

การพัฒนาระบบตรวจหาจุดที่เกิดเหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิตแบบไร้สายสำหรับสาย
งานการผลิตฮาร์ดดิสก์
**Development of a Wireless Electrostatic Discharge (ESD) Events Locator System for
Hard Disk Assembly Line**

กิตติคุณ ทองพูล
Kittikhun Thongpull

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University
2553**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาระบบตรวจหาจุดที่เกิดเหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิตแบบไร้สาย
 สำหรับสายงานการผลิตฮาร์ดดิสก์

ผู้เขียน นายกิตติคุณ ทองพูล

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณีฎฐา จินดาเพ็ชร)

.....ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย ทองหนู)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร. เลิศศักดิ์ เลขวัต)

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกลม ชีรภาพจรเดช)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณีฎฐา จินดาเพ็ชร)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกลม ชีรภาพจรเดช)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
 หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแบบตรวจสอบหาจุดที่เกิดเหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิตแบบไร้สายสำหรับสายงานการผลิตฮาร์ดดิสก์
ผู้เขียน	นายกิตติคุณ ทองพูล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบระบบสำหรับตรวจสอบตำแหน่งจุดที่เกิดเหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิต (**Electrostatic Discharge: ESD**) แบบไร้สายสำหรับสายงานการผลิตฮาร์ดดิสก์ 2 วิธีการ วิธีการแรกอาศัยการวัดความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (**Electromagnetic Interference: EMI**) เนื่องจากการเกิด **ESD** ในแต่ละครั้งจะแพร่ **EMI** ออกมาเสมอ วิธีการนี้ใช้ตัวตรวจวัด **EMI** จำนวน 4 ตัว วางรอบบริเวณเครื่องจักรที่ไม่สามารถนำอุปกรณ์วัดเข้าไปภายในได้ ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความแรงของสัญญาณ **EMI** ที่ตรวจวัดได้เทียบกับระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับกับจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** ในแต่ละตัวถูกนำไปคำนวณด้วยวิธีการทางตรีโกณมิติเพื่อหาพิกัดตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** วิธีการที่สองอาศัยการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ (**Received Signal Strength Indicator: RSSI**) ของโมดูลสื่อสารไร้สาย วิธีการนี้ใช้ตัวตรวจวัด **EMI** จำนวน 1 ตัว เชื่อมต่อกับเซนเซอร์ไร้สาย แล้ววางให้เคลื่อนที่ไปกับสายพานของสายงานการผลิตเพื่อตรวจวัด **EMI** ตลอดสายงานการผลิต และใช้เซนเซอร์ไร้สายอีก 3 ตัว ติดตั้งรอบนอกบริเวณสายงานการผลิตดังกล่าว เพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์ไร้สายที่เคลื่อนที่อยู่บนสายพานด้วยวิธีการทางเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย จากการทดสอบในสภาพแวดล้อมภายในโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์พบว่า วิธีการแรกสามารถทำงานได้ในพื้นที่เพียง **1.5m×1.5m** ระบบสามารถให้คำตอบที่ถูกต้องโดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ **10.3cm** แต่วิธีการที่สองสามารถทำงานได้ในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่กว่าแบบแรกโดยสามารถหาคำตอบของจุดเกิดเหตุการณ์ในพื้นที่ **10m×10m** ด้วยความละเอียด **50cm**

คำสำคัญ การระบุตำแหน่ง, เหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้า, การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า, เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

Thesis Title **Development of a Wireless Electrostatic Discharge (ESD) Events
Locator System for Hard Disk Assembly Line**

Author **Mr. Kittikhun Thongpull**

Major Program **Electrical Engineering**

Academic Year **2009**

ABSTRACT

This research presents a development of a wireless Electrostatic Discharge (ESD) events locator system for hard disk assembly line. The designed system is based on two methods: an Electromagnetic Interference (EMI) strength based method and a Received Signal Strength Indicator (RSSI) based method. The former uses four EMI detectors placed around a manufacturing machine that cannot be entered by any instruments. The EMI signals are related to the distances between an ESD event and the EMI detectors. These signal are used for estimating the ESD event position by the Trilateration method as in the GPS (Global Positioning System). The later uses one wireless sensor node attached with an EMI detector moving along a manufacturing conveyor and three wireless sensor nodes for reference nodes placed cover the conveyor area. Once an ESD event is detected around the moving sensor node, the position is then estimated by the RSSI based localization method as in Wireless Sensor Networks (WSNs). From the tests in a real environment of HDD manufacturing, the EMI strength based method can properly work in the test field of 1.5m×1.5m and the average error was 10.3cm. In contrast, the RSSI based method can properly work in the larger area than the EMI strength based method. The test results show that the RSSI based method can estimate the positions of ESD events with 50 cm resolution in the 10m×10m test field.

Keywords: **Localization, Electrostatic Discharge, Electromagnetic Interference, Wireless Sensor Networks**

กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐา จินดาเพ็ชร ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษา และนำความรู้ในด้านการทำวิจัยเอกสาร ข้อมูลต่างๆเป็นอย่างดี รวมทั้งขัดเกลากะบวนกรคิดและให้กำลังใจในการแก้ปัญหาตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิกรม ชีรภาพจรเดช กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยเสมอมา รวมทั้งขัดเกลากะบวนกรคิดและให้กำลังใจในการแก้ปัญหาลดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย ทองหนู ประธานกรรมการสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยเสมอมา และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เลิศศักดิ์ เลขวัต ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ วิจัยผลงาน และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (IUCRC in HDD Components) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่กรุณามอบทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าระหว่างการศึกษา และงบประมาณในการวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ บริษัทซีเกต(ประเทศไทย) จำกัด มหาชน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน รวมถึงเพื่อน พี่ น้อง ในภาควิชา ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและครอบครัว ที่ส่งเสริมสนับสนุน ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจที่ดีเยี่ยม และทุนทรัพย์แก่ข้าพเจ้าตลอดมาจนกระทั่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

กิตติคุณ ทองพูล

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1. ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2. การตรวจเอกสาร บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประเด็นวิจัย.....	2
1.3. ประเด็นวิจัย.....	10
1.3.1. การระบุตำแหน่งการเกิดเหตุการณ์ ESD โดยอาศัยการวัด ความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	11
1.3.2. การระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด.....	11
1.3.2.1. การหาระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดด้วยการเปรียบเทียบ RSSI จาก กำลังส่งที่ต่างกัน.....	12
1.3.2.2. การระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมด้วย ประยุกต์เครือข่ายประสาท.....	12
1.3.3. การระบุตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ ESD โดยอาศัยการประยุกต์ ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.....	13
1.4. วัตถุประสงค์.....	13
1.5. ขอบเขตการวิจัย.....	13
1.6. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	14
1.6.1. ระบบหาตำแหน่งโดยมีอุปกรณ์ตรวจวัดติดตั้งกับถาดวางอุปกรณ์.....	14
1.6.2. ระบบตรวจหาตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ ESD ที่ใช้ตัวตรวจจับ EML.....	15
1.7. แผนการดำเนินการวิจัย.....	16
2. ทฤษฎีและหลักการ.....	17
2.1. เหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิต.....	17
2.2. ศักย์ไฟฟ้าสถิต.....	18
2.2.1. การสะสมประจุแบบ Triboelectric.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
222 การสะสมประจุด้วยอ็อน.....	18
223 การสะสมประจุโดยตรง.....	19
224 การสะสมประจุด้วยสนามเหนี่ยวนำ.....	19
23 การคายประจุ.....	19
231. โมเดล HBM.....	19
232 โมเดล MM.....	20
233 โมเดล CDM.....	20
24 EMI ที่แพร่กระจายจากเหตุการณ์ ESD.....	21
241. EMF ที่ได้รับจากเหตุการณ์ ESD.....	23
25 ตัวตรวจจับเหตุการณ์ ESD.....	23
251. EMAware.....	24
26 เซนเซอร์ไหนดไร้สาย.....	25
27 กระบวนการหาตำแหน่งของเซนเซอร์ไหนด.....	27
28 การประมาณระยะห่าง.....	28
281. การประมาณระยะแบบ Range-free.....	28
282 การประมาณระยะแบบ Range-Based.....	29
2821. การวัดค่ามุมที่มาถึง.....	29
2822 การวัดเวลาที่มาถึง.....	29
2823 การค่าวัดความแรงสัญญาณวิทยุที่รับได้.....	29
29 การคำนวณตำแหน่งของเซนเซอร์ไหนด.....	30
291. ระเบียบวิธี Triangulation.....	30
292 ระเบียบวิธี Bounding-box.....	31
293 ระเบียบวิธี Trilateration.....	31
210 กระบวนการชี้ตำแหน่ง.....	33
2101. การคำนวณแบบทำซ้ำ.....	33
2102 อัลกอริทึมการคำนวณแบบกลุ่ม.....	33
2103 การเพิ่มความแม่นยำโดยอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
211. การแพร่ของสัญญาณวิทยุ.....	34
211.1. กำลังวิทยุที่รับได้ในแบบจำลอง Free Space	35
211.2. สนามการสื่อสาร.....	36
211.3. การสะท้อนสัญญาณวิทยุกับพื้นโลกในแบบจำลอง Two Ray	37
211.4. แบบจำลองการสูญเสียของสัญญาณวิทยุ.....	40
211.5. แบบจำลองการสูญเสียของสัญญาณวิทยุในพื้นที่ภายในอาคาร.....	41
212. โมเดลสื่อสารไร้สาย CC2500	43
212.1. การวัดค่า RSSI	44
212.2. คุณลักษณะของเสาอากาศ.....	47
213. การลดผลความผิดพลาดของข้อมูล RSSI	49
3. ระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตโดยอาศัยการวัดความแรง ของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า	51
3.1. แนวคิดเบื้องต้นของการออกแบบระบบ	51
3.2. การทดลอง	51
3.2.1. การทดลองวัดรูปสัญญาณของเหตุการณ์ ESD	53
3.2.2. การวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI จากเหตุการณ์ ESD ที่ระยะห่าง ระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์และตัวตรวจวัดต่างกัน	55
3.2.3. การวัดแอมพลิจูดจากตัวตรวจจับทั้ง 4 ตัว	57
3.2.4. ทดลองหาคำตอบของพิกัดด้วย Trilateration	59
3.2.5. การตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบจากการคำนวณพิกัดตำแหน่ง ของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD	62
3.3. การทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะสัญญาณ ESD	64
3.3.1. การทดลองวัดสัญญาณรอบข้างเสาอากาศ	64
3.3.2. การทดลองวัดสัญญาณ ESD ในช่วงเวลายาวนาน	65
3.4. ปรับปรุงระบบระบุตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ ESD	67
3.5. สรุป	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4 ระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้ เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.....	70
41. แนวคิดเบื้องต้นของการออกแบบระบบ.....	70
42 ระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด.....	71
421. การจำลองโมเดลการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ.....	72
422 การจำลองการทำงานของแบบจำลอง Free Space	73
423 การจำลองการสะท้อนสัญญาณวิทยุกับพื้นโลกในแบบจำลอง Two Ray	73
424 การจำลองโมเดล log-normal distribution ที่มีการคิด shadowing และ Multipath	75
425 การทดลองวัดค่า RSSI ในสภาพแวดล้อมแบบอุตสาหกรรม.....	76
426 การทดลองวัดค่า RSSI โดยเปรียบเทียบกับกำลังส่งที่แตกต่างกัน.....	77
427 การออกแบบระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วยการประยุกต์ใช้ Neural Network	79
428 รัศมีการตรวจจับเหตุการณ์ ESD ความละเอียดของพิกัดตำแหน่งของระบบ ระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วยการประยุกต์ใช้ Neural Network	80
43 การทดลอง.....	81
431. ทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วย การประยุกต์ใช้ Neural Network	81
432 ทดสอบระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิต ด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.....	84
44 สรุป.....	85
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	86
51. สรุปผลการวิจัย.....	86
52 ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.21. ความผิดพลาดของระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิต โดยอาศัยการวัดความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่พื้นที่ 3m×3m หรือมากกว่า.....	89
5.22 ผลของเหตุการณ์ ESD ในระยะใกล้ที่รบกวนต่อระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้เครื่องข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.....	89
บรรณานุกรม.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	94

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2-1	ค่า RSSI offset	46
2-2	ค่า VSWR ของเสาอากาศ.....	48
2-3	ค่า Return Loss ของเสาอากาศ.....	48
3-1	ผลทดลองหาคำตอบของพิกัดด้วย Trilateration	59
3-2	ผลการคำนวณหาแรงดันของเหตุการณ์ ESD	69

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1-1 การทดลองเพื่อวัดรูปกระแสของการดิสชาร์จ.....	4
1-2 การทดลองเพื่อวัดรูปสัญญาณการแพร่ EMI จากการดิสชาร์จ.....	5
1-3 สัญญาณที่ได้รับจากการแพร่ EMI จากเหตุการณ์ ESD ที่เสาอากาศทั้งสี่.....	6
1-4 โครงสร้างของ Electrostatic Discharge Event Locator	6
1-5 โครงสร้างของ Electrostatic Discharge Monitoring	7
1-6 ESD Event Detector	8
1-7 กระบวนการหาตำแหน่งของ Electrostatic Discharge Locating Systems	8
1-8 กลไกการพิจารณาของ Neighborhood Intersection	9
1-9 ตัวอย่างการหาตำแหน่งด้วยระเบียบวิธี Trilateration	10
1-10 ระบบหาตำแหน่งโดยมีอุปกรณ์ตรวจวัดติดตั้งกับดาววางอุปกรณ์.....	15
1-11 ระบบตรวจหาตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ ESD ที่ใช้ตัวตรวจจับ EMI.....	15
2-1 ภาพจำลองและวงจรมุมของการเกิด ESD ในโมเดล HBM.....	20
2-2 วงจรมุมของโมเดล MM.....	20
2-3 ภาพจำลองและวงจรมุมของการเกิด ESD ในโมเดล CDM.....	21
2-4 ลิเนียร์ไดโพลที่จุด z' และ $-z'$	22
2-5 ตัวอย่างโครงสร้างของ ESD Event Detector ที่ใช้การตรวจจับ EMI.....	24
2-6 EMAware	24
2-7 โครงสร้างของ PSU-Mote และภาพตัวอย่าง PSU-Mote 1.1	26
2-8 การหาตำแหน่งด้วย Triangulation	30
2-9 การหาตำแหน่งด้วย Bounding-box	31
2-10 การหาตำแหน่งด้วย Trilateration	32
2-11 RSSI เทียบกับ T-R Separation ใน free space	36
2-12 Two Ray Ground Reflected Radio Propagation	38
2-13 RSSI เทียบกับ T-R Separation ใน Two Ray Ground Reflected	39

รายงานภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2-14 ค่า Path Loss เทียบกับระยะระหว่างตัวรับ-ตัวส่ง.....	41
2-15 Path Loss ที่ได้รับผลกระทบจาก Shadowing และ Multipath	43
2-16 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของไอซีสื่อสารไร้สาย CC2500	43
2-17 เวลาในการตอบสนองการอ่านข้อมูล RSSI	45
2-18 ค่า RSSI ที่อ่านได้เทียบกับค่า RSSI จริง.....	46
2-19 Radiation Pattern ของเสาอากาศ.....	47
2-20 Radiation Pattern ของเสาอากาศในรูปสามมิติ.....	48
2-21 กำลังที่ได้รับในสภาพแวดล้อมที่มีการรบกวนจากปัจจัยต่างๆ.....	49
2-22 โมเดลอย่างง่ายของการรบกวนจากปัจจัยต่างๆต่อสัญญาณวิทยุ.....	49
2-23 การเกิด Multipath ในการสื่อสาร ไร้สาย.....	50
3-1 แผนผังการทดลองในการออกแบบระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้า สถิตโดยอาศัยการวัดความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	52
3-2 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัดรูปสัญญาณกระแสดิซชาร์จ และสัญญาณจากการแพร่ EMI ของ ESD	54
3-3 ผลการทดลองวัดรูปสัญญาณกระแสดิซชาร์จ และสัญญาณ จากการแพร่ EMI ของ ESD	54
3-4 ผลการทดลองแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI ที่ระยะต่างๆ จาก ESD ระดับ 50 โวลต์.....	56
3-5 ผลการทดลองแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI ที่ระยะต่างๆ จาก ESD ระดับ 100 โวลต์.....	56
3-6 การจัดวางตัวตรวจจับในการทดลองวัดค่าแอมพลิจูดจาก ตัวตรวจวัด EMI ทั้งสี่ตัว.....	57
3-7 แผนผังจัดวางตัวตรวจจับในการทดลองวัดค่าแอมพลิจูด จากตัวตรวจวัด EMI ทั้งสี่ตัว.....	57
3-8 ผลการทดลองที่ Test point 1	58

รายงานภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3-9 ผลการทดลองที่ Test point 2	58
3-10 ผลการทดลองที่ Test point 3	58
3-11 ผลการทดลองที่ Test point 4	58
3-12 ผลการทดลองที่ Test point 5	58
3-13 Scatter Plot ของผลการทดลองหาคำตอบของพิกัดด้วย Trilateration ในพื้นที่การทดลองขนาด 1.5x1.5 เมตร.....	61
3-14 Scatter Plot ของผลการทดลองหาคำตอบของพิกัดด้วย Trilateration ในพื้นที่การทดลองขนาด 3x3 เมตร.....	61
3-15 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดจากการทดลองหาคำตอบของพิกัด ด้วย Trilateration ในพื้นที่การทดลองขนาด 1.5x1.5 เมตร.....	62
3-16 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดจากการทดลองหาคำตอบของพิกัด ด้วย Trilateration ในพื้นที่การทดลองขนาด 3x3 เมตร.....	62
3-17 การหาตำแหน่งด้วยวงกลมสี่วง.....	63
3-18 การทดลองวัดสัญญาณในบริเวณนอปปข้างของเสาอากาศของตัวตรวจวัด.....	64
3-19 ผลการทดลองวัดสัญญาณในบริเวณนอปปข้างของเสาอากาศของตัวตรวจวัด.....	65
3-20 การทดลองวัดสัญญาณ ESD ในช่วงเวลายาวนาน.....	66
3-21 ผลการทดลองวัดสัญญาณ ESD ในช่วงเวลายาวนาน.....	66
3-22 การวัดความแรงของสัญญาณ EMI ที่ได้จาก ESD ที่มีแรงดันต่างกัน.....	67
3-23 ความชันของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดที่แรงดันของ ESD แตกต่างกัน.....	68
41 โครงสร้างพื้นฐานของระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิต ด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.....	71
42 ผลการจำลองการทำงานของแบบจำลอง Free Space	73
43 ผลการจำลองของแบบจำลองการแพร่กระจายรูปแบบ Two Ray	74
44 ค่าเฉลี่ย Path Loss ที่ระยะ T-R Separation ต่างๆ.....	75
45 ค่า Path Loss เทียบกับ T-R Separation	76
46 ผลการทดลองวัดค่า RSSI ในสภาพแวดล้อมแบบอุตสาหกรรม.....	77
47 ผลการทดลองวัดค่า RSSI โดยเปรียบเทียบกับกำลังส่งที่แตกต่างกัน.....	78

รายงานภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
48 ความชันของการเปลี่ยนแปลงค่า RSSI ที่ระยะ 1 เมตร	78
49 ความชันของการเปลี่ยนแปลงค่า RSSI ที่ระยะ 2 เมตร	78
410 ความชันของการเปลี่ยนแปลงค่า RSSI ที่ระยะ 38 เมตร	78
411 โครงข่ายรูปแบบ Single Layer Pureline	79
412 โครงสร้างของระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วยการ ประยุกต์ใช้ Neural Network	80
413 การหาความละเอียดในการตรวจจับเหตุการณ์ ESD	81
414 พื้นที่ในการทดลองระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด ด้วยการประยุกต์ใช้ Neural Network	82
415 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่ง ของเซนเซอร์โหนดด้วยการประยุกต์ใช้ Neural Network	83
416 ผลการทดลองจากการทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งของ เซนเซอร์โหนดด้วยการประยุกต์ใช้ Neural Network	83
417 การจัดอุปกรณ์ในการทดสอบระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คาย ประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์โหนด.....	84
418 ผลการทดสอบระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิต ด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์โหนด.....	85
5-1 แนวทางการแก้ไขปัญหาของระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุ ไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์โหนด.....	90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ความต้องการของผู้ใช้งานและการแข่งขันในทางการตลาดของผู้ผลิต ส่งผลให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีทางการผลิตเพื่อให้ได้มาซึ่งชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลง ทำงานที่ความถี่นาฬิกาสูงขึ้น มีความหนาแน่นของวงจรเพิ่มมากขึ้น การทำงานที่ใช้แรงดันปฏิบัติงานที่ต่ำลง [1] เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นในแง่ของความเร็วในการปฏิบัติงาน ความสะดวกในการพกพา และการใช้พลังงานที่ลดน้อยลง แต่อย่างไรก็ดีปัจจัยดังกล่าวกลับส่งผลให้ปัญหาของปรากฏการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิต หรือ **ESD (Electrostatic discharge)** ที่เป็นสาเหตุสำคัญในการสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้กลับเพิ่มมากขึ้นในสายงานการผลิต [2] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ซึ่งถูกจัดเป็น **Class ESD Sensitive** [2] ซึ่งศักย์ไฟฟ้าเพียง 1 โวลต์ สามารถสร้างความเสียหายที่รุนแรงต่อหัวอ่านได้หากเกิดการคายประจุขึ้น

ในปัจจุบันได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการควบคุมที่เป็นการป้องกันการสะสมประจุซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดปรากฏการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิต เช่น การใช้อุปกรณ์ป้องกันในกระบวนการผลิตอย่างเคร่งครัด อย่างเช่น สายรัดข้อมือขูดป้องกันไฟฟ้าสถิต การควบคุมสภาพแวดล้อม การควบคุมระบบกราวด์ของเครื่องมือและเครื่องจักรทุกตัว เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในบางกรณีก็ไม่สามารถขจัดปัญหาดังกล่าวให้หมดสิ้นได้ [3] เนื่องจากไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการสัมผัสแล้วแยกจากกันหรือเสียดสีกันระหว่างวัสดุสองชนิด เรียกว่าเกิดปรากฏการณ์ **Triboelectric Charging** [4] ซึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในสายการผลิตที่มีอากาศ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ไปบนสายพาน และมีการหยิบจับอากาศอุปกรณ์เข้าออกระหว่างเครื่องจักร ก่อให้เกิดความเสี่ยงที่จะเกิดการสะสมประจุและนำไปสู่การคายประจุขึ้น ดังนั้นการแก้ปัญหา **ESD** ด้วยระบบป้องกันการสะสมประจุจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำงานควบคู่กับการตรวจหาจุดที่เกิดเหตุการณ์ **ESD** ได้แม่นยำถูกต้องและทันท่วงที เพื่อวิเคราะห์และแก้ปัญหาต่อไป และช่วยในการคัดแยกผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในบริเวณที่มีการเกิดเหตุการณ์ **ESD** ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ในกลุ่มดังกล่าว เพื่อนำไปตรวจสอบได้ตรงกลุ่ม ส่งผลให้เกิดความง่ายในการเข้าถึงผลิตภัณฑ์ที่อาจมีปัญหา นอกจากนี้ยังเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์

ได้ในอีกทางหนึ่ง เนื่องจากหลายๆ ครั้งที่เหตุการณ์ ESD เกิดขึ้นที่ตัวผลิตภัณฑ์แต่ความรุนแรงไม่สูงพอที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายอย่างถาวร อาจเกิดความบกพร่องต่อการทำงานเพียงบางส่วน [2] หากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวออกไปสู่ผู้ใช้งาน ย่อมทำให้ความน่าเชื่อถือต่อตัวผลิตภัณฑ์หรือผู้ผลิตลดลง แต่ถ้าเราชี้ชัดได้ถึงจุดที่เกิดเหตุการณ์ ESD จะสามารถนำกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่คาดว่าจะได้รับความเสียหายมาตรวจสอบได้ตรงกลุ่มมากขึ้น ทั้งยังลดเวลาในการหยุดดำเนินงานของสายงานการผลิตได้อีกทางด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้นเห็นได้ชัดว่าการตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ก่อให้เกิดประโยชน์ในหลายๆด้าน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีหลักสำคัญอยู่มีการออกแบบระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์ ESD เพื่อให้ได้มาซึ่งระบบชี้ตำแหน่งที่อยู่ของการเกิดการคายประจุไฟฟ้าสถิตอย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการคิดค้น EELS:ESD Events Locator System [8] ซึ่งสามารถระบุจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้ใกล้เคียงจุดเกิดเหตุการณ์จริง แต่ระบบดังกล่าวมีความต้องการทางด้านฮาร์ดแวร์ค่อนข้างสูง และต้องการระบบประมวลผลที่มีความเร็วสูง ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงการติดตั้งระบบ EELS เพื่อตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ให้ทั่วถึงตลอดสายงานการผลิตอาจสร้างความยุ่งยากในการติดตั้ง และต้องใช้งบลงทุนสูงมาก ดังนั้นเป้าหมายในการออกแบบระบบที่สามารถตรวจหาจุดที่เกิดเหตุการณ์ ESD ได้ครอบคลุมตลอดสายงานการผลิตในราคาถูกลง สามารถติดตั้งได้ง่าย และมีความยืดหยุ่น จะสามารถกำจัดข้อจำกัดข้างต้นออกไปได้ และมีความคุ้มค่าหากนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม

1.2 การตรวจเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประเด็นวิจัย

1.2.1 A. Steinman, J. Bernier, D. Boehm, T. Albano, W. Tan and D. Pritchard. "Test Methodologies for detecting ESD Events in Automated Processing Equipment," In Proceedings of Electrical Overstress/Electrostatic Discharge (EOS/ESD) Symposium 1999, pp. 168-177, 1999.[5]

คณะทำงานจาก ESD Association Standard – Automated Handler Workgroup: WG10 ได้รวบรวมปัญหาที่เกิดจากการเกิดเหตุการณ์ ESD ในเครื่องมือและเครื่องจักรที่ทำงานแบบอัตโนมัติในสายการผลิต และได้รวบรวมเทคนิควิธีแก้ปัญหาดังกล่าวในโรงงาน [5] และพบว่าสาเหตุที่แท้จริงของการเกิดเหตุการณ์ ESD ไม่ได้เกิดจากการสัมผัสอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของพนักงานเพียงอย่างเดียว กระบวนการผลิตสมัยใหม่มีการใช้เครื่องมือหรือเครื่องจักรที่ทำงานอัตโนมัติเพิ่มมากขึ้น พนักงานแทบไม่ได้สัมผัสกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยตรง การควบคุมการสะสมของประจุบนพื้นผิวเพื่อป้องกันการถ่ายเทประจุจากผู้ปฏิบัติงานสู่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น

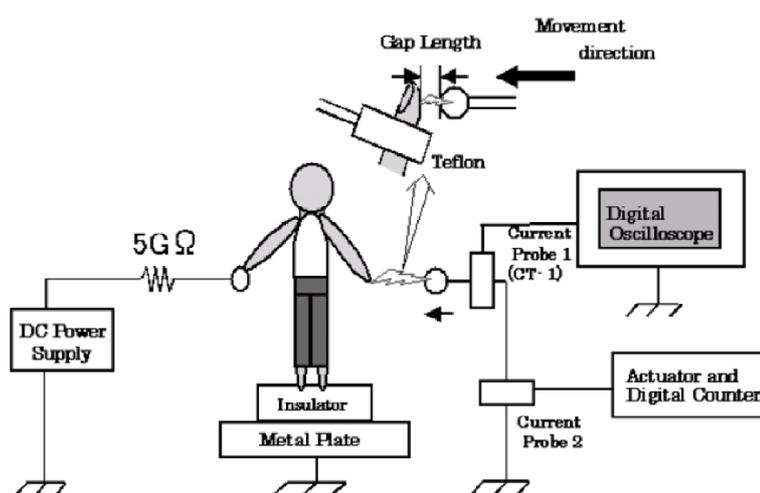
การสวมใส่ **wrist strap** รองเท้า และพื้นที่ปฏิบัติงานที่ออกแบบขึ้นเพื่อป้องกันการสะสมของประจุ เป็นต้น อาจไม่เพียงพอ การแก้ปัญหาการเกิดเหตุการณ์ **ESD** ต้องรับรองได้ว่าไม่มีเหตุการณ์ **ESD** เกิดขึ้นในเครื่องมือที่ถูกใช้สำหรับผลิตอิเล็กทรอนิกส์ วิธีการตรวจจับการเกิดขึ้นของเหตุการณ์ **ESD** มักอาศัยการตรวจจับจาก **EMI (Electromagnetic Interference)** ซึ่งเกิดได้เมื่อมีเหตุการณ์ **ESD** อุปกรณ์นี้เรียกว่า **EMI locator** ซึ่งสามารถระบุได้ว่าในพื้นที่นี้มีการเกิดเหตุการณ์ **ESD** แต่ในกรณีที่ไม่สามารถตรวจพบจุดที่เกิดเหตุการณ์ **ESD** ก็จำเป็นต้องค้นหาว่าประจุสะสมขึ้นที่ใดด้วยเครื่องมือวัด เช่น **ESD Indicator, Electrostatic Field Meter** และ **Electrostatic Voltmeter** เป็นต้น

1.2.2 J. Matsugi, Y. Mizoh, T. Nakano, K. Nakamura and H. Sakakima, “ESD Phenomena in GMR Heads in the Manufacturing Process of HDD and GMR Heads,” IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing Vol. 28, No.3, July 2005.[6]

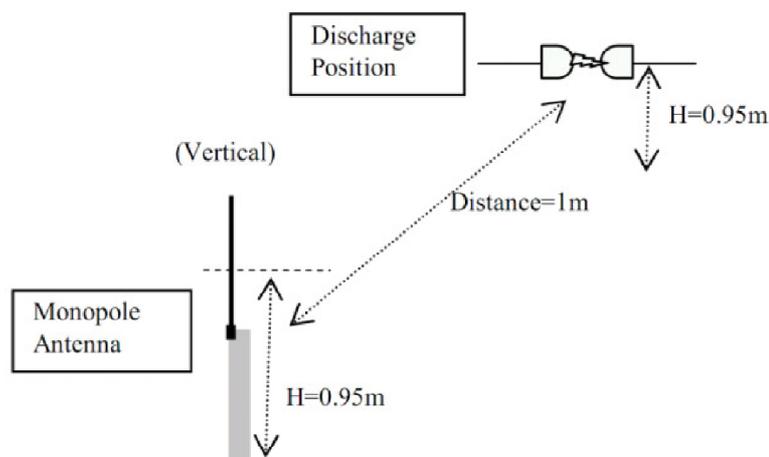
Junya Matsugi และคณะ ได้ทำการศึกษาลักษณะและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเสียหายที่มีสาเหตุจากการเกิดเหตุการณ์ **ESD** ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ประเภท **GMR: Giant Magnetoresistive** โดยได้จำแนกประเภทของความเสียหายออกเป็น 3 ประเภทตามผลกระทบที่เกิดขึ้น คือ **Hard ESD Damage Soft ESD Damage** และ **QST ESD Damage** ในการศึกษา **Hard ESD Damage** พบว่าเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของ **GMR** ซึ่งจะพบการหลอมละลายของชั้นฉนวนภายใน **GMR** ทำให้ **GMR** มีความเสียหายอย่างสิ้นเชิง ความเสียหายประเภทนี้สามารถสังเกตและตรวจสอบได้โดยง่าย ในกรณีศึกษา **Soft ESD Damage** ทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษาจากเส้นโค้งคุณลักษณะจากการทดลอง **QST: Quasi-Static Testing** และข้อมูลผลการทดสอบ **Off-Track** สามารถแยกลักษณะของความเสียหายออกเป็น 12 แบบย่อย พบว่าความเสียหายจากเหตุการณ์ **ESD** ในแบบ **Soft ESD Damage** เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุดและสังเกตทางกายภาพได้ยาก เพราะส่วนมาก **GMR** ที่ได้รับความเสียหายยังสามารถทำงานต่อได้แต่อาจไม่สมบูรณ์ และไม่มี ความเสียหายเชิงกลจึงไม่สามารถสังเกตจากโครงสร้างได้ ต้องอาศัยการทดสอบ **QST** และ **Off-Track** เพื่อบ่งบอกถึงความเสียหายดังกล่าวได้ และในส่วน **QST ESD Damage** จะเป็นความเสียหายในระดับเบาที่สุดแต่ก็ส่งผลต่อ **GMR** ในแง่ของการลดระดับ **SNR: Signal to Noise Ratio** จากการศึกษาพบว่า เมื่อ **GMR** ได้รับความเสียหายจากเหตุการณ์ **ESD** ในลักษณะนี้จะทำให้สัญญาณเอาท์พุทของ **GMR** มีสัญญาณรบกวนสูง จากผลการศึกษารูปแบบของความเสียหายจากเหตุการณ์ **ESD** ทั้งสามรูปแบบทำให้ได้แนวทางในการออกแบบโครงสร้างของ **GMR** เพื่อลดความเสี่ยงหรือความรุนแรงจากเหตุการณ์ **ESD** การออกแบบและการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีความปลอดภัยจากปัญหา **ESD** มากยิ่งขึ้น

1.2.3 T. Yoshida and N. Masui, “A Study on Discharge Current and Radiation Noise of ESD from Charged Metal and Charged Human Body,” in Industry Applications Society Annual Meeting 2008 IAS '08, pp. 1-6, 2008.[7]

Takahiro Yoshida และ Noriaki Masui ได้ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (**Electromagnetic Interference: EMI**) และกระแสของการดิสชาร์จ จากการทดลองโดยควบคุมปัจจัยที่เป็นองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเหตุการณ์ **ESD** ยกตัวอย่างเช่น ระดับแรงดันของประจุในการดิสชาร์จ ขั้วของประจุที่สะสมก่อนการดิสชาร์จ และโมเดลของการดิสชาร์จ ในการทดลองทำการจำลองการเกิดเหตุการณ์ **ESD** ในระดับแรงดันระหว่าง $\pm 2 \text{ KV}$ จนถึง $\pm 10 \text{ KV}$ กำหนดรูปแบบการดิสชาร์จสองรูปแบบคือ ดิสชาร์จผ่านแผ่นโลหะ และดิสชาร์จผ่านแบบจำลอง **HBM: Human Body Model** ใช้กับอุปกรณ์ **Current Transformer** เพื่อวัดกระแสของการดิสชาร์จ และเสาอากาศแกนเดี่ยวเพื่อรับสัญญาณ **EMI** ที่แพร่จากการเกิดเหตุการณ์ **ESD** การจัดเตรียมการทดลองดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 1-1 และ 1-2 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทำให้ได้ค้นพบคุณลักษณะของกระแสในการดิสชาร์จ และการแพร่ **EMI** ที่มีความสำคัญ คือ รูปสัญญาณการแพร่ของ **MRI** มีความเกี่ยวข้องกันโดยตรงกับรูปสัญญาณของการดิสชาร์จ ในส่วนนี้เป็นประเด็นส่วนหนึ่งที่ใช้นงานวิจัยนี้จะช่วยอธิบายถึงความสัมพันธ์ของกระแสของการดิสชาร์จและระดับความแรงของการแพร่สัญญาณ **EMI**



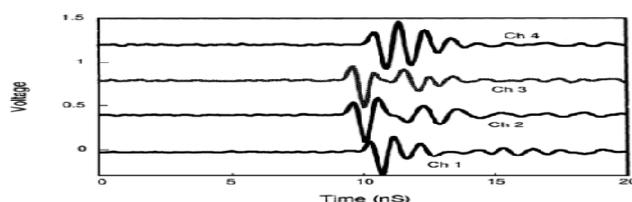
ภาพประกอบ 1-1 การทดลองเพื่อวัดรูปกระแสของการดิสชาร์จ [7]



ภาพประกอบ 1-2 การทดลองเพื่อวัดรูปสัญญาณการแพร่ EMI จากการ discharge [7]

1.24 L. D. Lin, L. F. Dechiaro and J. M. Chung “A Robust ESD Event Locator System with Event Characterization,” *Journal of Electrostatics*, Vol. 44, pp. 59-175, 1998 [8]

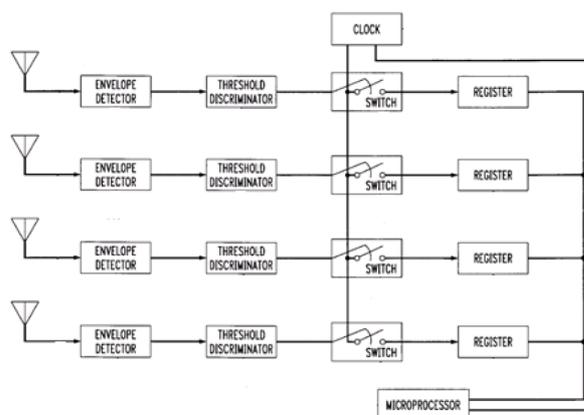
L. D. Lin และคณะ ได้ทำการออกแบบระบบ ESD event locator system (EELS) [8] เพื่อทำการหาตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ ESD โดยอาศัยหลักการของ Global positioning system (GPS) ในการคำนวณหาตำแหน่ง ระบบที่ได้ออกแบบขึ้นที่โครงสร้างซึ่งประกอบด้วยเสารับสัญญาณวิทยุจำนวน 4 เสา ซึ่งเชื่อมต่อกับ Digital Storage Oscilloscope ซึ่งถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อนำสัญญาณไปวิเคราะห์และคำนวณหาตำแหน่ง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงผล การคำนวณจะนำข้อมูลค่าความแตกต่างของเวลาที่สัญญาณเดินทางมาถึงเสาอากาศ (Time-of-arrival: ToA) เสาอากาศสี่ต้นจัดวางในรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อจำลองเหตุการณ์ ESD ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสดังกล่าวจะทำให้เกิดการแพร่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น จากนั้นสนามไฟฟ้าแพร่ไปถึงเสาอากาศทั้งสี่ต้นจะรับสัญญาณในลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ 1-3 ซึ่งสามารถนำความแตกต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณไปคำนวณเป็นระยะห่างจากจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ไปยังเสาอากาศแต่ละเสาได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการคำนวณต่อเพื่อหาพิกัดตำแหน่ง จากการทดลองระบบ EELS สามารถระบุตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ให้ผลคำตอบของพิกัดที่มีความละเอียดน้อยกว่า 1 cm ในพื้นที่ $50\text{cm}\times 50\text{cm}$ แต่วิธีนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีแบนด์วิดท์และความเร็วในการประมวลผลที่สูง เพื่อให้สามารถตรวจวัดความแตกต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณแต่ละเสาอากาศได้ ส่งผลให้ระบบจะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพงและประสิทธิภาพในการประมวลสัญญาณที่สูง



ภาพประกอบ 1-3 สัญญาณที่ได้จากการแพร่ EMI จากเหตุการณ์ ESD ที่เสาอากาศทั้งสี่ [8]

1.2.5 L. F. Dechiaro, F. J. Louis, L. M. Chung and L. Don, “Electrostatic Discharge Event Locator,” United States Patent 5923160, 07/13/1999.[9]

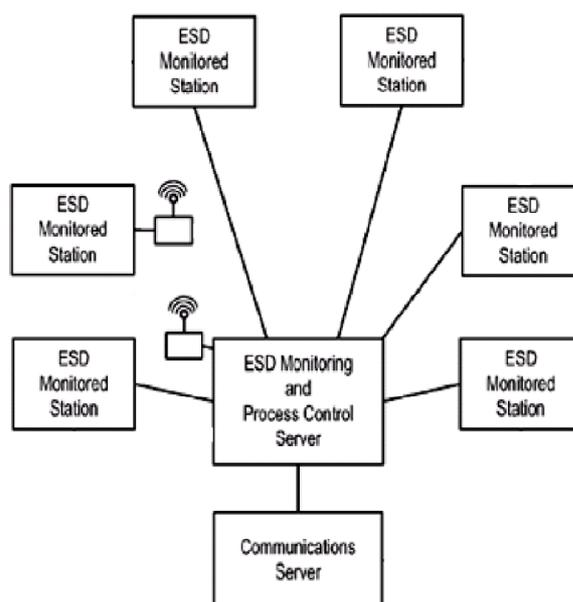
บริษัท Lucent Technologies โดย L. F. Dechiaro และคณะ ได้ทำการจดทะเบียนสิทธิบัตร **Electrostatic Discharge Event Locator**[5] ได้ทำการออกแบบระบบระบุตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ ESD โดยอาศัยหลักการของ **Global positioning system (GPS)** ใช้เสาอากาศรับสัญญาณ EMI จากการเกิดเหตุการณ์ ESD ทั้งหมด 4 ต้น และแต่ละเสาอากาศจะเชื่อมต่อกับวงจร **Envelope Detector** ทำหน้าที่ตรวจจับรูปร่างของสัญญาณ หลังจากนั้นสัญญาณที่มีรูปร่างตามที่กำหนดจะส่งต่อเข้าสู่วงจร **Threshold Discriminator** เพื่อตรวจสอบระดับของสัญญาณที่ได้รับว่ามีระดับสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ หากสูงกว่าค่าที่กำหนดจะส่งสัญญาณ ไปสู่วงจร **latch** ที่ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรระหว่างวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา **Clock** เข้ากับวงจร **Register** สำหรับนับจำนวนสัญญาณนาฬิกา เมื่อสัญญาณ EMI ได้ส่งไปถึงเสาอากาศต้นสุดท้าย จะเป็นทำการการหยุดนับสัญญาณนาฬิกาของ **Register** ทั้งหมด จากนั้นจึงนำข้อมูลจำนวนของสัญญาณนาฬิกาที่นับได้ไปแปลงเป็นเวลา และนำไปคำนวณต่อตามกระบวนการของ **GPS** จะทำให้ทราบถึงพิกัดของเหตุการณ์ ESD ที่เกิดขึ้น



ภาพประกอบ 1-4 โครงสร้างของ **Electrostatic Discharge Event Locator** [9]

1.26 R. Enta, “Electrostatic Discharge Monitoring and Manufacturing Process Control System,” United States Patent 7353120, 04/01/2008.[10]

บริษัท **Research In Motion Limited** โดย **Roger Enta** ได้ทำการจดทำเบียนสิทธิบัตร **Electrostatic Discharge Monitoring and Manufacturing Process Control System**[10] ออกแบบระบบการตรวจวัดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิต สำหรับใช้ติดตั้งในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ สามารถเข้าไปควบคุมเครื่องจักรเพื่อควบคุมกระบวนการผลิตได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ **ESD** ที่มีระดับสูงกว่าค่าที่กำหนดขึ้น สามารถ **Shutdown** เครื่องจักร หรือหยุดสายการผลิต และมีระบบตรวจสอบผู้ปฏิบัติงานว่ามีการสวม **wrist strap** หรือไม่ รวมทั้งตรวจสอบระบบ **Grounding** ของผู้ปฏิบัติงานว่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัยหรือไม่ อุปกรณ์ตรวจที่ใช้ในระบบมีการเชื่อมต่อในรูปแบบที่หลากหลาย ทั้งในแบบการเชื่อมต่อผ่านสายและไร้สาย โดยเชื่อมต่อกับผู้ใช้ผ่านจอมอนิเตอร์ในรูปแบบ **Graphic User Interface (GUI)**

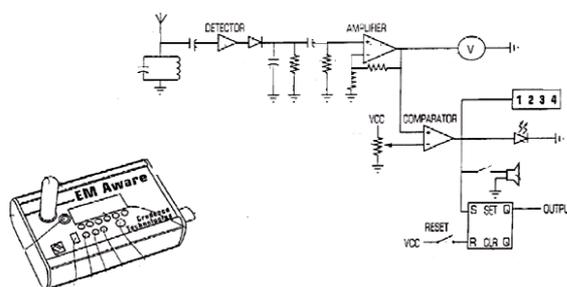


ภาพประกอบ 1-5 โครงสร้างระบบ **Electrostatic Discharge Monitoring** [10]

1.27 V. Kraz, “Electrostatic Discharges and Transient Signals Monitoring System and Method,” United States Patent 8567120, 08/07/2008.[11]

บริษัท **Credence Technologies** โดย **Valadimir Kraz** ได้ทำการจดทำเบียนสิทธิบัตร **Electrostatic Discharges and Transient Signals Monitoring System and Method** [11] ประกอบด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับการเกิดเหตุการณ์ **ESD** และระบบ

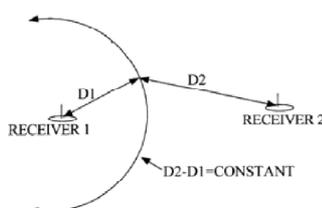
ตรวจจับเหตุการณ์ **ESD** โดยใช้ตัวตรวจวัดดังกล่าว สามารถปรับตั้งระดับของความแรงสัญญาณเหตุการณ์ **ESD** ได้ มีการนับจำนวนของเหตุการณ์ **ESD** ที่เกิดขึ้น สามารถใช้ร่วมกันได้หลายตัว ตัวตรวจจับสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้หลายรูปแบบ เช่น **RS-232, 4-20mA, TCP/IP** เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้นำอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบขึ้นในสิทธิบัตรนี้มาใช้ในการทดลองในชื่อทางการค้า **EMAware**



ภาพประกอบ 1-6 ESD Event Detector [11]

1.2.8 D. C. Greg “Electrostatic Discharge Locating Apparatus and Method,” United States Patent 6784120, 18/12/2007.[12]

บริษัท **Intersil Corporation** โดย **D. C. Grge** และคณะ ได้ทำการจดทะเบียนสิทธิบัตร **Electrostatic Discharge Locating Apparatus and Method [12]** เป็นการออกแบบระบบหาตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ **ESD** โดยใช้การตรวจจับสัญญาณการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า **EMI** ผ่านทางเสาอากาศโดยมีเครื่องรับสัญญาณ และทำการแปลงสัญญาณส่งต่อไปยังศูนย์กลาง เพื่อทำการเก็บข้อมูลและทำการคำนวณหาตำแหน่ง วิธีการหาตำแหน่งจะใช้ลักษณะการหาระยะของจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** ภายในวงกลมที่มีรัศมีเป็น **D1** และ **D2** ซึ่งค่าผลลบของรัศมีดังกล่าว **D2-D1** จะเป็นค่าคงที่ จากนั้นจะใช้วิธีเปิดตาราง **Look up table** เพื่อหาคำตอบของตำแหน่งของ **ESD**



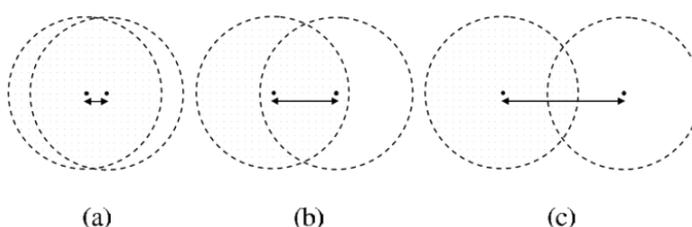
ภาพประกอบ 1-7 กระบวนการหาตำแหน่งของ **Electrostatic Discharge Locating Systems [12]**

1.2.9 L. Q. Zhuang K. M. Goh and J. B. Zhang “The Wireless Sensor Networks for factory Automatic: Issues and Challenges,” IEEE conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETF A). pp. 141-148, 2007.[13]

Zhuang และคณะ ได้รวบรวมประเด็น และทำทนายในการวิจัยเพื่อใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (WSN: Wireless Sensor Network) ในโรงงานที่มีเครื่องมือ/เครื่องจักรที่ทำงานโดยอัตโนมัติ การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ไร้สายเป็นทางออกที่ราคาต้นทุนต่ำและใช้พลังงานต่ำสำหรับการเฝ้าระวังและควบคุมสายการผลิต มีการตรวจจับภาวะแวดล้อม ประมวลผลข้อมูล และความสามารถในการควบคุม และได้มีการนำไปเปรียบเทียบกับ RFID (Radio Frequency Identification) ซึ่งเป็นเพียงฉลากอิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น ความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งานนั้นถือว่าดีกว่า WSN อยู่มาก

1.2.10 S. Buschmann, D. Pfisterer and S. Fischer, “Estimating Distances Using Neighborhood Intersection,” in Proceedings of Vehicular Technology Conference, pp. 314-321, 2006.[14]

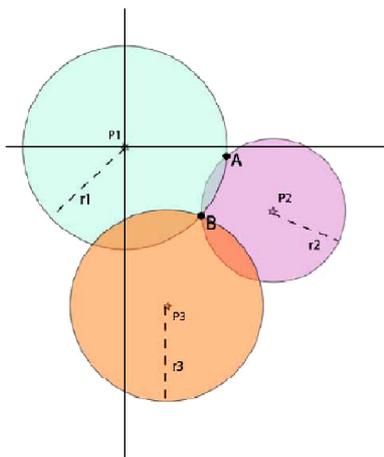
S. Buschmann และคณะ ได้ศึกษาวิจัยเรื่อง Estimating Distances Using Neighborhood Intersection การหาระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดนั้นถือเป็นหัวใจสำคัญที่จะนำไปสู่การระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดได้ งานวิจัยนี้ได้พัฒนากลไกในการหาระยะห่างระหว่างโหนดโดยใช้หลักการ NIDES: Neighborhood Intersection Distances Estimating Scheme [14] ซึ่งเป็นการเพิ่มความแม่นยำในการประมาณระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนด โดยมีหลักการคือเซนเซอร์โหนดสองตัวที่ต้องการหาระยะห่างจะต้องมีระยะห่างไม่มากกว่า (น้อยกว่าหรือเท่ากับ) r ซึ่ง r คือ ระยะทางสื่อสาร ดังอธิบายในภาพประกอบ 1-8 ภาพย่อย (a) และ (b) จะเห็นว่าเซนเซอร์โหนดสองตัวมีระยะห่างน้อยกว่า r จึงทำให้เซนเซอร์โหนดทั้งสองตัวอยู่ใน intersection area ในการทดลองได้ใช้เครื่องมือ SHAWN สำหรับการจำลองการทำงานของเครือข่าย จากผลการทดลองระบบที่ทำการพัฒนาขึ้น ได้ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ 15% ของระยะทางสื่อสาร



ภาพประกอบ 1-8 กลไกการพิจารณาของ Neighborhood Intersection [14]

1.211 L. V. Hai, T. T. Tu and M. D. Luca, “A Simple Method for Positioning and Tracking in Wireless Sensor Networks,” in Proceedings of International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision ICARCV, pp. 229-233.[15]

L. V. Hai ได้ทำการศึกษาระเบียบวิธีพื้นฐานที่ใช้ในการหาตำแหน่งของเซนเซอร์ โหนด โดยใช้หลักการของ **Trilateration method** [15] มีหลักการ คือ ทำการหาระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดและโหนดอ้างอิงทั้งสามตัว จากนั้นจึงทำการวาดวงกลมรอบโหนดอ้างอิงที่มีรัศมีเท่ากับระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดและโหนดอ้างอิงที่วัดได้ข้างต้น เมื่อลากครบทั้งสามวงรอบจะได้จุดที่มีการตัดกันของวงกลมทั้งสามวงซึ่งจุดนั้นคือตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด โดยในกระบวนการหาระยะห่างจะมีการนำค่า **path loss** ของการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุเข้ามาคำนวณเพื่อลดความผิดพลาด อีกทั้งใช้ อัลกอริทึม **Minimum Square Error (MSE)** ในการทำนายข้อมูลด้วยกระบวนการทั้งหมด ทำให้ได้ผลของการหาตำแหน่งที่มีความแม่นยำขึ้น และมีค่าความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งที่ **12%** ในพื้นที่ **1** ตารางเมตร



ภาพประกอบ 1-9 ตัวอย่างการหาตำแหน่งด้วยระเบียบวิธี **Trilateration** [15]

1.3 ประเด็นวิจัย

จากการตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้สามารถแยกกลุ่มเนื้อหาได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มข้อมูลแรกเป็นกลุ่มข้อมูลทางการเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิต และกลุ่มข้อมูลที่สองเป็นกลุ่มข้อมูลทางการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดในระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยทางการประยุกต์ อันมีจุดมุ่งหมายที่การออกแบบระบบที่ทำงานในการหาตำแหน่งจุดที่เกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิต

ซึ่งก่อให้เกิดการผสมผสานศาสตร์ทั้งสองด้านที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลของการทำงานของระบบที่นำไปใช้งานได้จริง ดังนั้นจึงก่อให้เกิดประเด็นวิจัยขึ้นเพื่อตอบสนองต่อเป้าหมายของงานวิจัย และก่อให้เกิดแนวคิด หรือระเบียบวิธีใหม่ที่ยังไม่มีการศึกษาอยู่ในเอกสารบทความและงานวิจัยที่ได้พบทบทวนมา

1.3.1 การระบุตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ ESD โดยอาศัยการวัดความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ศึกษาหาแนวทางในการตรวจหาตำแหน่งการเกิดเหตุการณ์ ESD ด้วยกระบวนการที่อาศัยข้อมูลจากการตรวจวัดความแรงของสัญญาณ EMI เนื่องจากการเกิดเหตุการณ์ ESD ในแต่ละครั้งจะแพร่ EMI ออกมาเสมอ ในขั้นต้นจะทำการศึกษาคูณลักษณะของการแพร่ EMI ที่มาจากเหตุการณ์ ESD ว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไรเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ ESD และตัวตรวจจับ EMI จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความแรงของสัญญาณ EMI กับระยะห่างของตัวตรวจจับกับจุดเกิดเหตุการณ์ จึงนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการหาตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้ โดยใช้ระเบียบวิธี Trilateration เพื่อให้ผลคำตอบของพิกัดในสองมิติ

1.3.2 การระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด

การหาตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดถือเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งของงานวิจัยนี้ เนื่องจากจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ในอีกรูปแบบหนึ่ง การระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดในงานวิจัยนี้จะอาศัยข้อมูล RSSI: Received Signal Strength Indicator เป็นข้อมูลในการคำนวณหาพิกัด เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับระยะระหว่างเซนเซอร์โหนดโดยตรง และง่ายต่อการอ่านข้อมูล เนื่องจากไอซีสื่อสารไร้สายส่วนใหญ่ในปัจจุบันได้ติดตั้งส่วนอ่านค่า RSSI แต่อย่างไรก็ดีข้อมูล RSSI ถือเป็นข้อมูลที่ถูกรบกวนได้โดยง่ายจากสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อน หรือเต็มไปด้วยสิ่งกีดขวาง เช่น ภายในอาคาร สำนักงาน และโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นการนำข้อมูล RSSI ไปใช้ในการหาตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดนั้นจำเป็นต้องมีกระบวนการเพิ่มเติมเกี่ยวกับการกำจัดสัญญาณรบกวน กู้คืน และรู้จำ เป็นต้น เพื่อให้ได้ข้อมูล RSSI ใหม่ที่มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้คำนวณต่อโดยเกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด

1.3.21 การหาระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดด้วยการเปรียบเทียบ RSSI จากกำลังส่งที่ต่างกัน

การประมาณระยะห่างระหว่างโหนดให้ได้คำตอบที่มีความใกล้เคียงความถูกต้องมากที่สุด ถือเป็นสิ่งสำคัญเพราะจะทำให้การนำข้อมูลไปใช้ต่อในการตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดมีความผิดพลาดลดลง ประเด็นวิจัยส่วนนี้จะออกแบบระเบียบวิธีในการเพิ่มความแม่นยำของการประมาณระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดไร้สาย การหาตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายนิยมใช้ข้อมูลจากความแรงของสัญญาณวิทยุที่ได้รับได้ หรือ RSSI แต่จากการค้นคว้าจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างกล่าวสรุปว่า RSSI อาจมีความไม่แน่นอน และเปลี่ยนแปลงต่อสิ่งแวดล้อมได้ง่าย

ประเด็นวิจัยนี้จึงทำการเพิ่มความถูกต้องของข้อมูล RSSI ด้วยการอาศัยกลไกการเพิ่มชุดข้อมูลจากการแยกกำลังส่งที่แตกต่างกัน เพื่อนำข้อมูล RSSI ที่วัดได้ในแต่ละกำลังส่งมาทำการเฉลี่ยและวิเคราะห์หาค่าระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนด การปรับปรุงข้อมูล RSSI เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงความถูกต้องมากขึ้น จะส่งผลต่อให้ผลการคำนวณระยะห่างระหว่างโหนดมีความผิดพลาดที่ลดลงตามมา และยังผลไปถึงการคำนวณหาพิกัดของเซนเซอร์โหนดด้วย

1.3.22 การระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมด้วยการประยุกต์เครือข่ายประสาท

ในการใช้งานเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมเป็นเรื่องยากที่จะหลีกเลี่ยงความผิดพลาดข้อมูล RSSI อันมีผลมาจากสภาพแวดล้อม เนื่องจาก RSSI เป็นข้อมูลที่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมได้โดยง่ายเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรม ซึ่งเต็มไปด้วยเครื่องจักร สิ่งกีดขวาง รวมถึงผู้ปฏิบัติงาน สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งรบกวนต่อการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ นั่นก็ย่อมจะมีผลกระทบต่อข้อมูล RSSI เช่นกัน การนำเครือข่ายประสาท (Neural Network) มาช่วยย่อมจะช่วยลดความผิดพลาดดังกล่าวลงได้ เนื่องจาก Neural Network เป็นระเบียบวิธีที่ช่วยในการรู้จำ หรือกู้คืนข้อมูลหรือสัญญาณที่โคจรรบกวนหรือมีบางส่วนสูญหาย ดังนั้นการประยุกต์ส่วนนี้ไปใช้จึงเป็นไปได้ที่จะช่วยเพิ่มความแม่นยำของการหาพิกัดของเซนเซอร์โหนดได้

การวิจัยสำหรับประเด็นนี้จะใช้การประยุกต์เครือข่ายประสาทเพื่อปรับค่าน้ำหนักสำหรับชุดเซตข้อมูล RSSI ที่ถูกส่งมาด้วยกำลังส่งที่แตกต่างกัน ด้วยอาศัยกฎการเรียนรู้แบบ Hebbian [12] ในการรู้จักค่าน้ำหนักที่จะใช้ชุดเซตค่า RSSI และทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ชุดข้อมูลที่แตกต่างของกำลังส่ง และ 16 ช่วงกำลังส่ง

1.3.3 การระบุตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ ESD โดยอาศัยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ด้วยการอาศัยระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์ โหนด และการใช้งานพื้นฐานของตัวตรวจจับ EMI ทำให้ได้มาซึ่งระบบที่สามารถทำการระบุพิกัดของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้ในพื้นที่ที่บริเวณกว้างกว่าเมื่อเทียบกับการระบุตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ ESD โดยอาศัยการวัดความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอันเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ดี กลไกรูปแบบนี้มีข้อจำกัดในหลายๆ ส่วน

การวิจัยสำหรับประเด็นนี้จะใช้การประยุกต์ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ โหนด ที่ถูกติดตั้งกับตัวตรวจจับ EMI ซึ่งทั้งสองจะเคลื่อนที่ไปด้วยกันในสายการผลิต และจะแจ้งเตือนพร้อมระบุพิกัดเมื่อตัวตรวจจับ EMI พบการเกิดเหตุการณ์ ESD

1.4 วัตถุประสงค์

1.41 เพื่อออกแบบระบบระบุพิกัดจุดเกิดเหตุการณ์ ESD สำหรับใช้ในสายการผลิตฮาร์ดดิสก์ที่ทำงานแบบไร้สาย

1.42 เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ตรวจวัดจุดเกิดเหตุการณ์ ESD แบบไร้สายขนาดเล็กที่สามารถเคลื่อนที่ไปกับถาดวางอุปกรณ์ในสายงานการผลิตได้

1.43 เพื่อศึกษาและพัฒนาต้นแบบสถานีฐานมีโปรแกรมคำนวณ และทำการบันทึกตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ ESD แบบไร้สาย

1.44 เพื่อศึกษาแนวทางสำหรับตรวจหาจุดที่เกิดเหตุการณ์ ESD ตลอดสายงานการผลิตฮาร์ดดิสก์ในราคาต่ำ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.51 พัฒนาระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์ ESD สำหรับสายงานการผลิตฮาร์ดดิสก์

1.52 สร้างเซนเซอร์ โหนด สำหรับการตรวจวัด 3 ตัว

1.53 สร้าง Base Station สำหรับเป็นศูนย์กลางในการรับส่งข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล

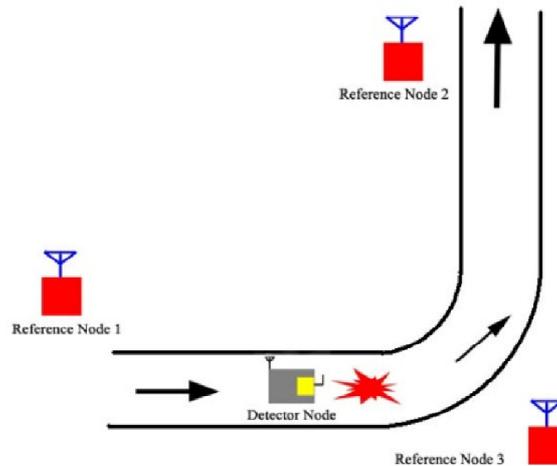
1.54 ออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการเกิด ESD Event และรายงานตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ ESD ในรูปแบบกราฟิก

1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยจะทำการศึกษาและพัฒนาระบบตรวจหาจุดที่เกิดเหตุการณ์ **ESD** แบบไร้สายสำหรับสายงานการผลิตฮาร์ดดิสก์ ระบบประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด **ESD** แบบไร้สายที่มีขนาดเล็ก และสถานีฐานที่มีโปรแกรมคำนวณและทำการบันทึกตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ ในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด **ESD** แบบไร้สาย ผู้วิจัยจะทำการเลือกเซนเซอร์ **ESD** โมดูลไร้สาย และไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เหมาะสม นำมาประกอบกัน ออกแบบอินเทอร์เฟซทางฮาร์ดแวร์ และเขียนโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับค่าจากเซนเซอร์ ประมวลผล และส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายมายังสถานีฐาน ในแต่ละสายงานการผลิตจะมีอุปกรณ์ตรวจวัด **ESD** แบบไร้สายอย่างน้อย 1 ตัว ถูกยึดติดกับถาดวางอุปกรณ์ในสายงานการผลิต หรืออาจจะต้องใช้วิธีอื่นที่เหมาะสม เพื่อให้อุปกรณ์ตรวจวัด **ESD** แบบไร้สายนี้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ตลอดสายงานการผลิต ที่สถานีฐานเป็นคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีโปรแกรมรับข้อมูล คำนวณหาตำแหน่งของจุดที่เกิดเหตุการณ์ **ESD** ในสายงานการผลิต และทำการบันทึก การคำนวณตำแหน่งบนสายงานการผลิตใช้อัตราเร็วของการเคลื่อนที่สายพาน ลักษณะเส้นทางของสายงานการผลิต และค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (**Received Signal Strength Indicator, RSSI**) จากเซนเซอร์โหนด และความแรงของสัญญาณ **EMI** จากตัวตรวจวัด **EMI** มาเป็นพารามิเตอร์หลักในการคำนวณตามระเบียบวิธีที่ได้ค้นหา หรือปรับปรุงขึ้นจากที่มีอยู่ สำหรับแนวทางในการออกแบบระบบขั้นต้น จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่มีอยู่ก่อนหน้าและทฤษฎีบางส่วน สามารถสรุปแนวทางในการออกแบบระบบเพื่อหาตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** ออกเป็น 2 แนวทาง ดังนี้

1.6.1 ระบบตรวจหาตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** ด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

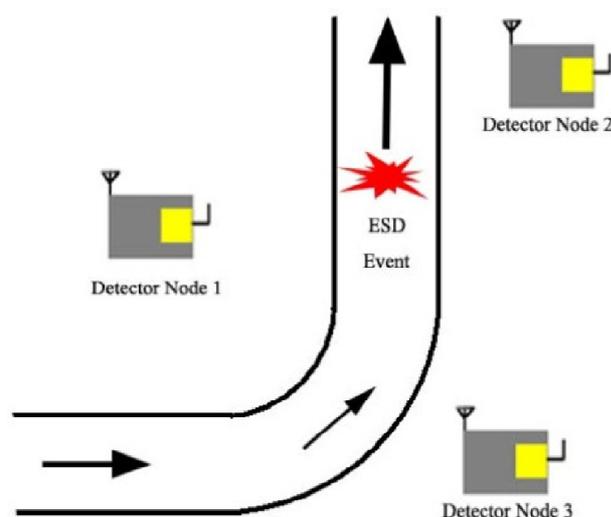
ระบบนี้จะมีอุปกรณ์ตรวจวัด **EMI** หนึ่งตัวเชื่อมต่อกับเซนเซอร์โหนดไร้สายโดยที่ทั้งสองจะถูกติดตั้งอยู่บนถาดวางชิ้นงานที่ใช้ในสายงานผลิต และมีเซนเซอร์โหนด 3 ตัว สำหรับสร้างตำแหน่งอ้างอิงและวัดความแรงของสัญญาณวิทยุ ระบบรูปแบบนี้มีข้อดีในแง่ของการใช้จำนวนตัวตรวจวัดเหตุการณ์ **ESD** เพียงหนึ่งตัวต่อการวัด ทำให้ลดค่าใช้จ่ายลงได้เนื่องจากตัวตรวจวัดดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง ในบางกรณีอาจมีปัญหาในแง่ของขนาดเมื่อต้องติดตั้งบนถาดวางอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก หรือข้อจำกัดของพื้นที่ทำงานของเครื่องจักร หากนำไปประยุกต์เพื่อใช้งานจริง



ภาพประกอบ 1-10 ระบบหาตำแหน่งโดยมีอุปกรณ์ตรวจวัดติดตั้งกับดาวเทียม

1.6.2 ระบบหาตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ด้วยอาศัยข้อมูลความแรงของ EMI

ระบบนี้จะใช้ตำแหน่งของโดยอาศัยหลักการของ GPS ใช้ข้อมูล การวัดความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากเสาอากาศ เมื่อมีเหตุการณ์ ESD เกิดขึ้น ตัวตรวจจับ EMI ทั้งสามตัวจะส่งข้อมูลความแรงของสัญญาณที่ได้รับจาก ESD ซึ่งสามารถนำข้อมูลความแรงของสัญญาณที่ได้รับดังกล่าวไปแปลงเป็นระยะทางและสามารถนำไปคำนวณเป็นพิกัดตำแหน่งด้วยกระบวนการคณิตศาสตร์ตรีโกณมิติต่อไปได้



ภาพประกอบ 1-11 ระบบตรวจหาตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ ESD ที่ใช้ตัวตรวจจับ EMI

1.7 แผนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงาน	เดือนที่							
	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24
1. ศึกษาวิธีการตรวจหาเหตุการณ์ ESD ในโรงงานฮาร์ดดิสก์								
2. ศึกษาและพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ตรวจวัด ESD แบบไร้สาย								
3. ทดสอบการใช้งานจริงในระดับห้องปฏิบัติการ								
4. ปรับปรุงและแก้ไขต้นแบบอุปกรณ์ตรวจวัด ESD แบบไร้สาย								
5. วิเคราะห์ผลและจัดทำรายงานความก้าวหน้า								
6. ศึกษาและพัฒนาโปรแกรมคำนวณตำแหน่งของจุดที่เกิดเหตุการณ์ ESD ในสายงานการผลิต								
7. ทดสอบการใช้งานจริงของระบบในระดับห้องปฏิบัติการและปรับปรุง								
8. ทดสอบการใช้งานจริงของระบบในระดับภาคสนามและปรับปรุงแก้ไข								
9. วิเคราะห์ผลและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์								

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

บทนี้เป็นเนื้อหาของทฤษฎีที่จำเป็นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย ความหมายของเหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิต **ESD (Electro Static Discharge)** การสะสมประจุบนพื้นผิวของวัตถุ การคายประจุ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากเหตุการณ์ **ESD** ตัวตรวจจับเหตุการณ์ **ESD** เซนเซอร์โหนดไร้สาย

2.1 เหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิต

เหตุการณ์การคายประจุไฟฟ้าสถิต หรือ **ESD (Electro Static Discharge)** คือการถ่ายเทประจุที่สะสมอยู่ ณ วัตถุใดๆ ที่มีการสัมผัสกัน อาจเป็นการถ่ายเทจากศักย์สูงไปศักย์ต่ำหรือจากศักย์ต่ำไปศักย์สูง เหตุการณ์ดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ทุกที่ที่มีการเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งเป็นการทำให้ประจุสะสมขึ้นที่ผิวของวัตถุเนื่องจากเกิดการเสียดสีกับอากาศ และการสัมผัสกันของวัตถุ ปริมาณของประจุที่เกิดขึ้นและสะสมอยู่ตามพื้นผิวของวัตถุจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความชื้นของสภาพแวดล้อม รวมถึงสภาพพื้นผิวของวัตถุที่มีการเสียดสีกันเช่นความเสียดทานของพื้นผิววัตถุ ซึ่งเป็นเสมือนการลัดวงจรของประจุที่สะสมอยู่ทำให้มีการถ่ายเทพลังงานและการสลายพลังงาน การสลายพลังงานนี้เองที่ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทสารกึ่งตัวนำ การตรวจจับเหตุการณ์ของการถ่ายเทประจุสะสมหรือ **Electrostatic Discharge Event** ในปัจจุบันมีวิธีการตรวจจับสองรูปแบบที่ใช้โดยทั่วไปคือ ตรวจจับการแพร่ของสนามแม่เหล็ก (**EMI**) จากการเกิด **ESD Event** และการตรวจจับโดยใช้หลักการเชิงแสง ในการตรวจจับการแพร่ของสนามแม่เหล็กการตรวจวัดในรูปแบบนี้จะใช้เซนเซอร์ที่เรียกว่า **ESD Event Detector** ซึ่งจะรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจาก **ESD** เนื่องจากทุกครั้งที่เกิด **ESD** ขึ้นจะส่งผลให้เกิดการแพร่สนามแม่เหล็กเพราะการถ่ายเทประจุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็วอันเป็นสาเหตุของการแพร่สนามแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กที่แพร่จาก **ESD Event** จะมีความถี่อยู่ในช่วง **10 MHz - 1.3 GHz** และระยะเวลาในการแพร่สนามแม่เหล็กจะสามารถนำไปวิเคราะห์ถึงความรุนแรงของ **ESD Event** ที่เกิดขึ้นได้ซึ่งข้อมูลต่างๆเหล่านี้ **ESD Event Detector** สามารถตรวจวัดได้

2.2 ศักย์ไฟฟ้าสถิต

ศักย์ไฟฟ้าสถิต (**Electrostatic Voltage**) คือศักย์ไฟฟ้าของประจุที่สะสมอยู่บนพื้นผิววัตถุ ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนสำหรับกระแสสสารจ (Discharge Current) ศักย์ไฟฟ้าที่ประจุอยู่บนพื้นผิววัตถุซึ่งมีความสัมพันธ์ กับกราวด์ของโลก ซึ่งสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าที่สะสมอยู่บนวัตถุได้โดยง่ายด้วยมิเตอร์วัดศักย์ไฟฟ้าสถิต (**Electrostatic Voltmeter**) ในสภาพแวดล้อมจริงการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าสถิต ควรจะพิจารณาถึงวัตถุที่อยู่ข้างเคียงเพราะหากมีวัตถุที่มีประจุสะสมสองชิ้นอยู่ใกล้กันและทำให้เกิดการเคลื่อนที่ประจุซึ่งกันและกัน เนื่องมาจากการเกิดความจุไฟฟ้า (**Capacitance**) ขึ้นระหว่างวัตถุสองชนิดที่อยู่ใกล้กัน ส่งผลให้การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าสถิต มีค่าที่วัดได้ไม่คงที่เนื่องจากประจุจะถูกถ่ายเทระหว่างกันจนกว่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน กลไกของการสะสมประจุไฟฟ้าอันก่อให้เกิดศักย์ไฟฟ้าสถิตถูกแบ่งแยกอย่างง่ายออกเป็นสี่ประเภทดังนี้

2.2.1 การสะสมประจุแบบ Triboelectric

หรือเรียกว่า **Triboelectric Charging** เป็นการสะสมประจุที่เป็นผลลัพธ์จากการที่วัตถุสองชิ้นมีพื้นผิวที่สัมผัสซึ่งกันและกันมีการเสียดสีและแยกออก กระบวนการนี้จะทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งที่มีแรงเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนที่สูงกว่าและเมื่อแยกวัตถุออกจากกันประจุที่ถูกเพิ่มเข้าจะส่งผลให้มีศักย์ไปในทางลบ เมื่อเกิดเหตุการณ์นี้ซ้ำๆ จะทำให้เกิดประจุสะสมเพิ่มมากขึ้นและจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามมา กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้บ่อยที่สุด

2.2.2 การสะสมประจุด้วยไอออน

การสะสมประจุด้วยไอออน (**Ionic Charging**) เป็นประจุที่สะสมอยู่ในโมเลกุลของอากาศในพื้นที่หนึ่งเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่หรืออากาศมีการเคลื่อนที่ก็จะส่งผลให้มีการเสียดสีระหว่างอากาศและวัตถุจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายและสะสมประจุที่วัตถุได้ถ้าหากพื้นผิวของวัตถุมีแรงเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนที่สูงกว่าอากาศ

2.2.3 การสะสมประจุโดยตรง

การสะสมประจุโดยตรง (**Direct Charging**) เป็นการสะสมประจุที่มีการเคลื่อนย้ายประจุของวัตถุสองวัตถุผ่านตัวกลางซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุและกระแสที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างวัตถุ อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่เชื่อมต่อวัตถุเข้าด้วยกัน

2.2.4 การสะสมประจุด้วยสนามเหนี่ยวนำ

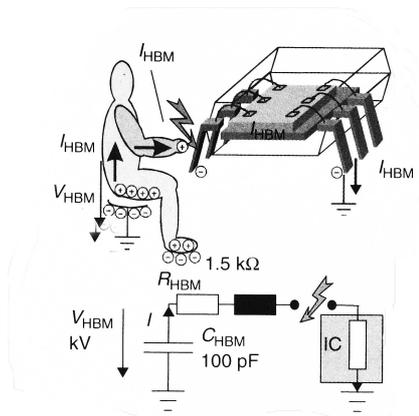
การสะสมประจุด้วยสนามเหนี่ยวนำ (**Field Induced Charging**) กระบวนการนี้เกิดจากการที่วัตถุมีการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าสถิตออกสู่ภายนอกวัตถุทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้ารอบๆวัตถุและมีการสะสมตามพื้นผิวของวัตถุโดยเฉพาะบริเวณที่นำไฟฟ้าได้ กรณีที่จะเกิดขึ้นยกตัวอย่างเช่นใน IC หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

2.3 การคายประจุ

การคายประจุ (**Discharge**) เป็นกลไกที่เกิดขึ้นเพื่อส่งถ่ายประจุระหว่างวัตถุนำที่ไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าสถิตแตกต่างกัน เพื่อให้วัตถุดังกล่าวมี ศักย์ไฟฟ้าสถิตที่เท่ากันซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักเป็นการคายประจุที่สะสมอยู่บนพื้นผิววัตถุลงสู่กราวด์ของพื้นโลก ความรุนแรงในการเกิดเหตุการณ์คายประจุ แต่ละครั้งมีปัจจัยที่กำหนดดังนี้ ระดับของศักย์ไฟฟ้าสถิต ขั้วของประจุไฟฟ้าที่สะสม รูปร่างของวัตถุ และคุณสมบัติของพื้นผิวที่สัมผัสกัน รูปแบบการเกิดการคายประจุสามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดเหตุการณ์เป็น 3 รูปแบบดังนี้

2.3.1 โมเดล HBM

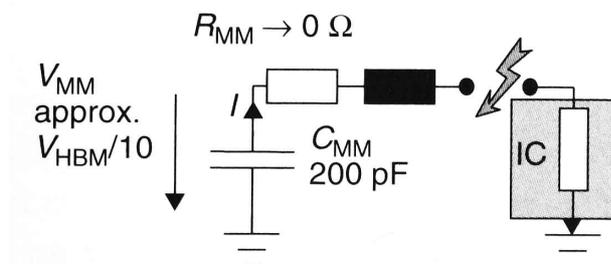
โมเดล **HBM** หรือ **Human Body Model** เป็นโมเดลจำลองการคายประจุจากวัตถุที่มีประจุสะสมลงสู่กราวด์โดยผ่านมนุษย์ที่มีบางส่วนของร่างกายเชื่อมต่อกับกราวด์ของพื้นโลก หรือเป็นการถ่ายเทประจุที่สะสมอยู่บนตัวของมนุษย์ลงสู่กราวด์ของพื้นโลกโดยผ่านตัววัตถุที่ต่ออยู่กับกราวด์ เมื่อนำเหตุการณ์ดังกล่าวมาเขียนวงจรเส้นทางในการถ่ายเทประจุ (**Charged Path**) ได้วงจรสมมูลดังอธิบายในภาพประกอบ 2-1 แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบทางไฟฟ้าของร่างกายมนุษย์ **HBM** ถือเป็นสาเหตุหลักๆ ในการเกิดเหตุการณ์ **ESD** โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่ใช้คนในการปฏิบัติการ ซึ่งจะเสี่ยงการสัมผัสระหว่างตัวบุคคลกับผลิตภัณฑ์ได้บ่อย แต่อย่างไรก็ตามปัญหา **ESD** ที่เกิดจาก **HBM** สามารถป้องกันได้โดยง่ายโดยการใส่ชุดควบคุมไฟฟ้าสถิต สายรัดข้อมือ หรือการออกแบบพื้นที่ทำงานให้มีการลงกราวด์ให้มากที่สุด



ภาพประกอบ 2-1 ภาพจำลองและวงจรสมมูลของการเกิด ESD ในโมเดล HBM

2.3.2 โมเดล MM

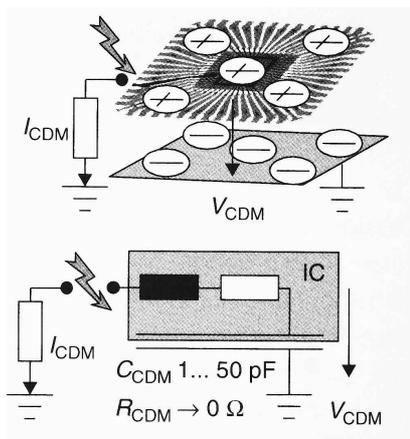
โมเดล MM หรือ **Machine Model** คือ โมเดลของการคายประจุที่มีการเคลื่อนที่ผ่านส่วนที่นำไฟฟ้า (โลหะ) ของเครื่องจักรลงสู่กราวด์พื้นโลก ซึ่งอาจเป็นเหตุการณ์ของวัตถุถ่ายเทประจุกับเครื่องจักรลงสู่กราวด์ หรือเครื่องจักรกับเครื่องจักรมีการถ่ายเทประจุลงกราวด์ ส่วนใหญ่จะเป็นการคายประจุที่รุนแรงและใช้เวลาสั้นๆ เนื่องจากความต้านทานของ **Charged Path** มีค่าต่ำใกล้เคียงศูนย์โอห์ม ตามวงจรสมมูลในภาพประกอบ 2-2 ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงต่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เช่นกัน



ภาพประกอบ 2-2 วงจรสมมูลของโมเดล MM

2.3.3 โมเดล CDM

โมเดล CDM หรือ **Charge Device Model** เป็นการเกิดเหตุการณ์ ESD ที่กล่าวถึงประจุที่สะสมบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เมื่ออยู่ใกล้หรือสัมผัสกับพื้นผิวที่ต่อกับกราวด์พื้นโลกทำให้เกิดการคายประจุโดยผ่านทางขาของอุปกรณ์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-3 เหตุการณ์ดังกล่าวนี้เกิดขึ้นได้บ่อยในสายงานการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



ภาพประกอบ 23 ภาพจำลองและวงจรสมมูลของการเกิด ESD ในโมเดล CDM

24 EMI ที่แพร่กระจายจากเหตุการณ์ ESD

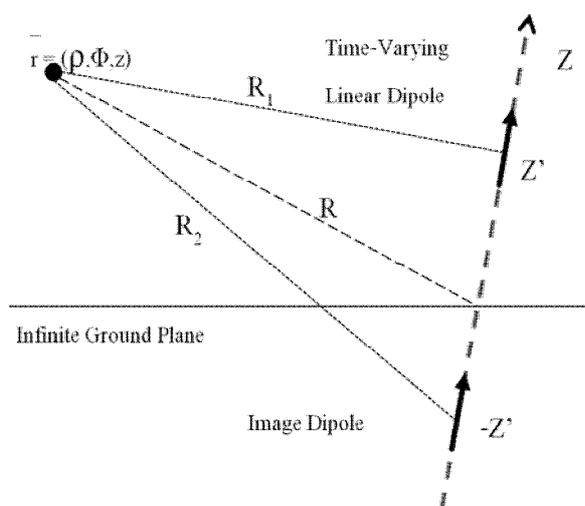
เหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิต ESD เป็นกลไกที่เกิดขึ้นเพื่อส่งถ่ายประจุระหว่างวัตถุที่มี ศักย์ไฟฟ้าสถิต แตกต่างกัน เพื่อให้วัตถุทั้งสองมี ศักย์ไฟฟ้าสถิต ที่เท่ากันซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักเป็นการคายประจุที่สะสมอยู่บนพื้นผิววัตถุลงสู่กราวด์ของพื้นโลก ความรุนแรงในการเกิดเหตุการณ์ ESD แต่ละครั้งมีปัจจัยที่กำหนดดังนี้ ระดับของ ศักย์ไฟฟ้าสถิต, ขั้วของประจุไฟฟ้าที่สะสม, รูปร่างของวัตถุ, คุณสมบัติของพื้นผิวที่สัมผัสกัน ESD มักเกิดขึ้นในเวลาสั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในการดิสชาร์จที่แรงดันต่ำลักษณะรูปคลื่นของ ESD Event จะมีองค์ประกอบของคลื่นความถี่สูง ที่มีความถี่ไม่เกิน 6 GHz [16] กระบวนการเกิดเหตุการณ์ ESD ในทุกๆครั้งจะเกิดการแพร่ของสนามไฟฟ้า เราสามารถหาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายอันมีสาเหตุจากเหตุการณ์ ESD ด้วยการสร้างโมเดลไดโพลของการดิสชาร์จจากโมเดลของการสปาร์ค (Spark) ของ ESD ที่มีคุณลักษณะเป็นจุดเล็กมาก เป็นฟังก์ชันขึ้นกับเวลา (Time-dependent) และไดโพลของ ESD Spark ตั้งฉากกับกราวด์แผ่นขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-4 สามารถอธิบายได้ด้วยสมการการแพร่กระจายของสนามจากการเกิดเหตุการณ์ ESD ดังสมการ

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{a}_r dl \frac{h_0}{2p} \frac{rz}{R^2} \hat{e}_r \frac{1}{R^2} i + \frac{1}{cR} \frac{\partial i}{\partial t} \hat{e}_\theta + \vec{a}_z dl \frac{h_0}{2p} \frac{\hat{e}_z}{R^2} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\hat{e}_z}{R^2} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial i}{\partial t} \hat{e}_\phi \dots (21)$$

จะเห็นได้ว่าการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเกิดเหตุการณ์ ESD นั้นจะอยู่ในรูปของกระแสของการดิซาร์จ i และ $\frac{di}{dt}$ ในกรณีของการเกิดเหตุการณ์ ESD โดยทั่วไปจุดสังเกตการณ์ R จะมีขนาดที่สูงเรียกกรณีนี้ว่า **Far-field** [17] เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงจะคำนวณการแพร่กระจายสนามจากเหตุการณ์ ESD ในกรณี **Far-field** ซึ่งจะนำเฉพาะพจน์ $(cR)^{-1}$ มาคำนวณ จึงทำให้ได้สมการไดโพลโมเดลดังสมการที่ 2.2 เรียกสมการดังกล่าวนี้ว่าสมการไดโพลโมเดลของ P.F.Wilson และ MT.Ma [17]

$$E_z(t) = -\frac{m_0 c l}{4\pi} \frac{e}{\epsilon_0 r^3} \ddot{i}(t) + \frac{1}{r^2} \dot{i}(t) + \frac{1}{cr} \frac{di(t)}{dt} \quad \dots(2.2)$$

$$\text{เมื่อ } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



ภาพประกอบ 2-4 ลิเนียร์ไดโพลที่จุด Z' และ $-Z'$ [18]

สมการ 2.2 เป็นการหาค่าตอบของความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่างจุด O และจุด O' มีระยะห่างระหว่างจุดดังกล่าวเท่ากับ r โดยค่า μ_0 เป็นค่าความซึมได้ของแม่เหล็ก **magnetic permeability** ใน **free space** จะเห็นได้ว่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่แพร่จากเหตุการณ์ ESD ขึ้นอยู่กับกระแสของการดิซาร์จ และระยะทางจากจุดเกิดเหตุการณ์ ในส่วนนี้จะเป็นประเด็นที่นำมาประยุกต์ในการประเมินระยะทางจากจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้

2.41 EMF ที่รับได้จากเหตุการณ์ ESD

ในการคำนวณเพื่อหา **Electromotive force (EMF)** ที่เสาอากาศรับได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ **ESD** จะเป็นกระบวนการที่ทำให้สามารถตรวจสอบถึงระยะจากจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** ได้ จากสมการหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า [8] เมื่อนำสมการมาปรับปรุงและคิดเฉพาะส่วน **far field** จะได้สมการดังนี้

$$EMF = -L \frac{2dl}{c} \frac{1}{cr} \left\{ \left(\frac{z^2}{r^2} - 1 \right) \cos q - \frac{xz}{r^2} \sin q \right\} \frac{di}{dt} \quad \dots(2.3)$$

นำสมการ 2.3 แปลงพิกัดเป็นพิกัดทรงกระบอก

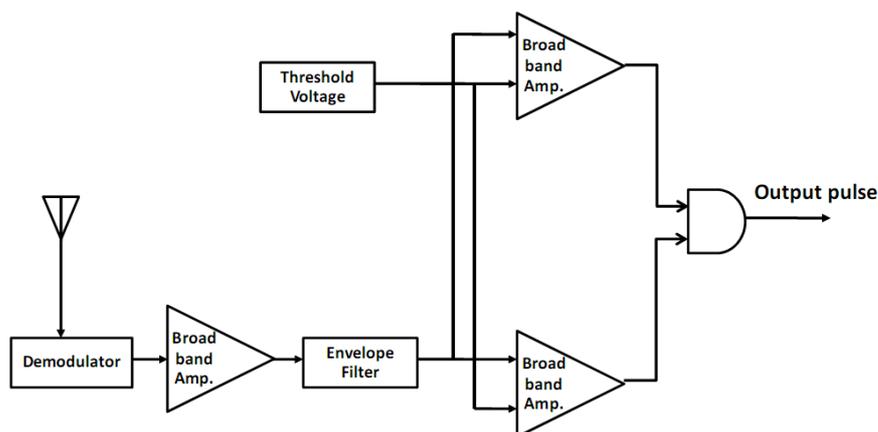
$$EMF = A(r, q, j) \left\{ dl \frac{di}{dt} \right\} \quad \dots(2.4)$$

ได้ค่า **EMF** ที่เกิดขึ้นจากเสาอากาศเป็นสมการที่ประกอบด้วยสองส่วนคือ รูปร่าง (**Shape**) และแอมพลิจูด ในส่วนรูปร่างของ **EMF** เป็นพจน์ของ $\frac{di}{dt}$ และส่วนของประสิทธิ์แอมพลิจูดเป็นพจน์ของ $A(r, q, j)$ ซึ่งส่วนนี้จะทำให้เกิดความแตกต่างกันของแอมพลิจูดของ **EMF** ในกรณีที่เสาอากาศรับสัญญาณอยู่คนละพิกัดตำแหน่ง ในส่วนนี้จึงสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการหาตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** ได้โดยใช้เสาอากาศรับสัญญาณที่ตั้งในพื้นที่ที่จะทำการตรวจวัด

2.5 ตัวตรวจจับเหตุการณ์ ESD

การตรวจจับการเกิดเหตุการณ์ **ESD** ในปัจจุบันได้มีการออกแบบอุปกรณ์สำหรับตรวจจับดังกล่าวในปัจจุบันได้มีการใช้เทคนิคในการตรวจจับสองรูปแบบคือตรวจจับจากการแพร่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า อีกรูปแบบคือใช้กลไกทางแสง โดยส่วนมากจะใช้รูปแบบการตรวจจับการแพร่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (**EMI**) เนื่องจากสะดวกและยืดหยุ่นกว่า ซึ่งในบางครั้งจึงเรียกอุปกรณ์นี้ว่า ตัวตรวจจับ **EMI (EMI Detector)** การทำงานของ ตัวตรวจจับ **EMI** จะอาศัยเสาอากาศที่คอยจับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ เนื่องจากทุกครั้งที่มีการคายประจุหรือ **ESD** จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ ศักย์ไฟฟ้าสถิต อย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดการแพร่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า **Electromagnetic Interference** กระจายออกไปในอากาศซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับการกระจาย

สัญญาณวิทยุ ซึ่งสัญญาณที่ได้จากเหตุการณ์ ESD จะมีความถี่ประมาณ 10MHz - 1.3GHz ซึ่งข้อมูลที่จะนำไปพิจารณาถึงเหตุการณ์ ESD ประกอบด้วยขนาดของ แอมพลิจูด และระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์ถึงความรุนแรงของเหตุการณ์ ESD ที่เกิดขึ้นได้



ภาพประกอบ 2-5 ตัวอย่างโครงสร้างของ ESD Event Detector ที่ใช้การตรวจจับ EMI [11]

2.5.1 EM Aware

EM Aware[19] เป็นอุปกรณ์ตรวจจับเหตุการณ์ ESD โดยวัดสัญญาณ EMI เนื่องจากการเกิด ESD จะส่งผลให้เกิด EMI ตามมา EM Aware สามารถทำงานได้โดยลำพังหรือต่อเข้ากับระบบ Facility Monitoring Systems (FMS) เพื่อตรวจวัดข้อมูลในหลายๆจุดได้ การเชื่อมต่อ EM-Aware มีการเชื่อมต่อสัญญาณแบบ 4-20 mA. ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้ในการต่อเซนเซอร์หรือทรานส์ดิวเซอร์ทั่วไปเพราะจะช่วยลดความผิดพลาดของสัญญาณที่เกิดขึ้นเมื่อสายมีระยะทางไกลได้ สัญญาณที่ออกจาก EM-Aware มีการแสดงในรูปแบบพัลส์และแอมพลิจูด ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความแรงของเหตุการณ์ ESD EM-Aware สามารถตรวจจับเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าได้ สามรูปแบบคือ Human Body Model (HBM), Machine Model (MM) และ charged device model (CDM)



ภาพประกอบ 2-6 EM-Aware [19]

คุณสมบัติของ EM Aware

ESD Events

Sensitivity	1 - 1000V
Characterization	HBM, MM and CDM
Threshold	Adjustable locally and remotely
Discharge	Polarity Both
Event Magnitude	Output to FMS, DAQ, LED Bar ESD Event Indication LED, Buzzer

Static Voltage

Types of Measurements	Induced Voltage 1" from the Surface
Measurement Range	+/-10V to +/-5000V Adjustable on-site
Indication	Output to FMS, DAQ, LED Bar

Interface

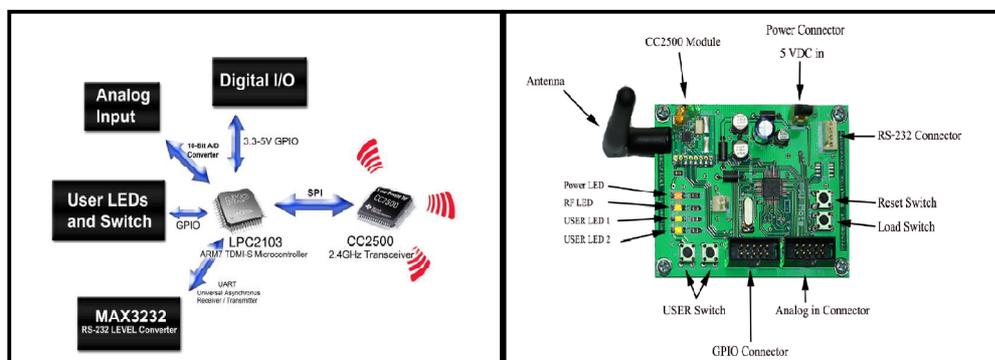
Output to FMS, DAQ	4- 20mA each channel
Connector	RJ45
Power	12- 24V DC, <200Ma

2.6 เซนเซอร์ไร้สาย

เซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor node) เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยการทำงานจากระบบสมองกลฝังตัวร่วมกับส่วนสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ โดยมีซอฟต์แวร์ที่พัฒนาโดยผู้ใช้งานซึ่งคอยจัดการการใช้งานของฮาร์ดแวร์บนเซนเซอร์ไร้สายเพื่อทำการวัด ตรวจสอบ สัญญาณจากเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เซนเซอร์ไร้สายในปัจจุบันถือว่าได้รับความสนใจและมีผู้พัฒนาออกมามากมาย แต่โดยส่วนใหญ่แล้วก็จะมีเป้าหมายในการทำงานแบบเดียวกันดังที่กล่าวไว้ข้างต้น การออกแบบเซนเซอร์ไร้สายส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การใช้พลังงานที่น้อยที่สุดเนื่องจากในการประยุกต์ใช้งานจะเป็นการอาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ ซึ่งมีขีดจำกัดในการให้พลังงาน จึงควรใช้พลังงานให้น้อยที่สุดเพื่อยืดอายุการทำงาน ในงานวิจัยนี้จะใช้เซนเซอร์ไร้สายรุ่น **PSU-Mote** เพื่อใช้ในการทดลอง **PSU-Mote[20]** ถูกออกแบบเพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างเซนเซอร์ไร้สายของกลุ่มวิจัยเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ปัจจุบันได้ออกแบบและประกอบขึ้นมาใช้งานจริงแล้ว โดยมีรุ่นที่

หนึ่ง (Ver. 1.0) นั้นได้นำมาทดลองใช้งานในรูปแบบต่างๆเพื่อทดสอบการทำงานและหาข้อบกพร่องหรือข้อจำกัด จนได้แนวทางในการออกแบบในรุ่นปัจจุบัน(Ver. 1.1) ซึ่งโดยพื้นฐานของระบบยังคงเป็นในรูปแบบของ Ver. 1.0 แต่ได้เพิ่มเติมในส่วนของการเชื่อมต่อ I/O และออกแบบให้มีขนาดเล็กลงรวมทั้งเลือกใช้จุดเชื่อมต่อรูปแบบที่มีความสะดวกในการเชื่อมต่อ ในขณะนี้ได้มีการใช้งาน PSU-Mote ในหลายๆกลุ่มเพื่อทำการวิจัยแล้ว PSU-Mote มีรายละเอียดทางด้านฮาร์ดแวร์ดังนี้

- ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 TDMI-S Core ของ NXP รุ่น LPC-2103
 - On-Chip Flash memory 64 KB
 - On-Chip RAM 8 KB
 - 8 Channel 10-bit Analog to digital converter
 - 32-bit GPIO
 - ใช้ Crystal Oscillator 16.9344 MHz โดย MCU สามารถประมวลผลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 67.7376 MIPS
- ในส่วนการสื่อสารใช้ไอซีสื่อสารไร้สาย CC2500 ในการรับส่งข้อมูล
 - True single chip 2.4 GHz RF transceiver
 - Programmable data rate up to 500 kbps
 - Low current consumption (13.3 mA in RX mode at 250 kbps)
 - Programmable output power up to 0 dBm
 - Efficient SPI interface
 - Digital RSSI output



ภาพประกอบ 2-7 โครงสร้างของ PSU-Mote และภาพตัวอย่าง PSU-Mote 1.1 [20]

2.7 กระบวนการหาตำแหน่งของเซนเซอร์ไร้สาย

การใช้งานเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (**Wireless Sensor Network : WSN**) ในปัจจุบันระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการวัด , ควบคุม และสังเกตการณ์ในสายการผลิตอุตสาหกรรม ได้เข้ามาช่วยลดข้อจำกัดที่เคยเกิดขึ้นในระบบที่ใช้สายอยู่เดิม การที่จะใช้ระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายให้ได้ถึงความสมบูรณ์แบบของการทำงานจะต้องมีกระบวนการหนึ่งเข้ามาร่วมปฏิบัติการด้วยคือ ระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์ไร้สาย ที่จะช่วยค้นหาตำแหน่งที่อยู่ปัจจุบันของเซนเซอร์ไร้สาย ช่วยให้การใช้งานเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสามารถครอบคลุมความต้องการในหลายๆด้านในงานวิจัยนี้ได้นำกระบวนการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์ไร้สายเข้ามาช่วยในการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์ไร้สายเพื่อระบุพิกัดของเซนเซอร์ไร้สายที่ใช้ในการวัดการเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตดังที่แสดงไว้ใน แบบโครงสร้างของระบบรูปแบบที่ 2 ซึ่งเป็นระบบที่ต้องอาศัยการตรวจรู้ตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตจากตำแหน่งของตัวเซนเซอร์ไร้สายที่เคลื่อนที่ไปตามสายพานการผลิต แต่อย่างไรก็ดีกระบวนการระบุพิกัดตำแหน่งถือเป็นกระบวนการที่มีโอกาสเกิดความผิดพลาดของผลคำตอบที่สูงอันเนื่องมาจากความแปรปรวนของสัญญาณที่นำมาใช้ในการคำนวณ ดังนั้นกลไกที่จะเข้ามาช่วยให้การระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์ไร้สายมีความแม่นยำใกล้เคียงค่าจริง หรือช่วยลดความเสี่ยงการเกิดความผิดพลาดขึ้น จะช่วยให้การใช้งานเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์ไร้สาย ได้มีการพัฒนาระเบียบวิธีหรือกลไกในการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์ไร้สายรวมทั้งงานวิจัยที่จะช่วยให้ปัญหาต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นลดน้อยลง ก็มีผู้ให้ความสนใจศึกษาและพัฒนาทางด้านนี้เป็นจำนวนมาก เช่น **Carsten Buschmann** และคณะได้ศึกษาวิจัยเรื่อง **Estimating Distances Using Neighborhood Intersection** งานวิจัยนี้ได้พัฒนากลไกในการหาระยะห่างระหว่างโหนดโดยใช้หลักการ **Neighborhood Intersection Distance Estimation Scheme (NIDES) [21]** ซึ่งเป็นการเพิ่มความแม่นยำในการประมาณระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ไร้สายโดยมีหลักการคือเซนเซอร์ไร้สายสองตัวที่ต้องการหาระยะห่างจะต้องมีระยะห่างไม่มากกว่า r ดังในรูปที่ โดย r คือระยะทางสื่อสาร จะเห็นว่าเซนเซอร์ไร้สายสองตัวที่มีระยะห่างดังกล่าวจะอยู่ในพื้นที่ **intersection area** จากผลการทดลองระบบที่ทำการพัฒนาขึ้นทำให้ได้ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ไม่เกิน 15% ของระยะทางสื่อสาร

Received Signal Strength Aggregate (RSSA) [22] เป็นอัลกอริทึมในการลดค่าความผิดพลาดของข้อมูล **RSSI** ที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อสิ่งแวดล้อมได้ง่าย โดยเฉพาะพื้นที่ในอาคาร และมีการนำค่า **Path Loss** ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณคลื่นวิทยุในการนำค่า

Path Loss มาคำนวณในแต่ละพื้นที่การใช้งานจะมีค่าไม่เท่ากันขึ้นกับสภาพแวดล้อม จะลดข้อผิดพลาดจากการแกว่งของข้อมูล **RSSI** ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความแปรปรวนของข้อมูลสูงได้ทำการแก้ไขปัญหานี้ด้วยโมเดลของ **White Gaussian Noise** และการคำนวณด้วยอัลกอริทึม **LMSE : Least Mean Square Error** ทำให้ความผิดพลาดของข้อมูลลดลง

จากการศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดทำให้สามารถแบ่งกลุ่มของกลไกที่ใช้ในการหาตำแหน่งของเซนเซอร์ออกเป็นสองกลุ่มคือ **Range-Based** และ **Range-Free** , **Range-Based** เป็นกลไกที่อาศัยข้อมูลของระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดตัวรับและตัวส่ง (**Transmitter to Receiver Separation : T-R separation**) ส่วน **Range-Free** เป็นการหาตำแหน่งโดยไม่อาศัยข้อมูล **T-R separation** ที่เป็นการวัดทางตรง แต่จะอาศัยข้อมูลทางอ้อมอย่างเช่น **Hop-Count** เป็นต้น กระบวนการที่ให้ได้มาซึ่งผลคำตอบของพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย **Distance estimation, Position computation** และ **Localization algorithm**[23] ดังที่จะแสดงในหัวข้อถัดไป

2.8 การประมาณระยะห่าง

หัวใจสำคัญของกระบวนการหาตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดคือการหาค่าระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนด (**T-R separation**) เป็นขั้นตอนอันดับต้นๆที่จะนำคำตอบที่ได้ไปคำนวณต่อขั้นตอนถัดไป ดังนั้นการคำนวณเพื่อประมาณค่า **T-R separation** ที่ให้คำตอบที่แม่นยำสูง จะส่งผลให้ความผิดพลาดของการคำนวณหาพิกัดของเซนเซอร์โหนดลดน้อยลงหรือให้คำตอบใกล้เคียงพิกัดจริงมากที่สุด ดังนั้นขั้นตอนการประมาณระยะห่างนั้นถือเป็นขั้นตอนที่ควรให้ความสำคัญและพิถีพิถันในการออกแบบอัลกอริทึม ในปัจจุบันได้มีระเบียบวิธีในการประมาณค่า **T-R separation** ให้ใช้งานอย่างหลากหลายดังเช่นที่จะยกตัวอย่างและอธิบายคร่าวๆดังนี้

2.8.1 การประมาณระยะแบบ Range-free

การหาค่าของ **T-R separation** โดยการไม่ใช้ข้อมูลระยะทางส่วนมากจะใช้ระเบียบวิธีการนับจำนวนของการสื่อสาร (**Hop Count**) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่เหมาะสมกับระบบ **Wireless Sensor Network** ที่มีขนาดใหญ่ และวางตัวในพื้นที่ที่ค่อนข้างกว้างหรือในสภาพเปิดโล่งเช่นพื้นที่นอกอาคาร ข้อได้เปรียบของการหาค่า **T-R separation** ในระเบียบวิธีนี้คือใช้การคำนวณที่น้อย แต่ข้อจำกัดที่สำคัญคือความไม่เป็นรูปแบบ (**Irregular**) ของการทำงานเพราะอาศัยข้อมูล **Hop-count** ที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงไปหากในระบบมีกระบวนการในการจัดเส้นทางข้อมูลที่แปรเปลี่ยนไปได้

(Dynamic Routing) จะส่งผลให้คำตอบของ **T-R separation** เปลี่ยนไปเช่นกันในขณะที่เซนเซอร์ โหนดไม่ได้มีการเปลี่ยนตำแหน่ง

2.8.2 การประมาณระยะแบบ Range-Based

ระเบียบวิธีซึ่งให้ได้มาถึงคำตอบที่เป็นค่า **T-R separation** สามารถนำข้อมูล หลากหลายมาใช้ในการหาคำตอบได้ดังนี้

2.8.2.1 การวัดค่ามุมที่มาถึง

หรือเรียกว่า **Angle of Arrival (AoA)** เป็นการวัดมุมของการวางตัวระหว่าง เซนเซอร์ โหนดซึ่งสามารถนำไปคำนวณทางตรีโกณมิติออกมาเป็นคำตอบของ **T-R separation** ได้ ระเบียบวิธีนี้จะต้องอาศัยเสาอากาศที่มีทิศทางการแพร่สัญญาณ (**Directional**) และเสาอากาศอาจมี ขนาดใหญ่ทำให้ขัดกับวัตถุประสงค์การใช้งานของเซนเซอร์ไร้สายและอาจต้องอาศัยกระบวนการ คำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนไม่เหมาะกับการนำมาใช้กับระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

2.8.2.2 การวัดเวลาที่มาถึง

หรือเรียกว่า **Time of Arrival (ToA)** ใช้ข้อมูลเวลาของการเดินทางมาถึงของ สัญญาณวิทยุ ทำให้สามารถประมาณค่า **T-R separation** ได้โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานของการเคลื่อนที่ ของคลื่น และการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ (**Radio Propagation**) แต่อย่างไรก็ตาม การจะวัด เวลาการมาถึงของสัญญาณวิทยุเป็นเรื่องที่ต้องอาศัยความเร็วของอุปกรณ์ในการประมวลผลที่สูง เพื่อที่จะสามารถจับเวลาในการเดินทางมาถึงของสัญญาณวิทยุที่เดินทางด้วยความเร็วประมาณ ความเร็วของแสง (**Speed of Light**) ซึ่งเมื่อดูจากความต้องการดังกล่าวค่อนข้างขัดแย้งกับปัจจัยใน การทำงานของ **Wireless Sensor Network** ที่มีการประมวลผลไม่ซับซ้อนและไม่ต้องการความ รวดเร็วเพื่อผลของการประหยัดพลังงานเป็นสำคัญ

2.8.2.3 การวัดความแรงสัญญาณวิทยุที่รับได้

ในการสื่อสารข้อมูลไร้สายในปัจจุบันทางด้าน **Hardware** จะนิยมไอซีสื่อสารไร้ สายสำเร็จรูป ที่จะมีฟังก์ชันของการวัดค่าความแรงของสัญญาณวิทยุที่รับได้ **Receive Signal Strength: RSSI** อันเป็นข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับ กำลังงานของสัญญาณวิทยุ (**Received Power: Pr**) ตามหลักการการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ **Pr** จะมีการแปรผกผันกับ **T-R separation** แต่ในการ

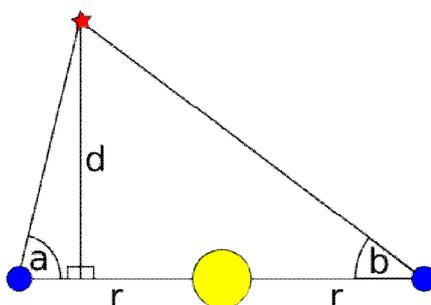
ใช้งานจริงข้อมูล **RSSI** จะเป็นข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมได้ง่าย[23] และมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงตัว อีกทั้งยังอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนต่างได้โดยง่าย จึงต้องมีการจัดการทางสัญญาณที่ช่วยลดผลกระทบดังกล่าวจะทำให้การนำข้อมูล **RSSI** ไปคำนวณเป็นค่า **T-R separation** มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้จะนำระเบียบวิธีในการประมาณระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดโดยอาศัยข้อมูล **RSSI** เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีที่เหมาะสมกับการนำมาใช้กับ **Wireless Sensor Network** เพราะลดความยุ่งยากทางด้าน **Hardware** ลงไป และไม่จำเป็นต้องใช้การประมวลผลที่มีประสิทธิภาพและมีความเร็วสูง

2.9 การคำนวณตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด

การคำนวณค่าตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด (**Position computation**) เป็นการคำนวณหาค่าตอบของพิกัดของเซนเซอร์โหนด โดยเทียบตำแหน่งกับโหนดอ้างอิง (**Anchor Node**) ซึ่งเป็นโหนดที่อยู่กับที่และรู้ตำแหน่งที่อยู่แน่นอน และโหนดข้างเคียง (**Neighbor node**) ขั้นตอนนี้จะต้องอาศัยข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า **T-R separation** ระหว่างเซนเซอร์โหนดกับ **Anchor Node** หรือ **Neighbor node** ระเบียบวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นในปัจจุบันมีดังนี้

2.9.1 ระเบียบวิธี Triangulation

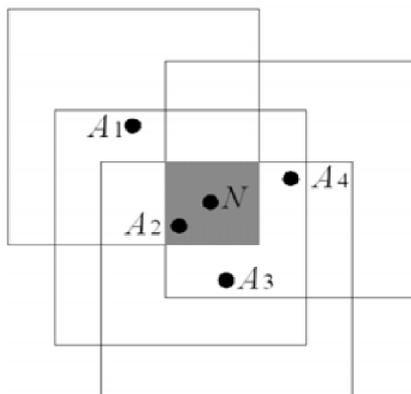
เป็นการใช้หลักการของสามเหลี่ยมมุมฉากในการหาค่าของจุดจุดหนึ่งที่ทำมุมกับจุดอ้างอิงทั้งสอง(**Anchor Node**) ดังแสดงในรูป ระเบียบวิธีนี้จะต้องอาศัยข้อมูล **Angle of Arrival (AoA)** ในการหาพิกัด [24] ข้อได้เปรียบระเบียบวิธีนี้คือใช้ข้อมูลในการคำนวณอย่างน้อยสองตัวก็สามารถให้คำตอบของพิกัดของเซนเซอร์โหนดได้ แต่ข้อเสียคือการใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนดังที่อธิบายไว้ในข้างต้น



ภาพประกอบ 2-8 การหาตำแหน่งด้วย **Triangulation**

2.9.2 ระเบียบวิธี Bounding-box

เป็นการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วยการใช้การสร้าง **Communication Area** ของแต่ละเซนเซอร์โหนด, **Anchor Node** และ **Neighbor node** แล้วทำการหาพื้นที่ทับซ้อนกันภายใน **Communication Area** ที่ครอบคลุมถึงตัวเซนเซอร์โหนดที่ต้องการหาตำแหน่ง [X] ระเบียบวิธีนี้มีข้อได้เปรียบทางด้านการคำนวณที่มีการคำนวณไม่ซับซ้อน อีกทั้งข้อมูลที่นำมาใช้เป็นข้อมูลที่คงที่โอกาสให้คำตอบผิดพลาดจึงน้อย แต่อย่างไรก็ตามคำตอบที่ได้นั้นก็ยังเป็นในแง่ของบริเวณที่ที่เซนเซอร์โหนดตั้งอยู่ ไม่ได้เป็นคำตอบที่กักคำตอบเดียว และความแม่นยำของการหาตำแหน่งนั้นกับจำนวนของ **Anchor Node** และ **Neighbor node** รอบๆ เซนเซอร์โหนด และรวมไปถึงการวางตัวของโหนดเหล่านั้นด้วย



ภาพประกอบ 2-9 การหาตำแหน่งด้วย Bounding box

2.9.3 ระเบียบวิธี Trilateration

เป็นระเบียบวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายในระบบค้นหาตำแหน่ง และได้นำมาใช้กับ **Global positioning system: GPS** ที่มีกระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียมในการอ้างอิงข้อมูลอย่างน้อย 3 ดวงเพื่อหาพิกัดตำแหน่งในแนวระนาบสองมิติ กระบวนการดังกล่าวอาศัยการคำนวณจากคณิตศาสตร์ตรีโกณมิติ พื้นฐานของ **Trilateration** [25] เสมือนการวาดวงกลมสามรูปโดยแต่ละวงมีรัศมีเป็น r_1 , r_2 และ r_3 ดังอธิบายในภาพประกอบ 2-10 วงกลมแต่ละวงจะมีพื้นที่ที่ทับซ้อนซึ่งกันและกัน บริเวณที่มีการทับซ้อนกันของวงกลมทั้งสามวงถือเป็นบริเวณที่ให้คำตอบในการนำมาใช้งานจุดศูนย์กลางของวงกลมทั้ง 3 คือตำแหน่งที่ตั้งของเซนเซอร์โหนดอ้างอิง (**Anchor Node**) ที่รู้ตำแหน่งที่แน่นอน และรัศมีของวงกลมทั้งคือค่า **T-R separation** ของเซนเซอร์โหนดและ **Anchor Node** แต่ละตัว ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากขั้นตอนการประมาณระยะระหว่างโหนดด้วยข้อมูล

RSSI เมื่อได้ข้อมูล **T-R separation** ทั้งสามแล้วจึงสามารถคำนวณหาคำตอบเป็นพิกัดของ เซนเซอร์โหนดด้วยสมการของวงกลม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกระเบียบวิธีนี้มาใช้ในการหาพิกัดของ เซนเซอร์โหนดเนื่องจากให้คำตอบที่มีความแม่นยำ ใช้การคำนวณที่ไม่ซับซ้อนเกินไป และมีความ ยืดหยุ่นในการใช้งานสูง การหาพิกัดตำแหน่งด้วยระเบียบวิธี **Trilateration** เป็นดังสมการ 2.5 ถึง 2.7

$$r_1^2 = x^2 + y^2 \dots (2.5)$$

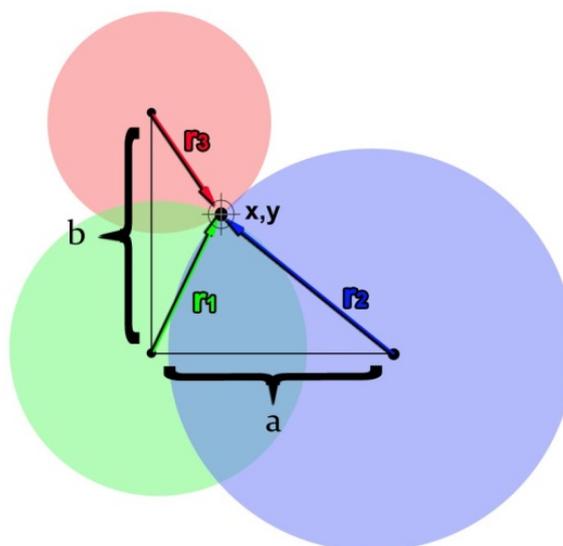
$$r_2^2 = (x-a)^2 + y^2 \dots (2.6)$$

$$r_3^2 = x^2 + (y-b)^2 \dots (2.7)$$

ตามภาพประกอบ 2-8 กำหนดให้วงกลม P_1 , P_2 และ P_3 มีรัศมี r_1 , r_2 และ r_3 โดย P_1 มีจุดศูนย์กลางที่จุดกำเนิด P_2 มีจุดศูนย์กลางที่ $(a, 0)$ และ P_3 มีจุดศูนย์กลางที่ $(0, b)$ ด้วยการแก้สมการ (2.5-2.7) เราสามารถหาค่าพิกัด x และ y ได้ดังสมการ 2.8 และ 2.9 ในงานวิจัยนี้จะ ใช้ระเบียบวิธี **Trilateration** ในการกระบวนการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด และ ตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD**

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + a^2}{2a} \dots (2.8)$$

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + b^2}{2b} \dots (2.9)$$



ภาพประกอบ 2-10 การหาตำแหน่งด้วย **Trilateration**

210 กระบวนการจัดตำแหน่ง

ขั้นตอนลำดับสุดท้ายของกระบวนการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์ โหนดคือกระบวนการจัดตำแหน่งหรือเรียกว่า **Localization** หัวใจสำคัญของกระบวนการดังกล่าวคือการชี้จุดที่ชัดเจนขึ้นของตำแหน่งหลังจากผ่านกระบวนการในขั้นตอนระบุตำแหน่ง เนื่องจากในขั้นตอนระบุตำแหน่ง นั้นคำตอบของตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดอาจมีหลายคำตอบ หรือได้คำตอบออกมาเป็นบริเวณพื้นที่หนึ่งๆ อีกทั้งการคำนวณในขั้นตอนระบุตำแหน่ง อาจเกิดความผิดพลาดจากการคำนวณค่อนข้างสูง ดังนั้นในขั้นตอน **Localization** ประกอบด้วยอัลกอริทึมที่ทำหน้าที่สำคัญสองหน้าที่ คือ อัลกอริทึมในการชี้พิกัดให้ละเอียดขึ้น และอัลกอริทึมในการปรับปรุงข้อมูลเพื่อลดค่าความผิดพลาดของผลคำตอบจะยกตัวอย่างของกระบวนการที่นำมาใช้ในอัลกอริทึมนี้ดังนี้

210.1 การคำนวณแบบทำซ้ำ

หรือเรียกว่า **Iterative Computational Methods** คือกระบวนการที่เข้ามาช่วยเพิ่มความแม่นยำของผลคำตอบที่ได้จากการคำนวณพิกัดตำแหน่งโดยอาศัยกระบวนการทำซ้ำเพื่อให้ได้จำนวนข้อมูลที่มีจำนวนมากขึ้นแล้วนำข้อมูลทั้งหมดมาผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์เช่น **Jacobi method, Gauss-Seidel method** หรือ **Successive over-relaxation method** [23] เป็นต้น

210.2 อัลกอริทึมการคำนวณแบบกลุ่ม

หรือเรียกว่า **Clustering algorithms** คือการคำนวณเพื่อหาพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดผลคำตอบที่ได้มักเป็นข้อมูลที่เกิดความผิดพลาดขึ้น **Clustering algorithms** ได้เข้ามาช่วยในการจัดกลุ่มข้อมูลออกเป็นหลายๆกลุ่มและศึกษาพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล จากนั้นจะกำหนดขอบเขตของกลุ่มโดยอิงตามระยะ (**distance-based clustering**) จากจุดกลางของกลุ่มกับสมาชิกในกลุ่มมีอัลกอริทึมที่ใช้ดังนี้ **K-means, Fuzzy C-means, Hierarchical clustering** และ **Mixture of Gaussians** อัลกอริทึมต่างๆเหล่านี้จะช่วยในการบ่งชี้หรือช่วยลดขอบเขตของคำตอบจากการคำนวณพิกัดของเซนเซอร์โหนด

210.3 การเพิ่มความแม่นยำโดยอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์

ในบางกรณีการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดอาจต้องการความแม่นยำในการคำนวณที่สูงมากๆ หรือการใช้งานในบางพื้นที่ที่มีการรบกวนของสภาพแวดล้อมสูง จำเป็นจะต้องมีกระบวนการทางคณิตศาสตร์อื่นๆเข้ามาเพิ่มเติมเช่นกระบวนการ **Artificial Neural Networks : ANN** หรือกระบวนการ **Kalman Filtering [23]** เป็นต้น ซึ่งเป็นกระบวนการประยุกต์ที่เข้ามาจัดการสัญญาณที่มีความแปรปรวนสูง

จากกระบวนการและระเบียบวิธีทั้งหลายที่ได้กล่าวมาข้างต้นที่จะใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งที่ตั้งอยู่ของเซนเซอร์โหนด เห็นได้ชัดว่ากระบวนการทั้งหลายถูกออกแบบมาเพื่อลดผลของความผิดพลาดของข้อมูลทั้งสิ้นอันเนื่องมาจากข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณนั้นค่อนข้างอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง **RSSI** ปัจจุบันพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ทางด้านกระบวนการของเซนเซอร์โหนดจะใช้ข้อมูล **RSSI** ในการคำนวณเป็นส่วนใหญ่จึงมีระเบียบวิธีใหม่เกิดขึ้นมากมายที่จะช่วยให้ระบุพิกัดได้แม่นยำขึ้นและสามารถนำไปใช้ในพื้นที่ๆส่งผลกระทบต่อข้อมูล **RSSI** โดยที่ยังสามารถให้คำตอบได้ถูกต้อง ในงานวิจัยนี้จะเป็นทำการศึกษาถึงขั้นตอนการระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด โดยอาศัยข้อมูล **RSSI** และมีการนำกระบวนการขั้นตอนต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้นเข้ามาช่วยในการลดผลจากความผิดพลาดของข้อมูล **RSSI** สัญญาณรบกวน และกระบวนการที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำของผลคำตอบโดยจะเน้นการศึกษาระบบที่ทำงานในสภาพแวดล้อมในอาคารเป็นหลัก ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่จะพบได้ในสายการผลิตของอุตสาหกรรม

211 การแพร่ของสัญญาณวิทยุ

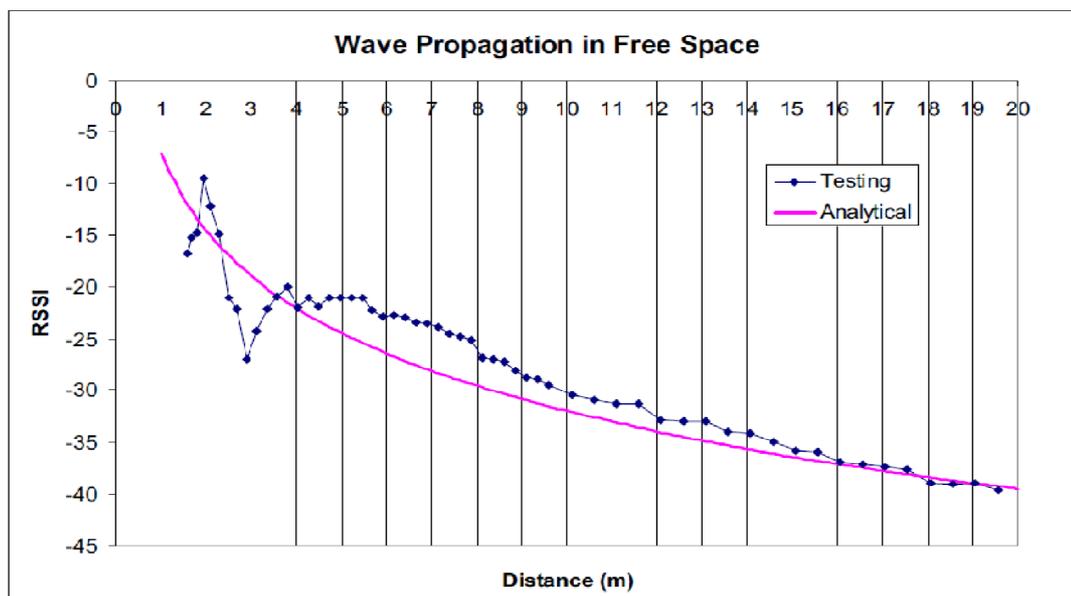
การสื่อสารไร้สายคือการสื่อสารที่อาศัยตัวกลางคืออากาศเพื่อแพร่กระจายสนามไฟฟ้าไปยังปลายทางสัญญาณที่แพร่กระจายออกไปจะเป็นความถี่วิทยุช่วงความถี่สูงเพื่อให้มีความสามารถในการแพร่ไปในตัวกลางที่เป็นอากาศได้ การที่อาศัยตัวกลางที่เป็นอากาศนั้น เป็นสาเหตุทำให้เกิดผลกระทบต่อสัญญาณจากสิ่งแวดล้อมได้ง่าย ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมอาจทำให้เกิดการลดทอน (**Attenuation**) การบิดเบี้ยวของสัญญาณ (**Distortion**) การเลื่อนเฟส (**phase shift**) และปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (**Doppler**) เป็นต้น ดังนั้นการสื่อสารไร้สายแม้จะมีความสะดวกในการนำไปใช้แต่ก็จะต้องแลกมากับโอกาสที่เกิดผลกระทบดังกล่าวได้ อีกทั้งการใช้งานในสภาพแวดล้อมบางประเภทเช่นภายในอาคาร ที่มีวัตถุ หรือ สิ่งกีดขวางเป็นจำนวนมาก จะเกิด

เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายสัญญาณเช่น การแทรกแซงกันของสัญญาณ (**Interference**) การเกิดเงาของสัญญาณ (**Shadow Fading**) เป็นต้น ทั้งหมดนี้เป็นเพียงการยกตัวอย่างผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในการใช้งานการสื่อสารไร้สาย อันถือเป็นหัวใจสำคัญอีกอย่างหนึ่งของงานวิจัยนี้ ดังนั้น การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะของการสื่อสารสัญญาณไร้สายในสภาพการใช้งานต่างๆ และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อม จะทำให้เราทราบถึงคุณสมบัติของการสื่อสารที่จะนำไปสู่การออกแบบระเบียบวิธีหรือกลไกในการหลีกเลี่ยง หรือลดผลกระทบดังกล่าวได้

211.1 กำลังวิทยุที่รับได้ในแบบจำลอง Free Space

การสื่อสารไร้สายโมเดลขั้นพื้นฐานที่จะนำมาใช้ในการอธิบายคุณลักษณะของสัญญาณคือ **Free Space Propagation Model** อันเป็นโมเดลที่ใช้ในการอธิบายถึงความแรงของสัญญาณวิทยุที่รับได้ (**Received Signal Strength**) โมเดลนี้จะอธิบายคุณลักษณะดังกล่าวเมื่อฝั่งส่งสัญญาณ และฝั่งรับรับ อยู่ในที่โล่งและไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างเส้นทางส่งสัญญาณ (**Line of Sight: LOS**) ยกตัวอย่างเช่นในการสื่อสารของดาวเทียม หรือการสื่อสารไมโครเวฟ เป็นการสื่อสารที่มีการส่งสัญญาณถึงกันแบบต่อแบบ **LOS Free Space Propagation Model** จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าความแรงของสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันที่ลดลงเป็นสัดส่วนกันระยะห่างระหว่างฝั่งรับและฝั่งส่ง (**Transmitter - Receiver Separation: T-R Separation**) สมการที่ 210 จะใช้ในการอธิบายถึงความแรงของสัญญาณที่รับได้จากการแพร่กระจายจากฝั่งส่งด้วยเสาอากาศ ในระยะทางต่างๆ ของ **T-R Separation (d)**, ในที่นี้ **d** เป็น **T-R Separation** ในขอบเขต **far-field** จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่ากำลังที่รับได้ที่ระยะต่างๆ ของ **T-R separation** จะมีการลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะดังกล่าวโดยเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับ **T-R Separation** ยกกำลังสอง ซึ่งนั้นสามารถอธิบายถึงการถูกลดทอนของสัญญาณเมื่อระยะระหว่างฝั่งกับฝั่งส่งเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน ภาพประกอบ 2-11 อันเป็นแผนภูมิของค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ **RSSI** เทียบกับระยะระหว่างตัวรับและตัวส่งจะเห็นว่าค่า **RSSI** ลดลงเมื่อระยะทางดังกล่าวเพิ่มขึ้นในแผนภูมิได้แสดงถึงค่าที่วัดจริงและค่าที่ได้จากการคำนวณเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r L^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad \dots(210)$$



ภาพประกอบ 2-11 RSSI เทียบกับ T-R Separation ใน free space

211.2 สนามการสื่อสาร

ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์สำหรับการแพร่กระจายของสัญญาณเพื่อลดความซับซ้อนของสมการลงจึงได้มีการกำหนดระยะระหว่างฝั่งรับกับฝั่งส่งซึ่งหมายถึงสนามการสื่อสาร สนามการสื่อสารถูกแบ่งออกเป็นสองช่วงคือสนามระยะใกล้ (**Near Field**) และสนามระยะไกล (**Far field**) ในสมการทางด้าน การสื่อสารส่วนใหญ่จะเน้นการอธิบายที่ระยะ **Far-field** เนื่องจากเป็นระยะที่ครอบคลุมการสื่อสารเป็นส่วนใหญ่โดยเฉพาะการสื่อสารที่ใช้ความถี่สูง ยกตัวอย่างเช่น การสื่อสารไร้สายที่ความถี่ **1 GHz** โดยใช้เสาอากาศที่มีขนาด จะมีระยะ **Far-field** อยู่ที่ **37.5 cm** ขึ้นไปจากการคำนวณตามสมการ 211 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณระยะ **Far-field** และหากสมมติให้ระยะในการสื่อสารอยู่ที่ **20m** ระยะ **Far-field** ครอบคลุมระยะการสื่อสารถึง **99.8%** จะเห็นได้ว่าระยะการสื่อสาร **Far-field** เป็นระยะการสื่อสารที่ครอบคลุมระยะการสื่อสารไว้เป็นส่วนใหญ่ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเน้นการวิเคราะห์และอธิบาย การสื่อสารในพื้นที่ **Far-field** เท่านั้น

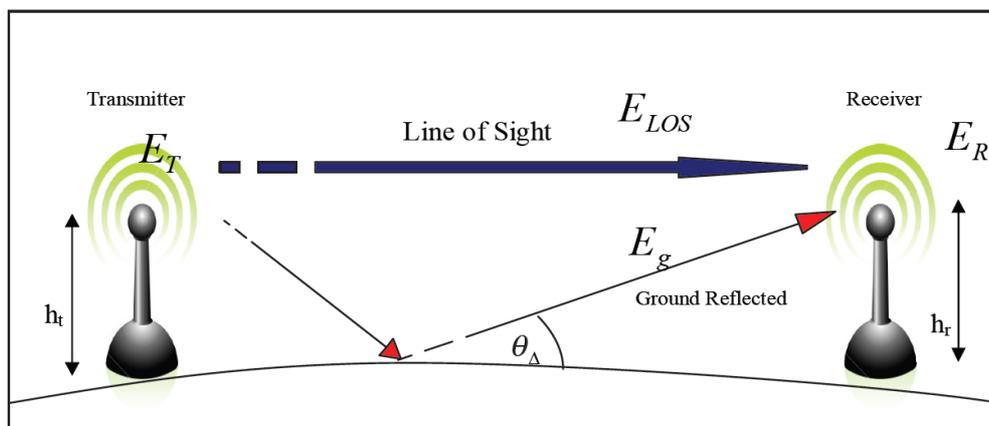
$$d_f \approx \frac{2D^2}{\lambda} \quad \dots(211)$$

ในการคำนวณหาค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ต่อระยะ **T-R Separation** สามารถคำนวณจากสมการที่ 1 และเราสามารถอธิบายได้ว่ากำลังที่รับได้มีการลดลงเทียบกับกำลังสองของ **T-R separation** ในการสื่อสารที่มีการกำหนดค่าอัตราขยายของเสาอากาศ กำลังของการส่ง เป็นค่าคงตัว และมีการวัดค่ากำลังที่รับได้ที่ระยะอ้างอิง $P_r(d_0)$ จึงสามารถอธิบายถึงกำลังที่รับได้ที่ระยะต่างๆเมื่อเทียบกับกำลังที่รับได้ที่ระยะอ้างอิง d_0 ตามสมการที่ 212

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad \dots(212)$$

211.3 การสะท้อนสัญญาณวิทยุกับพื้นโลกในแบบจำลอง Two Ray

ในการสื่อสารไร้สายจากการอธิบายในเรื่องของ **free-space propagation model** เป็นมองการแพร่ของสัญญาณในเส้นทางตรงเดียว (**Single direct path**) แต่ในความเป็นจริงแล้วเป็นเป็นเรื่องที่แทบจะเป็นไปไม่ได้ในการสื่อสารโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสื่อสารที่มีการแพร่กระจายสัญญาณออกเป็นมุมกว้างหรือทุกทิศทุกทาง (**Omnidirectional**) จึงเป็นเหตุผลให้หลายๆครั้งที่ทำให้การคำนวณหาค่ากำลังที่รับได้มีความไม่แม่นยำขึ้นหากอาศัยโมเดลของ **free-space propagation** แต่เพียงอย่างเดียว **Two Ray Ground Reflection model** จึงได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายถึงผลกระทบต่อสัญญาณวิทยุอันเนื่องมาจากการสะท้อนสัญญาณจาก พื้น โลกหรือ กระจก ที่ประกอบไปด้วยเส้นทางของสัญญาณสองเส้นทาง ได้แก่เส้นทางตรง (**LOS**) และ เส้นทางจากการสะท้อนของสัญญาณจากพื้น การเกิดเหตุการณ์นี้ได้ก็ต่อเมื่อความสูงของแพร่กระจายสัญญาณจากฝั่งส่ง (**ht**) มีความสูงจากพื้นมากกว่าศูนย์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-12 ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสัญญาณที่ฝั่งรับจะมีผลต่อทั้งการลดทอนสัญญาณ และการทำผิดเพี้ยนของสัญญาณ เนื่องมาจากการที่สัญญาณถูกแบ่งออกเป็นสองเส้นทางและมีเวลาในการเดินทางที่แตกต่างกันในเส้นทาง **LOS** สัญญาณจะมาถึงฝั่งรับก่อนสัญญาณที่สะท้อนจากพื้นเสมอ เมื่อมีเวลาที่แตกต่างกันก็จะทำให้มุมเฟสของสัญญาณทั้งสองแตกต่างกันด้วย เมื่อสัญญาณรวมกันที่ฝั่งรับก็จะทำให้เกิดการลดทอนและ **Distortion** ดังแสดงในภาพประกอบ 2-13



ภาพประกอบ 2-12 Two ray ground reflected radio propagation

ในการคำนวณหาค่าของสัญญาณที่ฝั่งรับใน โมเดล **Two Ray Ground Reflection** จะต้องเริ่มต้นจากการหาค่าความแตกต่างของระยะทางระหว่างเส้นทาง LOS และ เส้นทางของการสะท้อน Δ ตามสมการ 213 โดยที่ d คือระยะ LOS และ d'' คือระยะจากการสะท้อน และสามารถทำการหาค่ามุมการสะท้อนที่เป็นมุมที่สัญญาณจากการสะท้อนทำมุมกับพื้น q_Δ คำนวณได้จากสมการ 214

$$D = d'' - d \gg \frac{2h_t h_r}{d} \quad \dots(213)$$

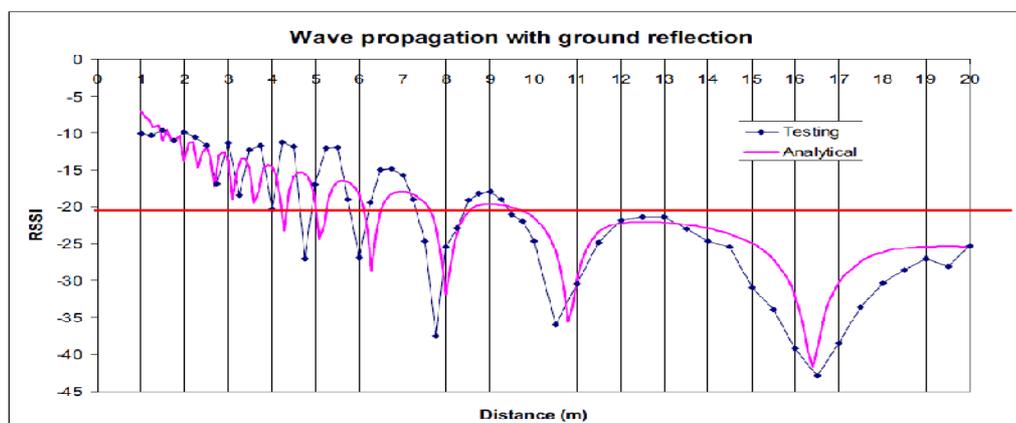
$$q_D = \frac{2pD}{l} \quad \dots(214)$$

จากหลักการการสะท้อนของพื้นฐานฟิสิกส์ ที่อธิบายเรื่องการเคลื่อนที่ของคลื่นว่า มุมของการสะท้อนจะเท่ากับมุมตกกระทบ จึงสามารถอธิบายได้ว่าสัญญาณที่ได้จากการสะท้อนจะเข้าสู่เสาอากาศเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้นนั่นคือเส้นทางที่มีมุมของการสะท้อนเท่ากับ q_Δ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสัญญาณที่ฝั่งรับรับได้โดยอาศัยโมเดล **Two Ray Ground Reflection** จะประกอบด้วยสัญญาณที่เดินทางผ่านสองเส้นทาง คือเส้นทาง LOS และเส้นทางจากการสะท้อนกับพื้น โดยที่สามารถหาค่าผลรวมของสนามไฟฟ้าจากสัญญาณทั้งสองที่เสาอากาศฝั่งรับด้วยสมการที่ 215 และเมื่อทราบถึงความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระยะ d จึงสามารถคำนวณหาค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะ d ได้จากสมการที่ 216

$$E_R(d) = \sqrt{\frac{\alpha E_0 d_0}{\epsilon} \frac{\ddot{\theta}^2}{d} (\cos q_D - 1)^2 + \frac{\alpha E_0 d_0}{\epsilon} \frac{\ddot{\theta}^2}{d} (\sin^2 q_D)} \quad \dots(215)$$

$$P_r(d) = \frac{|E|^2 G_r l^2}{480 p^2} \quad \dots(216)$$

จากผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนกับพื้นจะเห็นได้ว่าจะขึ้นกับมุมของการสะท้อน, **T-R separation**, ความสูงจากพื้นของเสาอากาศทั้งสองฝั่ง มีผลให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปทั้งสิ้น และยังผลไปถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังที่รับที่ระยะ **T-R Separation** ต่างๆด้วยดังแสดงในภาพประกอบ 2-13 เป็นแผนภูมิของค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ **RSSI** เทียบกับระยะระหว่างตัวรับและตัวส่งจะเห็นว่าค่า **RSSI** มีการเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นช่วงๆและค่า **RSSI** ซ้ำกันในระยะทางที่แตกต่างกันเช่น **RSSI** วัดได้ **-20dBm** เมื่อลากเส้นตรงในแนวนอนที่ระดับ **RSSI** ดังกล่าวจะพบว่าอยู่ตำแหน่งแตกต่างกันถึง **8** จุด ตรงจุดนี้จะเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดหากนำค่า **RSSI** ไปคำนวณกลับเป็นระยะ **T-R Separation** โดยไม่อาศัยกระบวนการอื่นมาช่วย แผนภูมิได้แสดงถึงค่าที่วัดจริงและค่าที่ได้จากการคำนวณเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน จากการวิเคราะห์แผนภูมิดังกล่าวเมื่อเทียบกับแผนภูมิในภาพประกอบ 2-11 ทำให้ทราบว่าหากอาศัยเพียงโมเดลของ **free-space propagation** ไปใช้ในการประมาณค่า **T-R Separation** จะทำให้คำตอบที่ได้มีความผิดพลาดสูง อีกทั้งยังมีหลายๆตำแหน่งที่มีค่าของกำลังที่รับได้ ซ้ำกัน ดังนั้นในการใช้งานทางด้านการประมาณค่า **T-R Separation** จะต้องมีกลไกที่ทำให้ระบบรับรู้ถึงคุณลักษณะดังกล่าวและสามารถแยกแยะจนได้คำตอบที่ถูกต้องได้



ภาพประกอบ 2-13 RSSI เทียบกับ **T-R Separation** ใน **Two ray ground reflected**

211.4 แบบจำลองการสูญเสียของสัญญาณวิทยุ

แบบจำลองทางการสื่อสารแบบไร้สายจะได้จากข้อมูลที่มีที่มาสองรูปแบบคือ ได้จากกระบวนการทางคณิตศาสตร์ (Analytical) และได้จากกระบวนการทางทดลอง (Empirical) ในส่วนข้อมูลของการทดลองจะเป็นการบันทึกข้อมูลหลายๆค่าและทำการหาแนวโน้ม จะหาสมการที่เข้ารูป (Fitting) หรือเชื่อมโยงกับสมการที่มีอยู่เดิม กระบวนการนี้จะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเรียบง่าย และครอบคลุมทุกตัวแปรในแบบจำลอง เพราะเป็นการนำข้อมูลจากการวัดจริงมาใช้ อย่างไรก็ตามการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่ต่างไปจากการทดลองที่เป็นการทดลองของแบบจำลอง ที่อาจมีการแตกต่างกันในหลายๆตัวแปรที่มีผลกระทบต่อแบบจำลอง ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะนำข้อมูลจากการบวนการ คำนวณมาเข้าร่วมในการสร้างแบบจำลอง ในการสื่อสารไร้สาย จะมีการนำแบบจำลองชนิดหนึ่ง เข้ามาร่วมในการคำนวณการแพร่สัญญาณ (Propagation) คือแบบจำลองของการสูญเสียกำลัง (Path Loss Model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการประมาณระดับสัญญาณที่ฝั่งรับซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ ระยะทาง โดยสามารถนำไปใช้ในการหาค่าของ SNR (Signal to Noise Ratio) ได้ Path loss Model จะมีประโยชน์ปรับปรุงข้อมูลของระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าของระยะทางได้มีความใกล้เคียงค่าจริงขึ้น

แบบจำลองของการสูญเสียกำลังในรูปแบบ Log-distance

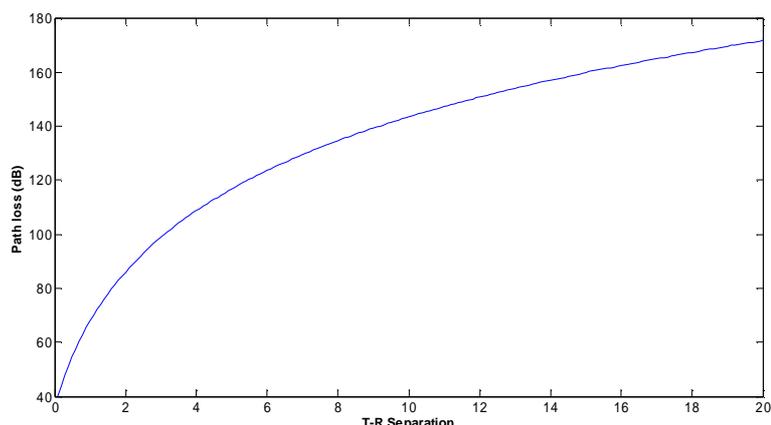
$$PL(dB) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad \dots(217)$$

n : ค่ากำลังของการสูญเสีย Path loss exponent

แบบจำลองของการสูญเสียกำลังในรูปแบบ Log-normal Shadowing

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_s \quad \dots(218)$$

X_s : ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยเกาส์เซียน s ในหน่วย dB



ภาพประกอบ 2-14 ค่า Path loss เทียบกับ T-R Separation

ค่ากำลังที่รับได้ภายใต้โมเดล **Log-normal Shadowing**

$$P_r(d)[dBm] = P_t[dBm] - PL(d)[dB] \quad \dots(219)$$

2.11.5 แบบจำลองการสูญเสียของสัญญาณวิทยุในพื้นที่ภายในอาคาร

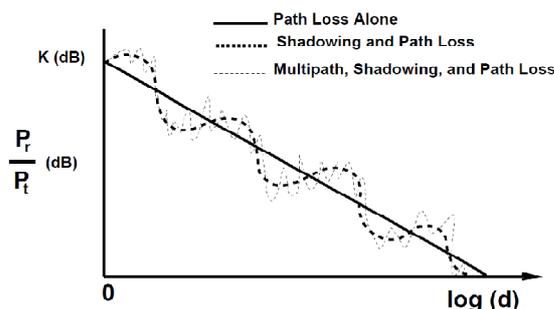
การใช้งานการสื่อสารไร้สายในสภาพแวดล้อมภายในอาคารมีความแตกต่างกันอย่างมากกับการสื่อสารไร้สายภายนอกอาคารหรือสภาพพื้นที่เปิดโล่ง ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดสองข้อคือระยะทางการสื่อสารที่สั้น และการเปลี่ยนแปลงต่อสภาพแวดล้อมของพื้นที่ทำการสื่อสารที่มีผลมาจากกิจกรรมที่เกิดจากมนุษย์หรือเครื่องจักรในบริเวณนั้นๆ การสื่อสารภายในอาคารมีผลกระทบที่มากจากอิทธิพลของตัวโครงสร้างอาคาร วัสดุที่ใช้ภายในอาคาร และสิ่งกีดขวางต่างๆ ภายในอาคาร การแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุภายในอาคารจะเป็นในทำนองเดียวกับการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุภายนอกอาคาร ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของการสะท้อน และการลดทอนเนื่องจากระยะทาง การสื่อสารไร้สายในโรงงานอุตสาหกรรม ที่แทบจะทั้งหมดมีคุณลักษณะของสิ่งแวดล้อมแบบภายในอาคาร จึงจะต้องอาศัยโมเดลที่มาอธิบายการแพร่กระจายของสัญญาณรวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมดังกล่าว การแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุภายในอาคารจะเป็นในรูปแบบหลายเส้นทาง (**multipath propagation**) ที่ประกอบด้วย เส้นทางตรง (**Line of Sight : LoS**) และเส้นทางอ้อม (**Non Line of Sight : NLOS**) การเกิด **Multipath Propagation** มักมีสาเหตุมาจาก การสะท้อน (**reflection**), **diffraction** และ **dispersion** [26] ปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดการแทรกแซงของสัญญาณที่เสาอากาศฝั่งรับ ผลกระทบต่อสัญญาณที่ฝั่งรับในสภาพแวดล้อมในอาคารสามารถอธิบายในรูปของ **Path Loss** ดังแสดงในสมการที่ 2.20

$$PL(d)[dBm] = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + ad + \sum PAF[dB] \quad \dots(2.20)$$

- n คือ **Path Loss Exponent**
 a คือ **Linear Path Attenuation**
 PAF คือ **Partition Attenuation Factor**

สมการที่ 2.20 ได้แสดงถึง **Path Loss** ที่เกิดขึ้นต่อสัญญาณในพื้นที่ในอาคาร ที่ได้ นำเอาพารามิเตอร์ **Path Loss Exponent : n** ที่เป็นค่ากำลังของการลดทอนสัญญาณในพื้นที่ต่างซึ่ง ค่า **Path Loss Exponent** นี้เป็นค่าที่แปรเปลี่ยนไปตามสภาพพื้นที่โดยอาศัยการวัดและเก็บข้อมูล เพื่อให้ได้ค่า **Path Loss Exponent** ที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่นั้นๆ อย่างไรก็ดีได้มีมาตรฐานทางการสื่อสารเป็นจำนวนมากได้อธิบายถึงเรื่อง **Path Loss** ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารและได้ กำหนดค่า **Path Loss Exponent** ขึ้นเป็นมาเป็นมาตรฐานซึ่งค่าที่กำหนดไว้นั้นเป็นค่าที่ได้วิเคราะห์ ทางสถิติจากการวัดซ้ำๆกันหลายๆครั้งในการนำไปใช้จริงจะต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าไปจากจุด ที่กำหนดออกไปเพื่อให้ได้ค่าการลดทอนใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น

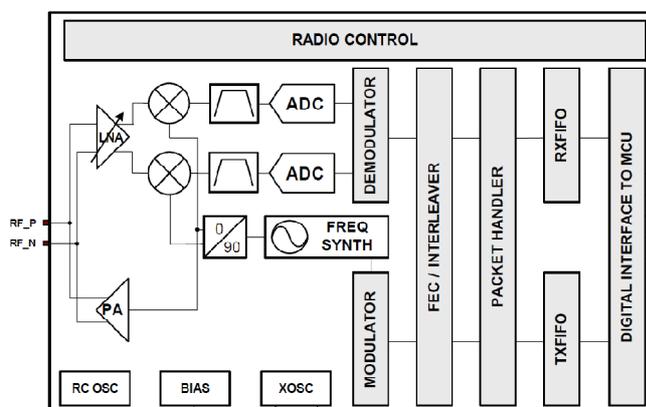
Linear Path Attenuation: a เป็นข้อมูลที่ใช้อธิบายถึงการลดทอนของสัญญาณ เส้นทางตรงที่ความถี่ของคลื่นวิทยุต่างๆค่าดังกล่าวได้มาจากการทดลองเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ทาง สถิติ **Partition Attenuation Factor: PAF** เป็นค่าการลดทอนสัญญาณวิทยุจากการแพร่กระจาย ผ่านสิ่งกีดขวางในพื้นที่นั้นๆ เช่นผนังกันห้อง ตู้เก็บของ โถง เป็นต้น อย่างไรก็ตามการสื่อสารไร้ สายในสภาพแวดล้อมในอาคารยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อสัญญาณที่รับได้นั้นคือเรื่องของ **Multipath Fading** จากการศึกษาผลของการสะท้อนในหัวข้อ 2.6 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับ โมเดลของ **Path Loss** ภายในอาคารจึงสามารถอธิบายคุณลักษณะของ การลดทอนสัญญาณได้ดัง ภาพประกอบ 2.15 จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าการใช้งานภายในอาคารประกอบด้วยปัจจัยหลักสาม อย่างคือ **Path Loss Multipath** และ **Shadowing** จากโมเดลดังกล่าวนี้จึงจะเป็นหัวใจสำคัญที่จะ อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ที่ **T-R Separation** ต่างๆกันสำหรับการ ใช้งานในอาคาร เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการประมาณค่าระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดได้อย่าง ถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 2-15 Path loss ที่ได้รับผลกระทบจากการเกิด Multipath และ Shadowing

2.12 โมดูลสื่อสารไร้สาย CC2500

การสื่อสารไร้สายจะต้องมีภาคฮาร์ดแวร์ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณวิทยุความถี่สูง อันประกอบด้วย ภาคกำเนิดคลื่นความถี่ (Frequency Oscillator) ภาคมอดูเลเตอร์ (Modulator) ภาคขยายกำลัง (Power Amplifier) และภาค LNA (Low Noise Amplifier) ที่กล่าวมาเป็นเพียงองค์ประกอบพื้นฐานยังไม่รวมถึงส่วนควบคุมการสื่อสารและตรวจสอบข้อมูล ซึ่งนั่นหมายถึงความยุ่งยากและซับซ้อนของฮาร์ดแวร์ แต่ในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาไอซีสำเร็จรูปที่รวมฮาร์ดแวร์ที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารหลายด้านเข้าด้วยกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกแนวทางดังกล่าวเข้ามาช่วย โดยใช้ไอซีสำเร็จรูปสำหรับการสื่อสารไร้สาย CC2500 [27] ของบริษัท Texas instrument โครงสร้างของ CC2500 ดังแสดงในภาพประกอบ 2-16 CC2500 เป็นไอซีประเภท Single Chip Low Cost Low Power RF Transceiver หมายถึงเป็นทั้งตัวรับและตัวส่งข้อมูลในตัวเดียวกันและใช้การควบคุมจากภายนอกด้วยการเชื่อมต่อทาง Serial Peripherals Interface : SPI



ภาพประกอบ 2-16 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของไอซีสื่อสารไร้สาย CC2500

คุณสมบัติของไอซีสื่อสารไร้สาย **CC2500**

- **True single chip 2.4 GHz RF transceiver**
- **High sensitivity (-101 dBm at 10 kbps, 1% packet error rate)**
- **data rate up to 500 kbps**
- **output power up to 0 dBm**
- **Suitable for frequency hopping systems due to a fast settling frequency synthesizer**
- **FSK, GFSK, MSK and OOK supported**
- **Programmable Carrier Sense indicator**

2.12.1 การวัดค่า RSSI

คุณสมบัติข้อหนึ่งของไอซีสื่อสารไร้สาย **CC2500** ที่สำคัญนั่นคือสามารถให้เอาต์พุตค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ **RSSI** ซึ่งถือเป็นข้อมูลที่สำคัญของงานวิจัยนี้ดังเช่นที่ได้อธิบายไว้ในเรื่องการประมาณระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดในหัวข้อ **2.8** ไอซีสื่อสารไร้สาย **CC2500** สามารถให้เอาต์พุต **RSSI** ในรูปแบบดิจิทัลเป็นข้อมูลขนาด **8 bit** ในฟอร์แมต **2's complement [24]** โดยมีค่าความละเอียดของค่า **RSSI** อยู่ที่ $\frac{1}{2}$ dB ต่อ **LSB (Least significant bit)** ในทุกๆครั้งที่มีการรับข้อมูล **CC2500** จะทำการวัดและบันทึกค่า **RSSI** ของการสื่อสารครั้งล่าสุดไว้เสมอ โดยเก็บข้อมูลไว้ที่รีจิสเตอร์ ที่ชื่อ **RSSI** ในตำแหน่งแอดเดรส **0x34 [27]** การอ่านข้อมูล **RSSI** จาก **CC2500** จะมีการกำหนดช่วงเวลาที่น้อยที่สุดในการอัปเดตค่า **RSSI** ของการรับข้อมูลแต่ละครั้งโดยสามารถคิดเป็นความถี่สูงสุดในการอ่านค่า **RSSI** ได้ตามสมการที่ **2.21**

$$f_{RSSI} = \frac{2 \cdot BW_{channel}}{8 \cdot 2^{FILTER_LENGTH}} \quad \dots(2.21)$$

$BW_{channel}$ คือ แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ

$FILTER_LENGTH$ คือขนาดข้อมูลของ **Channel Filter**

ในการรับข้อมูลแต่ละครั้ง **CC2500** จะทำการอัปเดตค่าในรีจิสเตอร์ **RSSI** ค่าใหม่เสมอซึ่งจะมีเวลาในการตอบสนองเวลานี้เป็นค่าเวลาตอบสนองที่เร็วที่สุดของวงจรอ่านค่า **RSSI** ซึ่งสามารถหาค่าเวลาดังกล่าวได้จากสมการที่ **2.22** ซึ่งเป็นการนำสมการที่ **2.21** มาประยุกต์สมการนี้จะให้คำตอบของเวลาถูกต้องเมื่อค่า **RSSI** มีค่าน้อยกว่า **-70 dBm**

$$RSSI \text{ Response Time} = \frac{8}{BW_{channel}} \cdot \left(\frac{WAIT_TIME}{2} + 1 + 2^{FILTER_LENGTH} \right) + MAX \left[\frac{20}{BW_{channel}}, \frac{10}{(8 \cdot DataRate)} \right] \quad \dots(2.22)$$

WAIT_TIME คือ เวลาในคาบของการเริ่มต้นกระบวนการ ADC

ยกตัวอย่างในการคำนวณ กำหนดให้

$$BW_{channel} = 541.6 \text{ KHz}, \text{ DataRate} = 250 \text{ Kbps}, \text{ WAIT_TIME} = 3, \text{ FILTER_LENGTH} = 1$$

$$RSSI \text{ Response Time} = \frac{8}{541666.667} \cdot \left(\frac{3}{2} + 1 + 2^1 \right) + MAX \left[\frac{20}{541666.667}, \frac{10}{(8 \cdot 250000)} \right] = 103.4 \text{ us}$$

ในการอ่านค่า **RSSI** แต่ละครั้งอาจมีเวลาตอบสนองที่ไม่เท่ากันทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการในการอ่านค่า **RSSI** จะต้องมีขั้นตอนการแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Conversion) ที่ใช้เวลาในการ **Quantizing** เพื่อแปลงข้อมูลไม่เท่ากันขึ้นกับแรงดันอินพุตของ ADC โดยในแรงดันค่าสูงจะใช้เวลาในการ **Quantizing** นานกว่าแรงดันต่ำ ดังนั้นสัญญาณวิทยุที่มีความแรงของสัญญาณที่รับได้สูง (ค่า **RSSI** สูง) จะใช้เวลาในการตอบสนองของข้อมูล **RSSI** ที่ยาวนานกว่าสัญญาณวิทยุที่มีค่า **RSSI** ต่ำดังแสดงในภาพประกอบ 2-17



ภาพประกอบ 2-17 เวลาในการตอบสนองการอ่านข้อมูล **RSSI**

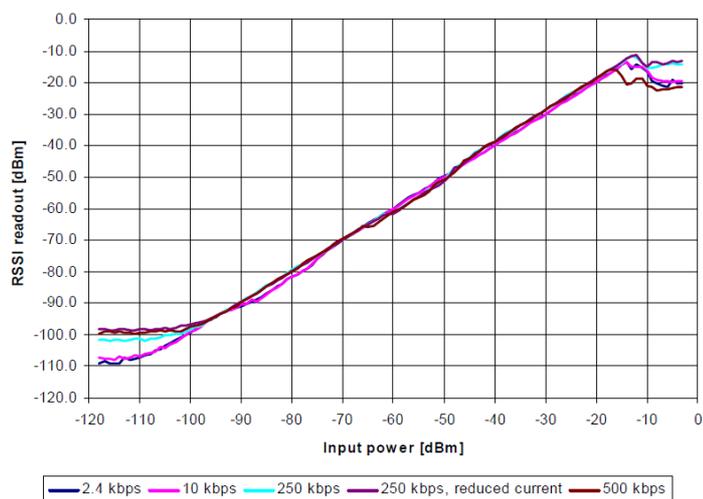
การอ่านค่า **RSSI** ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการอ่านจากรีจิสเตอร์ **RSSI** ในตำแหน่งแอดเดรส **0x34** ข้อมูลที่อ่านได้จะเป็นข้อมูล ดิจิตอลขนาด **8 bit** ในฟอร์แมต **2's**

complement ซึ่งจะต้องทำการแปลงข้อมูลจากเลขฐานสิบหกเป็นเลขฐานสิบจากนั้นนำค่าที่ได้ทำการแปลงเป็นค่ากำลังของสัญญาณที่เสาอากาศรับได้ด้วยสมการที่ 2.23 ซึ่งจะได้ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ในหน่วย dBm โดยค่า $RSSI_{DEC}$ คือค่าจากรีจิสเตอร์ $RSSI$, $RSSI_{offset}$ คือค่าระดับของ $RSSI$ ใช้ข้อมูลตามตารางที่ 2-1 และในภาพประกอบ 2-18 แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลของรีจิสเตอร์ $RSSI$ กับกำลังที่วัดจริง ณ เสาอากาศซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงข้อมูลของรีจิสเตอร์ $RSSI$ ที่เหมาะสมในการใช้งานคือช่วง -20 ถึง -100 dBm เพราะเป็นช่วงที่ทำให้คำตอบใกล้เคียงค่าจริง

$$RSSI_{dBm} = \begin{cases} \frac{RSSI_{DEC} - 256}{2} - RSSI_{offset} & , RSSI_{DEC} \geq 128 \\ \frac{RSSI_{DEC}}{2} - RSSI_{offset} & , RSSI_{DEC} < 128 \end{cases} \quad \dots(2.23)$$

ตารางที่ 2-1 ค่า $RSSI_{offset}$

Data rate [kbps]	$RSSI_{offset}$ [decimal]
2.4	71
10	69
250	72
500	72



ภาพประกอบ 2-18 ค่า $RSSI$ ที่อ่านได้จาก CC2500 เทียบกับค่า $RSSI$ จริง

2.12.2 คุณสมบัติของเสาอากาศ

คุณลักษณะของเสาอากาศที่ใช้ในการสื่อสารไร้สายถือเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณวิทยุที่แพร่กระจายออกไปรวมถึงสัญญาณที่รับได้ คุณสมบัติของเสาอากาศที่จะต้องพิจารณาเพื่อที่จะเลือกมาใช้ในการสื่อสารนั้นควรเลือกให้เหมาะสมกับกำลังส่ง, ระยะการสื่อสาร, พื้นที่การใช้งาน (เช่น เปิดโล่ง, มีสิ่งกีดขวาง) รวมทั้งพื้นที่การครอบคลุมของการสื่อสารที่ต้องการด้วย ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เสาอากาศย่านความถี่ **2.4GHz** ชนิดไดโพลมีคุณสมบัติดังนี้

Frequency Range : 2.4-2.5GHz

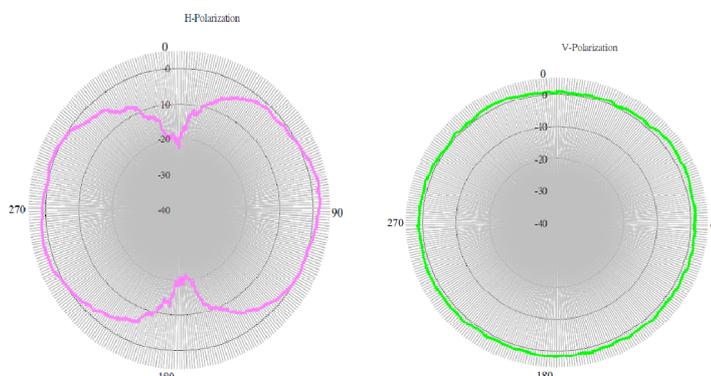
Impedance : 50ohms nominal

VSWR \leq 2.0

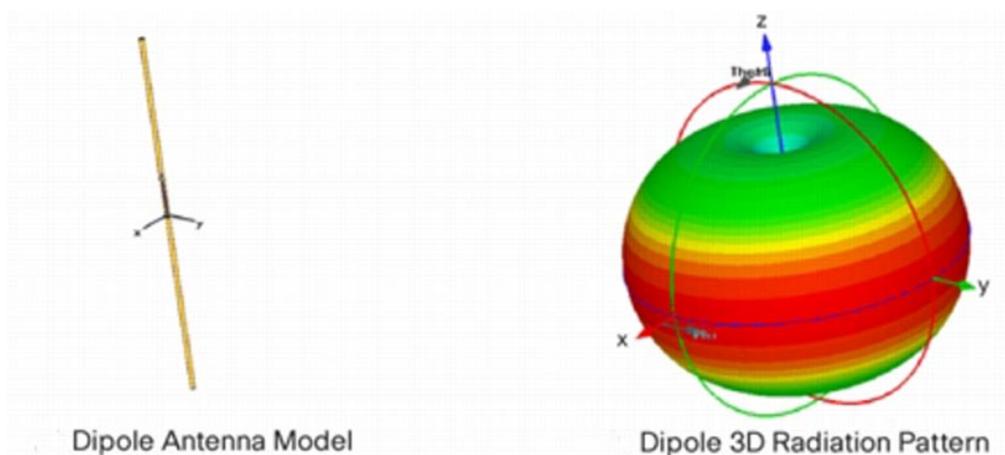
Gain: 2dBi

Connector: SMA Connector

คุณลักษณะอีกข้อหนึ่งของเสาอากาศที่ต้องนำมาวิเคราะห์หาคือแผนภาพการแพร่สัญญาณ (**Radiation Pattern**) ที่อธิบายถึงการแพร่ของสัญญาณจากเสาอากาศโดยภาพจะแบ่งออกเป็นสองรูปคือภาคตัดขวางแนวนอน (**Horizontal - Plan**) และภาคตัดขวางแนวตั้ง (**Vertical - Plan**) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-19 เป็นรูปที่แสดง **Radiation Pattern** ของเสาอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแพร่กระจายจะเป็นแบบทุกทิศทุกทางอย่างเท่ากันเมื่อมองจากระนาบแนวตั้ง (ขวามือ) และเมื่อมองจากระนาบแนวดิ่ง (ซ้ายมือ) มีการแพร่กระจายเป็นวงกลมไปทุกทิศทางเช่นเดียวกันแต่ในช่วงมุม **0 องศา** และ **180 องศา** สัญญาณจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง ทำให้เมื่อมองภาพการแพร่สัญญาณของเสาอากาศในรูปสามมิติจะพบว่าเป็นทรงกลมและบุ๋มเข้าในแกนแนว **Vertical** มีลักษณะคล้ายลูกแอปเปิ้ล ดังแสดงในภาพประกอบ 2-20



ภาพประกอบ 2-19 Radiation Pattern ของเสาอากาศ



ภาพประกอบ **2-20 Radiation Pattern** ของเสาอากาศในรูปแบบสามมิติ

ตารางที่ **2-2** ค่า **VSWR** ของเสาอากาศ

Center freq. @MHz	BW @MHz	VSWR		
		2.4GHz	2.45GHz	2.5GHz
2450		1.83	1.41	1.57

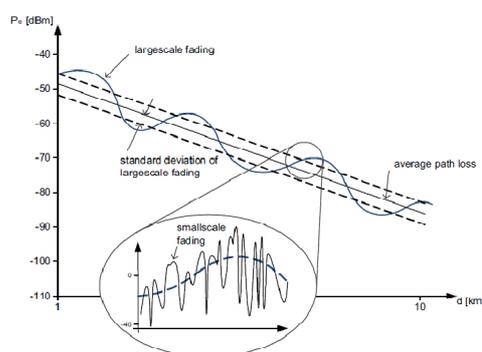
ตารางที่ **2-3** Return Loss ของเสาอากาศ

Center freq. @MHz	BW @MHz	Return Loss		
		2.4GHz	2.45GHz	2.5GHz
2450		-10.56	-15.26	-13.10

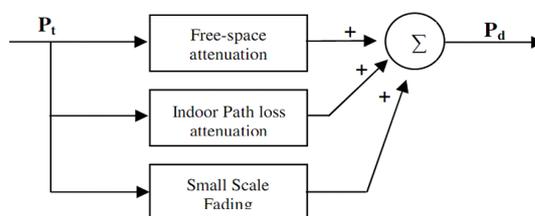
ปัจจัยเกี่ยวกับเสาอากาศที่เลือกใช้ในการรับส่งข้อมูลนี้ถือว่าเป็นปัจจัยที่จะมีผลกระทบโดยตรงต่อความแรงของสัญญาณที่ได้รับ **RSSI** ซึ่งจะช่วยอธิบายถึงขอบเขตของการแพร่สัญญาณวิทยุที่ครอบคลุมการสื่อสาร และในการวัด **RSSI** ให้ได้ผลที่ถูกต้องต้องควรเลือกในบริเวณการแพร่กระจายของคลื่นที่มีความสม่ำเสมอกันยกตัวอย่างจากภาพประกอบ **2-19** ในส่วนของ **Vertical Pattern** จะเห็นว่ามีความบางส่วนที่การแพร่กระจายคลื่นมีการลดทอนและไม่สามารถกระจายคลื่นได้หากเราสื่อสารข้อมูลระหว่างตัวรับและตัวส่งโดยมีแนวเส้นการส่งสัญญาณที่พาดผ่านบริเวณดังกล่าวจะทำให้สัญญาณที่ไปถึงตัวรับนั้นมีระดับสัญญาณต่ำหรืออาจสื่อสารไม่ได้ ซึ่งนั่นก็จะส่งผลกระทบต่อข้อมูล **RSSI** ให้มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างตัวรับกับตัวส่งที่ผิดแปลกไปจากเดิมที่สื่อสารในแนวที่มีการแพร่กระจายสัญญาณในระดับเดียวกัน และยังเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับการจำลองการทำงานของโมเดลหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์ เปรียบเทียบ กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง

2.13 การลดผลความผิดพลาดของข้อมูล RSSI

การประมาณระยะระหว่างเซนเซอร์โหนดถือเป็นหัวใจสำคัญในการระบุพิกัดของเซนเซอร์โหนดอัลกอริทึมในการให้ได้มาซึ่งคำตอบที่แม่นยำหรือความผิดพลาดที่น้อยที่สุดก็จะทำให้การระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดแม่นยำตามมา ในหัวข้อนี้จึงได้นำหลักการและทฤษฎีที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้มาเป็นแนวทางเพื่อนำไปสู่การออกแบบอัลกอริทึมสำหรับประมาณระยะระหว่างเซนเซอร์โหนดโดยอาศัยข้อมูล **RSSI** ดังนั้นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการที่จะอธิบายลักษณะของ **RSSI** ที่แปรเปลี่ยนไปตามระยะทางระหว่างโหนดดังเช่นที่แสดงในภาพประกอบ 2-25 ที่แสดงกำลังที่รับได้เทียบระยะต่างๆ ในสภาพแวดล้อมในอาคาร ที่มีผลจากสัญญาณสะท้อน หรือการเกิด **Fading** ได้ง่าย เราจึงสามารถอธิบายผลกระทบของสภาพแวดล้อมในอาคารต่อกำลังที่รับได้เมื่อเทียบกับระยะ **T-R Separation** เป็นโครงสร้างดังแสดงในภาพประกอบ 2-26 แสดงให้เห็นผลกำลังของสัญญาณที่รับได้ขึ้นกับปัจจัยสามอย่างด้วยกันประกอบด้วย **Free-Space Attenuation**, **Indoor path loss attenuation** และ **Small Scale Fading** และสามารถหาค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ จากสมการที่ 2.24



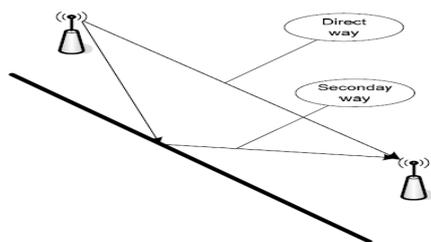
ภาพประกอบ 2-21 กำลังที่รับได้จากสภาพแวดล้อมที่มีการรบกวนจากปัจจัยต่างๆ [23]



ภาพประกอบ 2-22 โมเดลอย่างง่ายของการรบกวนจากปัจจัยต่างๆต่อสัญญาณวิทยุ

$$P_d [dBm] = P_{free-space}(d) [dB] + PL(d) [dB] + P_{Fading} [dB] \quad \dots (2.23)$$

ในสภาพแวดล้อมของการสื่อสารในอาคารมีโอกาสที่สัญญาณจะเจอกับสิ่งกีดขวางในบางครั้งสิ่งกีดขวางเหล่านั้นอาจไม่ได้เข้ามาบดบังเส้นทางการสื่อสารในเส้นทางตรงหรืออาจอยู่ในแนวอื่นของการสื่อสารเช่นผนังกันห้อง หรือฝ้าเพดาน เป็นต้น สิ่งนี้เป็นสาเหตุให้เกิดสัญญาณสะท้อนขึ้นดังแสดงในภาพประกอบ 2-27 ที่ประกอบด้วยสัญญาณจากเส้นทางตรง และสัญญาณจากเส้นทางการสะท้อน ตามปกติแล้วสัญญาณที่มาจากการสะท้อนจะเป็นสัญญาณที่มีขนาดแอมพลิจูดที่ต่ำกว่าสัญญาณในเส้นทางตรงและมีมูมเฟสที่แตกต่างกับมูมเฟสของสัญญาณในเส้นทางตรง เนื่องมาจากสัญญาณจากการสะท้อนจะใช้เวลาเดินทางนานกว่าเส้นทางตรงเนื่องจากระยะทางที่มากกว่าดังนั้นในส่วนนี้จะเป็นการนำเทคนิคในการตรวจจับเวลาการเดินทางมาถึงของสัญญาณในการช่วยแยกแยะสัญญาณเส้นทางตรงกับสัญญาณจากการสะท้อนได้โดยการหาค่าเวลาที่น้อยที่สุดในการเดินทางของสัญญาณซึ่งจะหมายถึงสัญญาณในเส้นทางตรง



ภาพประกอบ 2-23 การเกิด **Multipath** ในการสื่อสารไร้สาย

สัญญาณในเส้นทางตรงถือเป็นสัญญาณที่สำคัญและง่ายต่อการนำไปประมาณระยะระหว่างเซนเซอร์โหนด แต่การที่จะแยกแยะสัญญาณดังกล่าวออกจากสัญญาณอื่นๆก็ถือเป็นเรื่องที่ทำได้ยากและต้องใช้การประมวลผลที่มีความเร็วสูงดังนั้นกลไกดังกล่าวมานี้จะพัฒนาขึ้นเป็นตัวช่วยในการขจัดปัญหา **Multipath** ในระบบสื่อสารเพื่อดูความเป็นไปได้เท่านั้นการนำไปใช้งานจริงอาจเป็นเรื่องไม่สะดวกนักที่จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการจับเวลาในการเดินทางของคลื่นไฟฟ้าแม่เหล็ก ที่มีความเร็วในการเดินทางใกล้เคียงความเร็วแสง

Multi frequency Technique คืออีกกระบวนการหนึ่งที่ได้ออกแบบขึ้นการใช้ความถี่มากกว่า 1 ย่านความถี่ในการสื่อสาร โดยเป็นย่านความถี่ที่ห่างกันมากเช่น 433 MHz กับ 2.4 GHz จะทำให้สัญญาณที่เดินทางไปยังตัวรับได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากผลของความถี่ที่แตกต่างกันมาก สามารถนำไปใช้ในการหาค่ากำลังส่งในเส้นทางจริงได้ หรือแก้ไขปัญหาคาการแกว่งของสัญญาณด้วยการกำจัดตัวแปรที่ทำให้เกิดผลกระทบดังกล่าวออกไป

บทที่ 3

ระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์ภายในประจําไฟฟ้าสถิตโดยอาศัยการวัดความแรงของการ รบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1 แนวคิดเบื้องต้นของการออกแบบระบบ

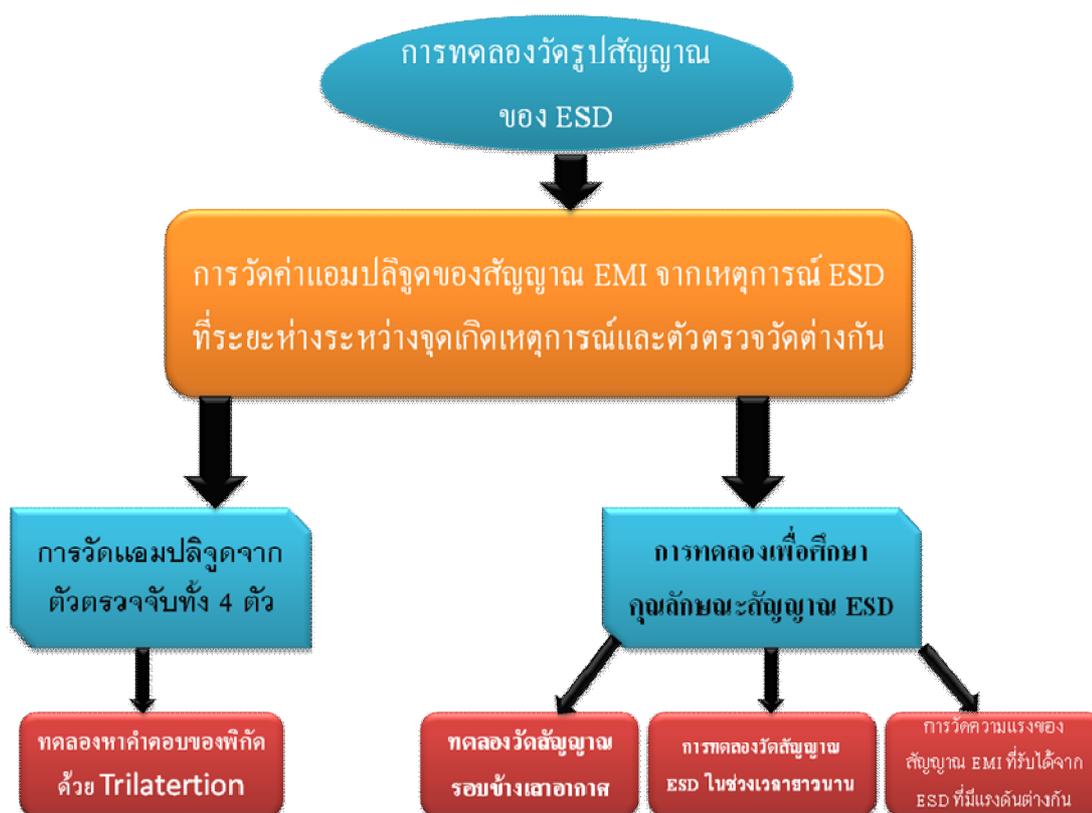
ในบทนี้เป็นการศึกษาแนวทางในการตรวจหาตำแหน่ง ESD ด้วยกระบวนการตรวจวัดความแรงของสัญญาณ EMI โดยในเบื้องต้นจะเป็นการศึกษาคุณลักษณะของการแผ่ EMI ที่มาจากเหตุการณ์ ESD ว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ ESD และตัวตรวจจับได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสัญญาณ EMI กับระยะห่างของตัวตรวจจับกับจุดเหตุการณ์ แล้วจึงนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการประมาณระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับ EMI ซึ่งข้อมูลระยะห่างดังกล่าวสามารถนำไปในกระบวนการหาตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้ โดยใช้ระบบวิธี Trilateration [25] ที่เป็นพื้นฐานของระบบ GPS (Global positioning system) ในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้หลักการดังกล่าวมาใช้ในการหาพิกัดจุดเหตุการณ์ ESD โดยการใช้ข้อมูลของความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2 การทดลอง

การทดลองถูกแบ่งออกเป็นหลายหัวข้อ การทดลองถูกจัดหมวดหมู่ตามโครงสร้างดังแสดงในภาพประกอบ 3-1 ในส่วนแรกเป็นการศึกษาคุณลักษณะของกระแสดิซชาร์จที่ส่งต่อสัญญาณ EMI การทดลองนี้ช่วยยืนยันความสัมพันธ์ที่ได้ศึกษาไว้ในบทที่ผ่านมาในส่วนของความสัมพันธ์ของสัญญาณ EMI ที่แผ่จากเหตุการณ์ ESD กับกระแสของการดิซชาร์จเหตุการณ์ ESD และการทดลองวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI จากเหตุการณ์ ESD ที่ระยะห่างระหว่างจุดเหตุการณ์และตัวตรวจวัดต่างกัน สุดท้ายจะทำการทดลองวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI จากเหตุการณ์ ESD ในพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อหาตำแหน่งของจุดเหตุการณ์ ESD การทดลองทั้งสองจะเป็นการศึกษาถึงลักษณะสัญญาณ EMI ที่แผ่จากการเกิดเหตุการณ์ ESD ดังที่อธิบายมาแล้วข้างต้นเพื่อหาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่จะใช้เป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ตรีโกณมิติเพื่อหาคำตอบเป็นพิกัดตำแหน่งและมีการทดลองบางส่วนในการศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเหตุการณ์ ESD เพื่อใช้

ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบกลไกในการเพิ่มความแม่นยำของระบบ เนื่องจากการทดลองจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีแบนวิดท์และอุปกรณ์การทดลองเฉพาะด้านจึงทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการทางด้าน ESD ของบริษัทซีเกต (เทพาร์กซ์) มีอุปกรณ์ในการทดลองดังนี้

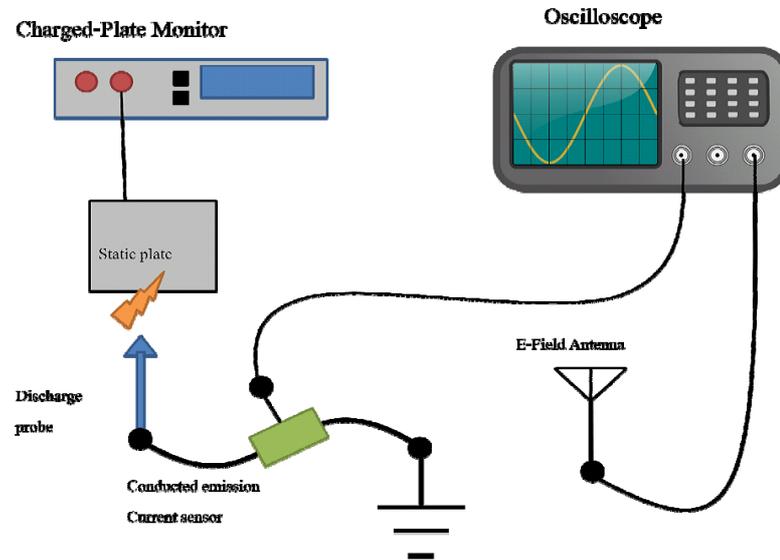
- Credence EM-AWARE ESD-EMI Detector
- Credence CTI-332 Current/EOS clamp antenna
- Credence CTC-114 Remote Radiated EMI antenna
- Tektronix 684B 3GHz bandwidth Digital Oscilloscope
- TREK model 156A Charged-Plate Monitor
- Windaq 700 Data Acquisition



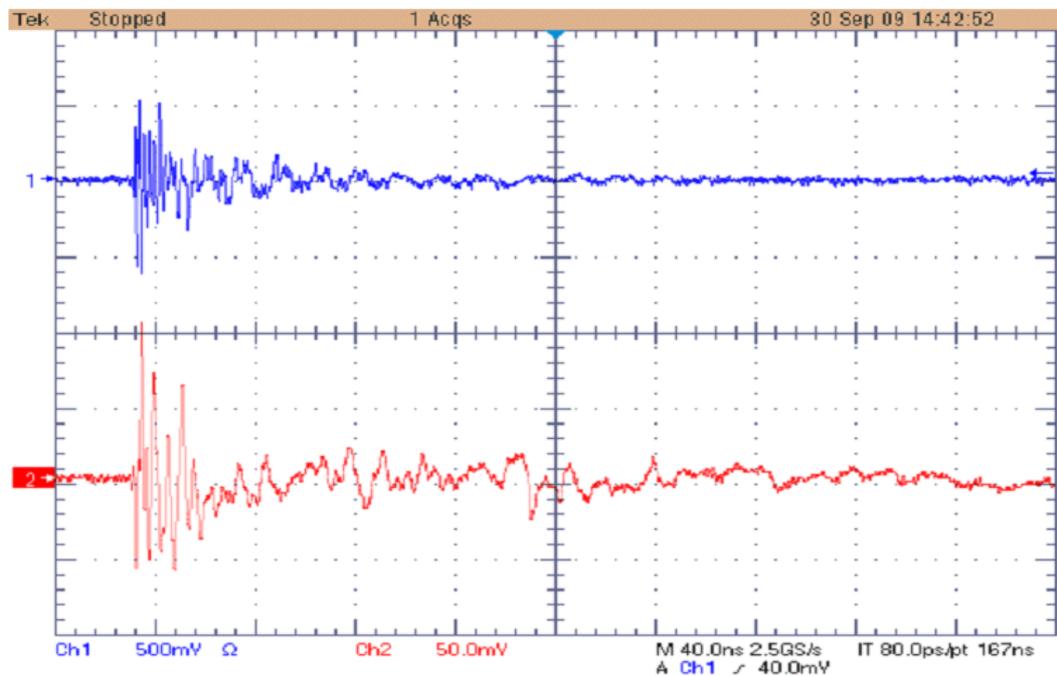
ภาพประกอบ 31 แผนผังการทดลองในการออกแบบระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์ภัยประจุไฟฟ้าสถิต โดยอาศัยการวัดความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

3.21 การทดลองวัดรูปสัญญาณของเหตุการณ์ ESD

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงรูปของสัญญาณของการเกิดเหตุการณ์ ESD จากสมการที่ 24 ทำให้ทราบว่ารูปร่างของสัญญาณจากการแพร่ของสนามเหตุการณ์ ESD ขึ้นกับกระแสของการดิสชาร์จ ดังนั้นในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะดังกล่าว โดยทำการทดลองวัดรูปสัญญาณของการเกิดเหตุการณ์ ESD ทั้งสองจุดคือ วัดรูปคลื่นกระแสของการดิสชาร์จ และวัดรูปคลื่นแรงดันที่เสาอากาศรับได้ ในการทดลองใช้อุปกรณ์ **Conducted Emission Current Sensor** ของ **Credence Technology** รุ่น **CTI-332** ทำหน้าที่ในการแปลงกระแสที่ไหลในสัญญาณที่คล้องผ่านอุปกรณ์ดังกล่าว ให้เป็นแรงดันเพื่อนำสัญญาณที่ได้ต่อเข้ากับออสซิลโลสโคปเพื่อวัดรูปสัญญาณกระแส และในส่วนตรวจวัดคลื่นแรงดันใช้อุปกรณ์ **E-Field Antenna** ของ **Credence Technologies** รุ่น **CTI-113** ทำหน้าที่เป็นเสาอากาศรับคลื่นสนามไฟฟ้าต่อเข้ากับออสซิลโลสโคปเพื่อวัดรูปสัญญาณสนามไฟฟ้าที่แพร่มายังเสาอากาศ ในการทดลองใช้อุปกรณ์ **Oscilloscope** รุ่น **TDS-554** ของ **Textronics** ในการจับคลื่นสัญญาณและบันทึกภาพ และใช้อุปกรณ์ **Charged-plate Monitor** เพื่อทำการจำลองประจุสะสมบนพื้นผิวและทำการดิสชาร์จที่แรงดัน 50 โวลต์ และ 100 โวลต์ ทำการดิสชาร์จประจุที่สะสมบนแผ่นเพลทลงสู่กราวด์ในรูปแบบ (Machine model: MM) โดยให้ระยะห่างระหว่างจุดดิสชาร์จและเสาอากาศเป็นระยะตั้งแต่ 10-60 cm เพิ่มครั้งละ 10 cm โดยเก็บข้อมูลจุดละ 20 ครั้ง เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยข้อมูลได้ผลการทดลองและให้สายกราวด์ที่ใช้ในการดิสชาร์จคล้องผ่านอุปกรณ์ **Conducted Emission Current Sensor** เพื่อวัดในรูปคลื่นของกระแสดิสชาร์จในรูปแบบ **Machine Model** ได้ผลการทดลองเป็นรูปคลื่นดังภาพประกอบ 3-3



ภาพประกอบ 3-2 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองวัดรูปสัญญาณกระแสดิสชาร์จและสัญญาณจากการแผ่ EMI ของ ESD

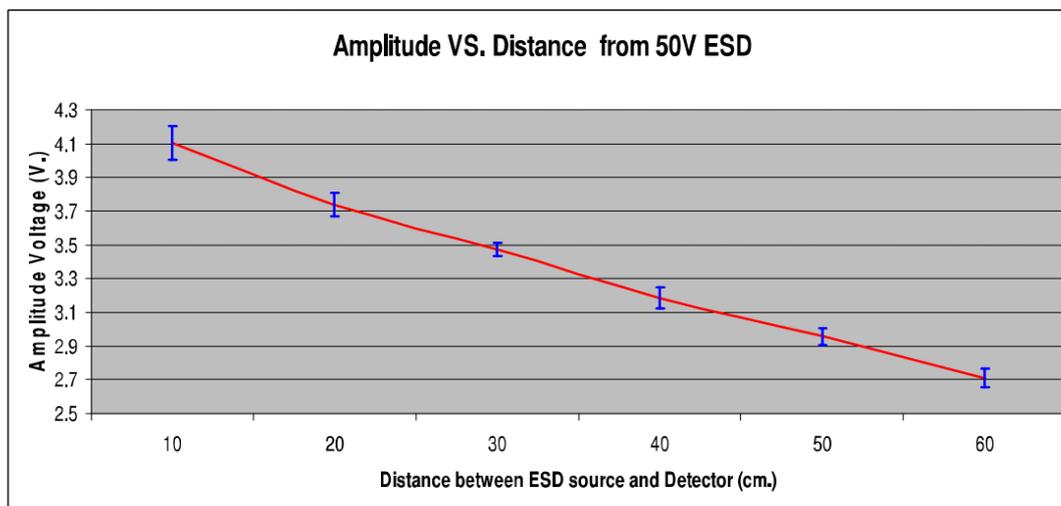


ภาพประกอบ 3-3 ผลการทดลองวัดรูปสัญญาณกระแสดิสชาร์จและสัญญาณการแผ่ EMI ของ ESD

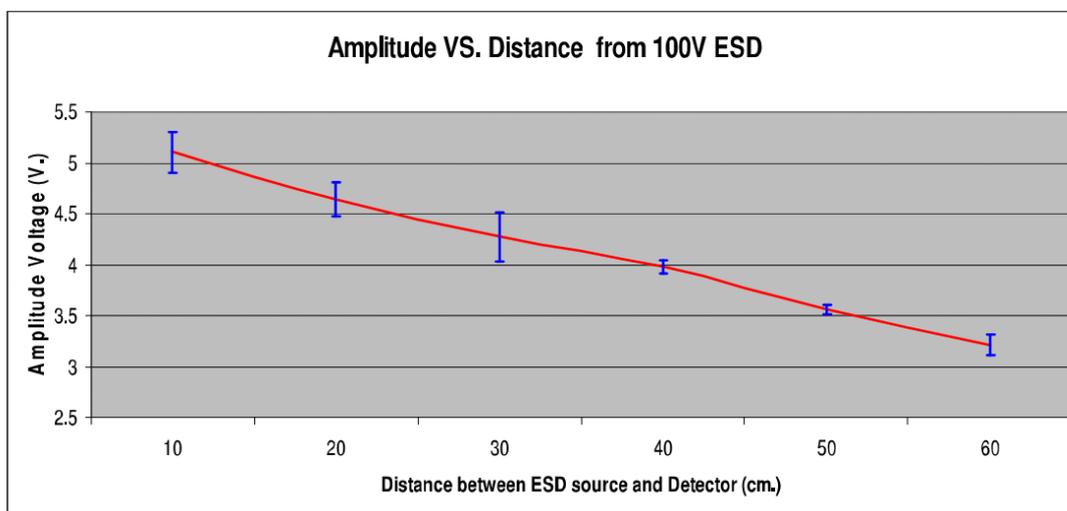
จากผลการทดลองในภาพประกอบ 3-3 เส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณที่ได้จาก **Current sensor** เส้นสีแดงคือสัญญาณจาก **E-field antenna** เป็นตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดพบว่ารูปสัญญาณกระแสดิซชาร์จ์ และสัญญาณจากการแพร์ **EMI** และ **ESD** มีความคล้ายคลึงกันในทุกๆ การทดลอง ในส่วนนี้สามารถพิสูจน์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณกระแสดิซชาร์จ์และสัญญาณจากการแพร์ **EMI** ว่ามีความเกี่ยวพันโดยตรง

3.2.2 การวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ **EMI** จากเหตุการณ์ **ESD** ที่ระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์และตัวตรวจวัดต่างกัน

ทำการทดลองวัดสัญญาณจาก ตัวตรวจวัด **EMI** โดยทำการเชื่อมต่อ ตัวตรวจวัด **EMI** เข้ากับ อุปกรณ์ **Data Acquisition** ที่มีอัตราสุ่มข้อมูลสูงสุดที่ **10 KS/s** และความละเอียดของข้อมูล **12** บิต อุปกรณ์นี้สามารถวัดสัญญาณได้ในแบบต่อเนื่อง (**Real Time**) แล้วทำการบันทึกข้อมูลแอมพลิจูดของสัญญาณ **EMI** ที่เกิดจากการแพร์ของการเกิด **ESD** การทดลองเป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดของสัญญาณ **EMI** จาก **ESD** กับระยะห่างว่าจะมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเป็นในรูปแบบใดเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการประมาณระยะห่างของจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** วิธีการทดลองใช้การจำลองการเกิดเหตุการณ์ **ESD** ด้วยเครื่องมือ **Charged Plate Monitor** ซึ่งสามารถสร้างประจุบนผิวของแผ่นเพลท (**plate**) ในระดับแรงดันต่างๆ ได้ตั้งแต่ **1 - 1000** โวลต์ โดยในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองที่สองระดับแรงดันคือ **50** โวลต์ และ **100** โวลต์ เนื่องจากเป็นระดับแรงดันที่อยู่ในช่วงตรงกลางของระดับแรงดันการเกิดเหตุการณ์ **ESD** ที่มักเกิดขึ้นในโรงงานคือแรงดันระหว่าง **20-250** โวลต์ และการเลือกช่วงแรงดันในการทดลองที่ระดับดังกล่าวเป็นระดับแรงดันที่ไม่ต่ำเกินไปและสูงเกินไปซึ่งอาจเกิดปัญหาในการวัดข้อมูลได้ ยกตัวอย่างเช่นหากเลือกใช้แรงดันต่ำจะทำให้ผลการทดลองมีค่าความผิดพลาดง่ายเพราะสัญญาณการแพร์ **EMI** จะมีความเบาบาง และหากระดับแรงดันทดลองมีค่าสูงเกินไปจะทำให้มองเห็นการเปลี่ยนแปลงของความแรงของ **EMI** ได้น้อยใน และระยะทางสำหรับการทดลองจะต้องใช้พื้นที่การทดลองที่มีขนาดกว้างมาก ในการทดลองทำการดิซชาร์จ์ประจุที่สะสมบนแผ่นเพลททองสุกราวด์ในรูปแบบ **MM (Machine model)** กำหนดจุดที่ทำการดิซชาร์จ์ตั้งแต่ **10-60 cm** ซึ่งเป็นระยะทางมากที่สุดที่จะทำการทดลองได้บนโต๊ะทดลองภายในห้องปฏิบัติการทางด้าน **ESD** เพิ่มครั้งละ **10 cm** โดยเก็บข้อมูลจุดละ **20** ครั้ง เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยข้อมูลและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ผลการทดลองดังภาพประกอบ 3-4 และ ภาพประกอบ 3-5



ภาพประกอบ 3-4 ผลการทดลองแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI ที่ระยะต่างๆ จาก ESD ระดับ 50 โวลต์

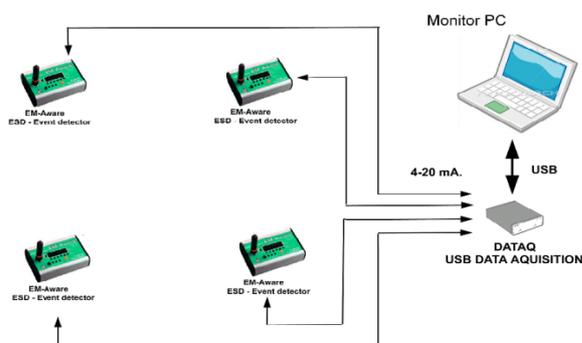


ภาพประกอบ 3-5 ผลการทดลองแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI ที่ระยะต่างๆ จาก ESD ระดับ 100 โวลต์

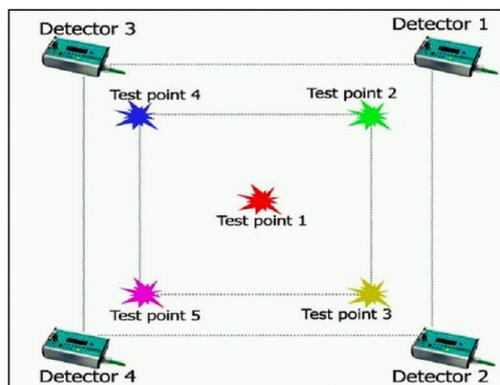
จากแผนภาพในภาพประกอบ 3-4 และภาพประกอบ 3-5 เห็นได้อย่างชัดเจนว่า แอมพลิจูดของสัญญาณ EMI ที่ตัว Detector ตรวจจับได้มีความสัมพันธ์กับระยะทางในบริเวณที่ทำการทดลอง โดยที่แอมพลิจูดจะลดลงเมื่อระยะทางมากขึ้นและมีแนวโน้มที่ชัดเจนสามารถนำไปใช้ในกระบวนการประมาณระยะห่างระหว่างจุดเหตุการณ์ ESD กับตัวตรวจจับได้ จากผลการทดลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ ESD ได้

3.2.3 การวัดแอมป์ลิจูดจากตัวตรวจจับทั้ง 4 ตัว

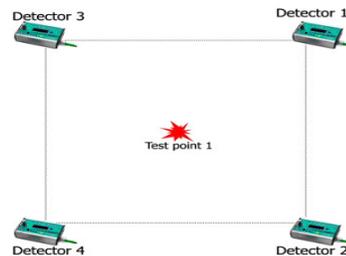
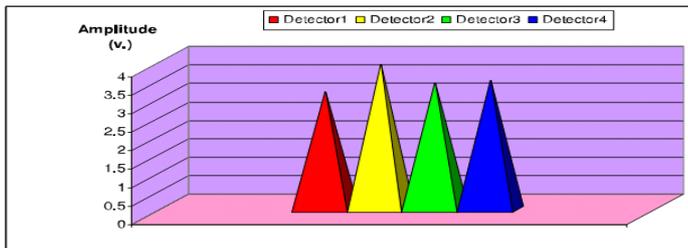
การทดลองนี้เป็นการศึกษาลักษณะของสัญญาณที่ได้จากการตัวตรวจวัด EMI ที่มีขนาดของแรงดันขาออกแปรตามแอมป์ลิจูดของสัญญาณ EMI ที่เกิดจาก ESD จากการทดลองก่อนหน้านี้ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของแอมป์ลิจูดของสัญญาณ EMI เมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ ESD และ สภาพอากาศของตัวตรวจวัด EMI ทำให้ทราบว่าเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นความแรงของสัญญาณ EMI จะลดลงแปรผกผันกับระยะทาง ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลส่วนนี้มาทำการหาตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้ ดังนั้นในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองเก็บข้อมูลของแอมป์ลิจูดที่ได้จาก ตัวตรวจวัด EMI โดยในการทดลองใช้ตัวตรวจวัด EMI จำนวน 4 ตัว วางในรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ เพื่อเพิ่มความแม่นยำขึ้นในการหาค่าตอบ และทำการจำลองการเกิดเหตุการณ์ ESD ตัวอุปกรณ์ Charged plate monitor สร้างเหตุการณ์ ESD ที่แรงดัน 50V. ในรูปแบบ Machine Model ตัวตรวจจับทั้งสี่เชื่อมต่ออุปกรณ์ Data acquisition ด้วยการเชื่อมต่อแบบ 4-20 mA และส่งข้อมูลที่ทำการแปลงเป็นดิจิทัลแล้วไปยัง PC ด้วยการเชื่อมต่อ USB ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 5 จุด ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสดังกล่าวประกอบ 3-6 แต่ละจุดมีการเฉลี่ยข้อมูล 20 ชุดข้อมูล



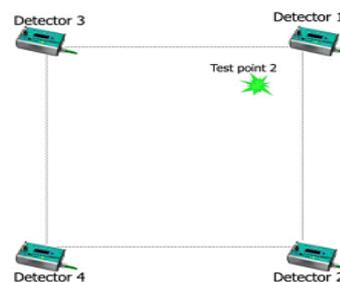
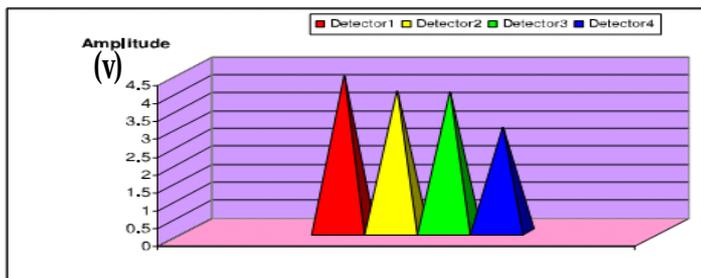
ภาพประกอบ 3-6 การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลอง



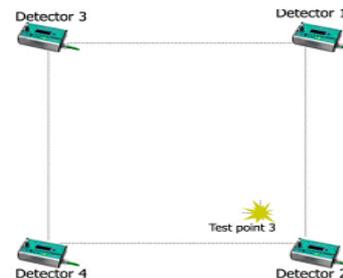
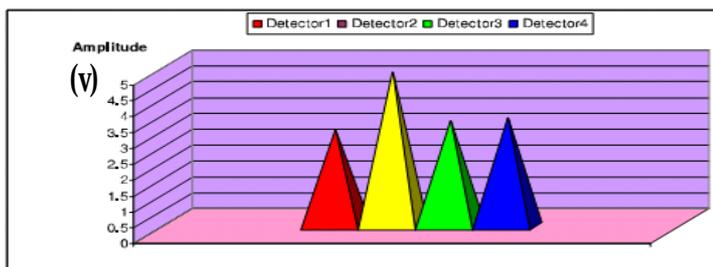
ภาพประกอบ 3-7 ฟังการจัดวางตัวตรวจจับและจุด Test point ในการทดลอง



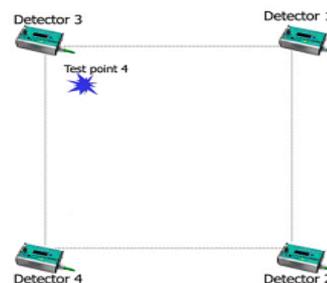
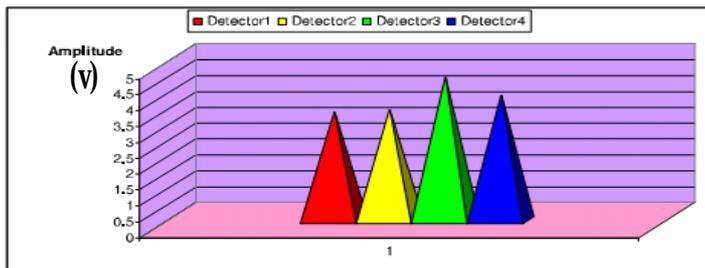
ภาพประกอบ 3-8 ผลการทดลองที่ Test point 1



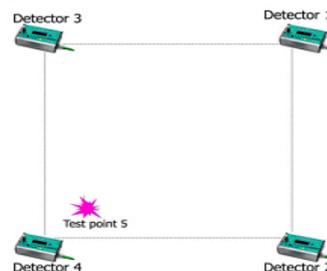
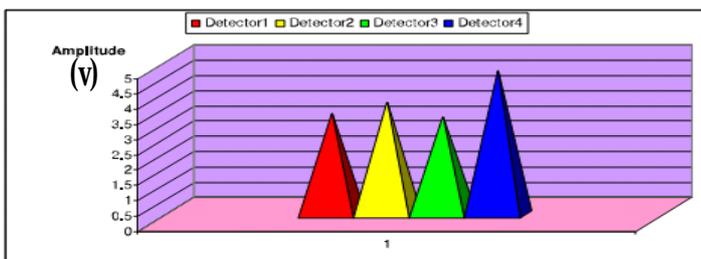
ภาพประกอบ 3-9 ผลการทดลองที่ Test point 2



ภาพประกอบ 3-10 ผลการทดลองที่ Test point 3



ภาพประกอบ 3-11 ผลการทดลองที่ Test point 4



ภาพประกอบ 3-12 ผลการทดลองที่ Test point 5

หลังจากได้ชุดข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบ 3-8 ถึง ภาพประกอบ 3-12 ทำให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนของลักษณะแอมพลิจูดจากตัวตรวจจับทั้งสี่ตัวที่มีขนาดแปรผันตามระยะจากจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ในแต่ละจุดที่ทำการทดสอบสังเกตได้ว่าขนาดของสัญญาณมีลักษณะที่แตกต่างกันไป ต่อจากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวไปหาคำตอบของพิกัดจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ด้วยคณิตศาสตร์ตรีโกณมิติต่อไป

3.2.4 ทดลองหาคำตอบของพิกัดด้วย Trilateration

การทดลองนี้เป็นการศึกษาลักษณะของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัด EMI ที่มีขนาดของแรงดันขาออกแปรตามแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI ที่เกิดจาก ESD จากการทดลองก่อนหน้านี้ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI เมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ ESD และ เสาอากาศของ ตัวตรวจวัด EMI ทำให้ทราบว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นความแรงของสัญญาณ EMI จะลดลงแปรผกผันกับระยะทาง ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลส่วนนี้มาทำการหาตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้ ในกระบวนการหาตำแหน่งจะต้องใช้ข้อมูลของระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ ESD และ เสาอากาศสามข้อมูลเป็นอย่างน้อยในการคำนวณหาพิกัด เพื่อนำไปคำนวณตามระเบียบวิธี Trilateration ดังนั้นในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองเก็บข้อมูลของแอมพลิจูดที่ได้จาก ตัวตรวจวัด EMI โดยในการทดลองใช้ ตัวตรวจวัด EMI จำนวน 4 ตัว เพื่อเพิ่มความแม่นยำขึ้นในการหาคำตอบ วางในรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60cm×60cm และทำการจำลองการเกิดเหตุการณ์ ESD ด้วยอุปกรณ์ Charged plate monitor สร้างเหตุการณ์ ESD ที่แรงดัน 50V. ในรูปแบบ Machine Model ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 5 จุด ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสดังภาพประกอบ 3-7 แต่ละจุดมีการเฉลี่ยข้อมูล 20 ชุดข้อมูลเพื่อลดผลของการแกว่งของข้อมูล ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ผลทดลองหาคำตอบของพิกัดด้วย Trilateration

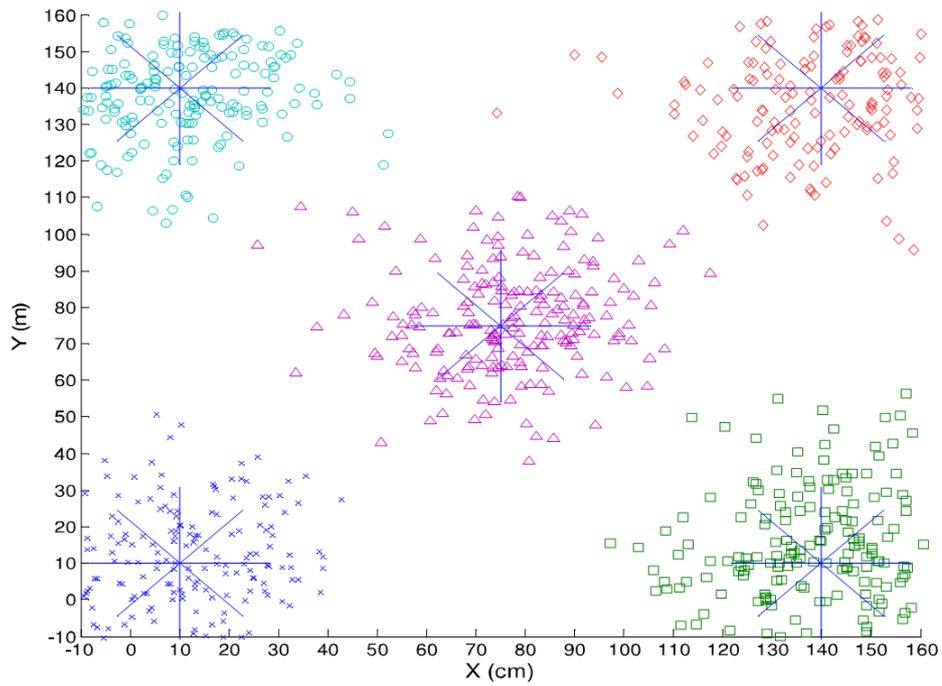
Test point	Calculation Value (cm)	Real Position (cm)	Error Distance (cm)	SD.
1	(27.33, -32.47)	(30, -30)	3.63	7.22
2	(48.58, -9.74)	(50, -10)	1.44	4.57
3	(45.82, -44.94)	(50, -50)	6.56	3.33
4	(8.88, -9.64)	(10, -10)	2.15	4.78
5	(7.13, -38.94)	(10, -50)	7.62	8.52

*จุด Origin อยู่ที่ Test point 3

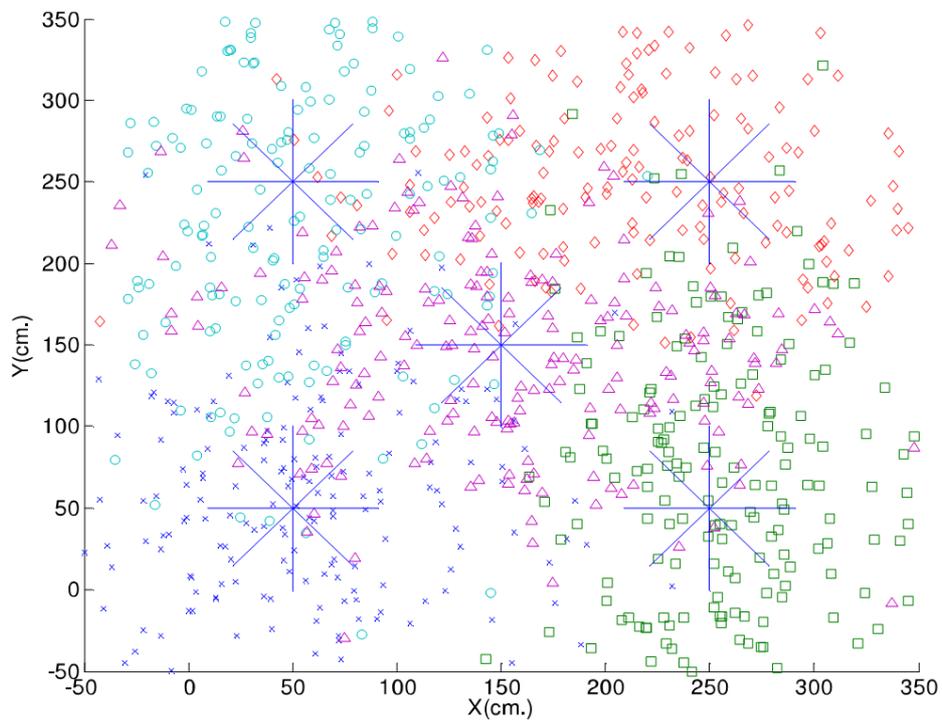
ข้อมูลในตารางที่ 3-1 ทำให้ทราบถึงผลการทำงานของระบบหาจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ด้วยการคำนวณแบบ **Trilateration** ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนของผลคำตอบที่ไม่สูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในจุดทดลอง **Test point 2** ค่าแอมพลิจูดที่วัดได้เมื่อนำไปคำนวณตามสมการ **Trilateration** ให้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนไปจุดจริงเพียง **1.44 cm** โดยที่ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดอยู่ที่ **4.28 cm** ส่วนที่จุดทดลอง **Test point 4** ที่ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ **7.62 cm** เป็นผลจากการประเมินระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ผิดพลาดที่ตัวตรวจจับตัวใดตัวหนึ่งหรือมากกว่า จึงทำให้ผลความผิดพลาดสูงขึ้นมาก แต่อย่างไรก็ดีในการทดลองนี้ผลการทดลองที่ได้จะต้องควบคุมตัวแปรในส่วนของแรงดันคิซาร์จ ซึ่งในการทดลองจะควบคุมไว้ที่ **50V**. แต่ในสภาพความเป็นจริงในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปเราไม่สามารถกำหนดหรือควบคุมแรงดันดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงต้องออกแบบกระบวนการในการระบุตำแหน่งการเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตที่สามารถตรวจวัดที่แรงดันต่างๆ ได้

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นต้นสามารถยืนยันถึงสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้นั้นคือ ข้อมูลความแรงของ **EMI** สามารถนำไปใช้ในการหาตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้ ดังนั้นจึงได้จัดการทดลองเกี่ยวกับการหาตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ด้วยอาศัยข้อมูลความแรงของ **EMI** อีกครั้งในพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมแบบอุตสาหกรรมทำการทดลองในห้องปฏิบัติการทางด้าน ESD ณ บริษัทซีเกต โดยได้จัดพื้นที่การทดลองขนาด **1.5m×1.5m** และขนาด **3m×3m** ซึ่งเป็นพื้นที่การทดลองที่เหมาะสมกับขนาดของเครื่องจักรที่ใช้ในสายงานการผลิต และเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเมื่อพื้นที่ตรวจวัดมีขนาดที่เพิ่มขึ้น

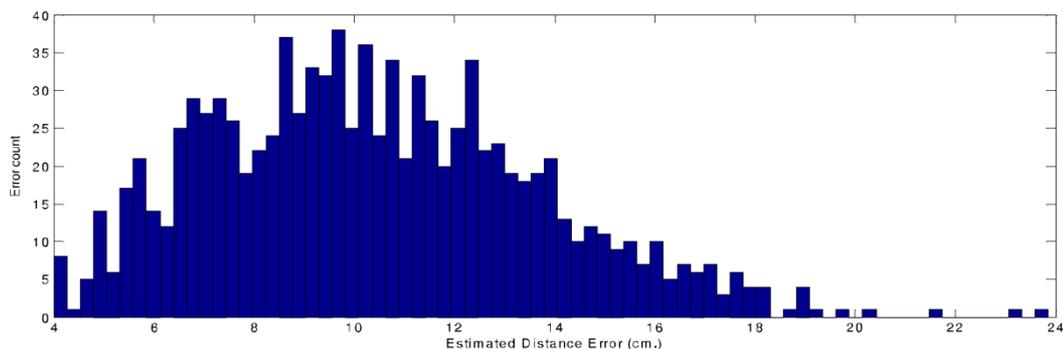
จากผลการทดลองพื้นที่ขนาด **1.5m×1.5m** ในภาพประกอบ 3-13 และพื้นที่ขนาด **3m×3m** ในภาพประกอบ 3-14 พบว่าระบบสามารถคำนวณจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้ คำตอบใกล้เคียงเหตุการณ์จริงโดยมีการกระจายตัวของผลคำตอบในรัศมี **20 cm** รอบจุดเกิดเหตุการณ์จริง มีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดอยู่ที่ **10.3 cm** ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน **12.66 cm** ผลการทดลองในพื้นที่การทดลองนี้ถือว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามเมื่อขนาดพื้นที่การทดลองเพิ่มขึ้นคือขนาด **3m×3m** กลับพบว่าค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้นอย่างมากและผลคำตอบกระจายตัวทั่วพื้นที่การทดลองจนไม่สามารถแยกแยะกลุ่มข้อมูลได้ มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ **72.65 cm** และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ **51.23 cm** สิ่งเหล่านี้อาจมีสาเหตุจากการเพิ่มขนาดพื้นที่จึงทำให้สัญญาณมีระดับความแรงของ **EMI** ที่ลดลงและอาจโดนรบกวนได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิด **Multipath** ของสัญญาณ **EMI** ก็อาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ระบบมีความผิดพลาดของคำตอบสูงเมื่อเพิ่มขนาดพื้นที่



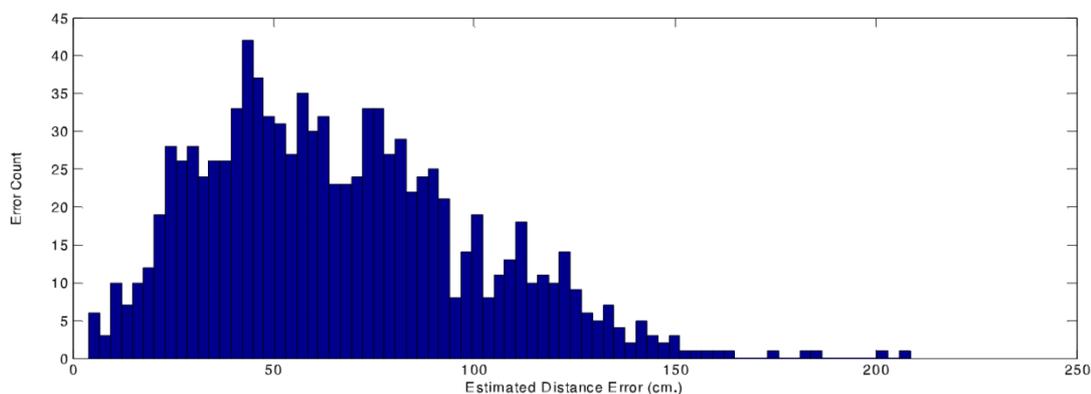
ภาพประกอบ 3-13 Scatter Plot ของผลการทดลองหาค่าตอบของพิกัดด้วย Trilateration ในพื้นที่
การทดลองขนาด $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$



ภาพประกอบ 3-14 Scatter Plot ของผลการทดลองหาค่าตอบของพิกัดด้วย Trilateration ในพื้นที่
การทดลองขนาด $3\text{m} \times 3\text{m}$



ภาพประกอบ 315 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดจากการทดลองหาคำตอบของพิกัดด้วย
Trilateration ในพื้นที่การทดลอง $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$

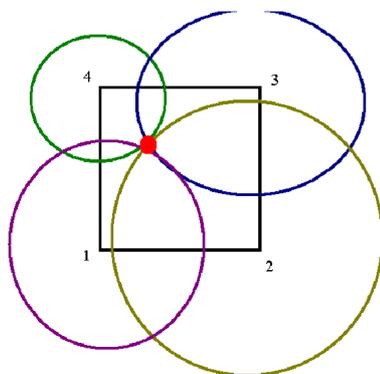


ภาพประกอบ 316 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดจากการทดลองหาคำตอบของพิกัดด้วย
Trilateration ในพื้นที่การทดลอง $3\text{m} \times 3\text{m}$

3.2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบจากการคำนวณพิกัดตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD

ในการคำนวณหาคำตอบพิกัดตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ตามระเบียบวิธี **Trilateration** ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 2 ได้ทำการพิสูจน์แล้วว่า การคำนวณตำแหน่งให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงค่าจริง หากแต่ในบางครั้งของการคำนวณจะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งความผิดพลาดนั้นเป็นผลมาจากความผิดพลาดจากการประมาณระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ ESD และเสาอากาศของตัวตรวจจับ เนื่องจากเป็นแหล่งข้อมูลเพียงแหล่งเดียวที่นำมาใช้ในการคำนวณ ความผิดพลาดนั้นอาจจะเกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอกเข้ามารบกวน หรือผลของสัญญาณสะท้อน ดังนั้นจึงควรมีกระบวนการเพื่อทำการตรวจสอบผลการคำนวณว่าใกล้เคียงความถูกต้องมากน้อยเพียงใด เพื่อให้สามารถระบุถึงความน่าเชื่อถือของผลการคำนวณนั้นๆ ได้ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้

ศึกษาความสัมพันธ์ของรัศมีของวงกลมสี่วงที่วางตัวโดยมีจุดศูนย์กลางเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส หากกำหนดจุดใดๆ ภายในสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ ซึ่งเส้นรอบวงของวงกลมทั้งสี่ตัวกันพอดี ดังแสดงในรูป



ภาพประกอบ 317 การหาตำแหน่งด้วยวงกลมสี่วง

อ้างอิงจากสมการที่ 25, 26 และ 27 เป็นการหาพิกัดของจุดตัดเส้นรอบวงของวงกลม 3 วง เมื่อเพิ่มวงที่สี่เข้าไปจะทำให้ได้สมการในการหาคำตอบของพิกัดดังกล่าวเพิ่มอีก 1 สมการ คือ

$$r_4^2 = x^2 + y^2 + a^2 + b^2 - 2ax - 2by \quad \dots(31)$$

เมื่อทำการแทนค่าจากสมการ 25, 26 และ 27 ลงในสมการที่ 31 จะทำให้ได้สมการดังนี้

$$r_4^2 = r_1^2 + (r_2^2 - r_1^2) + (r_3^2 - r_1^2) \text{ ย้ายข้างจะได้เป็น}$$

$$\frac{r_4^2 + r_1^2}{r_2^2 + r_3^2} = 1 \quad \dots(32)$$

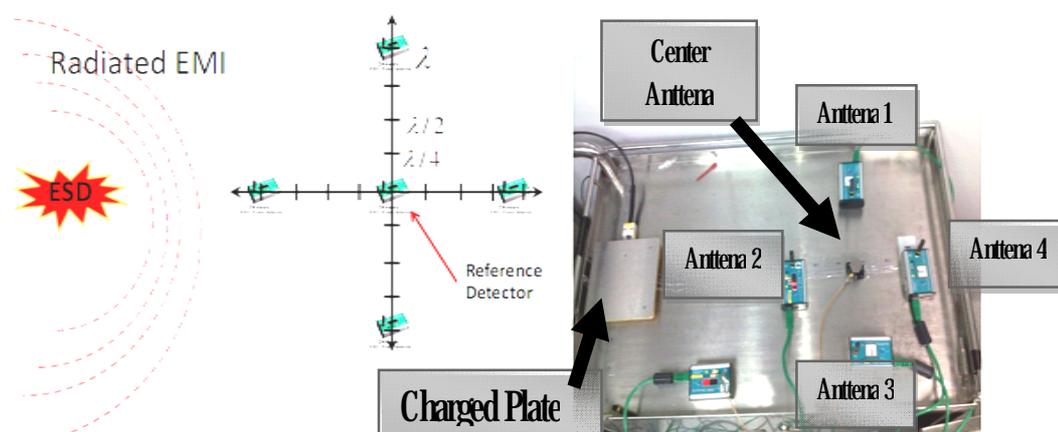
จากสมการที่ 32 สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบถึงความถูกต้องของผลการคำนวณหาระยะระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ ESD กับเสาอากาศของตัวตรวจวัด ทั้งสี่ตัวได้ กล่าวคือ เมื่อได้ข้อมูลแอมพลิจูดของสัญญาณ EMi จาก ESD และทำการคำนวณประมาณค่าระยะห่างดังกล่าวจากตัวตรวจวัดทั้งสี่ตัว เมื่อได้คำตอบทั้งสี่แล้วจึงนำมาคำนวณตามสมการที่ 32 เพื่อหาตรวจหาความผิดพลาด ซึ่งข้อมูลที่ใกล้เคียงความถูกต้องผลของการหาคำตอบจากสมการที่ 32 จะต้องได้ค่าใกล้เคียง 1 หากไม่ใกล้เคียงหรือคำตอบต่างจากค่า 1 มากก็สามารถสรุปได้ว่าการ

ประมาณระยะห่าง มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งข้อมูลดังกล่าวไม่เหมาะสมที่จะไปคำนวณต่อในสมการพิกัดตำแหน่งเพราะคำตอบที่ได้จะมีความผิดพลาด

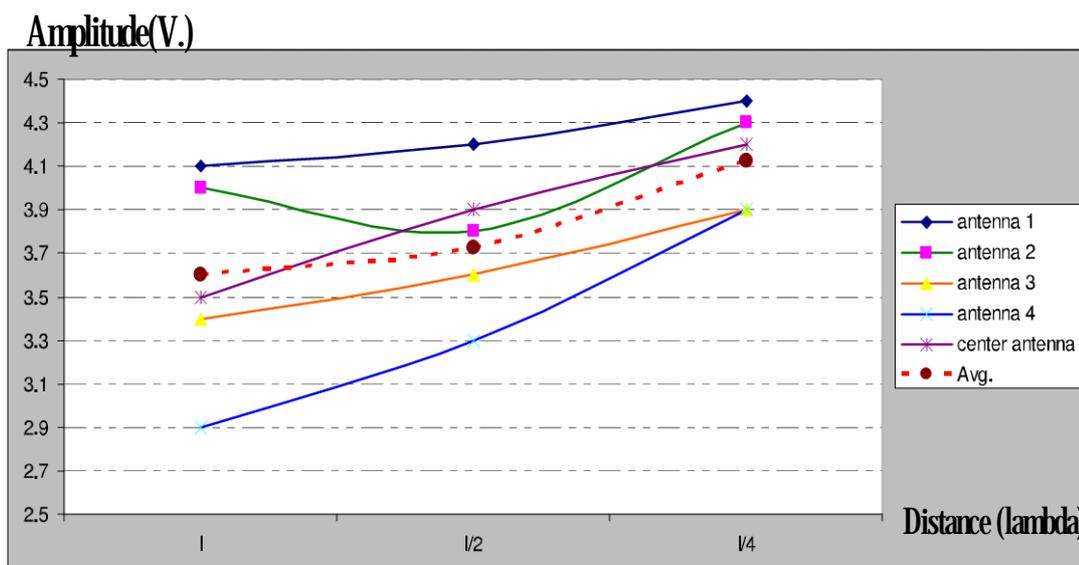
3.3 การทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะสัญญาณ ESD

3.3.1 ทดลองวัดสัญญาณรอบข้างเสาอากาศ

การทดลองนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะสัญญาณจากตัวตรวจวัด ESD ซึ่งสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในบริเวณรอบข้างของเสาอากาศของตัวตรวจวัด จากข้อสันนิษฐานเบื้องต้นในเรื่องของการวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI ที่แพร่จาก ESD เกิดความผิดพลาดขึ้น ไปจากแนวโน้มที่ควรจะเป็นในบางบริเวณที่ทำการวัดค่า อันมีสาเหตุมาจากของ Distortion effect ของสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนจากวัตถุที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงจุดที่ทำการวัด ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบดังกล่าวโดยใช้ตัวตรวจวัด 5 ตัวในการวัดสัญญาณ EMI รอบๆ เสาอากาศโดยกำหนดให้สัญญาณ EMI จาก ESD มีความถี่ 1 GHz ซึ่งเป็นความถี่ของ EMI จากการเกิด ESD โดยส่วนใหญ่ [16] ซึ่งจะมี λ เท่ากับ 30 cm การทดลองจะแบ่งระยะของตัวตรวจวัดอ้างอิง (Reference Detector) ไปยังตัวตรวจวัดรอบข้างออกเป็น 3 ระยะคือ λ , $\lambda/2$ และ $\lambda/4$ cm ทำการเก็บข้อมูลที่วัดได้จากตัวตรวจวัดทั้ง 5 ตัว 1000 ครั้งและนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยโดยจำลองการเกิดเหตุการณ์ ESD ที่ 50V ห่างจากเสาอากาศของตัวตรวจวัด 50 cm การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลองอธิบายด้วยภาพประกอบ 3-18 และผลการทดลองแสดงในภาพประกอบ 3-19



ภาพประกอบ 3-18 การทดลองวัดสัญญาณในบริเวณรอบข้างของเสาอากาศของตัวตรวจวัด

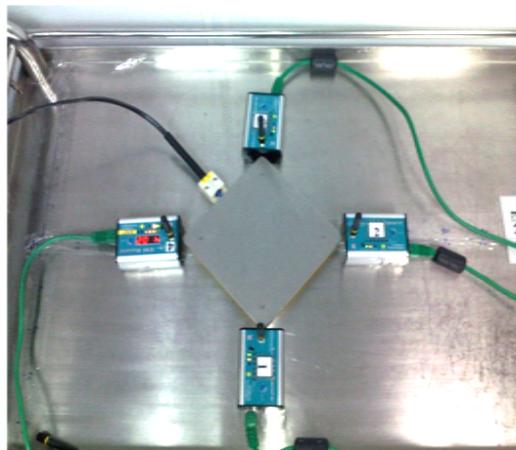
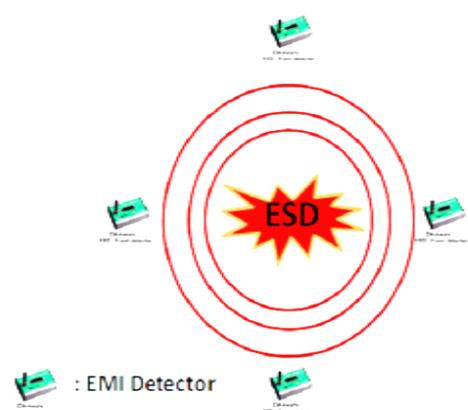


ภาพประกอบ 3-19 ผลการทดลองวัดสัญญาณในบริเวณรอบข้างของเสาอากาศของตัวตรวจวัด

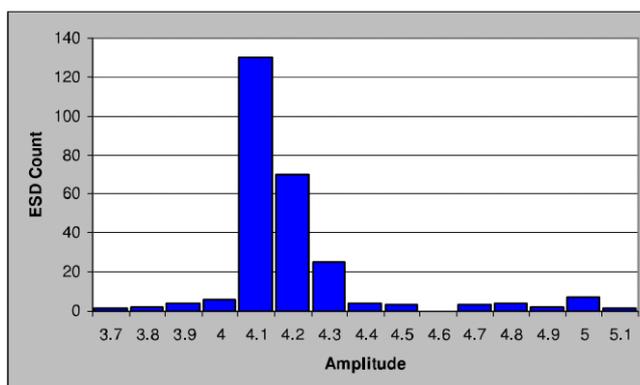
จากผลการทดลองในภาพประกอบ 3-19 สังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแอมพลิจูดจากตัวตรวจวัด ทั้งสี่ตัวมีการเปลี่ยนแปลงขนาดในบริเวณตำแหน่งการทดลองต่างๆ ที่ระยะห่างจากเสาอากาศเดียวกัน มีขนาดแตกต่างกันขึ้นกับระยะห่างจากจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากตำแหน่งของเสาอากาศอาจจะมีผลกระทบบ้างแต่ไม่มากนัก แต่จะมีในส่วนของตัวตรวจวัดตัวที่ 2 ระยะ $\lambda/2$ ที่มีขนาดสัญญาณลดลงผิดไปจากแนวโน้มทั่วไป ซึ่งตรงนี้คาดว่าอาจจะเป็นผลกระทบจาก **Fading effect** หรือ **Reflected Signal** แต่อย่างไรก็ดี ผลเฉลี่ยของข้อมูลจากเสาอากาศทั้งสี่เสา ก็ยังมีความใกล้เคียงกับจุดที่วัดจริงในส่วนนี้ หากสามารถนำข้อมูลมาปรับปรุงให้เข้าใกล้แนวโน้มของค่าเฉลี่ยได้ ก็อาจจะช่วยลดผลของการแปรปรวนของสัญญาณต่อสภาพแวดล้อมได้

3.3.2 การทดลองวัดสัญญาณ ESD ในช่วงเวลายาวนาน

โดยธรรมชาติแล้วสัญญาณ **EMI** ที่แพร่จากการเกิดเหตุการณ์ **ESD** เป็นสัญญาณที่มีความแปรปรวนสูงและอ่อนไหวต่อการรบกวนได้ง่าย อีกทั้งเป็นสัญญาณที่ส่งผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศจึงมีโอกาสสูงที่เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นที่ระยะห่างเท่ากันแรงดันในดิสชาร์จเท่ากัน อาจจะมีคำตอบที่ได้จากการตรวจวัดไม่เท่ากัน ในการทดลองนี้จึงทำการจำลองเหตุการณ์ **ESD** ที่ 50 โวลต์ และตรวจวัดสัญญาณจาก **ESD Event Detector** โดยทำการเก็บข้อมูลในช่วงระยะเวลาต่อเนื่อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในแต่ละชั่วโมงจะเก็บข้อมูลห่างกันครั้งละ 6 นาที จึงมีข้อมูลทั้งสิ้น 240 ชุดข้อมูล



ภาพประกอบ 3-20 การทดลองวัดสัญญาณ ESD ในช่วงเวลายาวนาน

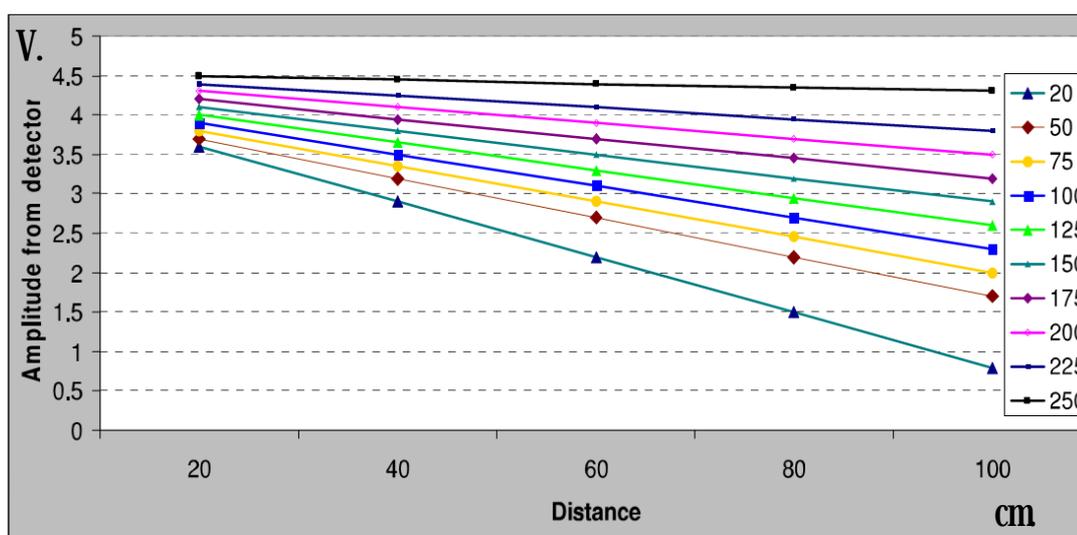


ภาพประกอบ 3-21 ผลการทดลองวัดสัญญาณ ESD ในช่วงเวลายาวนาน

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 3-21 ทำให้เห็นว่าในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงที่ทำการวัดข้อมูล จะได้ข้อมูลที่เกาะกลุ่มมากที่สุดอยู่ที่ 41 โวลต์ เป็นจำนวน 130 ชุดข้อมูล และหากคิดชุดข้อมูลในช่วง 41-42 ซึ่งเป็นค่าที่มีแรงดันใกล้เคียงกัน ได้ชุดข้อมูลทั้งสิ้น 200 ชุดข้อมูล ถือเป็น 83% ของข้อมูลทั้งหมดในการวัดตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งตัวเลขดังกล่าวถือเป็นค่าความน่าเชื่อถือในการให้คำตอบของกาวัดแอมพลิจูดของสัญญาณ EMI จากเหตุการณ์ ESD แต่ทั้งนี้หากนำข้อมูลที่ได้ในส่วนนี้ไปวิเคราะห์ร่วมกับกระบวนการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณในการทดลองก่อนหน้านี้ อาจส่งผลให้คำตอบมีความใกล้เคียงค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นและจะช่วยกำจัดข้อมูลที่อยู่นอกแนวโน้มออกไปได้จะช่วยส่งผลให้การคำนวณในขั้นต่อไปมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

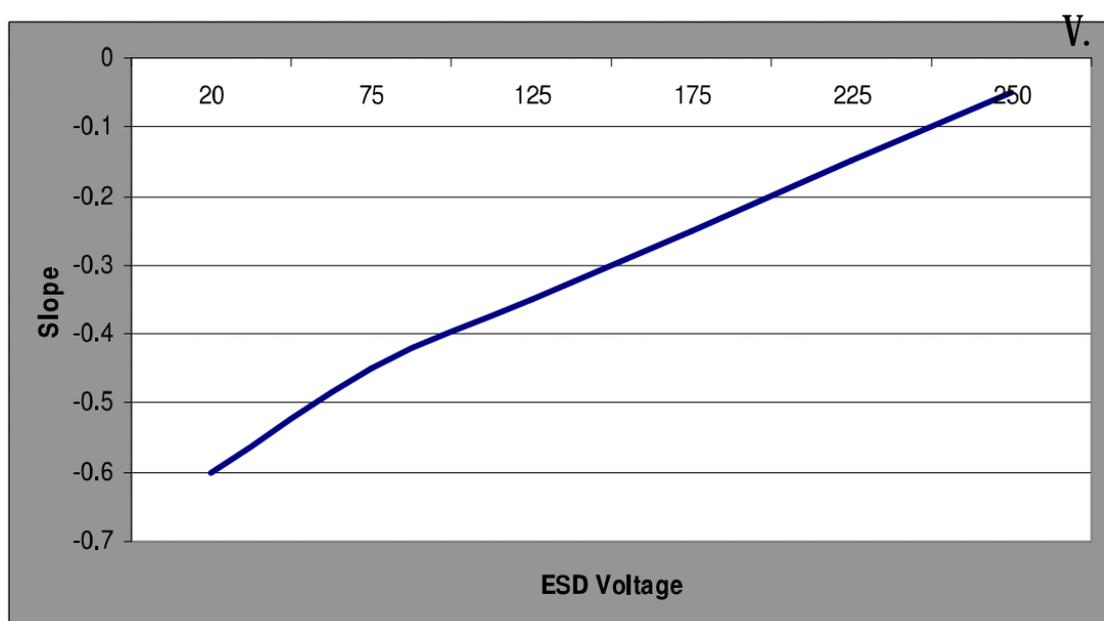
34 การปรับปรุงระบบระบุตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ ESD

เพื่อให้ระบบที่ได้ถูกออกแบบขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริง จำเป็นต้องพัฒนาให้ระบบสามารถตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตได้ที่แรงดันระดับต่างๆ กัน ในการปรับปรุงระบบเดิมนั้น จะยังคงใช้พื้นฐานการคำนวณด้วยระเบียบวิธี **Trilateration** ที่นำข้อมูลระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์กับเสาอากาศของตัวตรวจวัด มาทำการคำนวณ โดยจะเพิ่มกระบวนการคำนวณแรงดันของการเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิต เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการประมาณระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** กับเสาอากาศของตัวตรวจวัด ดังนั้นจึงต้องมีข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากการตรวจวัดเทียบกับแรงดันของเหตุการณ์ **ESD** ระดับต่างๆ ในแต่ละระยะทางระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** และตัวตรวจวัด ดังนั้น จึงทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยได้จัดอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย ตัวตรวจวัดสัญญาณ **EMI** จาก **ESD EM-Aware** ต่อเข้ากับ **PC** ผ่านทางอุปกรณ์ **Data acquisition DATAQ DI-700** เพื่อบันทึกข้อมูลแอมพลิจูดจากตัวตรวจวัดและนำไปวิเคราะห์ในการจำลองเหตุการณ์ **ESD** ใช้อุปกรณ์ **Charged Plate Monitor** สร้างประจุไฟฟ้าสถิตบนพื้นผิววัตถุ และทำการดิสชาร์จลงกราวนด์ด้วยโมเดลคายประจุไฟฟ้าสถิตแบบ **Machine-Model** แรงดันที่ทำการจำลองเหตุการณ์ **ESD** เริ่มตั้งแต่ **20** โวลต์ ไปจนถึง **250** โวลต์ ทำการทดลองที่ระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์และตัวตรวจวัดต่างกัน **5** จุดการทดลอง คือ **20, 40, 60, 80 และ 100 cm** ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ **3-22**



ภาพประกอบ 3-22 ผลการวัดความแรงของสัญญาณ **EMI** ที่รับได้จาก **ESD** ที่มีแรงดันต่างกัน

จากแผนภาพดังกล่าวเราจะสังเกตเห็นได้ว่าการเกิดเหตุการณ์ **ESD** ในแต่ละระดับแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันเมื่อเทียบกับระยะทางเป็นเชิงเส้นในช่วง ระยะ 20 - 100 เซนติเมตร และจุดที่น่าสนใจคือการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันเอาท์พุทของตัวตรวจจับ **EMI** ในแต่ละระดับแรงดันของการเกิดเหตุการณ์ **ESD** จะมีค่าความชันของเส้นกราฟดังกล่าว ที่เป็นค่าเฉพาะตัว (ในกรณีที่ทำกรประมาณค่าฟังก์ชันด้วยสมการเส้นตรง) ดังนั้นหากนำเอากระบวนการหาความชันของสัญญาณแอมพลิฟิเคชันจากตัวตรวจวัดอย่างน้อยสองตัวติดตั้งโดยมีระยะห่างที่ทราบค่าแน่นอนมาทำการคำนวณหาค่าความชัน จะสามารถหาค่าตอบของระดับแรงดันของเหตุการณ์ **ESD** ได้ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** กับตัวตรวจวัดได้อย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้นเนื่องจากในแต่ละระดับแรงดันของเหตุการณ์ **ESD** จะมีฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงเฉพาะตัว อีกทั้งยังสามารถทำการหาค่าตอบได้ในหลายๆระดับแรงดันของการเกิดเหตุการณ์ **ESD** เป็นการเพิ่มความสามารถของระบบที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ **3.24** ที่สามารถหาค่าตอบได้จากเหตุการณ์ **ESD** ในระดับแรงดันที่กำหนดไว้เท่านั้น จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้จริงเนื่องจากใน สถานการณ์จริงไม่อาจทราบได้ว่าเหตุการณ์ **ESD** เกิดขึ้นที่แรงดันเท่าไร และสิ่งที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการนี้คือสามารถหาค่าตอบของแรงดันการดิสชาร์จที่เกิดขึ้น จึงทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีความหลากหลายและประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางขึ้นด้วย จากการทดลองข้างต้นสามารถสรุปค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแอมพลิฟิเคชันที่แรงดันของการเกิดเหตุการณ์ **ESD** ต่างกันได้ดังแสดงในภาพประกอบ **3-23**



ภาพประกอบ **3-23** ความชันของการเปลี่ยนแปลงแอมพลิฟิเคชันที่แรงดันของ **ESD** ต่างกัน

ตารางที่ 3-2 ผลการคำนวณหาแรงดันของเหตุการณ์ ESD

ระดับแรงดันที่ทำการจำลอง (V.)	ผลที่ได้จากการคำนวณ (V.)	เปอร์เซ็นต์ความ ผิดพลาด
25	23.8	4.8
50	46.8	6.4
75	72.3	3.6
100	102.5	2.5
125	124.4	0.4
150	160.0	6.6
175	181.0	3.4
200	216.0	8.0

3.5 สรุป

จากการทดลองในหัวข้อนี้เป็นเครื่องช่วยยืนยันเกี่ยวกับสมมติฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอันเป็นการเชื่อมโยงถึงการออกแบบระบบที่สามารถทำงานได้ ระบบระบุพิกัดตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ที่ออกแบบขึ้น โดยอาศัยกระบวนการวัดความแรงของสัญญาณการแพร่ EMI ของการเกิดเหตุการณ์ ESD สามารถทำงานได้ถูกต้องให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงค่าจริงในการใช้งานที่พื้นที่ขนาด $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ โดยมีผลความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 10.3cm อย่างไรก็ตามเมื่อนำระบบนี้ไปใช้ในพื้นที่ขนาด $3\text{m} \times 3\text{m}$ กลับพบว่าค่าความผิดพลาดของผลคำตอบเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากโดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 51.23cm ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการสัญญาณรบกวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรบกวนจากสัญญาณสะท้อน ของสัญญาณ EMI อันที่จริงแล้วยังมีกระบวนการที่สามารถใช้ในการปรับปรุงอีกกระบวนการหนึ่งคือการวิเคราะห์รูปร่าง (Pattern) ของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดทั้งสี่ตัว มาเป็นกระบวนการในการระบุตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD การนำกระบวนการดังกล่าวมาใช้จะต้องใช้เทคนิคทางด้าน Pattern Matching หรือ Pattern Recognize เข้ามาช่วยในการหาคำตอบ ข้อดีของกระบวนการดังกล่าวคือสามารถนำข้อมูลแอมพลิจูดไปคำนวณได้ทันที ไม่ต้องคำนวณหาระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ ESD และเสาอากาศของตัวตรวจวัด ทำให้ลดการคำนวณลงไปมากและสามารถหาคำตอบได้ทุกระดับแรงดันของการเกิดเหตุการณ์ ESD ส่งผลให้การคำนวณใช้เวลาอันสั้นลง และ อาจช่วยลดความผิดพลาดลงได้ด้วย สำหรับกระบวนการดังที่กล่าวมานี้จะได้นำไปศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ต่อไป

บทที่ 4

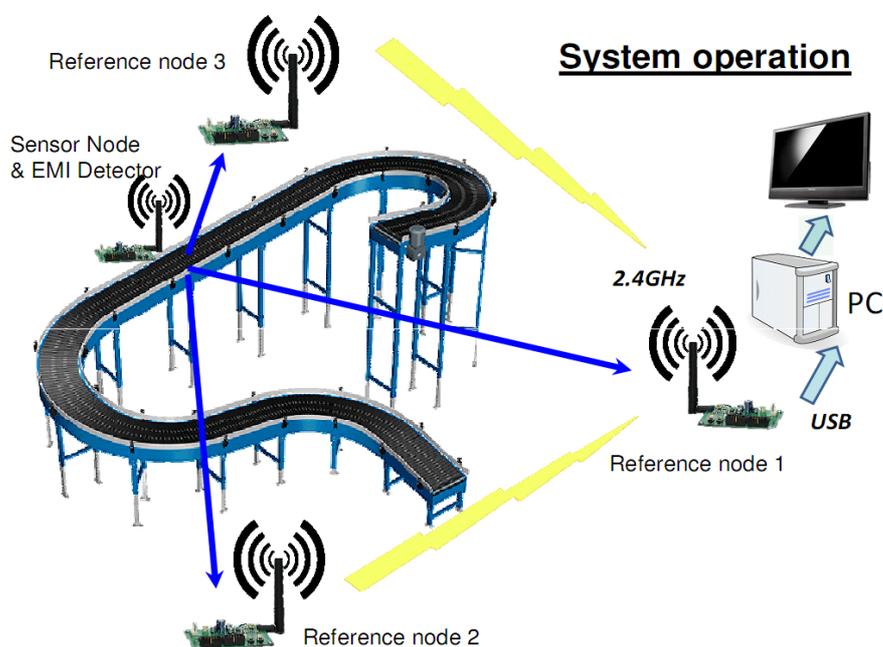
ระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่าย เซนเซอร์ไร้สาย

4.1 แนวคิดเบื้องต้นของการออกแบบระบบ

จากบทที่ผ่านมาซึ่งแสดงถึงการออกแบบระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิต โดยอาศัยการวัดความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า จากการทดลองระบบดังกล่าวสามารถระบุตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้ใกล้เคียงจุดเกิดเหตุการณ์จริงระบบดังกล่าวต้องการตัวตรวจจับ EMI ในการทำงานจำนวน 4 ตัวอย่างใดก็ตามการทำงานของระบบดังกล่าวเมื่อนำไปใช้งานในพื้นที่ขนาดใหญ่กว่า $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ ระบบจะให้คำตอบที่มีความผิดพลาดอยู่มาก ดังนั้นในการใช้งานจริงย่อมมีความต้องการใช้งานระบบในพื้นที่ขนาดกว้าง เพื่อให้ครอบคลุมการตรวจวัดได้ตลอดสายการผลิต หากนำระบบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ย่อมจะต้องใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการปรับปรุงระบบเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ได้สูงสุดโดยใช้ตัวตรวจวัดหรืออุปกรณ์อื่นๆ ให้น้อยที่สุดถือเป็นเป้าหมายหลักของงานวิจัยในส่วนนี้

ด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายร่วมกับหลักการพื้นฐานของการตรวจจับสัญญาณ EMI จากเหตุการณ์ ESD จะทำให้ได้ระบบที่สามารถตรวจจับเหตุการณ์ ESD ในสายการผลิต ได้ในพื้นที่ที่มีขนาดกว้างขึ้นและยังคงความแม่นยำไว้ ระบบนี้จะอาศัยกระบวนการระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดไร้สายอันเป็นกระบวนการพื้นฐานที่นิยมใช้ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ตัวตรวจจับ EMI พร้อมด้วยเซนเซอร์โหนดที่ทำการระบุตำแหน่งจะถูกติดตั้งไว้กับถาดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในสายการผลิต ซึ่งถาดวางอุปกรณ์นี้จะเคลื่อนที่ไปตามสายการผลิต เมื่อตัวตรวจจับ EMI ได้รับสัญญาณที่มีระดับสูงกว่าค่ากำหนด (Threshold) ซึ่งหมายถึงอาจเกิดเหตุการณ์ ESD ในถาดวางอุปกรณ์หรือบริเวณใกล้เคียง เซ็นเซอร์โหนดจะส่งข้อมูลแพ็คเก็ตไปยังโหนดไร้สายที่ทำหน้าที่เป็นโหนดอ้างอิงตำแหน่งในการระบุพิกัดเพื่อทำการคำนวณหาพิกัดของเซนเซอร์โหนดและโหนดที่ทำหน้าที่เป็น Base station จะรวบรวมข้อมูลทั้งหมดทำการวิเคราะห์และแจ้ง

เดือนไปยังผู้ใช้ว่าเกิดเหตุการณ์ **ESD** ขึ้น ณ บริเวณใด โครงสร้างของระบบแสดงไว้ในภาพประกอบ **41** เมื่อมองภาพรวมแล้วระบบมีความต้องการขั้นต่ำทางด้านฮาร์ดแวร์คือ ตัวตรวจจับ **EMI** จำนวน **1** ตัวและเซนเซอร์โหนดไร้สายจำนวน **4** ตัว ระบบก็สามารถทำงานได้ตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ต่อจากนี้ได้อธิบายถึงหลักการ โดยละเอียดของการออกแบบระบบทั้งส่วนที่เกี่ยวข้องกับการระบุพิกัดของเซนเซอร์โหนด และการตรวจจับสัญญาณ **EMI** จากเหตุการณ์ **ESD** และการทดลองระบบที่ออกแบบขึ้นรวมถึงการปรับปรุงการทำงานของระบบ



ภาพประกอบ **41** โครงสร้างพื้นฐานของระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์ภายในโดยอาศัยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

42 ระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด

การระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดที่ได้อธิบายหลักการพื้นฐานไว้ในบทที่ **2** ทำให้ทราบว่าระบบจำเป็นต้องมีโหนดอ้างอิงที่รู้ตำแหน่งแน่นอนจำนวน **3** ตัว และเซนเซอร์โหนดที่ต้องการหาตำแหน่ง จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ **2** ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูล **RSSI** ในการคำนวณหาพิกัดของเซนเซอร์โหนด ซึ่งเป็นที่ทราบดีแล้วว่าข้อมูล **RSSI** นั้นเป็นข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงต่อการรบกวนจากสภาพแวดล้อมได้โดยง่ายดังนั้นการนำข้อมูล **RSSI** ไปคำนวณหา

พิกัดโดยตรงย่อมนี่จะเกิดความผิดพลาดของคำตอบ เนื่องด้วยระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ให้ข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด ดังนั้นคำตอบของพิกัดที่คลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งจริงย่อมเป็นสิ่งที่ต้องการหลีกเลี่ยงหรือลดความผิดพลาดดังกล่าวให้น้อยลงในหัวข้อนี้ประกอบด้วยหัวข้อย่อยที่อธิบายเกี่ยวกับการจำลองการทำงานของโมเดลการสื่อสารและการทดลองในสภาพแวดล้อมจริงรวมถึงหลักการเพื่อนำไปสู่การค้นหาระเบียบวิธีที่จะทำให้สามารถระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดได้อย่างแม่นยำที่สุด

4.21 การจำลองโมเดลการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

จากเนื้อหาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการสื่อสารไร้สายทราบข้อมูลคุณสมบัติทั้งไอซีสื่อสารไร้สายและเสาอากาศที่ใช้ดังนั้นเราจึงสามารถเอาพารามิเตอร์ต่างๆของอุปกรณ์ทั้งสองตัวมาทำการจำลองการทำงานได้เพื่อศึกษาลักษณะของการแพร่สัญญาณ โดยได้ทำการศึกษาและจำลองด้วยโมเดลต่างๆที่ได้ศึกษาและอธิบายไว้แล้ว เช่น **Free Space Propagation**, **Ground Reflection in Two Ray model** และ **Indoor Path Loss Model** เป็นต้น การจำลองการทำงานเพื่อศึกษาถึงสัญญาณที่ได้ในโมเดลต่างๆในกรณีที่ใช้กับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย เพื่อให้เห็นแนวโน้มของผลจากทฤษฎี ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์หลายๆ ด้านเช่นนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดจริง หรือนำไปสู่การคิดค้นกลไกใหม่หรือระเบียบวิธีใหม่ที่จะมาช่วยแก้ปัญหาที่มีอยู่เดิม ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุเพื่อหาผลของกำลังที่รับได้ในระยะ **T-R Separation** ต่างๆ และนำโมเดลต่างๆที่มีผลกระทบต่อ การสื่อสารไร้สายมาเข้าร่วม เพื่อให้ได้ลักษณะของสัญญาณที่สามารถอธิบายได้ทางคณิตศาสตร์ และจะนำไปสู่การออกแบบอัลกอริทึมในการลดความผิดพลาดจากการประมาณระยะระหว่างเซนเซอร์โหนดโดยอาศัยข้อมูล **RSSI** ในการทดลองใช้เครื่องในการทดลองคือซอฟต์แวร์ **MATLAB** ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองต่างๆในการจำลองจะกำหนดพารามิเตอร์ในการสื่อสารดังนี้

Transmitter power output = 1mW. (0 dBm).

Transmitter Antenna gain = 2dBi

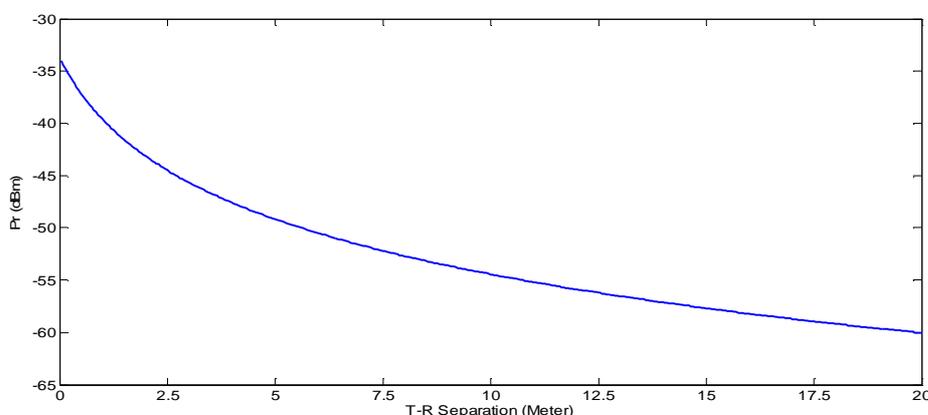
Receiver Antenna gain = 2dBi

T-R Separation= 1 to 20meter

Frequency= 2.4 GHz.

4.2.2 การจำลองการทำงานของแบบจำลอง Free Space

ทำการจำลองเพื่อหาค่ากำลังที่รับได้เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะ T-R Separation โดยอาศัยโมเดลของ Free Space Propagation ตามสมการที่ 2.10 ได้ผลการจำลองตามภาพประกอบ 4.2 ดังเกิดได้ว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นค่ากำลังที่รับได้ลดลงอย่างต่อเนื่องและเป็นเส้นโค้งซึ่งเป็นคุณลักษณะของการลดลงตามกำลังสองของระยะทาง



ภาพประกอบ 4.2 ผลการจำลองการทำงานของแบบจำลอง Free Space

4.2.3 การจำลองการสะท้อนสัญญาณวิทยุกับพื้นโลกในแบบจำลอง Two Ray

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองการสื่อสารไร้สายโดยเพิ่มผลกระทบอีกเหตุการณ์หนึ่ง นั่นคือผลของสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนกับพื้น เหตุการณ์นี้ถือเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นโดยปกติในการสื่อสารไร้สายและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาและจำลองเพื่อหาผลรวมของกำลังที่รับได้ที่เสาอากาศของตัวรับ โดยใช้สมการในการอธิบายผลรวมของสัญญาณดังกล่าวจากสมการที่ 2.15 ในการจำลองกำหนดพารามิเตอร์เพิ่มในส่วนโมเดลการสะท้อนดังนี้

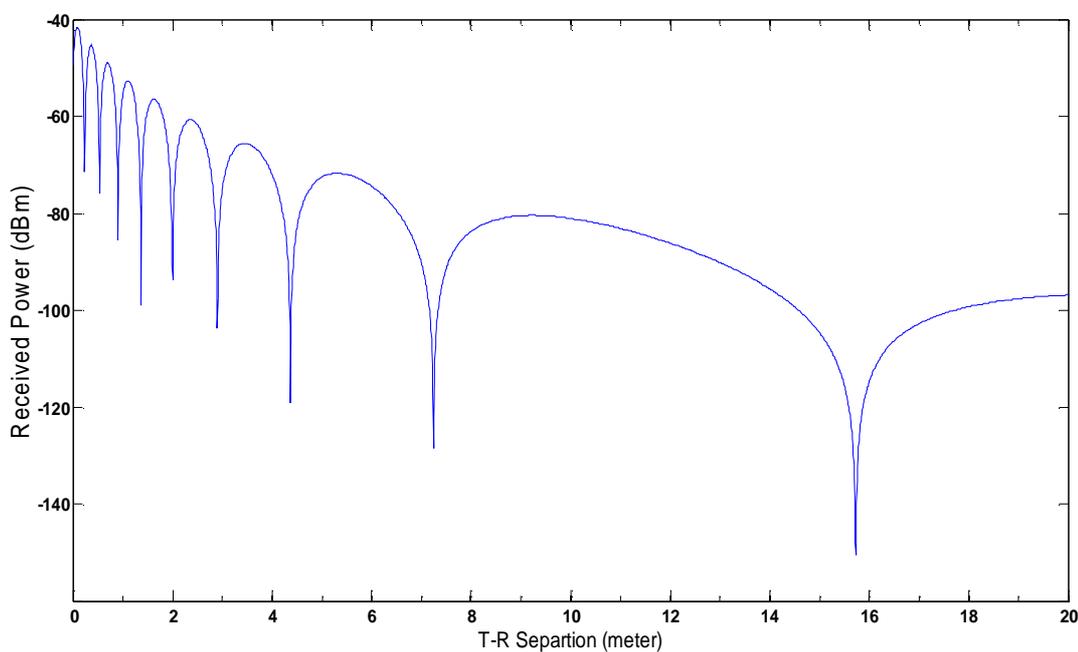
$$E_0 = 0.0122 \text{ W/m}^2$$

$$d_0 = 1 \text{ m}$$

$$h_t = 1 \text{ m}$$

$$h_r = 1 \text{ m}$$

ผลการจำลองดังแสดงในภาพประกอบ 43 พบว่ากำลังที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเป็นช่วงๆ ซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณที่มาจาก การสะท้อนมีมุมเฟสที่แตกต่างกับสัญญาณในเส้นทางตรง โดยในจุดต่ำสุดของการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเป็นช่วงที่มุมเฟสต่างกัน 180 องศาทำให้สัญญาณถูกลดทอนดังรูปที่แสดง การจำลองนี้ช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของสัญญาณในการวัดจริงได้อีกทั้งยังสามารถนำไปอธิบายถึงผลจากการสะท้อนกับวัตถุอื่นๆ เช่น ผนัง กำแพง เป็นต้น



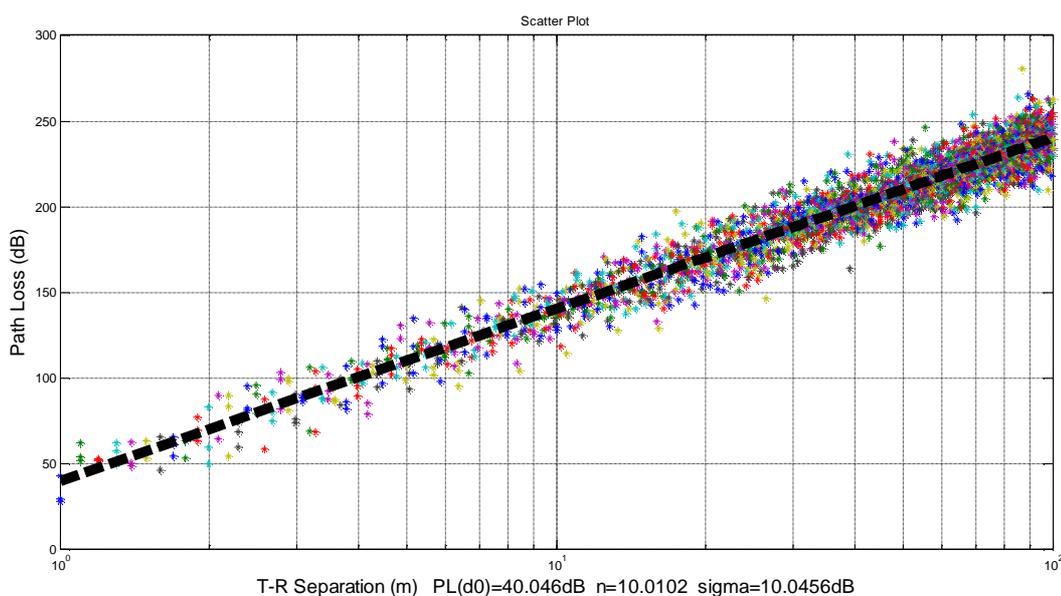
ภาพประกอบ 43 ผลการจำลองของแบบจำลองการแพร่กระจายรูปแบบ Two Ray

4.2.4 การจำลองโมเดล **log-normal distribution** ที่มีการคิด **shadowing** และ **Multipath**

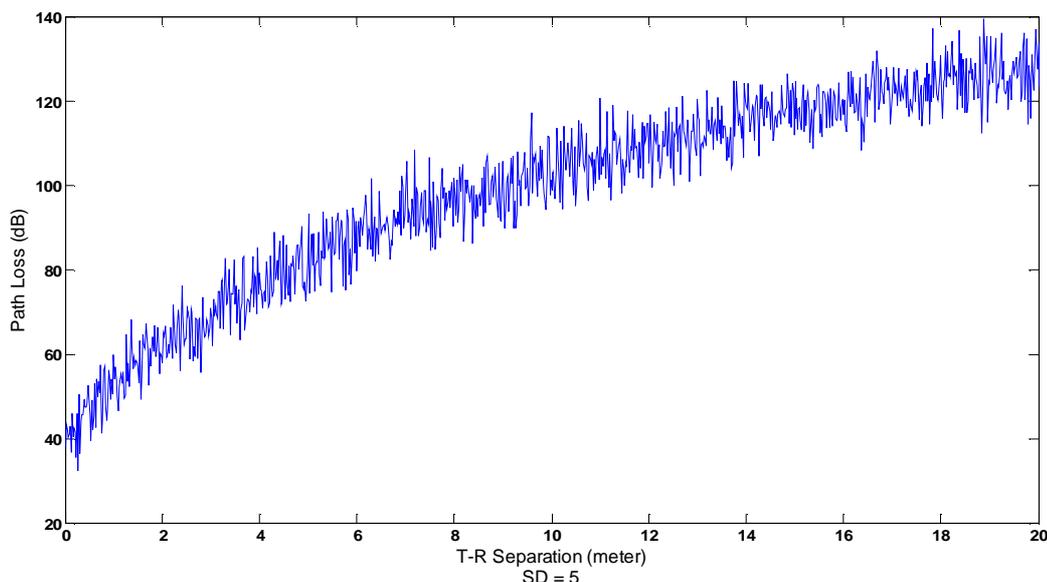
ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองการสื่อสารที่อธิบายด้วยโมเดล **Log-normal Shadowing** พร้อมทั้งส่วนของ **Multipath** โมเดลนี้ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังที่รับได้โดยได้เพิ่มองค์ประกอบของการแกว่งขึ้นลงของกำลังที่รับได้ อันเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมในพื้นที่ทำการสื่อสาร ได้กำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Standard Deviation } S &= 10 \\ PL_0 &= 40 \text{ dB} \\ d_0 &= 1 \text{ m} \end{aligned}$$

ผลการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 44 และภาพประกอบ 45 ในรูปแรกเป็นการแสดงค่า **Path Loss** ที่ระยะ **T-R Separation** ต่างๆ ในสเกลลอการิทึม แต่ละระยะได้ทำการการหาค่า **Path Loss** ทั้งหมด 10 ครั้งเพื่อดูผลของการแกว่งของ **Path Loss** และในเส้นประสีดำเป็นเส้นประมาณค่า **Path Loss**



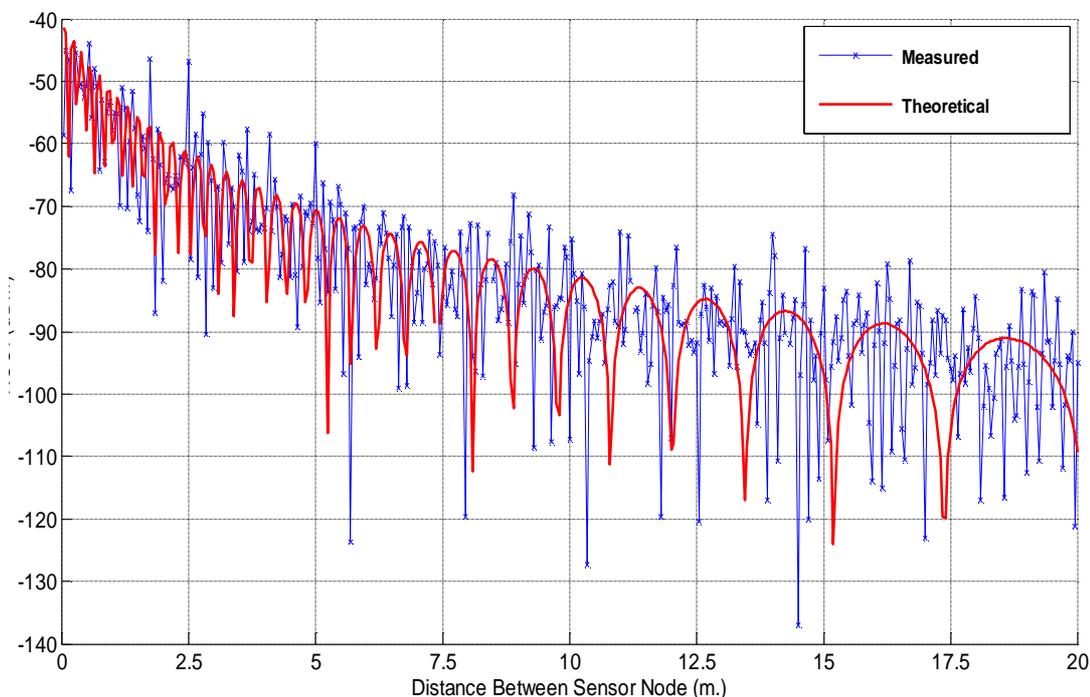
ภาพประกอบ 44 ค่าเฉลี่ย **Path loss** ที่ **T-R Separation** ระยะต่างๆ



ภาพประกอบ 45 ค่า Path loss เทียบกับ T-R Separation

4.2.5 การทดลองวัดค่า RSSI ในสภาพแวดล้อมแบบอุตสาหกรรม

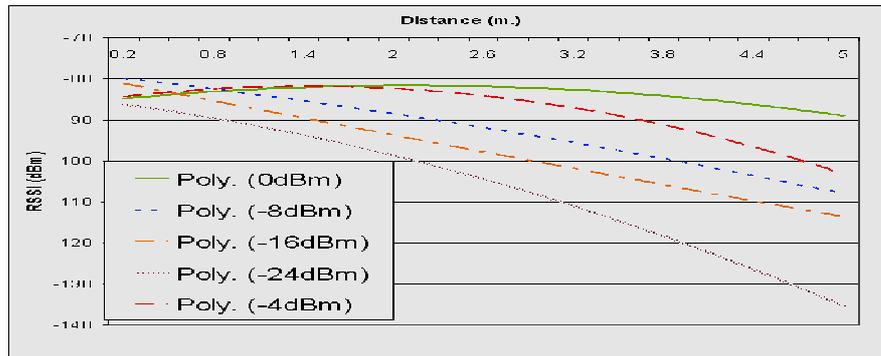
เป้าหมายหนึ่งของงานวิจัยนี้คือให้ได้มาซึ่งระบบที่สามารถทำงานได้จริงการนำไปใช้งานจริงระบบจะต้องสามารถปฏิบัติงานได้ในสภาพแวดล้อมแบบอุตสาหกรรม อันเป็นพื้นที่ที่ประกอบด้วยเครื่องจักรและผู้ปฏิบัติงาน สิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยเสี่ยงต่อการเกิดความผิดพลาดของข้อมูล RSSI ทำให้ข้อมูล RSSI ที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นฟังก์ชันกับระยะทางที่ชัดเจนและยากต่อการนำไปแปลงข้อมูลกลับเป็นระยะห่างระหว่างตัวรับกับตัวส่ง ดังนั้นขั้นต้นจึงได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของข้อมูล RSSI ในสภาพแวดล้อมแบบอุตสาหกรรม ทำการทดลองด้วยการวัดค่าจริงภายในพื้นที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลังภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ใช้ PSU-Mote ซึ่งติดตั้งอยู่กับที่ส่งข้อมูลไปยัง PSU-Mote อีกตัวหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นโหนดรับข้อมูลที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางตรงระยะทางตั้งแต่ 0.1 ถึง 20 เมตร นำข้อมูลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB ทำการจำลองการส่งสัญญาณวิทยุโดยใช้โมเดล Two-Ray Ground Model เพื่อให้เห็นถึงผลของสัญญาณที่มีการสะท้อนจากวัตถุหรือพื้นโลก ผลการทดลองแสดงในภาพประกอบ 46 ทำให้เห็นถึงลักษณะของข้อมูล RSSI ที่มีความแปรปรวนของข้อมูลและยากที่จะคาดคะเนถึงระยะที่แท้จริงได้หากนำไปใช้ในกระบวนการประมาณระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนด



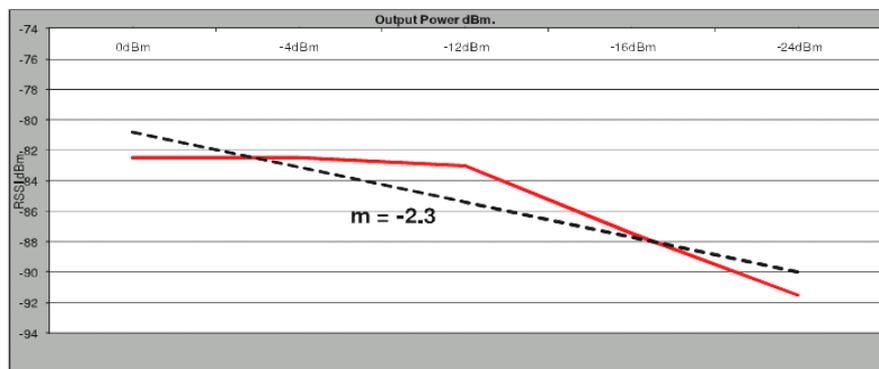
ภาพประกอบ 46 ผลการทดลองวัดค่า RSSI ในสภาพแวดล้อมแบบอุตสาหกรรม

4.2.6 การทดลองวัดค่า RSSI โดยเปรียบเทียบกับกำลังส่งที่แตกต่างกัน

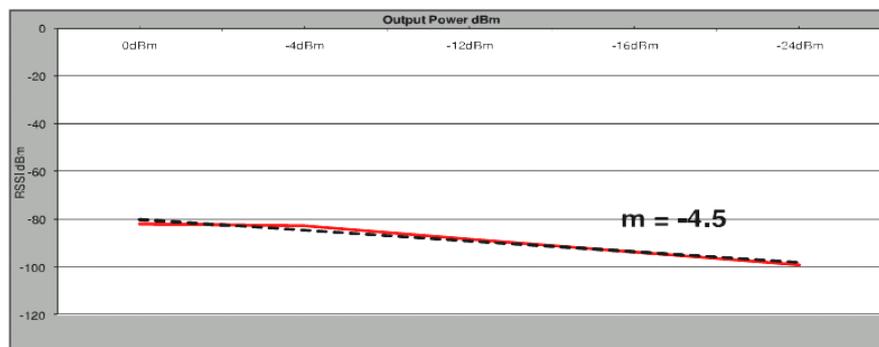
ในส่วนนี้เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า RSSI ที่ระดับ กำลังส่ง (Output Power) ของตัวส่งที่แตกต่างกัน 5 ระดับคือ -24dBm , -16dBm , -8dBm , -4dBm และ 0dBm เทียบกับระยะห่างระหว่างโหนดรับและโหนดส่ง วัดข้อมูลในระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดตั้งแต่ 0.2 เมตร ถึง 5 เมตร ทำการทดลองเก็บข้อมูลแต่ละตำแหน่งจำนวน 1000 ครั้งแล้วนำค่า RSSI ที่วัดได้ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย ในการทดลองได้ใช้อุปกรณ์และพื้นที่ในการทดลองเช่นเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อ 4.2.5 ได้ผลการทดลองดังภาพประกอบ 4.7 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของ RSSI เมื่อเทียบกับระยะระหว่างตัวรับและตัวส่งในแต่ละกำลังส่ง จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นฟังก์ชันเฉพาะตัวในแต่ละกำลังส่งแต่เมื่อสังเกตข้อมูลที่ระยะระหว่างตัวรับและตัวส่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงกำลังส่งจะมีค่าเฉพาะตัวในแต่ละระยะดังกล่าวด้วย ตรงจุดนี้สามารถวิเคราะห์ได้จากการหาค่าความชันของการเปลี่ยนแปลงระดับ RSSI ดังแสดงตัวอย่างในภาพประกอบที่ 4.8 4.9 และ 4.10 ที่แสดงตัวอย่างที่ระยะ 1 เมตร 2 เมตร และ 3.8 เมตร ตามลำดับ



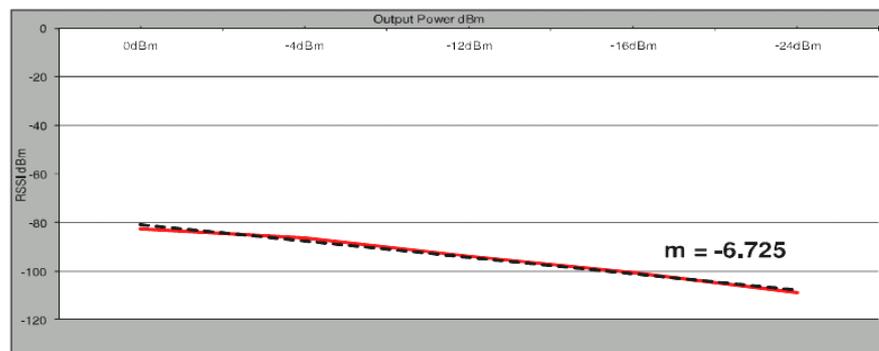
ภาพประกอบ 47 ผลการทดลองวัดค่า RSSI โดยเปรียบเทียบกับกำลังส่งที่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 48 ความชันของการเปลี่ยนแปลงค่า RSSI ที่ระยะ 1 เมตร



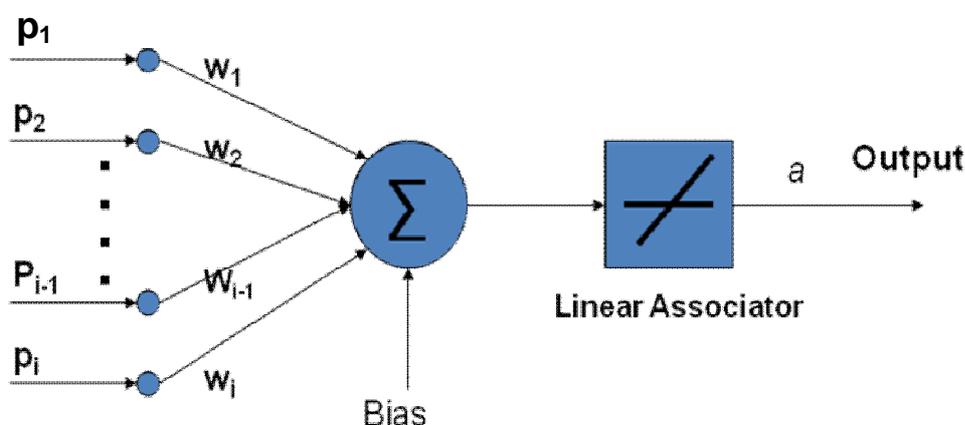
ภาพประกอบ 49 ความชันของการเปลี่ยนแปลงค่า RSSI ที่ระยะ 2 เมตร



ภาพประกอบ 410 ความชันของการเปลี่ยนแปลงค่า RSSI ที่ระยะ 38 เมตร

4.2.7 ออกแบบระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วยการประยุกต์ใช้ Neural Network

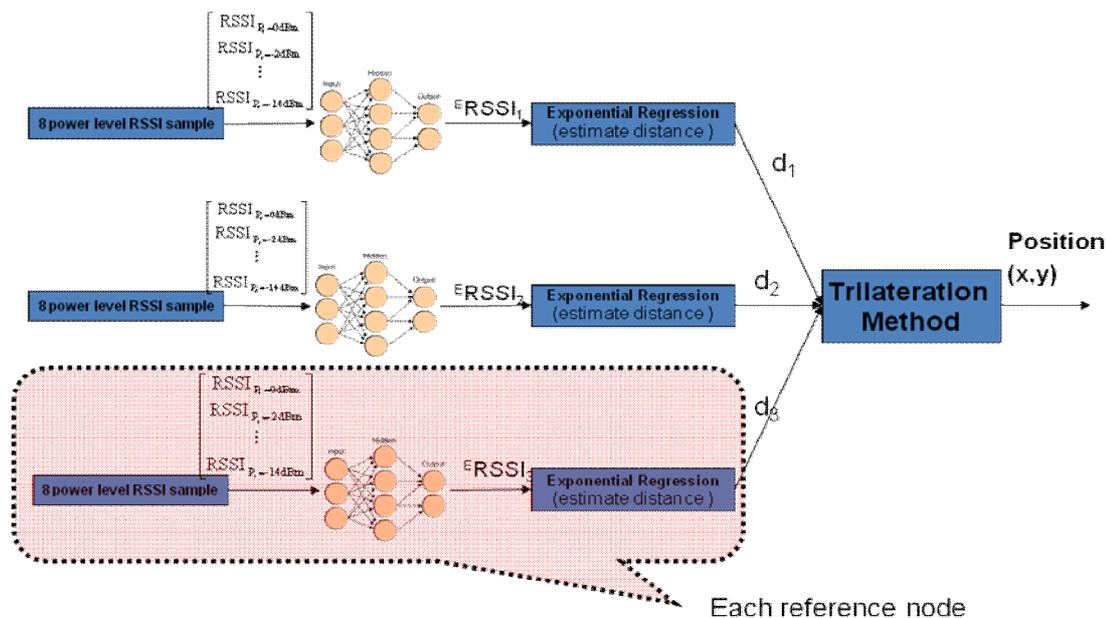
จากหัวข้อที่ผ่านมาเราสามารถนำค่าความชันของเส้นตรงในแต่ละระยะระหว่างตัวรับกับตัวส่งซึ่งแต่ละตำแหน่งจะมีค่าเฉพาะตัว จึงทำการออกแบบระบบสำหรับระบุพิกัดของเซนเซอร์โหนดด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เข้ามาช่วยในการปรับค่าน้ำหนักของอินพุตแต่ละตัวในกรณีนี้คือค่า RSSI จากกำลังส่งทั้ง 5 ระดับเพื่อชดเชยให้อาชีพที่มีความใกล้เคียงค่าอาชีพเป้าหมายมากที่สุด โครงสร้างของระบบดังแสดงในภาพประกอบ 4.12 ประกอบด้วยสองกระบวนการใหญ่ๆคือกระบวนการประมาณระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนด และกระบวนการคำนวณพิกัดตำแหน่งด้วย **Trilateration** ในที่นี้เราจะนำโครงข่ายประสาทเทียมเข้าไปปรับปรุงในส่วนกระบวนการประมาณระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนด เนื่องจากค่าความผิดพลาดของการหาพิกัดตำแหน่งขึ้นกับค่าความผิดพลาดของการประมาณระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดดังนั้นหากสามารถลดความผิดพลาดลงที่กระบวนการนี้ได้ค่าพิกัดตำแหน่งก็ย่อมจะใกล้เคียงค่าถูกต้องด้วยเช่นกัน จากภาพประกอบ 4.12 ข้อมูลระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดทั้งสามคือ d_1 d_2 และ d_3 จะเป็นอาชีพจากโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นโครงข่ายรูปแบบ **Single Layer Pureline** ดังแสดงในภาพประกอบ 4.11 โดยที่อินพุตคือค่า RSSI ที่ได้จากกำลังส่งที่ต่างกันถูกคูณกับค่าน้ำหนักของแต่ละอินพุต ค่าน้ำหนักจะมีการปรับปรุงตัวเองด้วยกฎการเรียนรู้แบบ **Hebbian** ดังอธิบายในสมการที่ 4.2



ภาพประกอบ 4.11 โครงข่ายประสาทเทียมรูปแบบ Single Layer Pureline

$$a = (W_1 p_1 + W_2 p_2 + \dots + W_i p_i + ib) \quad \dots(41)$$

$$\text{new } W = \text{old } W + t_q p_q^T \quad \dots(42)$$

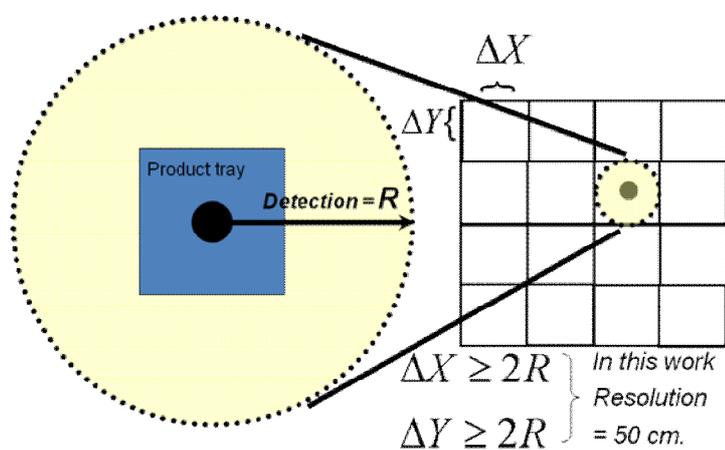


ภาพประกอบ 412 โครงสร้างของระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วยการประยุกต์ใช้
Neural Network

4.2.8 รมีการตรวจจับเหตุการณ์ ESD ความละเอียดของพิกัดตำแหน่งของระบบระบุพิกัด ตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วยการประยุกต์ใช้ Neural Network

เนื่องจากระบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาเป็นการระบุพิกัดตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD โดยอาศัยกระบวนการหาค่าตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด และใช้การตรวจจับการแพร่ EMI ในบริเวณรอบข้างอาคารอุปกรณณ์ เมื่อตัวตรวจจับรับสัญญาณการแพร่ EMI ได้ในระดับที่สูงกว่าค่ากำหนด จะแจ้งเตือนไปยังเซนเซอร์โหนดและเซนเซอร์โหนดจะส่งข้อมูลแพคเกจเพื่อระบุตำแหน่งต่อไป ตัวตรวจจับ EMI ที่ใช้ให้เอาท์พุตเป็นแรงดันที่สัมพันธ์กับความแรงของสัญญาณการแพร่ EMI ที่รับได้ซึ่งขึ้นกับระยะห่างจากจุดเกิดเหตุการณ์มายังตัวตรวจวัด ระบบที่ออกแบบขึ้นจะต้องมีการกำหนดค่าขอบเขตของการตรวจวัดนั้นหมายถึงหากสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดบ่งชี้ถึงจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ที่อยู่ไกลจากอาคารอุปกรณณ์ ก็ให้ละเลยเหตุการณ์นั้นไปเนื่องจากจะทำให้

ให้ระบบแจ้งเตือนเหตุการณ์ ESD ที่ไม่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ที่สังเกตการณ์อยู่ในที่นี้จะกำหนดค่าขอบเขตของการตรวจจับคือรัศมี 25 cm จากตำแหน่งกลางของถาดวางผลิตภัณฑ์เนื่องจากครอบคลุมถาดวางผลิตภัณฑ์ และบริเวณรอบข้างอีกส่วนหนึ่ง ดังนั้นเมื่อคู่มือข้อมูลจากภาพประกอบ 3-16 จะทำให้ทราบระดับแรงดันเอาต์พุตที่อยู่ในขอบเขตของการตรวจจับคือ 35 ถึง 45 โวลต์ และเราสามารถหาค่าความละเอียดสูงสุดของการตรวจจับได้ดังแสดงในภาพประกอบ 4-13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่ออกแบบขึ้นนี้มีมีความสามารถในการระบุพิกัดจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ได้ด้วยความละเอียดในพื้นที่ 50cm×50cm



ภาพประกอบ 4-13 การหาความละเอียดในการตรวจจับเหตุการณ์ ESD

4.3 การทดลอง

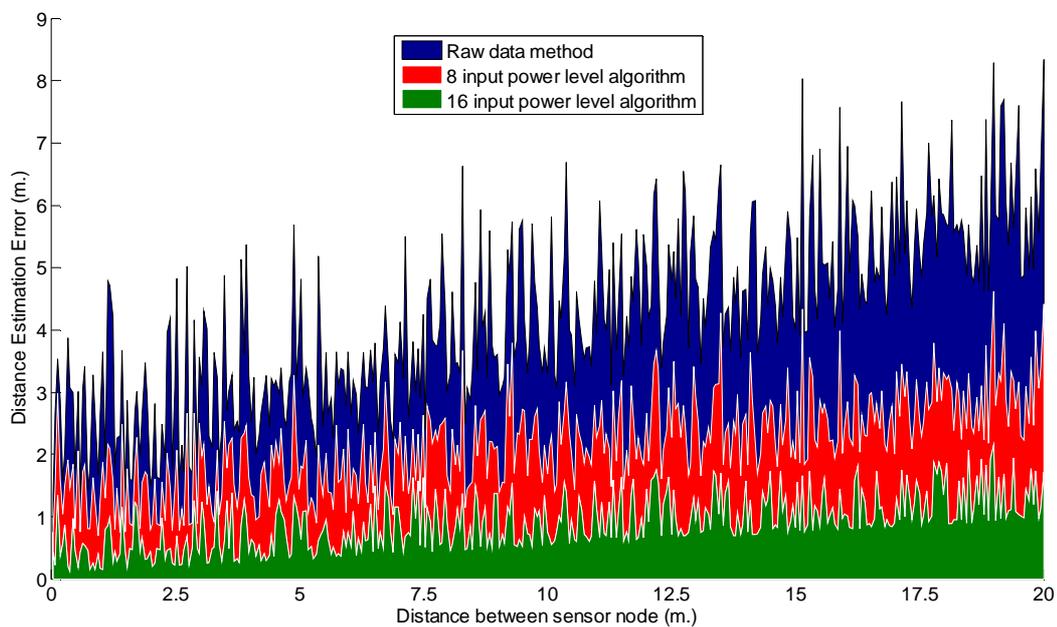
4.3.1 ทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วยการประยุกต์ใช้ Neural Network

ทำการทดลองเพื่อหาพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดทดลองภายในพื้นที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลังภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่มีสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกับโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากมีมอเตอร์กำลังสูงและเครื่องกลไฟฟ้ากระจายอยู่ในบริเวณนี้ ในการทดลองใช้เซนเซอร์โหนดอ้างอิง (Anchor Node) ที่รู้ตำแหน่งแน่นอนจำนวน 3 ตัว ติดตั้งไว้บริเวณมุมทั้งสามของพื้นที่ทำการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 4-14 เส้นสีเขียวคือเส้นทางการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์โหนดซึ่งถูกติดตั้งไว้กับหุ่นยนต์ซึ่งเคลื่อนที่อัตโนมัติตาม

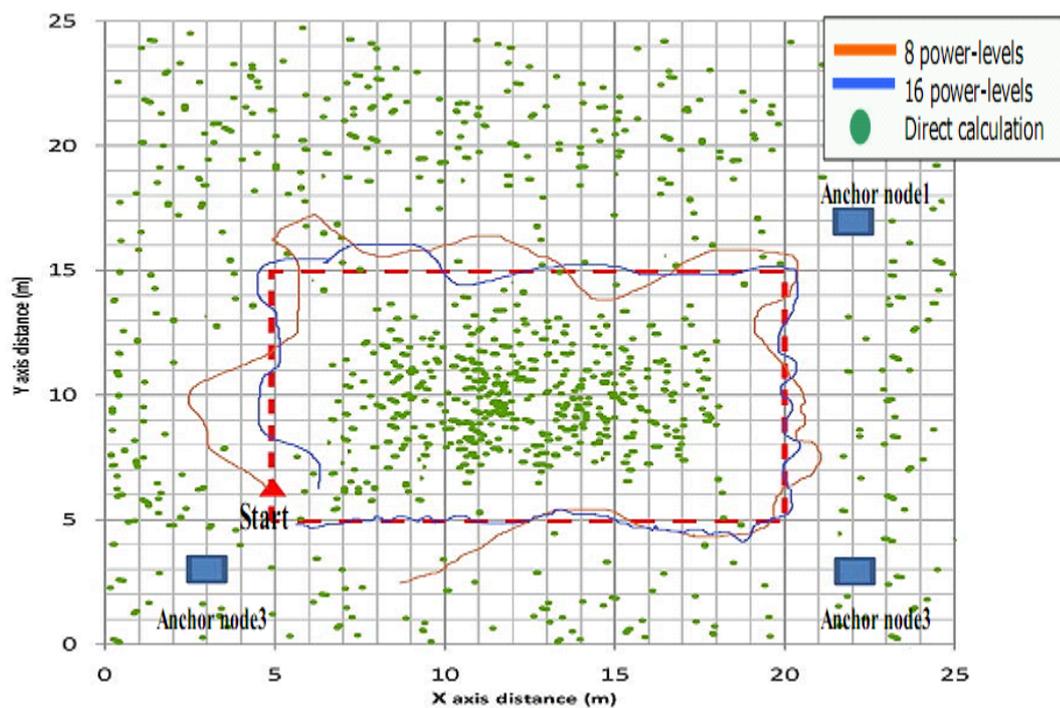
เส้นทางที่กำหนดและแจ้งสัญญาณไปยังเซนเซอร์โหนดทุกๆระยะทางการเคลื่อนที่ 1 เซนติเมตร เพื่อให้เซนเซอร์โหนดส่งข้อมูลแพคเกจไปยังเซนเซอร์โหนดอ้างอิงทั้งสาม และนำข้อมูล RSSI ที่ได้จากทั้ง 3 เซนเซอร์โหนดอ้างอิงไปเข้าสู่กระบวนการที่ได้ออกแบบขึ้นไว้ในหัวข้อ 4.23 ซึ่งจะแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 รูปแบบคือคำนวณโดยตรงไม่มีกระบวนการปรับปรุงข้อมูล แบบที่สองคือใช้กระบวนการ **Neural Network** โดยมีอินพุตเป็น RSSI จากกำลังส่งที่แตกต่างกัน 8 ระดับ และใช้กระบวนการ **Neural Network** โดยมีอินพุตเป็น RSSI จากกำลังส่งที่แตกต่างกัน 16 ระดับ ผลการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะแสดงผลของความผิดพลาดจากการประมาณระยะห่างระหว่างเซนเซอร์โหนดในภาพประกอบ 4.15 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อใช้กระบวนการ **Neural Network** เข้ามาช่วยทำให้ความผิดพลาดลดลงอย่างเห็นได้ชัดในการคำนวณโดยตรงจะให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 5.42 เมตร และผลการหาพิกัดตำแหน่งในภาพประกอบ 4.16 ซึ่งแสดงพิกัดตำแหน่งที่คำนวณได้เมื่อนำกระบวนการ **Neural Network** เข้ามาช่วยทำให้สามารถระบุพิกัดได้ใกล้เคียงค่าจริงมากโดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเพียง 0.9 เมตรสำหรับระบบที่ใช้อินพุต RSSI จากกำลังส่งที่แตกต่างกัน 16 ระดับ และ 2.2 เมตร สำหรับระบบที่ใช้อินพุต RSSI จากกำลังส่งที่แตกต่างกัน 8 ระดับ เห็นได้ว่าสามารถให้คำตอบเป็นผลที่น่าพอใจและมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมแบบอุตสาหกรรม



ภาพประกอบ 4.14 พื้นที่ในการทดลองระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วยการประยุกต์ใช้ **Neural Network**



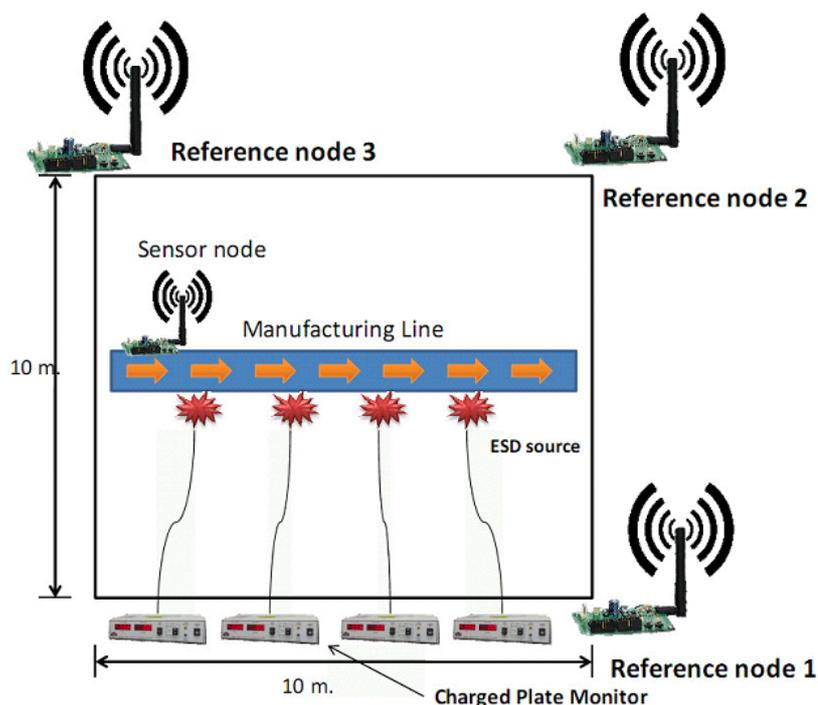
ภาพประกอบ 415 ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์
โหนดด้วยการประยุกต์ใช้ Neural Network



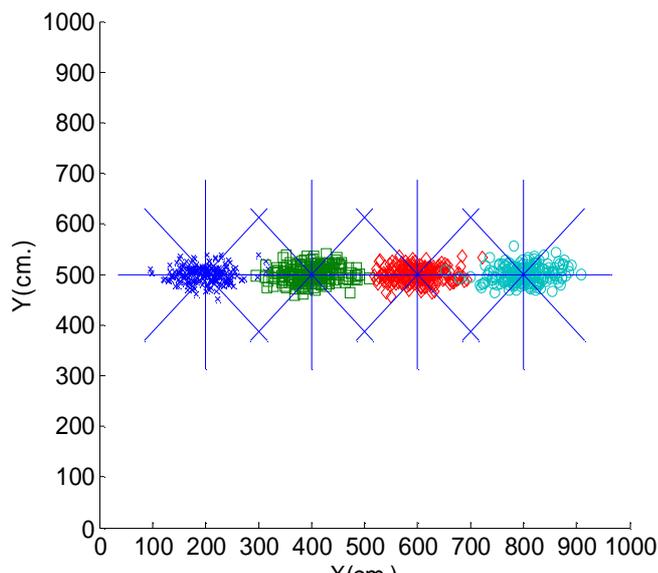
ภาพประกอบ 416 ผลการทดสอบจากทดสอบระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดด้วยการ
ประยุกต์ใช้ Neural Network

4.3.2 การทดสอบระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้ เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ทำการทดสอบการทำงานของระบบที่ได้ออกแบบขึ้น ทำการทดลองในสภาพแวดล้อมจริงในสายการผลิตฮาร์ดดิสก์ที่จำลองขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการทางด้าน ESD ของบริษัทซีเกด (เทพาร์กซ์) กำหนดพื้นที่สำหรับการทดลองขนาด $10\text{m} \times 10\text{m}$ ทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 413 จำลองการเกิดเหตุการณ์ ESD ที่ระดับแรงดัน 50 V ด้วยอุปกรณ์ Charged Plate Monitor ที่ถูกติดตั้งไว้แล้ว 4 จุดในสายการผลิตที่จำลองขึ้นเหตุการณ์ ESD เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องพร้อมๆกันทั้งสี่จุด ผลการทดลองในภาพประกอบ 414 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการระบุตำแหน่งการเกิดเหตุการณ์ ESD ที่แม่นยำมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดที่ 24 เซนติเมตร และระบบสามารถแยกแยะเหตุการณ์ ESD ที่อยู่นอกระยะตรวจจับได้อย่างสมบูรณ์อีกด้วย



ภาพประกอบ 417 การจัดอุปกรณ์ในการทดสอบระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย



ภาพประกอบ 418 ผลการทดสอบระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการ
ประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

44สรุป

ระบบระบุพิกัดตำแหน่งของเหตุการณ์ ESD ด้วยการอาศัยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้ถูกออกแบบขึ้นและทดลองใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง ระบบสามารถให้ผลคำตอบที่ใกล้เคียงค่าจริงมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดที่ 24 เซนติเมตรเมตรความละเอียดของผลคำตอบ 50cm ในพื้นที่การทดลองขนาด 10m × 10m ระบบสามารถแยกแยะจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ที่อยู่นอกขอบเขตการตรวจจับได้อย่างต่อเนื่อง การระบุตำแหน่งในระบบนี้เป็นการใช้ข้อมูลของตำแหน่งจากตำแหน่งของเซนเซอร์โหนด ในการระบุตำแหน่งเซนเซอร์โหนดงานวิจัยนี้ได้ออกแบบกระบวนการระบุพิกัดตำแหน่งโดยอาศัยโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาช่วยในการจัดการข้อมูล RSSI ที่มีความแปรปรวนต่อสภาพแวดล้อมได้ง่าย ระบบนี้สามารถลดผลความผิดพลาดลงได้มาโดยให้ความผิดพลาดเฉลี่ย 0.9 เมตรสำหรับระบบที่ใช้อินพุต RSSI จากกำลังส่งที่แตกต่างกัน 16 ระดับ และ 2.2 เมตร สำหรับระบบที่ใช้อินพุต RSSI จากกำลังส่งที่แตกต่างกัน 8 ระดับ เมื่อเทียบกับการคำนวณโดยตรงที่มีความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 5.42cm จะเห็นว่าช่วยให้คำตอบแม่นยำขึ้นได้มาก นั่นหมายถึงผลการคำนวณตำแหน่งของการเกิดเหตุการณ์ ESD ก็จะแม่นยำขึ้นเช่นกัน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการตรวจเอกสาร บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประเด็นวิจัยทำให้ทราบถึงแนวทางที่จะนำไปสู่เป้าหมายของงานวิจัยนี้ เพื่อให้ได้มาซึ่งระบบที่สามารถระบุตำแหน่งการเกิดเหตุการณ์ **ESD** และสามารถนำไปใช้งานได้จริง เราทราบถึงธรรมชาติของเหตุการณ์ **ESD** ว่าในทุกๆครั้งที่เกิดเหตุการณ์ **ESD** จะเกิดการแพร่การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (**EMI**) สิ่งนี้เองที่เป็นคั่งค้างสำคัญของงานวิจัยนี้เพื่อนำไปสู่เป้าหมายที่กำหนด จากการศึกษาวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะของการแพร่ **EMI** จากเหตุการณ์ **ESD** พบว่ามีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับระยะทางของจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** ไปยังจุดสังเกตการณ์ จึงได้ทำการทดลองวัดรูปสัญญาณกระแสของการดิสชาร์จจากเหตุการณ์ **ESD** เทียบกับรูปสัญญาณการแพร่ **EMI** ที่รับได้จากเสาอากาศ ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดพบว่ารูปสัญญาณกระแสดิสชาร์จและสัญญาณจากการแพร่ **EMI** ของ **ESD** มีความคล้ายคลึงกันในทุกๆการทดลอง และเมื่อทำการทดลองวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ **EMI** จากเหตุการณ์ **ESD** ที่ระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์และตัวตรวจวัดต่างกันเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแอมพลิจูดของสัญญาณ **EMI** ที่ตัวตรวจจับ **EMI** รับสัญญาณได้มีความสัมพันธ์กับระยะทางในบริเวณที่ทำการทดลอง โดยที่แอมพลิจูดจะลดลงเมื่อระยะทางมากขึ้น และแนวโน้มที่ชัดเจนทั้งสองสิ่งที่ทำการพิสูจน์มานี้จะเป็นประเด็นสำคัญที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการประมาณระยะห่างระหว่างจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** กับตัวตรวจจับได้

เมื่อสมมุติฐานแรกได้พิสูจน์และเห็นแจ้งแล้วว่ามีความเป็นไปได้การทดลองวัดแอมพลิจูดจากตัวตรวจจับทั้ง 4 ตัวในพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลการทดลองทำให้ได้แนวโน้มที่ชัดเจนของลักษณะแอมพลิจูดจากตัวตรวจจับทั้งสี่ตัวที่มีขนาดแปรผันตามระยะจากจุดกำเนิดเหตุการณ์ **ESD** ในแต่ละจุดที่ทำการทดสอบจะสังเกตได้ว่าขนาดของสัญญาณจากตัวตรวจจับทั้งสี่มีลักษณะเป็นลักษณะเฉพาะตัวสามารถแยกแยะตำแหน่งได้จากการเปรียบเทียบรูปร่างของสัญญาณทั้งสิ้น แต่เราทราบกันแล้วว่าสัญญาณดังกล่าวสามารถแปลงเป็นข้อมูลเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างจุดเกิด

เหตุการณ์ ESD กับตัวตรวจจับได้ เมื่อนำไปคำนวณตามสมการ **Trilateration** สามารถให้คำตอบ เป็นพิกัดตำแหน่งได้ใกล้เคียงตำแหน่งจริง โดยที่ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดอยู่ที่ **4.28 cm** มีค่า ความผิดพลาดสูงสุดที่ **7.62 cm** และในการทดลองระบบในสภาพแวดล้อมจริงระบบระบุพิกัด ตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD ที่ออกแบบขึ้นโดยอาศัยกระบวนการวัดความแรงของสัญญาณ การแพร่ EMI ของการเกิดเหตุการณ์ ESD สามารถทำงานในการใช้งานที่พื้นที่ขนาด **1.5m×1.5m** โดยมีผลความผิดพลาดเฉลี่ยที่ **10.3cm** อย่างไรก็ตามเมื่อนำระบบนี้ไปใช้ในพื้นที่ขนาด **3m×3m** กลับพบว่าค่าความผิดพลาดของผลคำตอบเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ **51.23cm** แต่ระบบนี้ยังต้องควบคุมตัวแปรในส่วนแรงดันของการดิสชาร์จ เพื่อให้ระบบที่ออกแบบ ขึ้นสามารถทำงานได้ในสถานการณ์จริงซึ่งไม่ทราบระดับแรงดันของเหตุการณ์ ESD จึงได้มีการศึกษาถึงระดับแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจวัดเทียบกับแรงดันของ เหตุการณ์ ESD ระดับต่างๆ ซึ่งพบว่าแต่ละระดับแรงดันของการเกิดเหตุการณ์ ESD จะมีค่าความ ชันของเส้นกราฟดังกล่าว ที่เป็นค่าเฉพาะตัวในแต่ละระดับแรงดันของเหตุการณ์ ESD จึงทำให้ สามารถหาคำตอบของระดับแรงดันของเหตุการณ์ ESD ได้

ระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตที่ได้พัฒนาขึ้น สามารถทำงาน ได้อย่างสอดคล้องตามทฤษฎีและหลักการที่วิเคราะห์ไว้ อีกทั้งให้ผลการคำนวณหาคำตอบของพิกัด ตำแหน่งของจุดเกิดเหตุการณ์ ESD โดยมีความถูกต้องเป็นที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ดียังมีความ ผิดพลาดของคำตอบอยู่บ้าง เนื่องจากการคำนวณต้องอาศัยระเบียบวิธีที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่า ซึ่งส่งผลให้มีความผิดพลาดตามมาได้ อีกทั้งสัญญาณ EMI ที่แพร่จากการเกิดเหตุการณ์ ESD มีความแปรปรวนสูงและอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมได้โดยง่าย ดังนั้นการศึกษาลักษณะต่างๆ ของการเกิดเหตุการณ์ ESD จะช่วยให้เราเข้าใจธรรมชาติและค้นหากระบวนการเข้ามาช่วยในการ ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล และกระบวนการปรับปรุงข้อมูลให้เข้าใกล้ความถูกต้องมาก ยิ่งขึ้น

มาถึงจุดนี้ถึงแม้จะได้ระบบที่สามารถระบุตำแหน่งการเกิดเหตุการณ์ ESD ที่ ทำงานได้อย่างถูกต้องแล้ว แต่ข้อจำกัดของระบบนี้คือเมื่อพื้นที่ในการตรวจจับที่มีขนาดกว้างขึ้น ในการทดลองเมื่อเพิ่มเป็น **3mx3m** พบว่าค่าความผิดพลาดสูงมากผลคำตอบไม่เหมาะที่จะ นำไปใช้งาน ดังนั้นจึงได้เกิดแนวคิดใหม่ด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายร่วมกับ

หลักการพื้นฐานของการตรวจจับสัญญาณ **EMI** จากเหตุการณ์ **ESD** ในการสร้างระบบที่สามารถตรวจจับเหตุการณ์ **ESD** ได้ในพื้นที่ที่มีขนาดกว้างขึ้นจากระบบแรกและยังคงความแม่นยำไว้

โครงสร้างของระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยอาศัยกระบวนการระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดไร้สาย เซนเซอร์โหนดที่ทำการระบุตำแหน่งจะถูกติดตั้งกับตัวตรวจจับ **EMI** ความแม่นยำของตำแหน่งจุดเกิดเหตุการณ์ **ESD** ที่ได้จากระบบนี้จะขึ้นกับกระบวนการระบุพิกัดตำแหน่งของเซนเซอร์โหนดไร้สาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบกระบวนการดังกล่าวที่มีการปรับปรุงให้มีผลคำตอบที่ความผิดพลาดน้อยลงด้วยการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้ ทำให้ได้ระบบที่สามารถหาคำตอบของจุดเกิดเหตุการณ์ในพื้นที่ **10m×10m** ด้วยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของตำแหน่งอยู่ที่ **24 cm** มีความละเอียดของตำแหน่งที่ **50 cm** และระบบสามารถแยกแยะเหตุการณ์ **ESD** ที่อยู่นอกระยะตรวจจับได้อย่างสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบสำหรับใช้ในการระบุตำแหน่งการเกิดเหตุการณ์ **ESD** สองรูปแบบ ซึ่งมีการทำงานพื้นฐานที่แตกต่างกันคือ ระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตโดยอาศัยการวัดความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ระบบแรกเป็นการนำข้อมูลการแพร่ **EMI** จากเหตุการณ์ **ESD** เพียงอย่างเดียว ในการหาคำตอบระบบนี้มีข้อดีในแง่ของการติดตั้งระบบที่ไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ไว้กับอาคารผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิต ส่วนข้อเสียคือระบบต้องการใช้ตัวตรวจจับ **EMI** อย่างน้อย **3** ตัวในการทำงาน และเมื่อใช้ในพื้นที่ขนาด **3m×3m** พบว่าผลคำตอบมีความผิดพลาดจนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ระบบที่สองถูก ออกแบบเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าวด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ระบบนี้มีข้อดีในแง่ของพื้นที่ในการตรวจจับที่มีขนาดกว้างกว่าระบบแรกอยู่มาก และมีแนวโน้มในการพัฒนาต่อเพื่อเพิ่มพื้นที่ดังกล่าวได้อีก ระบบต้องการตรวจจับ **EMI** เพียงหนึ่งตัว ทำให้เมื่อนำไปใช้งานจริงระบบนี้จะมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าระบบแรกเพราะตัวตรวจจับ **EMI** เป็นอุปกรณ์วัดเฉพาะทางและมีราคาค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของระบบนี้คือระบบจำเป็นต้องติดตั้งเซนเซอร์โหนดพร้อมด้วยตัวตรวจจับ **EMI** ไปกับอาคารผลิตภัณฑ์ในสายการผลิตซึ่งในบางกรณีจะไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวได้เนื่องด้วยลักษณะของอาคารหรือกระบวนการของเครื่องจักรในการผลิต ดังนั้นแล้ว

ระบบที่ได้ออกแบบขึ้นทั้งสองจึงมีข้อดี ข้อเสียแบ่งแยกกันการนำไปใช้งานจริงจะต้องวิเคราะห์ลักษณะสายการผลิตเพื่อเลือกระบบที่จะใช้ให้เหมาะสม

5.2 ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

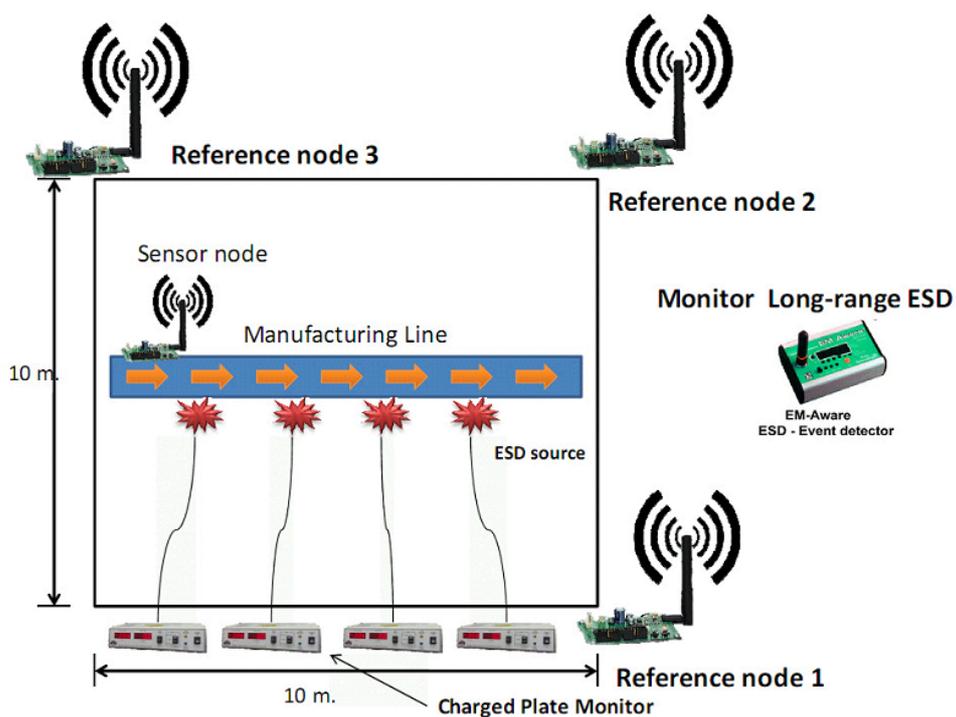
5.2.1 ความผิดพลาดของระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตโดยอาศัยการวัดความแรงของการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่พื้นที่ ขนาด $3m \times 3m$ หรือมากกว่า

จากการทดลองทำให้ทราบถึงความผิดพลาดของค่าตอบซึ่งค่อนข้างสูง ผู้วิจัยได้นำปัญหานี้ไปวิเคราะห์และพิจารณาอีกครั้ง และได้ทำการทดลองอีกครั้งเพื่อวัดข้อมูลให้มากขึ้นและลองปรับเปลี่ยนสภาพแวดล้อมรอบๆบริเวณที่ทำการทดลอง แต่ผลยังปรากฏเหมือนเดิม ในขั้นต้นอาจจะสรุปโดยรวมว่ามาจากกรณีที่สัญญาณ **EMI** นั้นไม่เป็นไปตามฟังก์ชันที่คาดคะเนไว้ ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีสิ่งเหล่านี้อาจมาจากผลของการสะท้อนของสัญญาณจากวัตถุที่เป็นโลหะ เนื่องจากในพื้นที่ทำการทดลองประกอบด้วยเครื่องจักรที่มีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นโลหะที่มีการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างดีอาจมีสัญญาณสะท้อนเข้ามารบกวนทำให้ค่าความแรงของสัญญาณผิดเพี้ยนไป แนวทางในการแก้ปัญหานี้จากการศึกษาในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะพบงานวิจัยหนึ่งที่พัฒนาระบบ **ESD event locator system (EELS)** ระบบนี้ทำการระบุพิกัดจุดเกิด **ESD** ด้วยการใช้อุปกรณ์ **ToA : Time of Arrival** ซึ่งจะสามารถแยกแยะสัญญาณในลักษณะ **multipath** ได้ แต่ระบบนี้จะต้องใช้เครื่องที่มีความเร็วสูงมากเพื่อที่จะแยกแยะความต่างของเวลาดังกล่าวได้ ดังนั้นหากคิดค้นกระบวนการที่นำข้อมูล **ToA** มาประยุกต์ร่วมด้วยอาจจะช่วยให้ระบบมีความสมบูรณ์และทำงานในพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้นได้

5.2.2 ผลของเหตุการณ์ **ESD** ในระยะใกล้ที่รบกวนต่อระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

การตรวจจับ **EMI** ของระบบจะมีขอบเขตของการตรวจจับดังอธิบายไว้ในภาพประกอบ 49 ขอบเขตดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดช่วงระดับแรงดันเอาท์พุทของตัวตรวจวัด **EMI** จากการออกแบบกำหนดรัศมีการตรวจจับ **25 cm** จากตำแหน่งกลางของภาควางผลิตภัณฑ์ด้วยข้อมูลจากภาพประกอบ 316 ระดับแรงดันเอาท์พุทที่อยู่ในขอบเขตการตรวจจับคือ 35 ถึง 45

โวลต์ แต่อย่างไรก็ตาม ระดับแรงดันนี้ไม่ใช่แรงดันของเหตุการณ์ ESD ที่อยู่ภายในขอบเขตของการตรวจจับอย่างแท้จริง หากมองในภาพประกอบ 3-16 ยกตัวอย่างในเส้นกราฟของ ESD แรงดัน 250 โวลต์ จะเห็นว่ามี การเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันในช่วงประมาณ 44 ถึง 43 โวลต์เท่านั้น ในระยะทางตั้งแต่ 0.25 ถึง 1 เมตร ตรงนี้ก็แสดงให้เห็นถึงการเกิดเหตุการณ์ ESD ที่อยู่ภายนอกเขตการตรวจจับ แต่ระบบเข้าใจว่าเป็นเหตุการณ์ ESD ที่อยู่ภายในขอบเขตการตรวจจับ ก็จึงทำให้ระบบแจ้งเตือนเหตุการณ์ที่ผิดพลาด แนวทางในการแก้ปัญหาเรื่องนี้จำเป็นต้องเพิ่มตัวตรวจจับ EMI อีกอย่างน้อยหนึ่งตัวติดตั้งไว้บริเวณรอบพื้นที่ที่ทำการตรวจจับ โดยให้มีระยะห่างจากเซนเซอร์โหนดพอสมควรเพื่อนำข้อมูลของการเกิดเหตุการณ์ ESD มาวิเคราะห์เพิ่มเติมว่าเป็นเหตุการณ์ ESD ที่เกิดขึ้นในระยะไกลหรือไม่



ภาพประกอบ 5-1 แนวทางแก้ไขปัญหของระบบตรวจหาจุดเกิดเหตุการณ์คายประจุไฟฟ้าสถิตด้วยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

บรรณานุกรม

- [1] D.M. Judge, "Trends in Automatic Testing of Electronic Devices," Proceedings of Southeast Con '91, pp.401 - 404, 1991.
- [2] M Lam, W. Bookin, S. Czarniecki, P. Golcher, , I.E.T. Iben, and D. J. Richard, "ESD Damage and Solutions in Tape Head Manufacturing" In Proceedings of Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium 2007, pp. 2B.6-1 - 2B.6-6, 2007.
- [3] D. G. Bellmore, "Controlling ESD in Automated Handling Equipment," 2002 Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium, pp. 226 - 235, 2002.
- [4] A. Borjesson, "A Method for Measurement of Triboelectric Charging" Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings, pp. 253 - 261, 1995.
- [5] A. Steinman, J. Bernier, D. Boehm, T. Albano, W. Tan, and D. Pritchard, "Test Methodologies for Detecting ESD Events in Automated Processing Equipment," In Proceedings of Electrical Overstress/Electrostatic Discharge (EOS/ESD) Symposium 1999, pp. 168-177, 1999.
- [6] J. Matsugi, Y. Mizoh, T. Nakano, K. Nakamura and H. Sakakima, "ESD Phenomena in GMR Heads in the Manufacturing Process of HDD and GMR Heads," IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 28, No.3, July 2005.
- [7] T. Yoshida and N. Masui, "A Study on Discharge Current and Radiation Noise of ESD from Charged Metal and Charged Human Body," Industry Applications Society Annual Meeting 2008 (IAS '08), pp.1-6, 2008.
- [8] L. D. Lin, L. F. Dechiaro and J. M. Chung "A Robust ESD Event Locator System with Event Characterization," Journal of Electrostatics, Vol. 44, pp. 59-175, 1998.
- [9] L. F. Dechiaro, F. J. Louis, L. M. Chung and L. Don, "Electrostatic Discharge Event Locator," United States Patent 5923160, 07/13/1999.

- [10] R. Erta, "Electrostatic Discharge Monitoring and Manufacturing Process Control System," United States Patent 7353120, 04/01/2008.
- [11] V. Kraz, "Electrostatic Discharges and Transient Signals Monitoring System and Method," United States Patent 8567120, 08/07/2008.
- [12] D. C. Greg, "Electrostatic Discharge Locating Apparatus and Method," United States Patent 6784120, 18/12/2007.
- [13] L. Q. Zhuang, K. M. Goh and J. B. Zhang, "The Wireless Sensor Networks for Factory Automatic: Issues and Challenges," IEEE conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), pp.141-148, 2007.
- [14] S. Buschmann, D. Pfisterer and S. Fischer, "Estimating Distances using Neighborhood Intersection," in Proceedings of Vehicular Technology Conference, pp. 314-321, 2006.
- [15] L. V. Hai, T. T. Tu and M. D. Luca, "A Simple Method for Positioning and Tracking in Wireless Sensor Networks," in Proceedings of International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision ICARCV, pp. 229-233, 2008.
- [16] Y. Tonoya, K. Watanabe, and M. Honda, "Impulsive ESD Noise Occurred from an Office Chair," EOS/ESD Symposium Proceedings, EOS-15, 1993.
- [17] P.F. Wilson, M. Ma, "Fields Radiated from ESD," IEEE Trans. on EMC, Vol.33, pp. 187 - 196, 1991.
- [18] P.F. Wilson, A.R. Ondrjka, M.T. Ma, J.M. Ladbury, "Electromagnetic Fields Radiated from Electrostatic Discharges - Theory and Experiment," NTIS Tech. Rpt. 1988.
- [19] Credence Technologies Inc., "EMAware--Continuous ESD Monitor Product page," [Online] Available: <http://www.credencetech.com/products/category.php?cat=ESD,2009>
- [20] K. Thongpull, "PSU-Mote User manual," [Online] Available: http://saturn.ee.psu.ac.th/~kittikhun/PSU_Mote/PSU-Mote_Manual.pdf

- [21] S. Buschmann, D. Pfisterer, S. Fischer, " Estimating Distances Using Neighborhood Intersection" , Proceedings of Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring 2006.
- [22] P. Bahl and V. N. Padmanabhan "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, " In Proceedings of IEEE INFOCOM 2000, pages 775-784, 2000.
- [23] Bal, M. Xue, H. Weining Shen Ghenriwa, H., "A Testbed for Localization and Tracking in Wireless Sensor Networks," IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 2009, pp. 3581 - 3586, San Antonio, Texas, USA, 2009.
- [24] Chinh T. Vu, Yingshu Li: Delauray-Triangulation Based Complete Coverage in Wireless Sensor Networks. PerCom Workshops 2009: 1-5
- [25] Thomas, F. and Ros, L., Revisiting trilateration for robot localization. IEEE Transactions on Robotic. v21 iNo. 1. 93-101.
- [26] H.L. ori, "Application of diffraction theory to wireless propagation problems," International Symposium Antennas and Propagation Society, 2000.
- [27] T. Instruments, "CC2500 datasheet," 2005. [Online]. Available: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2500.pdf>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายกิตติคุณ ทองพูล		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120068		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550	

ทุนการศึกษา

โครงการวิจัยเพื่อการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาจากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้าน
ส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (I/UCRC in HDD Components) คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น รหัสโครงการ CPN-HR 13-02-51 M