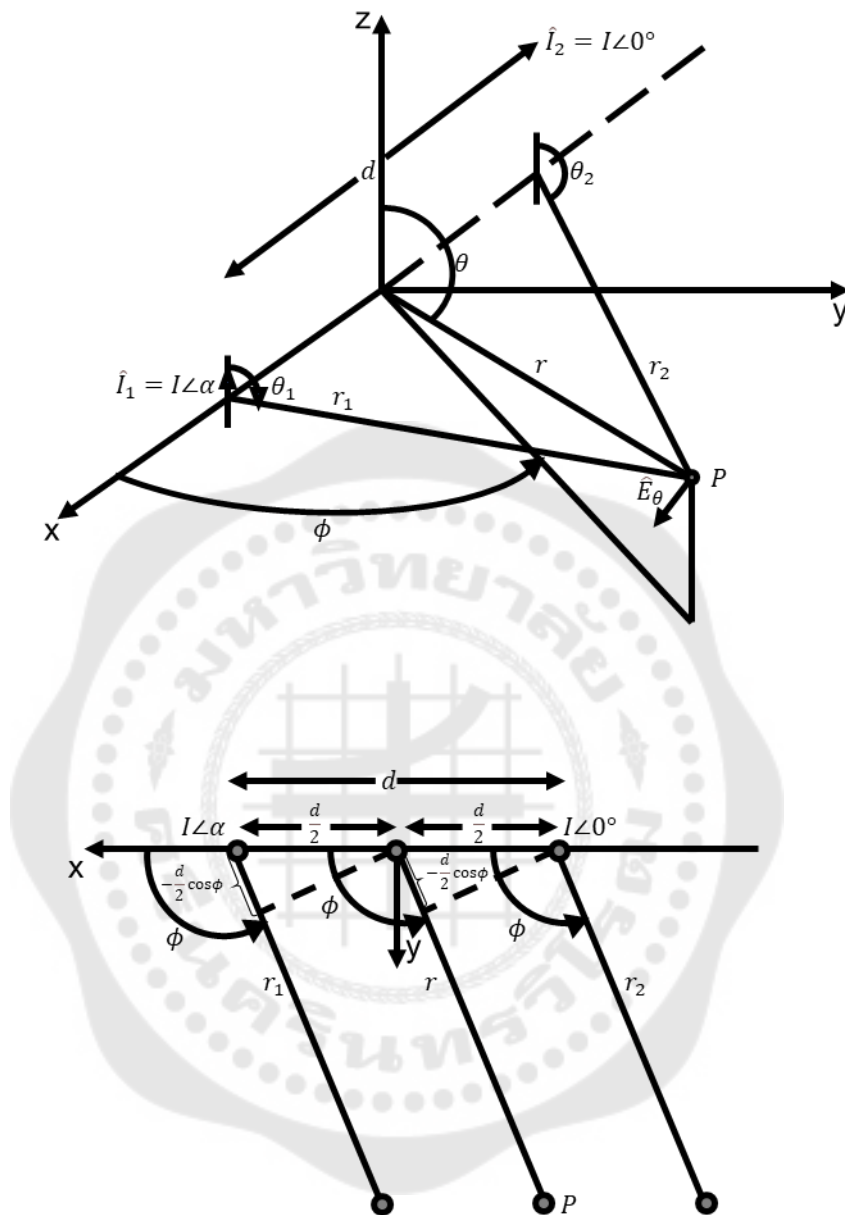
$$r_1 \cong r - \frac{d}{2} \cos \phi \quad (2.9ก)$$

$$r_2 \cong r + \frac{d}{2} \cos \phi \quad (2.9ข)$$

สมการของผลรวมที่เกิดขึ้นหลังจากพิจารณาสนามที่เกิดขึ้น 2 ตำแหน่งในระยะสนามระยะไกล จะมีค่าเท่ากับ และสมการดังกล่าวนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นในการนำไปประยุกต์ในการคาดการณ์ค่า สนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ ดังสมการที่ 2.10

$$\hat{E}_\theta = \hat{M}I \frac{e^{-j\beta_0 r}}{r} \underbrace{\left(e^{j[\beta_0(d/2)\cos\phi+(\alpha/2)]} + e^{-j[\beta_0(d/2)\cos\phi+(\alpha/2)]} \right)}_{2\cos[\beta_0(d/2)\cos\phi+(\alpha/2)]} e^{j(\alpha/2)} \quad (2.10ก)$$

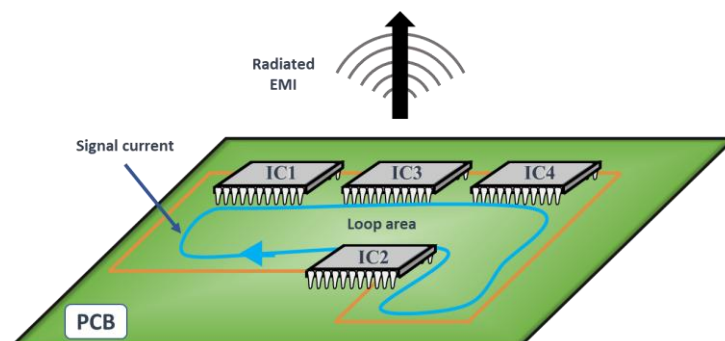
$$\hat{E}_\theta = 2\hat{M}I \frac{e^{-j\beta_0 r}}{r} e^{j(\alpha/2)} \cos\left(\pi \frac{d}{\lambda_0} \cos \phi + \frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.10ข)$$



ภาพประกอบ 25 การพิจารณาสนามที่เกิดขึ้น 2 ตำแหน่งในระยะสนามระยะไกล

2.14 การรบกวนทางอากาศโหมดผลต่างในแผ่นวงจรพิมพ์ (DM radiated emission)

อุปกรณ์ส่วนใหญ่จะมีกระแสไหลในวงจร เช่น สัญญาณนาฬิกา (clock signal) ซึ่งจะเกิดขึ้นอยู่ในแผ่นวงจรพิมพ์ พลังงานที่แพร่ออกมาทางอากาศ จะถูกจำลองว่าเป็นสายอากาศแบบลูปกระแสขนาดเล็ก (small loop antenna) ในแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งมีกระแสที่เป็นสัญญาณรบกวนอยู่ ดังภาพประกอบที่ 26



ภาพประกอบ 26 การแพร่สัญญาณรบกวนทางอากาศเนื่องจากแผ่นวงจรพิมพ์ในโหมดผลต่าง โดยมีเงื่อนไขอยู่ว่า ลูปกระแสนขนาดเล็กจะต้องมีความกว้างของลูปกระแสเล็กกว่าหนึ่งในสี่ส่วนของความยาวคลื่น (quarter wavelength, $\lambda/4$) ณ ความถี่กำลังสนใจ ดังนั้นความเข้มสนามไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$E = 263 \times 10^{-12} \times (f^2 \times A \times I_s) \quad (2.11)$$

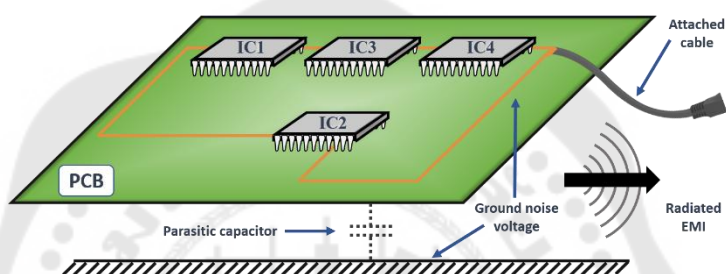
เมื่อ	E	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
	f	คือ ความถี่ของกระแสจากแหล่งกำเนิด (Hz)
	A	คือ พื้นที่ของลูปกระแส (m^2)
	I_s	คือ กระแสจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (A)

ในความเป็นจริงแล้วสายอากาศแบบลูป ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นเพียงแค่แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ แต่แหล่งกำเนิดยังสามารถรับผลกระทบของสัญญาณรบกวนจากเหยื่อที่ได้รับผลกระทบได้เช่นเดียวกัน นี่คือเหตุผลหลักทำให้ต้องมีระนาบกราวด์ (ground planes) เพื่อช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาสัญญาณรบกวนส่วนเกินที่ย้อนเข้ามาในระบบ

2.15 การรบกวนทางอากาศโหมดผลร่วมในแผ่นวงจรพิมพ์ (CM radiated emission)

ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในแผ่นวงจรพิมพ์ ไม่ได้มีเพียงแค่การแพร่กระจายสัญญาณในโหมดผลต่าง (DM radiation) ที่เกิดจากลูปกระแส ในทำนองเดียวกันการทำงานของแผ่นวงจรพิมพ์ จะมีกระแสโหมดผลร่วม (CM current) อยู่ในสายเคเบิลที่แนบอยู่กับแผ่นวงจรพิมพ์ หรือไม่ก็เกิดสัญญาณรบกวนระหว่างแผ่นวงจรพิมพ์ และระนาบกราวด์ ซึ่งถ้าหากความยาวของสายเคเบิล

ยาวกว่า $1/20$ ของความยาวคลื่น สายเคเบิลนั้นก็จะทำหน้าที่เป็นสายอากาศ (antenna) ถ้าหากเปรียบเทียบกันในเรื่องของผลกระทบของทั้ง 2 โหมดนี้ การแพร่กระจายทางอากาศในโหมดผลรวม (CM radiation) จะมีมากกว่า ซึ่งการแพร่กระจายในโหมดผลต่าง กระแสที่เกิดขึ้นสามารถคาดการณ์ได้ง่ายโดยใช้กฎของเคอร์ชอฟ (Kirchoff's current law) ในทางกลับกัน มันไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะคาดการณ์กระแสโหมดผลรวมในแผ่นวงจรพิมพ์ ดังภาพประกอบที่ 27 จะเห็นได้ว่าเส้นทางของกระแสที่วนกลับมาจะมีค่าของตัวเก็บประจุแฝง (parasitic capacitance) เกิดขึ้นระหว่างบริเวณข้างเคียง



ภาพประกอบ 27 การแพร่สัญญาณรบกวนทางอากาศเนื่องจากแผ่นวงจรพิมพ์ในโหมดผลรวม

ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสโหมดผลรวม สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.12

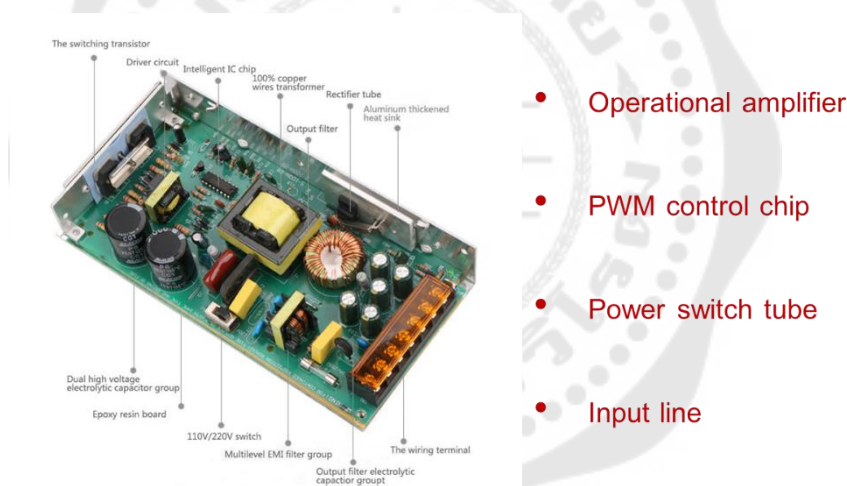
$$E = 1.26 \times 10^{-4} \times (f \times L \times I_{CM}) \quad (2.12)$$

เมื่อ	E	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)
	f	คือ ความถี่ของกระแสจากแหล่งกำเนิด (Hz)
	L	คือ ความยาวของสายเคเบิล (m)
	I_{CM}	คือ กระแสโหมดผลรวมในสายเคเบิล (A)

จะเห็นได้ว่าหากความยาวของสายเคเบิลมีค่ามาก ก็จะส่งผลทำให้สนามไฟฟ้ามีค่ามากตามไปด้วย เพราะฉะนั้นในการออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB design) สิ่งที่ต้องพิจารณาคือการลดกระแสโหมดผลรวมให้เกิดขึ้นได้น้อยที่สุด ไม่ว่าจะเป็นการแบ่งส่วนในวงจร (partitioning) การใส่วงจรกรองสัญญาณรบกวน (filtering) รวมทั้งการเชื่อมต่อกับระบบกราวด์ (grounding) ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น

2.16 การเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง

กระแสที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง (switching power supply) มักจะประกอบไปด้วยสัญญาณรบกวนที่เกิดจากส่วนประกอบต่าง ๆ ในวงจรดังภาพประกอบที่ 28 ซึ่งกระแสสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่จะเกิดที่ความถี่ที่มากกว่า 50 หรือ 60 Hz ปัญหาเหล่านี้เป็นผลจากการสวิตชิง (switching) หรือการใช้เทคนิคพัลส์วิตท์มอดูเลชัน (pulse width modulation, PWM) กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งองค์ประกอบหลักของแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง ที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าคือ ความถี่สวิตชิง (switching frequency) และฮาร์มอนิกส์ (harmonics) โดยปกติแล้วความถี่สวิตชิงที่ 50 Hz ถึง 500 kHz สามารถก่อให้เกิดทั้งกลไกการเกิดของสัญญาณรบกวนในโหมดผลรวมและโหมดผลต่าง (CM and DM mechanisms) โดยย่านความถี่ต่ำจะก่อให้เกิดการรบกวนในโหมดผลต่าง (DM emission) และเกิดการรบกวนในโหมดผลรวม (CM emission)



ภาพประกอบ 28 สาเหตุในการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง

ที่มา: <http://www.vantoelectric.com/newsdetail/6.html>

2.17 โพรบกระแสและอิมพีแดนซ์ในการส่งผ่าน (current probe and transfer impedance)

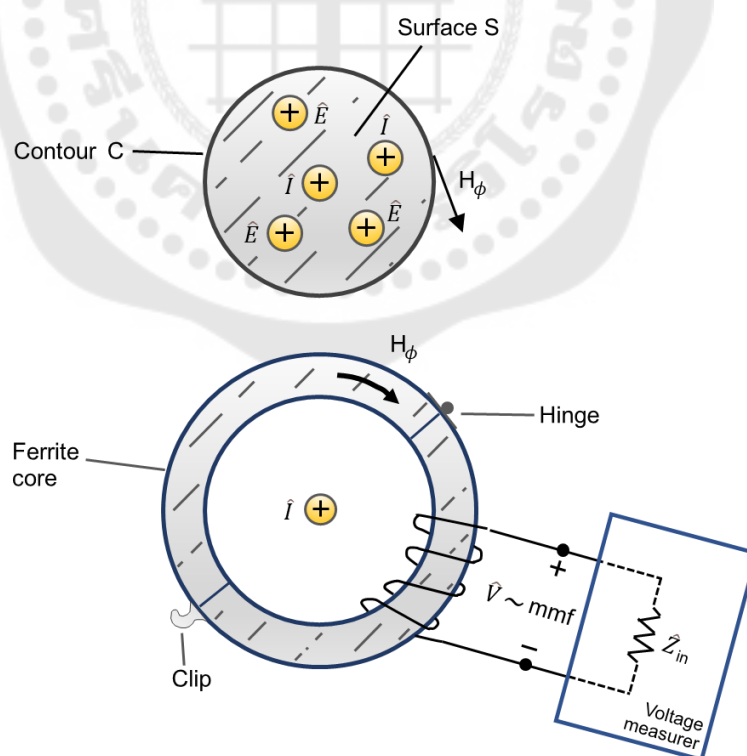
โพรบกระแสเป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการวัดค่าของกระแสที่ได้จากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กจะแสดงในภาพประกอบที่ 29 ในปกติแล้วกระแสที่อยู่ในระบบสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าที่แพร่ผ่านทางอากาศได้โดยใช้การคำนวณจากรูปแบบจำลองของสายส่ง (transmission line model) ในอีกแง่มุมหนึ่งมันก็เป็นเรื่องที่ยากต่อการคำนวณ



ภาพประกอบ 29 โพรบกระแสที่ใช้งานจริง

ที่มา: <https://www.artisanrg.com/TestMeasurement/60342-1/ESCO-ETS-Lindgren-91550-1-Current-Probe>

ดังนั้นโพรบกระแสจึงเป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้วัดกระแสได้ และหลักการทำงานของโพรบกระแสนั้นสามารถพิสูจน์ได้จากกฎของแอมป์แปร์ (Ampere's law) ดังภาพประกอบที่ 30



ภาพประกอบ 30 หลักการทำงานพื้นฐานของโพรบกระแส

ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.13

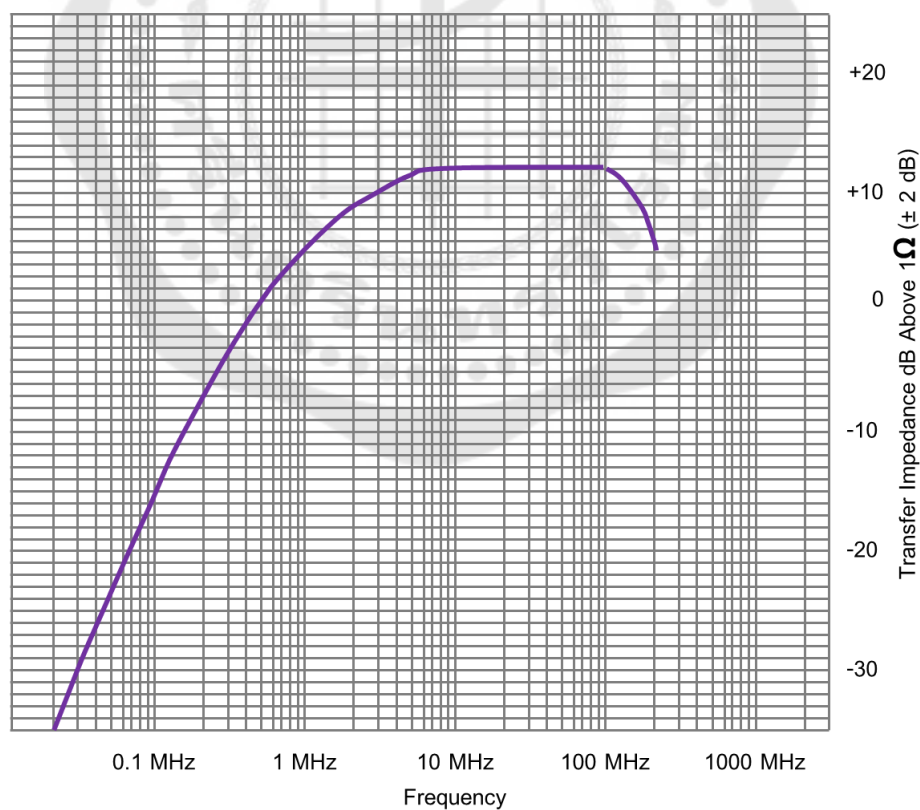
$$\hat{Z}_T = \frac{\hat{V}}{\hat{I}} \quad (2.13)$$

เมื่อ Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ในการส่งผ่าน (Ω)

$\hat{V}$ คือ แรงดันที่วัดได้ (V)

$\hat{I}$ คือ กระแสที่วัดได้ (A)

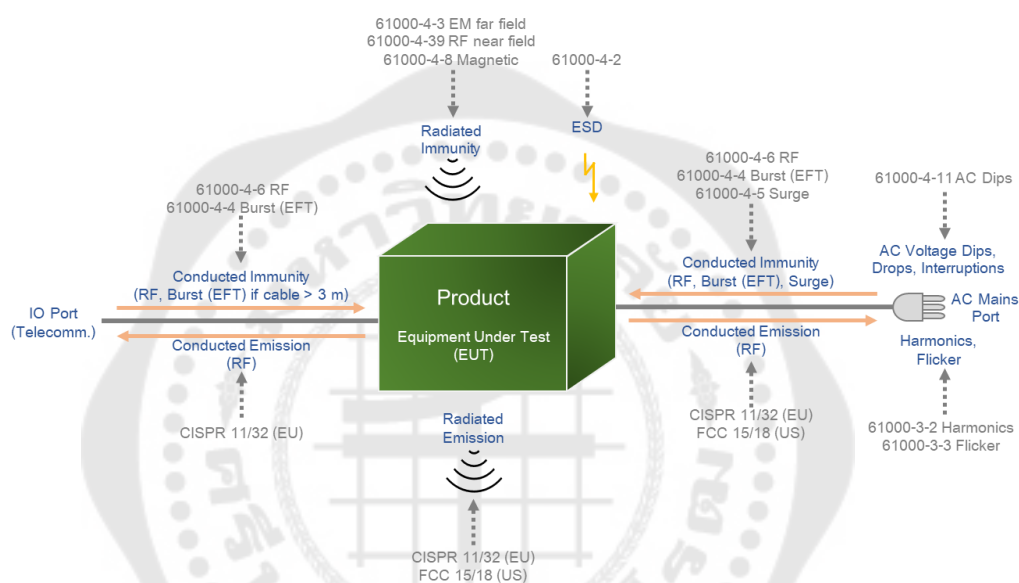
ค่าของ $\hat{Z}_T$ ที่ได้จากการคำนวณคือค่าอิมพีแดนซ์ในการส่งผ่าน (transfer impedance) ของโพรบกระแส โดยปกติแล้วบริษัทผู้ผลิตโพรบนั้นจะให้ข้อมูลตารางการสอบเทียบ (calibration chart) มาพร้อมกับโพรบซึ่งจะแสดงขนาดของอิมพีแดนซ์ในการส่งผ่านเทียบกับค่าความถี่ ดังภาพประกอบที่ 31



ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงผลการวัดอิมพีแดนซ์ในการส่งผ่านจากผู้ผลิต

2.18 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC standards)

มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นตัวกำหนดรูปแบบ กฎเกณฑ์ และวิธีการทดสอบของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะมีการกำหนดค่าต่าง ๆ หรือระดับขั้นต่ำของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และการมีภูมิคุ้มกันของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานภายใต้คลื่นการรบกวนต่าง ๆ ดังภาพประกอบที่ 32 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแต่ละส่วนที่การทดสอบที่แตกต่างกันออกไป



ภาพประกอบ 32 มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละส่วนของการทดสอบ
อุปกรณ์

เป็นที่ทราบกันดีว่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามักจะเกิดขึ้นจากการใช้งานในระบบการสื่อสารซึ่งจะส่งผลกระทบหลาย ๆ ด้านในการใช้งาน ดังนั้นการที่จะทำให้เกิดความปลอดภัย และไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านการใช้งานต่าง ๆ จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมาตรฐานในแต่ละภูมิภาคจะมีข้อกำหนดที่แตกต่างกันออกไป ดังภาพประกอบที่ 33 โดยในความเป็นจริงแล้วมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ในแต่ละประเทศจะมีเยอะมาก ซึ่งสามารถหาข้อมูลเชิงลึกได้ตามอ้างอิง (29) สำหรับในงานวิจัยนี้จะขอยกตัวอย่างเฉพาะบางมาตรฐานที่นิยมใช้งานจริง ดังนี้



ภาพประกอบ 33 ตัวอย่างสัญลักษณ์ของมาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: <https://www.techtalkthai.com/standards-and-markings-for-it-products>

2.18.1 มาตรฐาน FCC (FCC standards)

ในปี พ.ศ. 2470 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้จัดตั้งองค์กร Federal Communications Commission เพื่อให้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สื่อสาร โดยการใช้งานจะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการแผ่กระจายพลังงานที่มีความถี่วิทยุ (radio-frequency energy) ในย่านความถี่ 9 kHz ถึง 3000 GHz ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้ถูกออกแบบเพื่อรองรับการทำงานของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นทางสายตัวนำและทางอากาศ เพื่อควบคุมสินค้าที่มีการทำงานในย่านความถี่วิทยุ ไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระทบต่อการทำงานของระบบอื่น ๆ โดยมาตรฐานดังกล่าวนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ เพื่อให้ครอบคลุมในการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์ความถี่วิทยุ (radio-frequency devices) อุปกรณ์ที่ใช้ในงานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ (ISM) เป็นต้น

2.18.2 มาตรฐาน CISPR (CISPR standards)

ในปี พ.ศ. 2476 นานาชาติได้จัดตั้งมาตรฐาน CISPR ขึ้นมาเพื่อหาวิธีการวัดและขีดจำกัดในการรบกวนของอุปกรณ์ในย่านความถี่วิทยุ ซึ่งหลาย ๆ ประเทศได้ใช้มาตรฐาน CISPR นี้เป็นต้นแบบ และถูกนำมาดัดแปลงเพื่อร่างให้เป็นมาตรฐานที่บังคับใช้ในแต่ละประเทศ สำหรับประเทศไทยก็ได้มีการนำมาตรฐานนี้มาปรับใช้ด้วยเช่นกัน

2.18.3 มาตรฐานทางการทหาร (military standards)

มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานที่จัดตั้งขึ้นโดยหน่วยทางการทหารของประเทศสหรัฐอเมริกา อาทิเช่น มาตรฐาน MIL-STD-461B และ MIL-STD-462 จะมีขั้นตอนและวิธีการทดสอบที่มีรายละเอียดเข้มข้นมากกว่ามาตรฐาน FCC เนื่องจากมาตรฐานนี้มีการพิจารณาเรื่อง ความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า และมีการทดสอบที่ย่านความถี่ 30 Hz ถึง 40 GHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าย่านความถี่ที่พิจารณานั้นมีช่วงที่กว้างกว่ามาตรฐาน FCC เป็นอย่างมาก

2.18.4 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

ในปี 2541 มาตรฐานการทดสอบในเรื่องของความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้านี้เป็นมาตรฐานที่มีการนำมาใช้งานในประเทศไทย ซึ่งได้ถูกปรับใช้มาจากมาตรฐานนานาชาติ (IEC) เช่น มอก. 1955-2542 ที่เป็นมาตรฐานในการทดสอบการทำงานของบริภัณฑ์ส่องสว่างภายใต้การรบกวนความถี่วิทยุ เป็นต้น

2.19 การทดสอบการแพร่ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC testing)

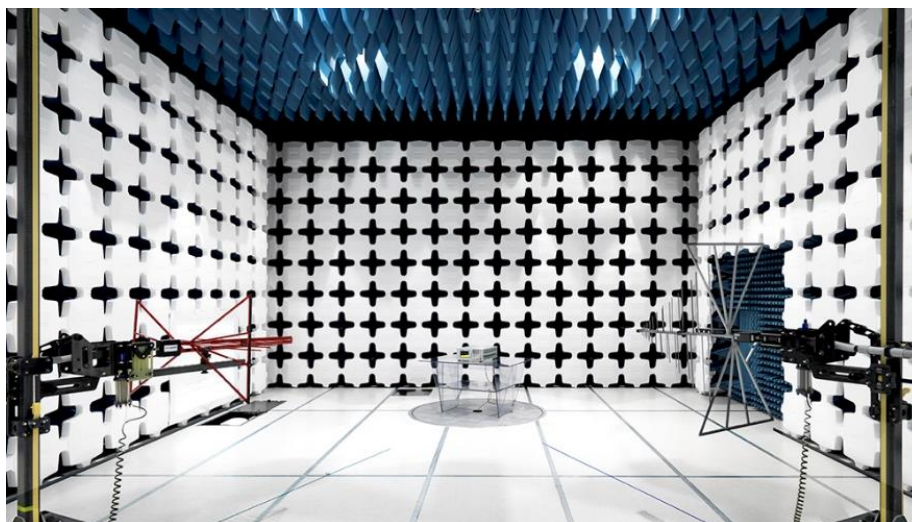
ในปี 1990 EMI/EMC ได้กลายเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างมากในทางการค้า ซึ่งหลายประเทศได้ตั้งข้อกำหนดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่จะนำเข้ามาขายในประเทศจะต้องผ่านการทดสอบทาง EMI/EMC โดยจะต้องผ่านการทดสอบใน 2 หัวข้อใหญ่ ๆ คือ การแพร่สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (emission) และความคงทนต่อสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า (susceptibility)

2.19.1 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าและโทรคมนาคม

ในการทดสอบการแพร่กระจายสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ (radiation emission testing) ตามมาตรฐานสากล จะใช้โครงสร้างสำคัญของการวัดสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ขึ้นกับชิ้นส่วนขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทดสอบ ราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ความสะดวกในการใช้งาน

2.19.2 การทดสอบในห้องปิดกั้นคลื่นสนามไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อน (semi-anechoic chamber)

การทดสอบการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการสื่อสารข้อมูล ในห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อนที่มีขนาดระยะทดสอบตามมาตรฐานสากล ซึ่งกำหนดระยะทดสอบไว้ 2 แบบคือ ที่ระยะทดสอบ 3 เมตร และที่ระยะทดสอบ 10 เมตร ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 34 ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีคุณสมบัติเป็นห้องที่ใช้กั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายในออกสู่ภายนอก และป้องกันสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนและสัญญาณวิทยุจากภายนอกเข้ามารบกวนอุปกรณ์ภายใต้การทดสอบภายในห้อง



ภาพประกอบ 34 ห้องปิดกั้นคลื่นสนามไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อน

ที่มา: https://about.keysight.com/en/newsroom/imagelibrary/library/SAC_images/

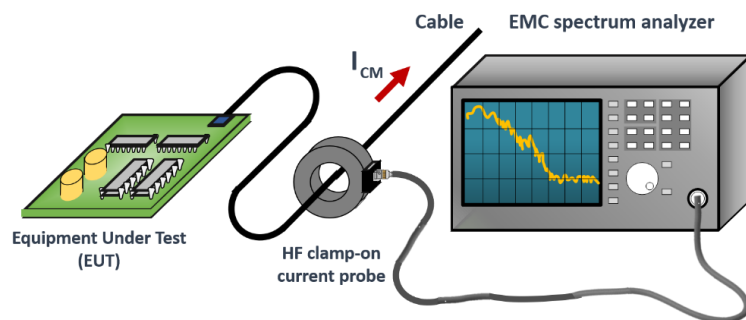
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการศึกษาวิธีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ โดยวิธีหลักในการวิเคราะห์ปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical method) และวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) (30, 31) สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นและให้ความสนใจที่การคำนวณแบบโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ เนื่องจากต้องการวิธีที่ใช้เวลาน้อย มีความแม่นยำในการใช้งาน และมีความซับซ้อนไม่มากจนเกินไป (32) โดยจะเริ่มต้นจากการคำนวณด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี และทำการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ในห้องทดสอบ ที่ได้จากการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าทางอากาศ (fundamental of the radiated emission)

ในแผ่นวงจรพิมพ์ นั้นมีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่ทำให้เกิดการรบกวนทางอากาศอย่างโดยไม่ตั้งใจ (unintentional radiated emission) ได้หลายกรณี เช่น เกิดจากแผงวงจรรวม (integrated circuit, IC) การเชื่อมต่อระหว่างแผ่นวงจรพิมพ์กับลายทองแดง (PCB traces) และแผ่นวงจรพิมพ์กับสายเคเบิล (PCB attached cables) ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้ดังภาพประกอบที่ 26 และ 27 ถ้าหากยังมีลายทองแดง หรือสายเคเบิลมีความยาว ก็จะส่งผลทำให้สนามไฟฟ้าแพร่กระจายทางอากาศได้ดี ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ต้องคำนึงถึง นอกจากนี้แผ่นวงจรพิมพ์ ส่วนใหญ่จะเชื่อมต่อกับสายเคเบิล ซึ่งเป็นตัวการหลักในการทำให้เกิดสัญญาณรบกวนไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ จะเห็นได้ว่าปัญหาในลักษณะดังกล่าว เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เป็นโหมดผลรวมเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะแก้ปัญหาโดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ และหาสาเหตุของการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดผลรวม ซึ่งถ้าหากปรับปรุงแก้ไขได้จะส่งผลทำให้ค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศโดยรวมลดลงได้ หรือมากไปกว่านั้นอาจทำให้อุปกรณ์ทดสอบมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพประกอบ 35 การใช้โพรบกระแสเพื่อวัดค่ากระแสโหมดผลรวม

ในการรบกวนทางอากาศในโหมดผลรวมเป็นสิ่งที่ค่อนข้างยากในควบคุมเพื่อให้ผ่านมาตรฐานเพราะสายเคเบิล คือ แหล่งกำเนิดหลักที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายสัญญาณรบกวนทางอากาศที่ต่ออยู่กับแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งลักษณะการเกิดของการแพร่ในโหมดผลรวมคือ แหล่งกำเนิดที่ถูกจำลองว่าเป็นสายอากาศแบบไดโพล (dipole antenna) หรือสายอากาศโมโนโพล (monopole) ซึ่งจะก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ห่างจากแหล่งกำเนิดเป็นระยะห่าง r เมตร (33) โดยตำแหน่งที่พิจารณาต้องถูกพิจารณาว่า สายอากาศโมโนโพล มีความสั้นกว่า 1 ส่วน 4 ของความยาวคลื่น ($\lambda/4$) มาก ๆ ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.1

$$E_{CM} = \frac{4\pi \times 10^{-7} (f I_{CM}) \sin \theta}{r} \quad (3.1)$$

เมื่อ	E_{CM}	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าโหมดผลรวม (V/m)
	f	คือ ความถี่ของกระแสจากแหล่งกำเนิด (Hz)
	l	คือ ความยาวของสายเคเบิล (m)
	I_{CM}	คือ กระแสโหมดผลรวมในสายเคเบิล (A)
	θ	คือ มุมระหว่างแนวตั้งฉากของแหล่งกำเนิดกับตำแหน่งที่วัด
	r	คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับตำแหน่งที่วัด (m)

หาก $\theta=90^\circ$ จะเป็นมุมตั้งฉากที่ทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด โดยสามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในดังสมการที่ 3.2

$$E_{CM} = \frac{12.6 \times 10^{-7} (f I_{CM})}{r} \quad (3.2)$$

เนื่องจากต้องการที่จะเปรียบเทียบในเรื่องของการคาดการณ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง โดยกำหนดให้อยู่ในย่านความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz ดังนั้นจึงทำการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน CISPR 22 Class B

3.2 วิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศโดย Henry W. Ott

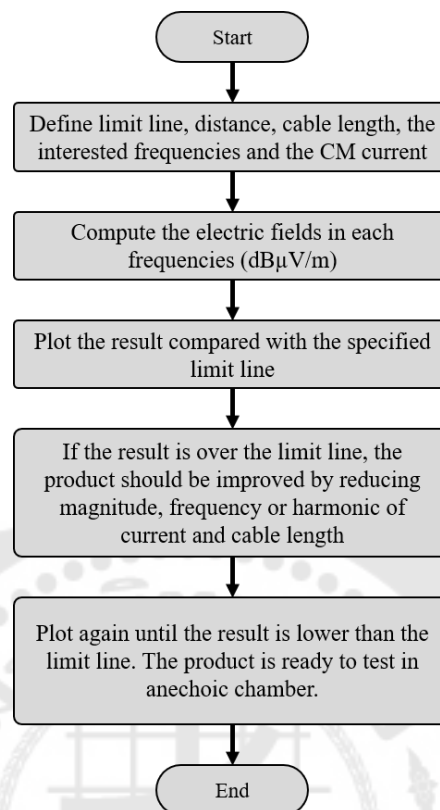
เริ่มแรกสัญญาณรบกวนทางอากาศจะถูกเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐาน (limit line) ตามมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) จากนั้นใช้โพรบวัดค่ากระแสในสายเคเบิลที่มีความยาวเท่ากับ 1 เมตร และเปรียบเสมือนเป็นสายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) ดังภาพประกอบที่ 35 โดยทำการวัดในย่านความถี่ทางอากาศ 30 MHz ถึง 1 GHz จากนั้นตำแหน่งที่วัดผลมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ 3 เมตร โดยค่ากระแสที่วัดได้จากโพรบจะมีค่าเป็น 2 เท่าของกระแสโหลดรวม $I_{probe(CM)} = 2I_{CM}$ ดังนั้นจากทฤษฎีข้างต้นจึงสามารถหาสนามไฟฟ้าได้โดย

$$E_{CM} = \frac{6.28 \times 10^{-7} |I_{probe(cm)}| fl}{r} V/m \quad (3.4)$$

จากนั้น

$$E_{CM} = 20 \log \left(\frac{E_{CM}}{10^{-6}} \right) dB\mu V / m \quad (3.5)$$

จากนั้นค่าสนามไฟฟ้าทางอากาศจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศจากแหล่งกำเนิดที่ถูกวัดค่าด้วยสายอากาศวัดสัญญาณแบนด์กว้าง (broadband antenna) ทั้งแนวการวัดในแนวนอน (horizontal) และแนวตั้ง (vertical) ซึ่งขั้นตอนการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจาก (16) จะถูกแสดงดังภาพประกอบที่ 36



ภาพประกอบ 36 ผังงานแสดงขั้นตอนการคาดการณ์ค่าสนามไฟฟ้าของ Henry W. Ott (16)

3.3 วิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศโดย Clayton R. Paul.

การหาค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศในรูปแบบนี้จะหาค่าสัญญาณรบกวนในรูปแบบของแรงดันจากเครื่องวิเคราะห์ (spectrum analyzer) และพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ในการส่งผ่าน (transfer impedance) จากโพรบวัดกระแส มีค่าเท่ากับ $15 \text{ dB}\Omega$ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.6

$$\left| \hat{V}_{SA} \right|_{\text{dB}\mu\text{V}} = \left| \hat{I}_{\text{probe(CM)}} \right|_{\text{dB}\mu\text{A}} + \left| \hat{Z}_T \right|_{\text{dB}\Omega} \quad (3.6)$$

เมื่อ $\hat{V}_{SA}$ คือ แรงดันของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (dBμV)
 $\hat{I}_{\text{probe(CM)}}$ คือ กระแสโหมดผลรวมที่วัดจากโพรบกระแส (dBμA)
 $\hat{Z}_T$ คือ อิมพีแดนซ์ของโพรบกระแส (dBΩ)

แล้วนำไปคำนวณเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าในสมการที่ 3.7

$$\left| \hat{E}_{CM} \right|_{dB\mu V} = \left| \hat{V}_{SA} \right|_{dB\mu V} + \text{cable loss}_{dB} + 20 \log_{10} f_{MHz} + \left| \hat{F}_{GP} \right|_{dB} - 13.58 \quad (3.7)$$

เมื่อ $\hat{E}_{CM}$ คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าโหมดผลรวม (dBμV)

$\hat{V}_{SA}$ คือ แรงดันของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (dBμV)

cable loss คือ ค่าการสูญเสียในสายเคเบิล (dBΩ)

f คือ ความถี่ของกระแสโหมดผลรวม (MHz)

$\hat{F}_{GP}$ คือ ตัวประกอบการปรับแก้การสะท้อนของคลื่น (dB)

จากสมการที่ข้างต้น ในการทดลองใช้สายไฟประเภท PVC flexible cord แบบ HO3VV-F ขนาด 3x0.75 mm² โดยที่ค่าการสูญเสียในสายเคเบิล (cable loss) ที่ใช้ในการทดลองจะมีค่าเท่ากับ -0.5745 dBΩ และ $\left| \hat{F}_{GP} \right|_{dB}$ คือตัวประกอบการปรับแก้ (correction factor) ที่มีทั้งการโพลาไรซ์ในแนวแกนนอน $\left| \hat{F}_{GP(H)} \right|_{dB}$ และแนวแกนตั้ง $\left| \hat{F}_{GP(V)} \right|_{dB}$ โดยในกรณีที่ระยะห่างจากการวัดแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้ามีระยะ 3 เมตร ดังนั้นจึงสามารถหาได้จากสมการที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

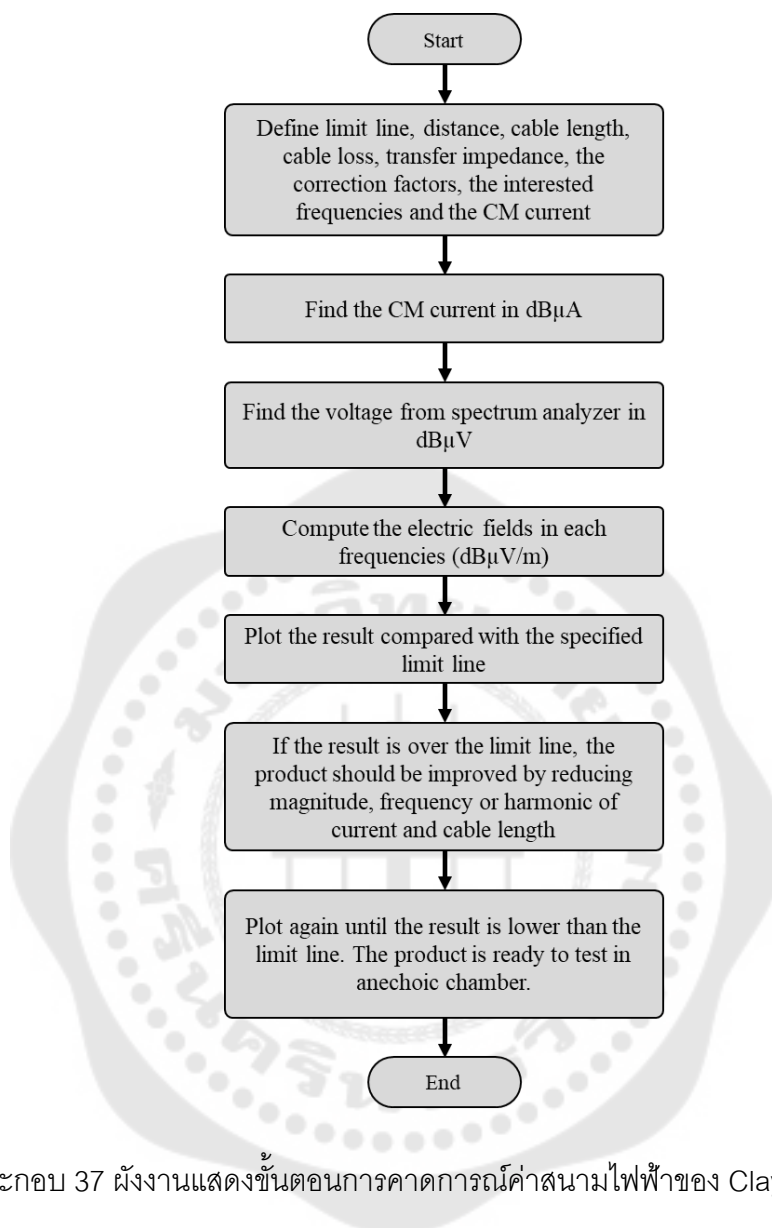
ตัวประกอบการปรับแก้ที่เกิดจากการโพลาไรซ์ในแนวแกนนอน (horizontal polarization),

$$\hat{F}_{GP(H)} = 1 - \frac{3}{\sqrt{13}} e^{-j\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(\sqrt{13}-3)} \quad (3.8)$$

ตัวประกอบการปรับแก้ที่เกิดจากการโพลาไรซ์ในแนวแกนตั้ง (vertical polarization),

$$\hat{F}_{GP(V)} = 1 + \left(\frac{3}{\sqrt{13}} \right)^3 e^{-j\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(\sqrt{13}-3)} \quad (3.9)$$

จากนั้นค่าสนามไฟฟ้าทางอากาศจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดที่ถูกวัดค่าด้วยสายอากาศวัดสัญญาณแบนด์กว้าง ทั้งตามแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งขั้นตอนการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจาก (18) จะถูกแสดงดังภาพประกอบที่ 37



ภาพประกอบ 37 ผังงานแสดงขั้นตอนการคาดการณ์ค่าสนามไฟฟ้าของ Clayton R. Paul (18)

3.4 วิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศโดย Shaowei Deng

การหารูปแบบนี้จะใช้แบบจำลองการเกิดสัญญาณรบกวนทางอากาศที่เกิดจากสายเคเบิล (board-source-cable antenna model) โดยสายอากาศโมโนโพลจะถูกตั้งวางอยู่เหนือระนาบกราวด์ที่เป็นอนันต์ (infinite ground plane) ในช่วงแรกความเข้มของสนามไฟฟ้าที่แพร่ทางอากาศ จะเริ่มหาค่าขนาดของสนามไฟฟ้า ซึ่งมีระยะห่าง 3 เมตรจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้จากสมการที่ 3.10 (17)

$$|E_\theta| = \eta_0 \frac{I_0}{2\pi r} \times \left| \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos(kl)}{\sin \theta} \right| \quad (3.10)$$

เมื่อ	E_θ	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (dBμV)
	η_0	คือ อิมพีแดนซ์ของคลื่น (Ω)
	I_0	คือ กระแสในสายเคเบิล (A)
	r	คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับตำแหน่งที่วัด (m)
	k	คือ ลำดับของคลื่น $k = 2\pi / \lambda$
	l	คือ ความยาวของสายเคเบิล (m)
	θ	คือ มุมระหว่างแนวตั้งฉากของแหล่งกำเนิดกับตำแหน่งที่วัด

$$|E_\theta| = 120\pi \times \frac{I_0}{2\pi \times 3} \times f(\theta, k) = 20 \times I_0 \times f(\theta, k) \quad (3.11)$$

ในกรณีที่ความยาวสายมีค่าเท่ากับ 1 เมตร จะใช้ค่า θ และ k ที่ทำให้ฟังก์ชันของค่าอาร์เรย์แฟคเตอร์ (array factor) มีค่าสูงสุดคือ 2.76 ซึ่งจะถูกคำนวณในสมการที่ 3.12

$$|E|_{\max} = 20 \times I_0 \times f_{\max}(\theta, k) \quad (3.12)$$

โดยมีเงื่อนไขอยู่ว่าความยาวของสายอากาศโมโนโพล จะต้องน้อยกว่า 1 ส่วน 4 ของความยาวคลื่นมาก ๆ จึงทำให้ค่า I_{peak} มีความสัมพันธ์กับ $I_{0(\max)}$ ดังสมการที่ 3.13

$$I_{peak} = I_{0(\max)} \sin\left(\frac{2\pi l_{cable}}{\lambda}\right). \quad (3.13)$$

ในทางกลับกันถ้าหากความยาวของสายอากาศโมโนโพล มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 ส่วน 4 ของความยาวคลื่น จะทำให้ค่า I_{peak} เท่ากับค่า $I_{0(\max)}$ ดังสมการที่ 3.14

$$I_{peak} = I_{0(\max)} \quad (3.14)$$

จุดหลักของวิธีนี้จะให้ความสำคัญที่การคำนวณค่าตัวประกอบของสายเคเบิล (cable length factor) และค่าตัวประกอบของแผ่นวงจรพิมพ์ (board size factor) ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบกับค่า 1 ส่วน 4 ของความยาวคลื่น โดยที่ค่าตัวประกอบของสายเคเบิลสามารถ

หาได้จากการที่ความยาวของสายเคเบิลมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 ส่วน 4 ของความยาวคลื่นตามเงื่อนไขดังสมการที่ 3.15

$$\text{cable_rad_factor} \equiv \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi l_{\text{cable}}}{\lambda}\right) & \text{when } l_{\text{cable}} \leq \frac{\lambda}{4} \\ 1.0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.15)$$

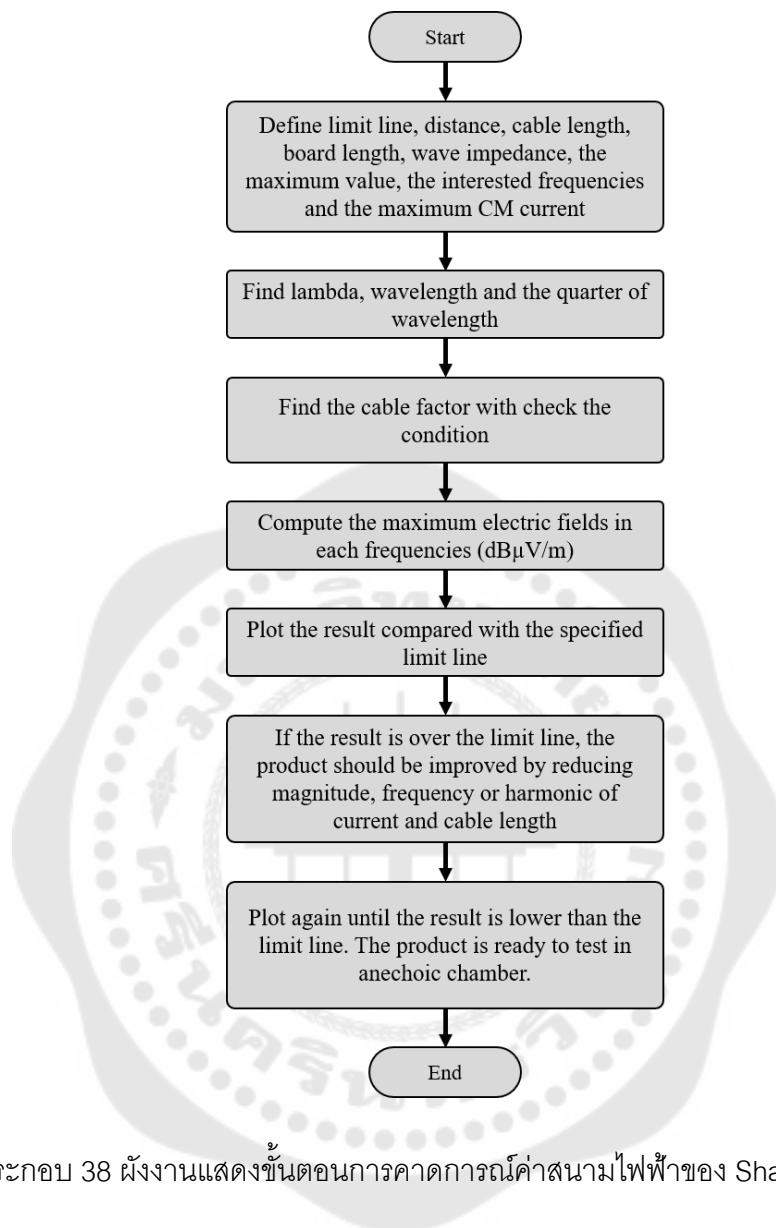
และค่าตัวประกอบของแผ่นวงจรพิมพ์ จะถูกพิจารณาจากความยาวของแผ่นวงจรพิมพ์ (l_{board}) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเป็นแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ที่มีความยาวของแผ่นวงจรพิมพ์ เท่ากับ 27.64 เซนติเมตร จึงสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.16

$$\text{board_size_factor} \equiv \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi l_{\text{board}}}{\lambda}\right) & \text{when } l_{\text{board}} \leq \frac{\lambda}{4} \\ 1.0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.16)$$

จากนั้นส่วนประกอบที่หามาได้ทั้งหมดจะถูกคำนวณเพื่อหาค่าสนามไฟฟ้าที่แพร่ทางอากาศได้ดังสมการที่ 3.17

$$E = |E|_{\text{max}} \times \text{cable_rad_factor} \times \text{board_size_factor}. \quad (3.17)$$

ซึ่งขั้นตอนการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศจาก (17) จะถูกแสดงดังภาพประกอบที่ 38



ภาพประกอบ 38 ผังงานแสดงขั้นตอนการคาดการณ์ค่าสนามไฟฟ้าของ Shaowei Deng (17)

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

บทนี้เป็นการกล่าวถึงขั้นตอนในการทดลองเพื่อคำนวณการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของ 3 วิธี โดยคำนวณจากค่าของกระแสไหลรวมที่วัดได้จากสายเคเบิลที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทดสอบ (equipment under test, EUT) ณ ความถี่ของการรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ 30 MHz ถึง 1 GHz สำหรับการคาดการณ์ที่คำนวณจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศโดย Henry W. Ott ส่วนที่ 2 วิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศโดย Clayton R. Paul ส่วนที่ 3 วิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนทางอากาศโดย Shaowei Deng จากนั้นวิธีการคาดการณ์ในแต่ละส่วนจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดในห้องทดสอบ โดยผลการทดลองจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ จะถูกแสดงออกมาในรูปแบบกราฟของค่าสัญญาณรบกวนเทียบกับความถี่ในย่านที่กำหนด ซึ่งการเปรียบเทียบจะมีรายละเอียด ดังนี้

การเปรียบเทียบผลการวัดจากห้องทดสอบในแนวนอนและแนวตั้ง เทียบกับผลจากการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยวิธีของ Henry W. Ott และเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak)

การเปรียบเทียบผลการวัดจากห้องทดสอบในแนวนอนและแนวตั้ง เทียบกับผลจากการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยวิธีของ Clayton R. Paul และเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak)

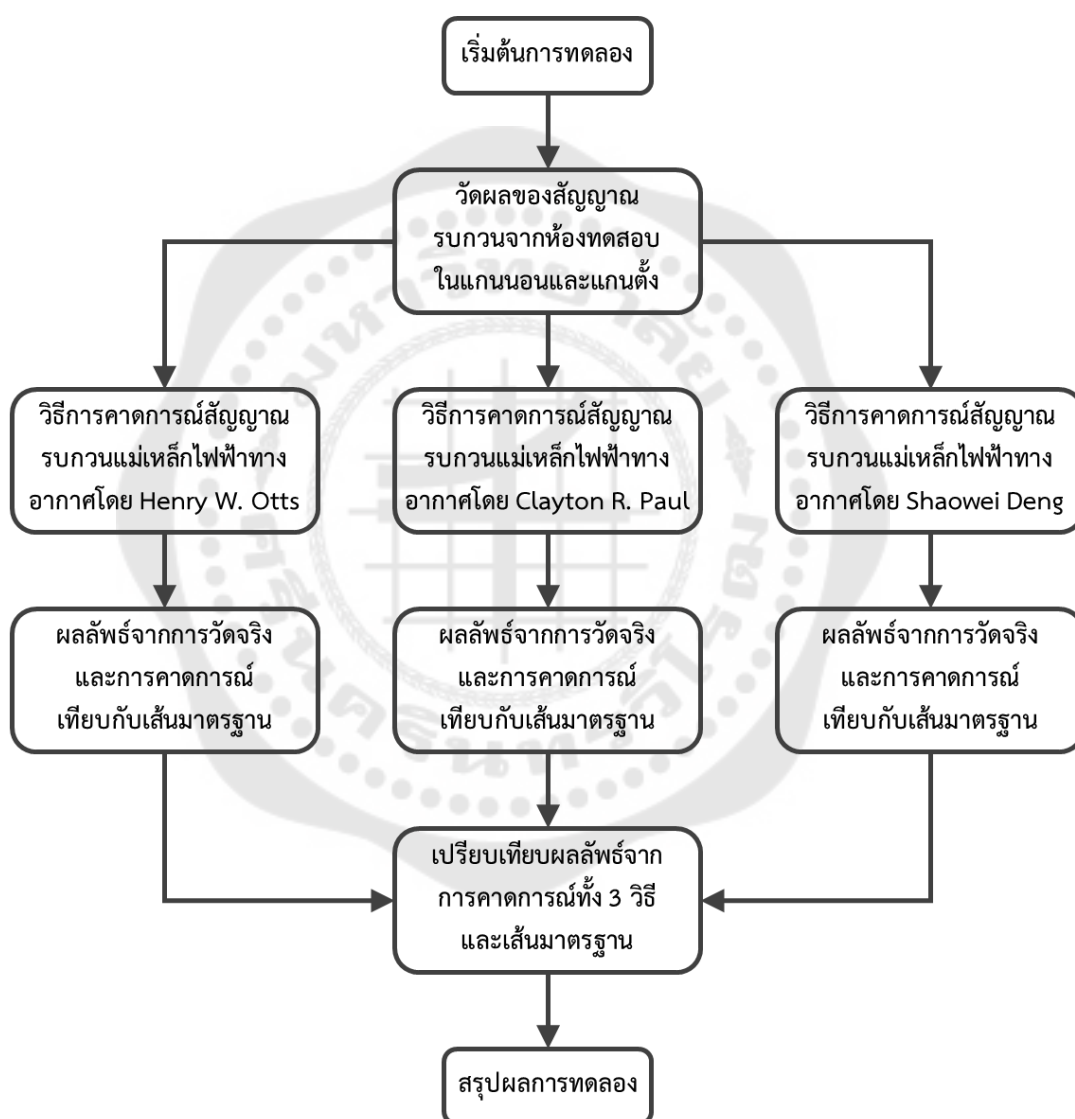
การเปรียบเทียบผลการวัดจากห้องทดสอบในแนวนอนและแนวตั้ง เทียบกับผลจากการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยวิธีของ Shaowei Deng และเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak)

การเปรียบเทียบผลการวัดจากห้องทดสอบในแนวนอนและแนวตั้ง เทียบกับผลจากการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของทั้ง 3 วิธี และเทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak)

4.1 แผนการทดลองวัดผลการคาดการณ์สัญญาณรบกวนทางอากาศในแต่ละรูปแบบ

วิธีการคาดการณ์ของ 3 วิธีข้างต้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่ได้จากห้องปิดกั้นคลื่นสนามไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อน ซึ่งการ

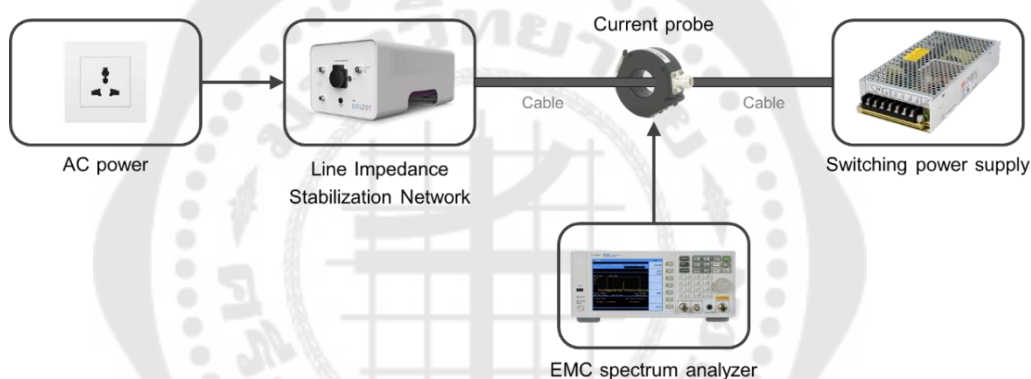
วัดผลจากห้องทดสอบดังกล่าวจะมีวิธีการวัดในแนวนอน (horizontal) และแบบแนวตั้ง (vertical) จากนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการคาดการณ์และห้องวัด จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐาน โดยทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการแสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบการคาดการณ์ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตชิง ขั้นตอนการทดลองแสดงตามแผนผังด้านล่างดังภาพประกอบที่ 39



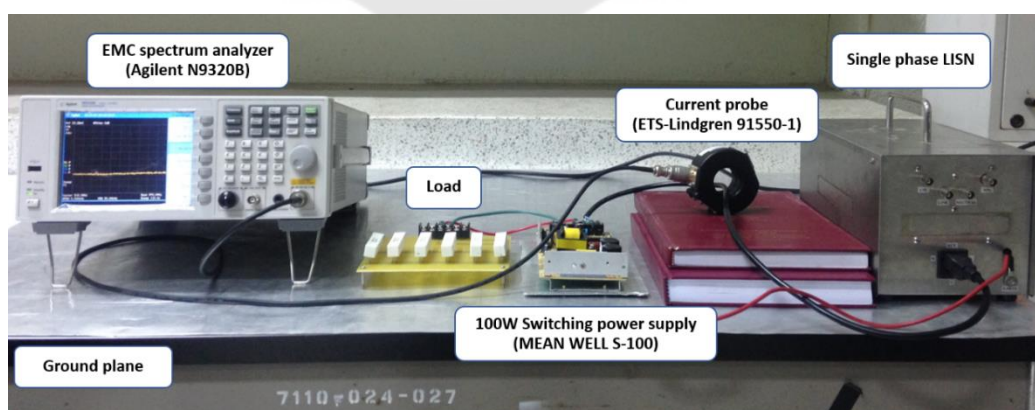
ภาพประกอบ 39 แผนผังการทดลอง

4.2 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อวัดกระแสไหลมผลรวม

ในการที่จะได้ค่ากระแสเพื่อเอามาใช้ในการคำนวณ จะสามารถหาได้สายเคเบิลที่เชื่อมต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าคือ แหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซึ่งที่เชื่อมต่อเข้ากับโหลด ซึ่งลักษณะการเกิดกระแสดังกล่าวจะเป็นลักษณะของกระแสไหลมผลรวมในระบบ โดยแหล่งกำเนิดสัญญาณจะถูกจ่ายไฟ โดยเชื่อมต่อกับเครื่องโครงข่ายเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (line impedance stabilization network, LISN) จากนั้นจะใช้โพรบกระแส (current probe) วัดที่สายเคเบิลตรงบริเวณกลางสาย ซึ่งค่ากระแสของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าในสายที่ถูกวัดด้วยโพรบ จะไปแสดงผลในเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (EMC spectrum analyzer) การจัดวางอุปกรณ์ตามวิธีข้างต้นจะถูกแสดง ดังภาพประกอบที่ 40 และ 41



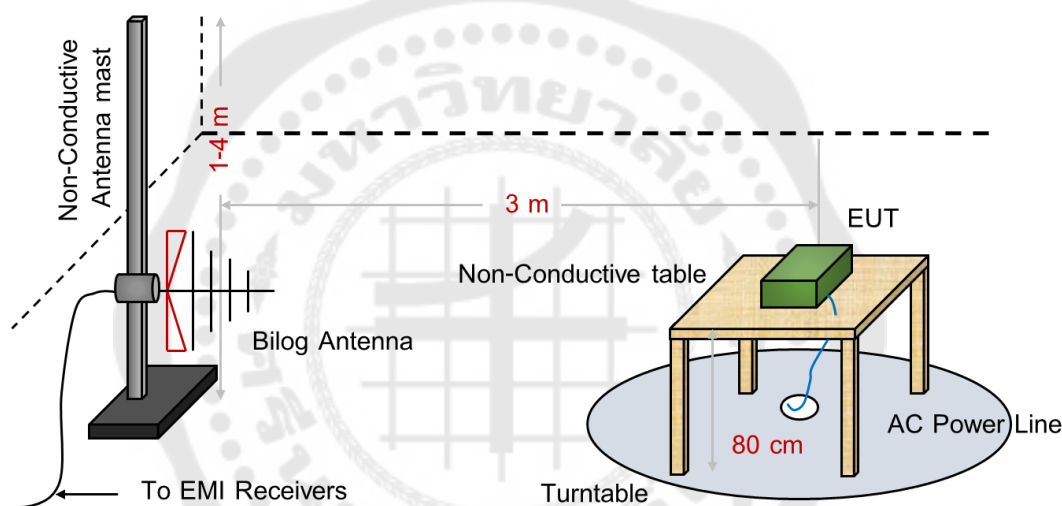
ภาพประกอบ 40 แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อวัดกระแสไหลมผลรวมจากสายเคเบิลที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซึ่ง



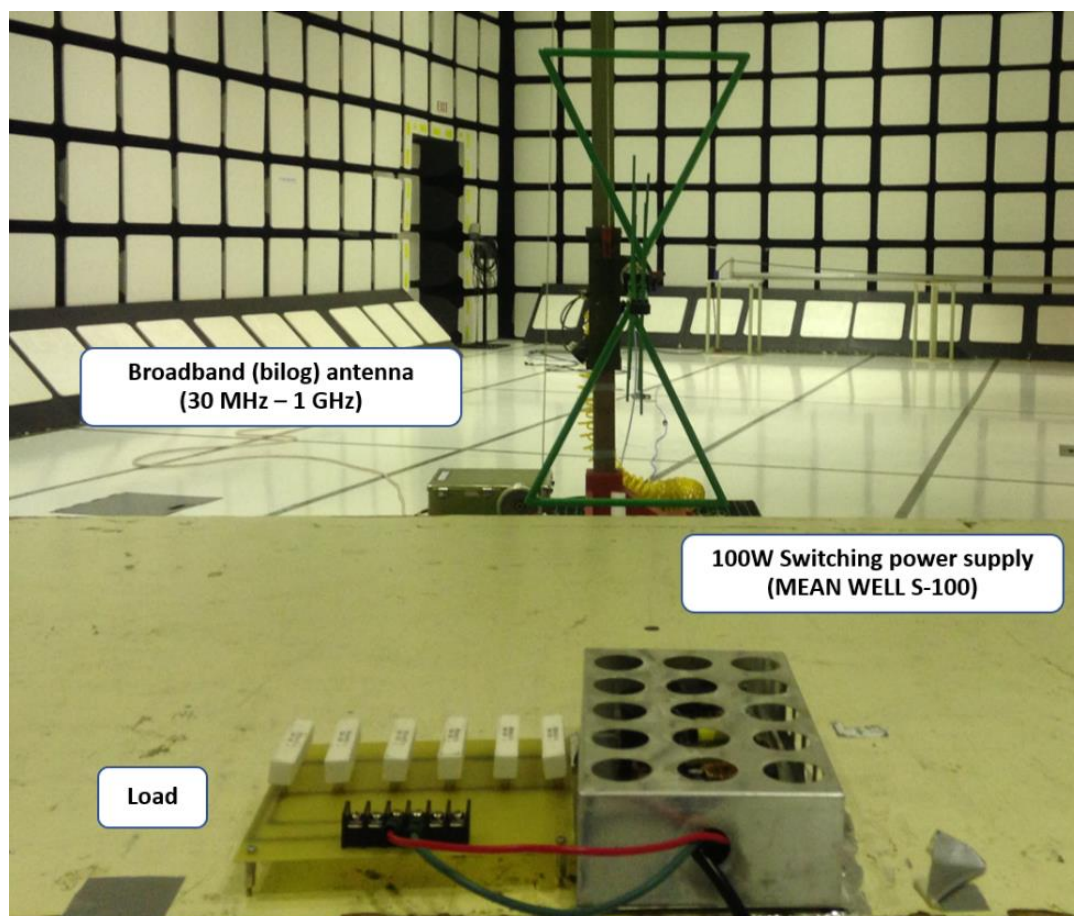
ภาพประกอบ 41 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบเพื่อวัดกระแสไหลมผลรวมจากสายเคเบิลที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซึ่ง

4.3 รูปแบบการทดลองการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ

ในการทดสอบได้ใช้สายเคเบิลที่มีความยาว 1 เมตร ซึ่งจะถูกระบุว่าเป็นอุปกรณ์ทดสอบ (EUT) วางอยู่บนโต๊ะสูง 80 เซนติเมตร ซึ่งต้องมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า โดยทำการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยเสาอากาศชนิด Bi-Log ซึ่งรองรับการใช้งานในย่านความถี่ 30 MHz ถึง 1 GHz โดยวางตั้งห่างจากอุปกรณ์ทดสอบเป็นระยะ 3 เมตร ตามมาตรฐาน CISPR 22 Class B (quasi-peak) ดังภาพประกอบที่ 42 สำหรับการทดลองทั้งหมดนี้จะกระทำอยู่ในห้องปิดกันคลื่นสนามไฟฟ้าแบบกึ่งไร้คลื่นสะท้อน ดังภาพประกอบที่ 43 และจากนั้นจะได้ผลการวัดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่อยู่ในย่านที่กำหนด



ภาพประกอบ 42 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องทดสอบ

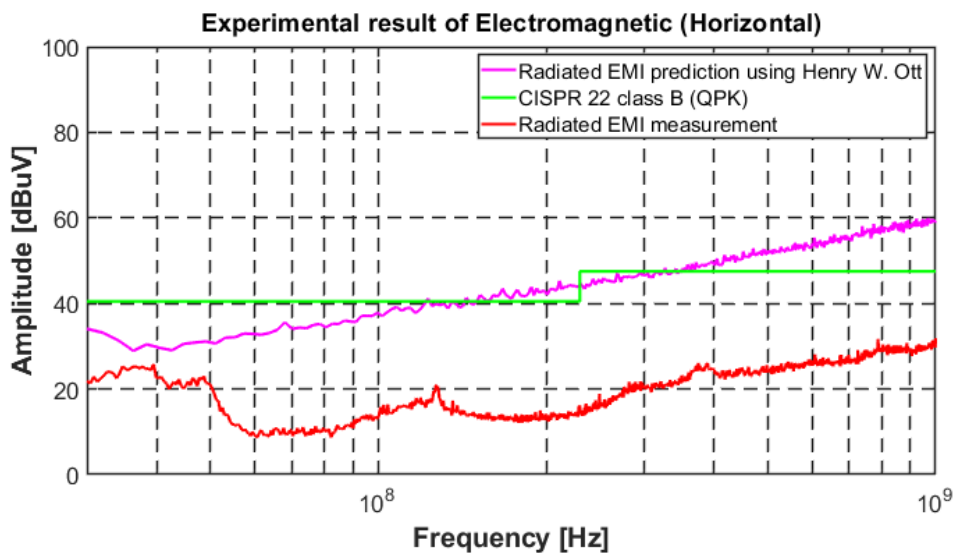


ภาพประกอบ 43 การวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลัง
สวิตซ์ในห้องทดสอบจริง

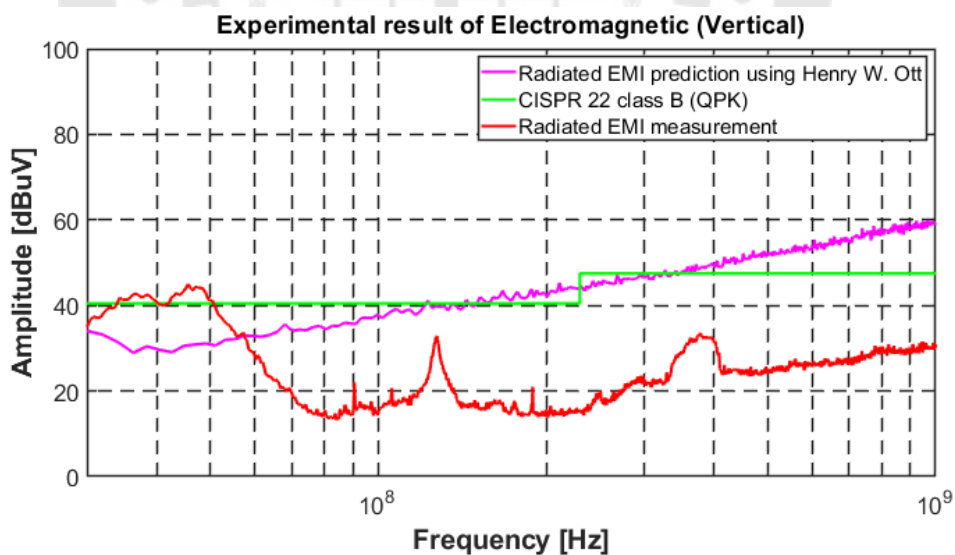
4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองวงจรของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ ในแต่ละกรณี

ในการทดลองนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลการวัดจากห้องทดสอบตามแนวนอนและแนวตั้ง เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และเปรียบเทียบกับผลการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศโดยใช้วิธี ดังนี้

4.4.1 กรณีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของ Henry W. Ott

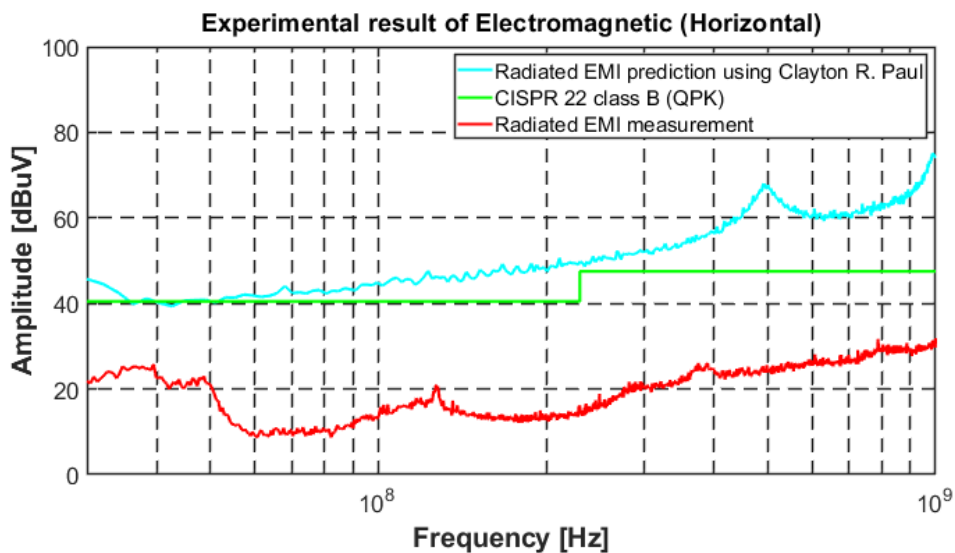


ภาพประกอบ 44 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Henry W. Ott เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวนอน

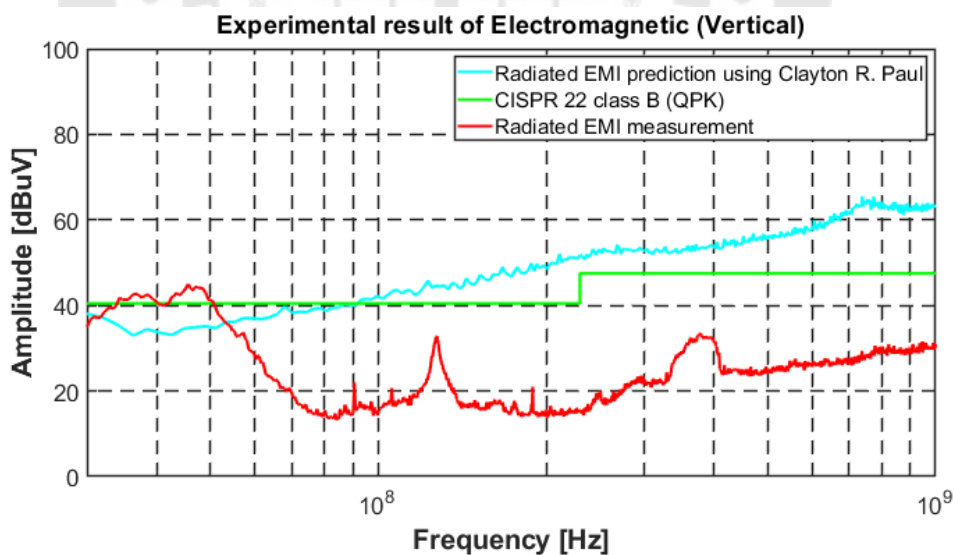


ภาพประกอบ 45 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Henry W. Ott เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวตั้ง

4.4.2 กรณีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของ Clayton R. Paul

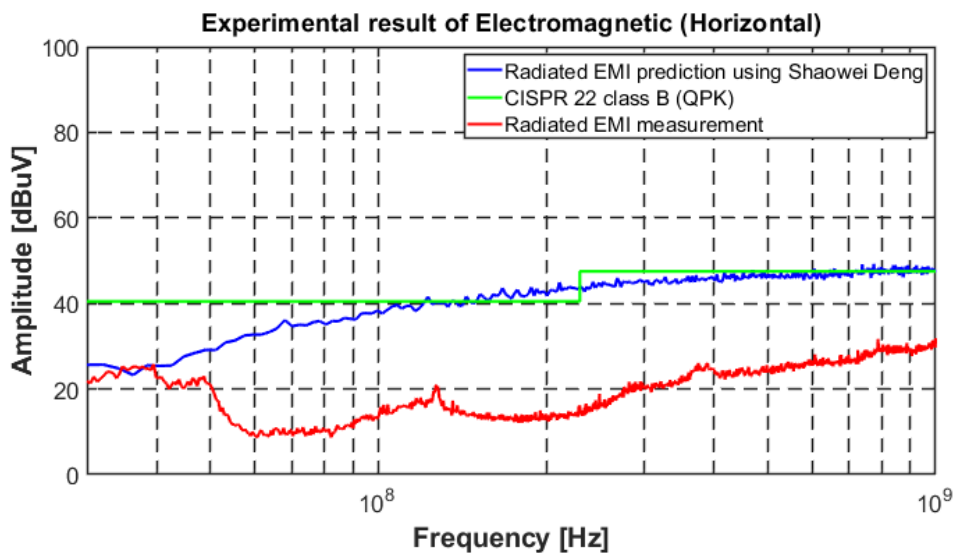


ภาพประกอบ 46 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Clayton R. Paul เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวนอน

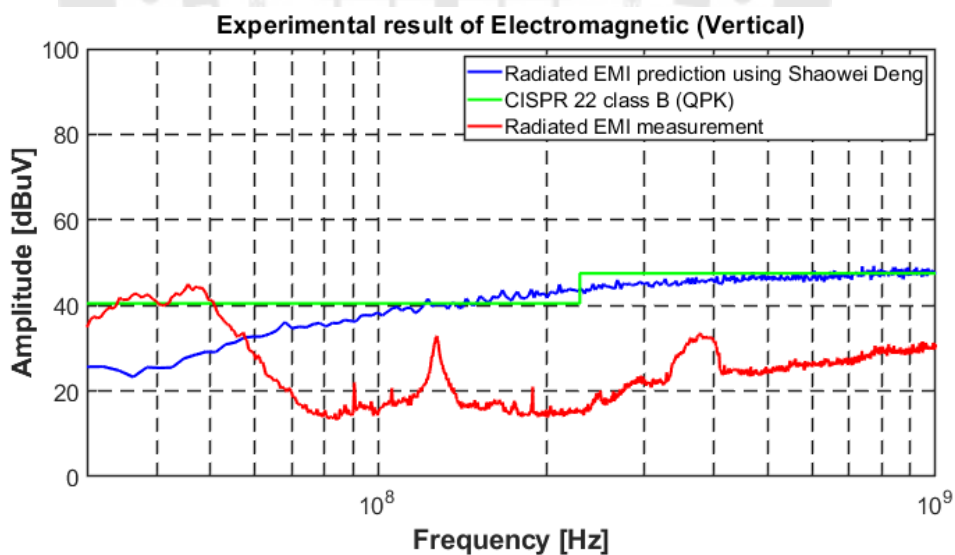


ภาพประกอบ 47 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Clayton R. Paul เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวตั้ง

4.4.3 กรณีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศของ Shaowei Deng

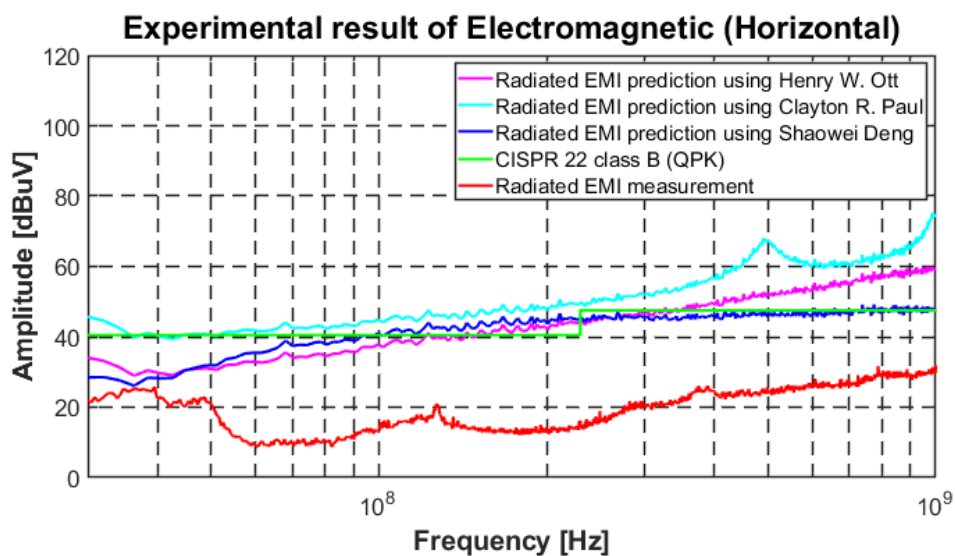


ภาพประกอบ 48 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Shaowei Deng เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวนอน

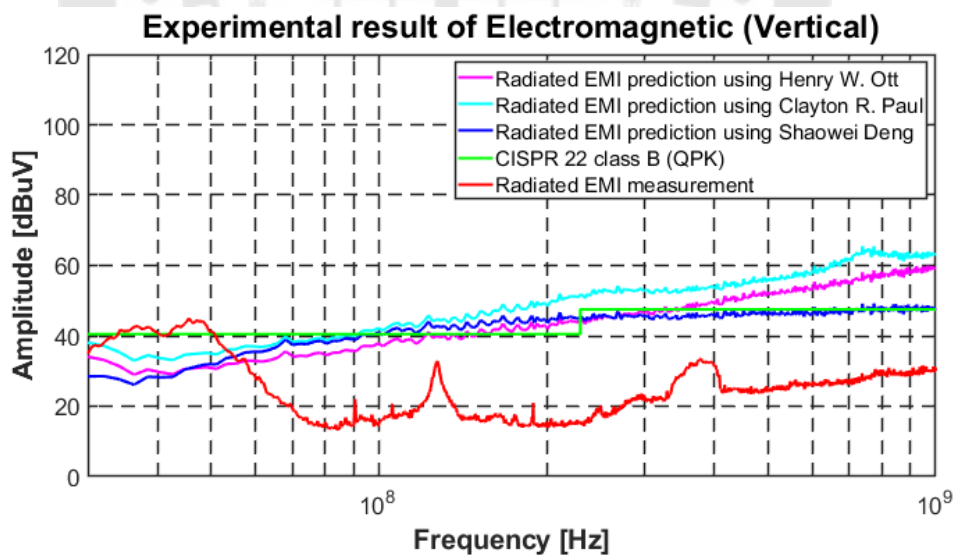


ภาพประกอบ 49 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Shaowei Deng เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวตั้ง

4.4.4 กรณีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศโดยของทั้ง 3 วิธี



ภาพประกอบ 50 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของทั้ง 3 วิธี เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวนอน



ภาพประกอบ 51 ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของทั้ง 3 วิธี เทียบกับเส้นมาตรฐาน CISPR 22 class B (quasi-peak) และผลการวัดจริงในห้องทดสอบตามแนวตั้ง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่องการศึกษาเทคนิคการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ โดยอาศัยผลการวัดกระแสไหลมอดผลร่วมสำหรับระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อนำมาใช้ในการคาดการณ์ผลลัพธ์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ทดสอบ โดยจะทำการศึกษาวิธีการคาดการณ์ที่มีอยู่แล้ว 3 วิธี ซึ่งวิธีการคาดการณ์ในแต่ละแบบจะถูกเปรียบเทียบกับผลจากการวัดจากห้องทดสอบตามมาตรฐานสากลเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความแม่นยำและมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงมากที่สุด

5.1 อภิปรายผลการทดลอง

ในการทดสอบของงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่ได้จากการคาดการณ์กับผลที่วัดได้จากห้องทดสอบ โดยผลจากการทดลองทั้งหมดที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 50 และ 51 จะเห็นได้ว่าผลการวัดตามแนวตั้งในย่านความถี่ 30 MHz ถึง 55 MHz แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์จากการวัดค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซึ่งนั้นมีค่าเกินเส้นมาตรฐาน แต่ผลลัพธ์จากการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศในแต่ละวิธีกลับมีค่าต่ำกว่าเส้นมาตรฐานซึ่งทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่คาดการณ์ของทั้ง 3 วิธี ยังไม่มีความแม่นยำเพียงพอเมื่อเทียบกับผลวัดจริง ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบจะถูกอธิบายตามวิธีการคาดการณ์ของแต่ละวิธี ดังนี้

5.1.1 ผลจากการทดลองด้วยวิธีการคาดการณ์ของ Henry W. Ott

วิธีการนี้จะทำการพิจารณากระแสที่วัดได้จากโพรบที่ใช้วัดกระแสไหลมอดผลร่วม และนำมาคำนวณในสมการเพื่อหาค่าของสนามไฟฟ้าระยะไกล โดยรูปแบบของสมการที่ใช้คำนวณจะอ้างอิงจากสมการของไดโพลไฟฟ้า ซึ่งมีการพิจารณาแหล่งกำเนิดให้เป็นองค์ประกอบเล็ก ๆ ของความยาวไดโพล โดยข้อดีของวิธีดังกล่าวนี้จะมีการคำนวณเป็นไปตามทฤษฎีซึ่งมีรูปแบบที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่ข้อเสียของวิธีการนี้ก็กลับมีผลลัพธ์ที่ได้จากการคาดการณ์สูงเกินจากผลที่ได้จากการวัดจริง ดังภาพประกอบที่ 44 และ 45 เนื่องจากการคำนวณในวิธีนี้มีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดจริงน้อยเกินไป

5.1.2 ผลจากการทดลองด้วยวิธีการคาดการณ์ของ Clayton R. Paul

สำหรับการคาดการณ์ในวิธีนี้จะมีการคำนวณที่มีลักษณะคล้ายกับวิธีการของ Henry W. Ott ในช่วงแรกและจากนั้นจะมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการวัดกระแสไหลวนผลรวมและการโพลาไรซ์เข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อให้เหมาะสมกับผลวัดจริง แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการคาดการณ์กลับสูงเกินจากผลวัดจริงในย่านความถี่ตั้งแต่ 55 kHz และสูงกว่าค่าที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Henry W. Ott ประมาณ 20 dB μ V ในแนวแกนตั้งและ 10 dB μ V ในแนวแกนนอน ส่วนในช่วงความถี่ตั้งแต่ 200 MHz เป็นต้นไปจะเห็นได้ชัดว่า การคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยวิธีของ Clayton R. Paul ทั้งตามแนวนอนและแนวตั้ง ได้ให้ผลลัพธ์ที่สูงเกินจากค่าที่วัดจริงประมาณ 30 dB μ V ดังภาพประกอบที่ 46 และ 47 เนื่องจากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Clayton R. Paul มีข้อจำกัดในเรื่องโพลาไรซ์ที่ใช้วัดกระแสไหลวนผลรวม ซึ่งรองรับการใช้งานในย่านความถี่ได้สูงสุดเพียงแค่ 100 MHz โดยประมาณ ดังภาพประกอบที่ 31 หากใช้งานในย่านความถี่ที่สูงเกินกว่าที่กำหนดอาจส่งผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ในการส่งผ่านนั้นมีความแม่นยำไม่เพียงพอต่อการคำนวณ ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Clayton R. Paul มีค่าที่สูงกว่าผลจากการวัดจริงมากเกินไป

5.1.3 ผลจากการทดลองด้วยวิธีการคาดการณ์ของ Shaowei Deng

ในทางกลับกันจะเห็นได้ชัดว่าวิธีการของ Shaowei Deng ที่ใช้การคำนวณมีการพิจารณาในเรื่องแฟคเตอร์ของความยาวสายเคเบิล และแฟคเตอร์ของขนาดแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งส่งผลให้ผลการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยวิธีของ Shaowei Deng มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าของสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศที่เกิดจากแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ซิงค์มากขึ้น ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคาดการณ์ในช่วงย่านความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 50 MHz มีค่าใกล้เคียงกับผลวัดจริงโดยห่างประมาณ 10 dB μ V ในแนวแกนนอน และมีค่าต่ำกว่าผลวัดจริงประมาณ 20 dB μ V ในแนวแกนนอน แต่ผลลัพธ์โดยรวมยังคงห่างไกลจากค่าที่วัดจริง เนื่องจากการคำนวณในวิธีนี้พิจารณาค่าอาร์เรย์แฟคเตอร์ที่มีการกำหนดค่า โดยพิจารณาจากความถี่สูงสุดคือ 500 MHz จึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ เกิดความแตกต่างจากผลวัดจริงประมาณ 20 dB μ V และในช่วงความถี่ตั้งแต่ 200 MHz เป็นต้นไปจะมีผลลัพธ์ที่ได้จากการคาดการณ์สูงใกล้เคียงกับผลวัดจริงมากยิ่งขึ้น ดังภาพประกอบที่ 48 และ 49 ซึ่งทำให้ความแม่นยำของวิธีนี้มีแนวโน้มที่ดีขึ้นสำหรับการใช้งานในย่านความถี่สูง

5.2 สรุปผลการทดลอง

การเปรียบเทียบด้วยวิธีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศทั้ง 3 วิธี ที่ทำการทดสอบกับแหล่งจ่ายกำลังสวิตซ์ และเทียบกับมาตรฐาน CISPR 22 Class B (quasi-peak) ซึ่งพบว่าวิธีการคาดการณ์ค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศด้วยวิธีของ Henry W. Ott มีความไม่ซับซ้อนในการคำนวณตามทฤษฎีโดโพลไฟฟ้า แต่ข้อเสียของวิธีนี้ยังมีผลลัพธ์ในการคาดการณ์ที่สูงเกินจากผลวัดจริง เนื่องจากการคำนวณในวิธีนี้มีการพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องจากในวัดจริงน้อยเกินไป สำหรับการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Clayton R. Paul จะมีลักษณะคล้ายกับวิธีการของ Henry W. Ott ในช่วงแรก โดยจะมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการของวัดกระแสไหลมผลรวม และการโพลไรซ์เข้ามาเกี่ยวข้องในการคำนวณเพื่อให้เหมาะสมกับการวัดจริง แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการคาดการณ์ยังคงสูงเกินจากผลวัดจริง โดยเฉพาะในย่านความถี่สูงตั้งแต่ 200 MHz เป็นต้นไป ผลจากการคาดการณ์จะสูงเกินกว่าผลวัดจริงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีข้อจำกัดของโพรบกระแสที่ใช้งานได้ในย่านความถี่ไม่เกิน 250 MHz และสุดท้ายเป็นวิธีการคาดการณ์ด้วยวิธีของ Shaowei Deng ที่มีการจำลองการเกิดสัญญาณรบกวนในรูปแบบสายอากาศโมโนโพล โดยมีการกำหนดค่าในฟังก์ชันของอาร์เรย์แพคเตอร์ให้มีค่าสูงสุด พร้อมทั้งมีการพิจารณาค่าตัวประกอบของสายเคเบิลและแผ่นวงจรพิมพ์มาใช้ในการคำนวณ ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคาดการณ์มีค่าใกล้เคียงกับผลวัดจริงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 วิธี แต่ผลลัพธ์โดยรวมยังคงสูงเกินกว่าค่าที่วัดได้ในย่านความถี่สูง เนื่องจากการพิจารณาพารามิเตอร์ไม่ละเอียดและมากพอต่อการวัดจริง

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวิธีการคาดการณ์ที่มีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการวัดอุปกรณ์จริงเพิ่มเข้ามาในการคำนวณ ผลลัพธ์จากการคาดการณ์จะมีแนวโน้มเข้าใกล้กับผลลัพธ์จากการวัดจริงมากที่สุด แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการคาดการณ์โดยรวมยังคงมีค่าสูงเกินกว่าผลวัดจริง ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่สูงเกินไป แนวทางในการปรับปรุงและแก้ไขวิธีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ อาจจะต้องมีการพิจารณาพารามิเตอร์ให้มากขึ้น เพื่อจำลองการทดสอบและผลกระทบอื่น ๆ ให้ตรงกับสถานการณ์จริงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นวิธีการคาดการณ์สัญญาณรบกวนทางอากาศของ Shaowei Deng จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้คาดการณ์ เนื่องจากมีแนวโน้มค่าสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศสูงเข้าใกล้ค่าวัดจริงมากที่สุด และมีพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น อาร์เรย์แพคเตอร์ ตัวประกอบของสายเคเบิลและวงแผ่นวงจรพิมพ์ ที่เหมาะสมกับการวัดอุปกรณ์จริงในห้องทดสอบ

5.4 งานในอนาคต

เนื่องจากผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ผลที่มีความแม่นยำพอสมควร ยังมีหลาย ๆ ปัจจัยที่ควรได้รับการปรับปรุงแก้ไข ซึ่งอาจจะต้องทำการค้นคว้าหาวิธีการที่มีมุมมองของโจทย์ปัญหาที่แตกต่างจากเดิม ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของ วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ การวัดผลที่ถูกต้อง เป็นต้น โดยหากได้วิธีการคำนวณที่ปรับปรุงให้ดีขึ้นแล้ว จะสามารถนำมาต่อยอดใช้ในการออกแบบวัสดุเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าทางอากาศ เพื่อสร้างประโยชน์ให้แก่ผู้ออกแบบ หรือวงการอุตสาหกรรมด้านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอาจจะนำมาใช้งานโดยการสร้างขึ้นในรูปแบบของโปรแกรมที่เป็นซอฟต์แวร์ต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานได้เบื้องต้น เพื่อให้ง่ายต่อการประเมินผลิตภัณฑ์ต้นแบบก่อนที่จะนำไปห้องทดสอบอุปกรณ์



บรรณานุกรม

1. Thomas DWP, Smartt C, Greedy S, editors. Characterisation of radiated fields from PCBs in the time domain. 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC); 2015 16-22 Aug. 2015.
2. Ravelo B, Liu Y, Jastrzebski AK. PCB Near-Field Transient Emission Time-Domain Model. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2015;57(6):1320-8.
3. Huang Q, Liu Y, Li L, Wang Y, Wu C, Fan J, editors. Radio frequency interference estimation using transfer function based dipole moment model. 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC); 2018 14-18 May 2018.
4. Automotive EMC guide. Interference Technology. 2018.
5. Hegarty T. An overview of radiated EMI specifications for power supplies. In: Instruments T, editor. Texas Instruments, Phoenix, AZ2018.
6. Alongkorn Promtee PN, Sarun Choocadee, Somsak Akatimagool. Simulation Software for Electromagnetic Wave Propagation in Conducting Cavity Using Method of Moments. Journal of KMUTNB. 2014;24:257-67.
7. Chareonsap C. Analysis of electromagnetic field problems for waveguides by the finite element method [Thesis]. Thailand: Chulalongkorn University; 1995.
8. Sriphanlam M. Analysis of a microstrip antenna with an arbitrarily shaped patch by using the finite element method [Thesis]. Thailand: Chulalongkorn University; 1996.
9. Hockanson DM, Drewniak JL, Hubing TH, Doren TPV. FDTD modeling of common-mode radiation from cables. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1996;38(3):376-87.
10. Jianqing W, Fujiwara O, Sasabe K, editors. A simple method for predicting common-mode radiation from a cable attached to a conducting enclosure. APMC 2001 2001 Asia-Pacific Microwave Conference (Cat No01TH8577); 2001 3-6 Dec. 2001.
11. Park HH, Park H, Lee HS. A Simple Method of Estimating the Radiated Emission From a Cable Attached to a Mobile Device. IEEE Transactions on Electromagnetic

Compatibility. 2013;55(2):257-64.

12. Corporation A. Ansoft High Frequency Structure Simulator v9 User's Guide 2013

[Available from: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.

13. HyperWorks A. FEKO User's Manual 7.0. Stellenbosch, South Africa.

14. Corporation C. Microwave Studio. ver. 2011 Darmstadt, Germany 2011

[<http://www.cst.com>].

15. Sayegh AM, Jenu MZBM, Sapuan SZ, Dahlan SHB. Analytical Solution for Maximum Differential-Mode Radiated Emissions of Microstrip Trace. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016;58(5):1417-24.

16. Ott HW, Ott HW. Electromagnetic compatibility engineering: John Wiley & Sons; 2009.

17. Deng S, Hubing T, Beetner D. Estimating Maximum Radiated Emissions From Printed Circuit Boards With an Attached Cable. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2008;50(1):215-8.

18. Paul CR. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. ed: Wiley-Interscience; 2006.

19. Tarateeraseth V, Padungtin W. Three-Phase EMI Filter Designs for Three-Phase Induction Motor Drives. International Review of Electrical Engineering (IREE). 2019;14(2).

20. ชารัตริศเรษฐ ว. ปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. Technology. 2011;4.

21. (EIT) EloT. Practical Shielding, EMC/EMI, Noise Reduction, Earthing and Circuit Board Layout [Available from: <https://www.eit.edu.au/resources/practical-shielding-emc-emi-noise-reduction-earthing-and-circuit-board-layout/>.

22. นระมาตย์ ว. การวิเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (X-Pole antennas) ที่ออกแบบสร้างจากอลูมิเนียมและทองแดง: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ; 2559.

23. Srisathit K, Wongsiritorn P. Design and Development of Circular Antenna for FM Broadcasting Radio: Rajamangala University of Technology Rattanakosin; 2018.

24. เสนาวงค์ แฉจล. การลดขนาดของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น (Straight)

แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2556.

25. สว่างวัฒนกิจ โ, หงษา อ, ทะสังชา ภ. การออกแบบโพรงช่องว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีเจาะรูปแบบคาบบนแผ่นกราวด์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2558.

26. กะการดี ด, จิตอารี ว. การออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยี LoRa: มหาวิทยาลัยบูรพา; 2560.

27. วงศ์ธรรม์ ร. หลักการพื้นฐานที่สำคัญของสายอากาศและการวิเคราะห์ผลการทดสอบสายอากาศรับสัญญาณฯ. เผยแพร่ความรู้และแลกเปลี่ยนความเห็นเกี่ยวกับการออกแบบและการทดสอบสายอากาศรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล; อาคารหอประชุมชั้น 2 สำนักงาน กสทช.: PTEC; 2559.

28. NICS SALE & SERVICE CO. L. Low Noise Block Down Converter (LNB) [Available from: <http://www.nics-sat.com/index.php?lay=show&ac=article&id=150811>].

29. EMC Ao. EMC Standards [Available from: <https://www.academyofemc.com/emc-standards>].

30. Railton CJ, Schneider JB. An analytical and numerical analysis of several locally conformal FDTD schemes. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1999;47(1):56-66.

31. Ittiponsopar W. Study of shape functions for electric field calculation by the boundary element method: Chulalongkorn University; 2003.

32. Garg R. Analytical and Computational Methods in Electromagnetics. Boston, [Mass.]: Artech House, Inc; 2008.

33. Balanis CA. Antenna theory : analysis and design. 3rd ed. ed: John Wiley; 2005.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

วราเทพ ผดุงถิ่น

วัน เดือน ปี เกิด

03 พฤศจิกายน 2537

สถานที่เกิด

กรุงเทพมหานคร

วุฒิการศึกษา

พ.ศ. 2560

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

