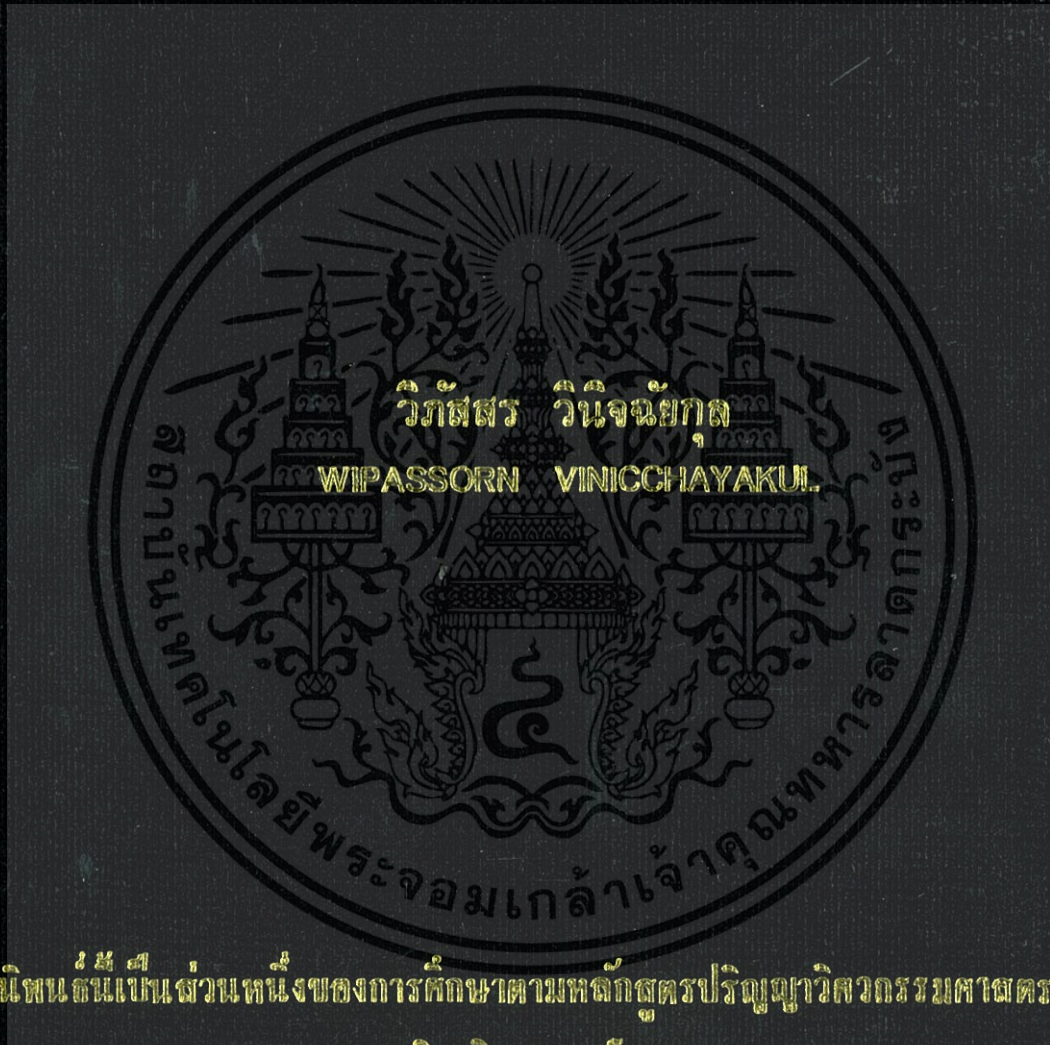


การจำลองการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่ง
สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาท

ULTRA WIDEBAND PROPAGATION MODEL FOR AN INDOOR
LOCALIZATION WITH NEURAL NETWORK



วิทยานิพนธ์เสนอแนะส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-010-139

ULTRA WIDEBAND PROPAGATION MODEL
FOR AN INDOOR LOCALIZATION WITH NEURAL NETWORK



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013
KMITL-2013-EN-M-010-139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร
ด้วยโครงข่ายประสาท

Thesis Title Ultra Wideband Propagation Model for An Indoor Localization with
Neural Network

นักศึกษา นางสาววิภัสสร วินิจฉัยกุล

รหัสประจำตัว 55611932

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-010-139

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|--------------------------|------------------|--|
| รศ.ดร.ชวรงค์ | พงศ์เจริญพาณิชย์ |  |
| ผศ.ดร.จิตติพงษ์ | เลิศวิริยะประภา |  |
| ผศ.ดร.พิชญ | สุพรรณกุล |  |
| ดร.สถาพร | พรหมวงศ์ |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ห้อง T202

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุช์ชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา
ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยานิพนธ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้อง
วันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2556

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การจำลองการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งสำหรับการ การทำตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาท |
| นักศึกษา | นางสาววิภัสสร วินิจัยกุล |
| รหัสประจำตัว | 55611932 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโทรคมนาคม |
| พ.ศ. | 2556 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ดร.สถาพร พรหมวงศ์ |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งสำหรับการทำตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาท โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงให้ระบบการทำตำแหน่งภายในอาคารสามารถใช้ในสภาวะแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ ทั้งสามระนาบ อันได้แก่ ระนาบความกว้าง ระนาบความยาว และระนาบความสูง ด้วยวิธีการฟิงเกอร์ปรีนที่ดึงร่วมกับการวิเคราะห์การแพร่กระจายแถบกว้างยิ่ง และโครงข่ายประสาท โดยในขั้นแรกจะทำการสร้างชุดข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนด้วยการวัดผลตอบสนองของช่องสัญญาณด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz จากนั้น นำผลตอบสนองของช่องสัญญาณดังกล่าวมาสร้างเป็นพารามิเตอร์สำหรับการทำฐานข้อมูลในกระบวนการของฟิงเกอร์ปรีนที่ดึง ได้แก่ ค่าการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึง ค่าการประวิงเวลาของวิถีแรก ค่าการสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ย และค่าการประวิงเวลาเฉลี่ย ในขั้นที่สองจะเป็นการประเมินผลลัพธ์ที่ได้โดยผลลัพธ์ โดยแสดงในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมและค่าเฉลี่ย นอกเหนือจากนั้นค่าผิดพลาดระยะทางจะถูกนำมาแสดงผลในรูปของพิกัด x และ y จากผลการทดสอบพบว่า การทำตำแหน่งภายในอาคารนั้นมีความแม่นยำอยู่ที่ 77.94% ที่ระยะ 1 เมตร และเมื่อทำการปรับปรุงแล้ว พบว่า ทำตำแหน่งภายในอาคารนั้นมีความแม่นยำอยู่ที่ 85.08% ที่ระยะ 1 เมตร ตามความต้องการของแอปพลิเคชันการติดตามภายในอาคาร

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis | ULTRA WIDEBAND PROPAGATION MODEL FOR AN INDOOR LOCALIZATION WITH NEURAL NETWORK |
| Student | Miss Wipassorn Vinicchayakul |
| Student ID | 55611932 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Telecommunications Engineering |
| Year | 2013 |
| Thesis Advisor | Dr. Sathaporn Promwong |

ABSTRACT

This thesis presents ultra wideband (UWB) propagation model for an indoor localization with neural network. The main purpose of this thesis is to improve the indoor localization system to find the location that has 3 dimension (3D) changing, x plane, y plane and z plane. Fingerprinting technique, UWB propagation channel analysis and neural network are used in this thesis. Firstly building the database in fingerprinting technique were created by using channel transfer function measurement with vector network analyzer (VNA) at the frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz. The first pathloss, the delay times of first path, the average of path loss and delay time were investigated to build the fingerprints. Secondly, to evaluate the result, they are shown in term of cumulative distribution function (CDF) and average distance error. Moreover, the distance errors are shown in graph at x and y coordinates. As the result, this indoor localization can identify an accurate the location as 77.94% at 1 meter. Then, to improve the result, this indoor localization can identify an accurate the location as 85.08% at 1 meter to follow the in-building tracking application.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือด้านคำปรึกษาแนะนำด้านเอกสารการค้นคว้า และอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ และสถานที่ในการทดลองจาก ดร.สถาพร พรหมวงศ์ จึงขอกราบขอบพระคุณท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ดังกล่าวเป็นอย่างยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล อาจารย์ประจำสาขาวิชาโทรคมนาคม ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษาแนะนำ วางแผนในการทำงานในด้านของการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่ง อีกทั้งยังให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือด้านการเขียนโปรแกรมต่างๆ และขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ยุทธนา คิดใจเดียว อาจารย์ประจำสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือเกี่ยวกับโครงข่ายประสาทเทียม ทำให้ผู้วิจัยสามารถนำความรู้ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว โดยเฉพาะนายวรพล วินิจฉัยกุล ตลอดจนครอบครัวนายธนิตพงษ์ วิบูลยานนท์ ทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาตลอดจนช่วยเหลือด้านทุนทรัพย์ และมอบหมายความรักความห่วงใยให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณพี่ๆนักศึกษาปริญญาเอกและปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ ให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลือทางด้านเทคนิคในการใช้เครื่องมือต่างๆ อย่างเต็มที่ จนเป็นผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินการได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่ได้ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้กำลังใจ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

วิภัสสร วินิจฉัยกุล
ผู้จัดทำ

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญรูป..... | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 2 |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน..... | 3 |
| 1.6 ขอบเขตการวิจัย..... | 4 |
| 1.7 ขั้นตอนการศึกษา..... | 4 |
| บทที่ 2 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่งและวิธีการวิเคราะห์ตำแหน่ง..... | 7 |
| 2.1 บทนำ..... | 7 |
| 2.2 ทบทวนวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 7 |
| 2.2.1 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 7 |
| 2.2.2 สรุปการทบทวนวรรณกรรม..... | 8 |
| 2.3 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง..... | 9 |
| 2.3.1 นิยามของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง..... | 10 |
| 2.3.2 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง..... | 11 |
| 2.3.3 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง..... | 12 |
| 2.3.4 มาตรฐานของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง..... | 14 |
| 2.3.5 ข้อดีของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง..... | 14 |
| 2.3.6 การประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง..... | 16 |
| 2.4 ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง..... | 17 |
| 2.4.1 การพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ..... | 17 |
| 2.4.2 การพิจารณาทิศทางการมาถึงของสัญญาณ..... | 17 |
| 2.4.3 การพิจารณาเวลาการมาถึงของสัญญาณ..... | 18 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.4.4 การพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ | 18 |
| 2.4.5 วิธีการพิจารณาความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งหรือวิธีการ ฟังเกอร์ปรินท์ตั้ง | 19 |
| 2.5 วิธีการวิเคราะห์ตำแหน่ง..... | 21 |
| 2.5.1 การวิเคราะห์แบบเพื่อนบ้านใกล้เคียง..... | 21 |
| 2.5.2 โครงข่ายประสาทเทียม | 21 |
| 2.6 สรุป..... | 35 |
| บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์..... | 36 |
| 3.1 บทนำ..... | 36 |
| 3.2 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง..... | 36 |
| 3.3 สัญญาณที่รับได้..... | 37 |
| 3.4 พารามิเตอร์จากการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง..... | 38 |
| 3.4.1 พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีและพารามิเตอร์การประวิงเวลา..... | 38 |
| 3.4.2 การสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ย..... | 39 |
| 3.4.3 การประวิงเวลาเฉลี่ย..... | 39 |
| 3.5 การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของการหาตำแหน่งแถบกว้างยิ่งในระนาบสามมิติ..... | 40 |
| 3.6 สรุป..... | 40 |
| บทที่ 4 การออกแบบและจัดทำกรวิจัย..... | 41 |
| 4.1 บทนำ..... | 41 |
| 4.2 การดำเนินการออกแบบการทดลอง..... | 41 |
| 4.2.1 บล็อกไดอะแกรมของวิทยานิพนธ์..... | 42 |
| 4.2.2 การออกแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ..... | 43 |
| 4.2.3 การออกแบบแบบจำลองการหาตำแหน่ง..... | 44 |
| 4.2.4 การออกแบบโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี..... | 45 |
| 4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... | 48 |
| 4.3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์..... | 48 |
| 4.3.2 ชุด Calibrate..... | 48 |
| 4.3.3 สายนำสัญญาณ..... | 48 |
| 4.3.4 คอมพิวเตอร์..... | 48 |
| 4.3.5 สายอากาศแบบกรวยคู่..... | 48 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.4 การออกแบบการจัดเก็บผลการทดสอบ..... | 49 |
| 4.5 สรุป..... | 50 |
| บทที่ 5 ผลการทดลองวิจัย..... | 51 |
| 5.1 บทนำ..... | 51 |
| 5.2 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร..... | 51 |
| 5.2.1 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 1..... | 51 |
| 5.2.2 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 2..... | 52 |
| 5.2.3 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 3..... | 53 |
| 5.2.4 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 4..... | 54 |
| 5.2.5 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 5..... | 55 |
| 5.2.6 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 6..... | 56 |
| 5.2.7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร..... | 57 |
| 5.2.8 การวิเคราะห์ผล CDF ของค่าความผิดพลาดระยะทางการทดสอบครั้งที่ 1-6..... | 58 |
| 5.3 ผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารในแต่ละตำแหน่ง..... | 58 |
| 5.3.1 ผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z=1.4$ เมตร..... | 58 |
| 5.3.2 ผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z=1.5$ เมตร..... | 61 |
| 5.3.3 ผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z=1.6$ เมตร..... | 64 |
| 5.4 วิเคราะห์ผลการจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบสามมิติ..... | 68 |
| 5.4.1 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของค่ากลางความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคาร..... | 68 |
| 5.4.2 วิเคราะห์สาเหตุค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารจากค่าความแปรปรวนของตำแหน่ง..... | 68 |
| 5.4.3 วิเคราะห์สาเหตุค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารในตำแหน่งที่สายอากาศอยู่ระยะไกล..... | 73 |
| 5.4.4 วิเคราะห์สาเหตุค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารซึ่งเกิดค่าผิดพลาดขึ้นตามแนวแกน x | 73 |
| 5.4.5 วิเคราะห์สาเหตุซึ่งค่าพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึงนั้น ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารสูง..... | 73 |
| 5.5 ประเมินผลการจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบสามมิติเมื่อปรับปรุงพารามิเตอร์อินพุต..... | 74 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 5.6 สรุป..... | 77 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 78 |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย..... | 78 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ..... | 79 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 80 |
| ภาคผนวก..... | 83 |
| ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 83 |
| ภาคผนวก ข. ข้อมูลสำหรับการสร้างฐานข้อมูล..... | 104 |
| ภาคผนวก ค. ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ..... | 112 |
| ภาคผนวก ง. การวิเคราะห์เมื่อนำสัญญาณแถบแคบมาใช้ในการหาตำแหน่ง..... | 137 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 142 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.1 พารามิเตอร์ในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร..... | 43 |
| 5.1 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 1..... | 51 |
| 5.2 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 2..... | 52 |
| 5.3 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 3..... | 53 |
| 5.4 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 4..... | 54 |
| 5.5 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 5..... | 55 |
| 5.6 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 6..... | 56 |
| 5.7 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยจากการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารทั้ง 6 ครั้ง..... | 57 |
| 5.8 บันทึกผล CDF ของค่าความผิดพลาดระยะทางการทดสอบครั้งที่ 1-6 เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร..... | 58 |
| 5.9 พารามิเตอร์ ณ ตำแหน่งจริง (2, 2.5, 1.5) เทียบกับตำแหน่ง (0, 3.5, 1.5) ที่ประมาณได้จากการทดสอบทั้ง 6 ครั้ง..... | 70 |
| 5.10 ค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์แต่ละตัว ณ ตำแหน่ง (0, 3.5, 1.5) | 71 |
| 5.11 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้พารามิเตอร์ 4 พารามิเตอร์ และ 3 พารามิเตอร์..... | 73 |
| 5.12 ผลการทดสอบเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์..... | 77 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ขั้นตอนในการศึกษาของวิทยานิพนธ์..... | 5 |
| 2.1 สัญญาณแถบกว้างยิ่งยั้งซึ่งมีแถบมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz | 10 |
| 2.2 สัญญาณแถบกว้างยิ่งยั้งซึ่งมีแถบความถี่กว้างมากในทางเวลาและความถี่..... | 11 |
| 2.3 เปรียบเทียบการใช้งานแถบความถี่ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่งยั้งกับการสื่อสาร แบบแถบความถี่แคบอื่นๆ..... | 11 |
| 2.4 สเปกตรัมมาร์คสำหรับการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นแถบกำลังงาน สำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC..... | 13 |
| 2.5 สัญญาณหลายวิถีซึ่งเกิดจากการสะท้อนของสัญญาณแถบกว้างยิ่งยั้ง ภายในห้องจากเครื่องส่งถึงเครื่องรับ..... | 15 |
| 2.6 การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งยั้ง..... | 16 |
| 2.7 การหาตำแหน่งโดยวิธี Trilateration | 18 |
| 2.8 การหาตำแหน่งโดยวิธีการพิจารณาทิศทางมาถึงของสัญญาณ..... | 18 |
| 2.9 การหาตำแหน่งโดยวิธีการพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ | 13 |
| 2.10 การทำงานของวิธีการฟิงเกอร์ปรีนที่ตั้ง..... | 19 |
| ก. การทำฐานข้อมูล | |
| ข. การใช้งานจริง | |
| 2.11 การตรวจสอบสินค้าในคลังสินค้า..... | 20 |
| 2.12 การหาตำแหน่งของนักผจญเพลิงที่เข้าไปค้นหาผู้ประสบภัยที่ติดอยู่ในอาคารที่ถูกไฟไหม้..... | 20 |
| 2.13 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยหลายข้อมูลขาเข้า..... | 23 |
| 2.14 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเส้นตรง..... | 24 |
| 2.15 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบฐานรัศมี..... | 24 |
| 2.16 การจำแนกชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมตามสถาปัตยกรรมโครงข่าย..... | 25 |
| 2.17 โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี ที่มีขนาดของข้อมูลขาเข้าเท่ากับ R จำนวนเซลล์ประสาท ในชั้นซ่อนเท่ากับ S และขนาดของข้อมูลขาออกเท่ากับ M..... | 26 |
| 2.18 ผลของพารามิเตอร์การกระจาย σ | 28 |
| 2.19 ตัวอย่างการจดจำรูปแบบ..... | 32 |
| (ก) การจำแนกสัญญาณคลื่นหัวใจ | |
| (ข) การจดจำลายมือตัวอักษร | |
| (ค) การจำแนกรูปแบบ | |
| 2.20 ตัวอย่างการจับกลุ่ม..... | 32 |
| 2.21 ตัวอย่างการประมาณค่าฟังก์ชัน จุดในรูปคือข้อมูลรูปแบบสำหรับการเรียนรู้..... | 33 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.22 ตัวอย่างการทำนายราคาหุ้น..... | 33 |
| 2.23 ตัวอย่างปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา TSP..... | 34 |
| 2.24 ตัวอย่างหน่วยความจำอ้างอิงด้วยเนื้อหาหรือหน่วยความจำสัมพันธ์..... | 35 |
| 3.1 รูปคลื่นของสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา | 37 |
| 3.2 สเปกตรัมของสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่ | 37 |
| 3.3 การสร้างพารามิเตอร์สูญเสียเชิงวิถีและพารามิเตอร์การประวิงเวลาของ สัญญาณแถบกว้างยิ่ง..... | 39 |
| 4.1 บล็อกไดอะแกรมการจำลองการหาตำแหน่งในระนาบสามมิติ..... | 41 |
| ก. การดำเนินการในการทำฐานข้อมูล | |
| ข. การดำเนินการสำหรับการทดสอบ | |
| 4.2 บล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์และประเมินผล..... | 42 |
| 4.3 แบบจำลองสำหรับการทำฐานข้อมูล..... | 44 |
| 4.4 แบบจำลองสำหรับการทดสอบ..... | 45 |
| 4.5 โครงสร้างของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรีคิมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์..... | 46 |
| 4.6 การทำงานของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรีคิมขั้นการเรียนรู้..... | 47 |
| 4.7 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวิจัย..... | 48 |
| 4.8 สายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในจำลองระบบการหาตำแหน่ง | 49 |
| 4.9 สายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในจำลองระบบการหาตำแหน่ง | 49 |
| 4.10 การทดสอบการจำลองช่องสัญญาณการแพร่กระจายแถบกว้างยิ่ง สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร..... | 50 |
| 5.1 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 1)..... | 52 |
| 5.2 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 2)..... | 53 |
| 5.3 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 3)..... | 54 |
| 5.4 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 4)..... | 55 |
| 5.5 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 5)..... | 56 |
| 5.6 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 6)..... | 57 |
| 5.7 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 1..... | 58 |
| 5.8 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 2..... | 59 |
| 5.9 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 3..... | 59 |
| 5.10 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 4..... | 60 |
| 5.11 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 5..... | 60 |
| 5.12 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 6..... | 61 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ X วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.13 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 1..... | 61 |
| 5.14 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 2..... | 62 |
| 5.15 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 3..... | 62 |
| 5.16 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 4..... | 63 |
| 5.17 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 5..... | 63 |
| 5.18 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 6..... | 64 |
| 5.19 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 1..... | 64 |
| 5.20 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 2..... | 65 |
| 5.21 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 3..... | 65 |
| 5.22 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 4..... | 66 |
| 5.23 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 5..... | 66 |
| 5.24 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 6..... | 67 |
| 5.25 การกระจายของค่าผิดพลาดระยะทางในรูปแบบของกราฟแท่ง..... | 68 |
| 5.26 ตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูงจากการหาตำแหน่งภายในอาคาร เมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 1..... | 69 |
| ก. ตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดระยะทางสูงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว | |
| ข. ตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดระยะทางสูงในรูปแบบของแบบจำลอง | |
| 5.27 ตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูงจากการหาตำแหน่งภายในอาคารในสภาวะแวดล้อมจริง..... | 71 |
| 5.28 ผลการทดสอบโดยใช้พารามิเตอร์อินพุตเพียง 3 พารามิเตอร์..... | 72 |
| ก. CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง | |
| ข. ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคาร | |
| 5.29 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 1)..... | 74 |
| 5.30 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 2)..... | 74 |
| 5.31 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 3)..... | 75 |
| 5.32 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 4)..... | 75 |
| 5.33 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 5)..... | 76 |
| 5.34 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 6)..... | 76 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบการหาตำแหน่งเริ่มถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นต้นว่า การใช้ระบบจีพีเอส ในการนำทางรถยนต์ไปยังจุดหมาย หรือใช้หาตำแหน่งของเครื่องบิน [1] หรือใช้ในการติดตามรถยนต์ และอื่นๆ อีกมากมายซึ่งล้วนแล้วแต่อำนวยความสะดวก เพิ่มความปลอดภัยให้กับชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์เป็นอย่างมาก นอกจากการนำระบบหาตำแหน่งมาประยุกต์ใช้กับภายนอกอาคารแล้ว การนำระบบการหาตำแหน่งมาประยุกต์ใช้ภายในอาคารก็เป็นอีกสิ่งหนึ่ง ซึ่งจะช่วยในการอำนวยความสะดวก เพิ่มความปลอดภัยให้กับชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์เช่นเดียวกัน เป็นต้นว่า การนำระบบการหาตำแหน่งมาใช้ในการหาตำแหน่งตนเองหรือร้านค้าในห้างสรรพสินค้า หรือใช้ในการระบุตำแหน่งของผู้ป่วยในโรงพยาบาล หรือใช้ในเหตุการณ์ฉุกเฉิน เช่น การค้นหาตำแหน่งของนักดับเพลิงซึ่งเข้าไปค้นหาผู้ประสบภัยภายในอาคาร [2] หรืออื่นๆ เป็นต้น ซึ่งสำหรับการนำระบบการหาตำแหน่งมาประยุกต์ใช้งานกับแอปพลิเคชันต่างๆ ที่ได้กล่าวมาไม่ได้พิจารณาแต่เพียงระนาบตามแนวแกน x และแกน y เพียงอย่างเดียว แต่มีระนาบแกน z ซึ่งเป็นระนาบของความสูงรวมอยู่ด้วย ดังนั้นการพิจารณา ตำแหน่งจึงควรต้องมีความแม่นยำมากขึ้น ดังนั้น การสร้างระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารขึ้นมานั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงเรื่องของสัญญาณและวิธีการที่ใช้ในการหาตำแหน่งเป็นอย่างมาก เนื่องจากสภาพแวดล้อมภายในอาคารนั้นเกิดสภาพการจางหายหลายวิถีสูง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการใช้ สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง (Ultra wideband: UWB) มาใช้ในการจำลองระบบการหาตำแหน่ง

ลักษณะเด่นที่ทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งถูกเลือกมาใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากเป็นสัญญาณไร้สายที่ใช้กำลังงานส่งต่ำ จึงไม่ไปรบกวนสัญญาณอื่นๆ และเนื่องจากมีแบนด์วิธที่กว้าง [3] จึงสามารถลดปัญหาที่เกิดมาจากองค์ประกอบของคลื่นหลายวิถีได้ อีกทั้งยังสามารถคาดคะเนเวลาของวิถีแรกที่มาถึงได้อย่างแม่นยำ จึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง เป็นที่สนใจในการนำมาใช้เพื่อให้ระบบการหาตำแหน่งมีความแม่นยำมากขึ้น

นอกจากสัญญาณที่นำมาใช้แล้ว วิธีการที่นำมาใช้ในการหาตำแหน่งล้วนแล้วแต่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยวิธีการที่นิยมนำมาใช้ในระบบหาตำแหน่ง [4] เช่น วิธีการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ(Received Signal Strengths : RSS) วิธีการพิจารณาทิศทางมาของสัญญาณ (Angles of Arrival : AOA) วิธีการพิจารณาเวลาการมาถึงของสัญญาณ (Times of Arrival : TOA) หรือวิธีการพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ (Time Difference of Arrival :TDOA) ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการแพร่กระจายสัญญาณ (คลื่นหลายวิถี หรือสถานะที่ไม่สามารถมองเห็นได้ในระดับสายตา) ทำให้วิธีการเหล่านี้ไม่มีความแม่นยำในการหาตำแหน่งเพียงพอ [5] ในสภาพแวดล้อมดังกล่าว วิธีการที่ถูกเลือกมาใช้คือ วิธีการฟิงเกอร์ปรีนท์ตั้ง เนื่องด้วยวิธีฟิงเกอร์ปรีนท์ตั้งได้นำเอาคุณลักษณะของช่องสัญญาณซึ่งเกิดการจางหายหลายวิถี มาสร้างเป็นลายลักษณ์ต้นแบบ แล้วบันทึกลงฐานข้อมูล จากนั้นตำแหน่งต่างๆ จะถูกประมวลโดยการนำลายลักษณ์ของตำแหน่งนั้นๆ มาเปรียบเทียบกับลายลักษณ์

ต้นแบบซึ่งได้บันทึกไว้ในฐานข้อมูลนั่นเอง อีกสิ่งหนึ่งซึ่งสำคัญมากสำหรับเทคนิคฟิงเกอร์ปรีนที่ดั่งคือ อัลกอริทึมรูปแบบการจับคู่ซึ่งมีหน้าที่ในการประมวลผลระหว่างตำแหน่งที่ได้ในขณะนั้นกับข้อมูลในฐานข้อมูล ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำโครงข่ายประสาทมาใช้เป็นอัลกอริทึมรูปแบบการจับคู่ข้อมูล

การที่โครงข่ายประสาทได้ถูกเลือกมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื่องด้วยการประมวลผลของโครงข่ายประสาทนั้นมีพื้นฐานอยู่บนการทำงานของสมองมนุษย์ ซึ่งโครงข่ายประสาทมีความสามารถในการเรียนรู้ และสามารถปรับตัวเองให้เข้ากับหลากหลายสภาพแวดล้อมได้ นอกเหนือจากนั้นโครงข่ายประสาทยังมีโครงสร้างที่แข็งแกร่ง ถึงแม้ว่าจะมีบางเซลล์ประสาทเกิดการเสียหายหรือถูกทำลาย เซลล์ประสาทที่เหลือก็ยังคงสามารถที่จะทำงานอยู่ได้ อีกทั้งโครงข่ายประสาทยังมีความสามารถในการแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น การจดจำรูปแบบ การแบ่งแยกข้อมูล การทำนาย การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และการประมาณค่า [6] จึงทำให้โครงข่ายประสาทได้ถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้นำเสนอการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งมาใช้ร่วมกับวิธีการหาตำแหน่งแบบฟิงเกอร์ปรีนที่ดั่ง และโครงข่ายประสาทในระนาบ 3 มิติ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทั้งสามระนาบ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ถูกจัดทำขึ้น โดยมีความมุ่งหมายในการพัฒนาวิธีการหาตำแหน่งให้สามารถหาตำแหน่งได้ แม้มีการเปลี่ยนแปลงของระนาบความสูง เพื่อให้สามารถรองรับได้กับแอปพลิเคชันการใช้งานจริง โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ ได้แก่

1. เพื่อศึกษาการใช้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งกับระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร
2. เพื่อศึกษาระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบสามมิติ
3. ทำการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาท
4. ทำการวิเคราะห์ และประเมินผลค่าผิดพลาดระยะทางที่เกิดขึ้นจากการจำลองช่องสัญญาณการแพร่กระจายแบบแถบกว้างยิ่งด้วยโครงข่ายประสาท

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การใช้วิธีการหาตำแหน่งแบบฟิงเกอร์ปรีนที่ดั่งร่วมกับโครงข่ายประสาทและสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง น่าจะสามารถปรับปรุงให้ระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารสามารถใช้ได้แม้จะอยู่ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของระนาบทั้งสามมิติ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับในเรื่องของทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นหนักไปที่การใช้วิธีการฟิงเกอร์ปรีนที่ดั่งร่วมกับสัญญาณแถบกว้างยิ่งและโครงข่ายประสาท โดยทำการสร้างแบบจำลองซึ่งจะใช้สำหรับการเก็บฐานข้อมูลและแบบจำลองสำหรับการทดสอบการหาตำแหน่งก่อน จากนั้นทำการเก็บพารามิเตอร์ของสัญญาณซึ่งได้จากการวัด โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์บันทึกลง

ฐานข้อมูลแล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาท จากนั้นในขั้นการทดสอบ ให้ทำการวัดพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ ณ จุดที่ต้องการในแบบจำลองสำหรับการทดสอบแล้วส่งให้ระบบประมวลผลตำแหน่ง

โดยสัญญาณแถบกว้างยั้งที่ถูกนำมาใช้จะกำหนดให้เป็นสัญญาณรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จากนั้นจะใช้หลักการของวิธีการฟังก์ชันปริ้นต์ดิง โดยทำการเก็บฐานข้อมูลจากพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณอันประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรก การประวิงเวลาของวิถีแรก การสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ย และการประวิงเวลาเฉลี่ย ในระนาบสามมิติซึ่งประกอบด้วยระนาบแกน x (ระนาบความกว้าง) แกน y (ระนาบความยาว) และแกน z (ระนาบความสูง) ในบริเวณพื้นที่ที่ได้ทำการทดสอบก่อน จากนั้น ใช้หลักการของโครงข่ายประสาทในกระบวนการฝึกสอนให้เรียนรู้ถึงพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ สูดท้ายเป็นขั้นของการทดสอบได้ทำการวัดพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณซึ่งได้กล่าวไปข้างต้น ทั้งตำแหน่งที่โครงข่ายประสาทมีการเรียนรู้และไม่มีการเรียนรู้มาทำการทดสอบ เพื่อให้แน่ใจว่าโครงข่ายประสาทสามารถทำนายตำแหน่งที่มีการเรียนรู้ และทำนายตำแหน่งที่ตัวของโครงข่ายเองต้องทำการประมาณค่าว่าได้ถูกต้องแม่นยำมากน้อยเท่าไร โดยการนำตำแหน่งจริงที่ได้กำหนดไว้มาเปรียบเทียบกับตำแหน่ง ซึ่งโครงข่ายประสาททำการประมาณ ทำการประเมินผลของการหาตำแหน่งด้วยค่าความผิดพลาดระยะทางยูคลิเดียน

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

วิธีการพื้นฐานที่มักถูกนำมาใช้ในระยะเวลาการหาตำแหน่งได้แก่ วิธีการ RSS, AOA, TOA และ TDOA ซึ่งผลจากการนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ในการหาตำแหน่งภายในอาคารพบว่า ไม่มีความแม่นยำพอเนื่องจาก วิธีการดังกล่าวจะพิจารณาสัญญาณในวิถีตรงเท่านั้น ถ้านำมาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวิธีการดังกล่าวจึงทำให้เกิดความผิดพลาดมากเนื่องจากภายในอาคารมีหลายบริเวณที่มีสภาพของการบดบัง และมีการจางหายหลายวิถีสูง อีกทั้งการใช้วิธีการดังกล่าวยังต้องใช้ฐานการส่งสัญญาณอย่างน้อย 3 สถานีฐาน ซึ่งมีความสิ้นเปลืองงบประมาณ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการของฟังก์ชันปริ้นต์ดิง ที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้แม้ในสภาวะบดบังไม่สามารถมองเห็นได้ในระดับสายตา อีกทั้งยังใช้สถานีฐานเพียงสถานีเดียวต่อหนึ่งพื้นที่อีกด้วย [5]

ส่วนทางด้านสัญญาณที่ได้นำมาใช้คือ สัญญาณแถบกว้างยั้งซึ่งมีลักษณะเด่นสำหรับการหาตำแหน่ง คือสัญญาณที่ใช้มีลักษณะเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์น้อยมาก ทำให้มีความละเอียดทางเวลาสูง สามารถแยกหากำลังงานหรือการสูญเสียเชิงวิถี และเวลาของสัญญาณที่มาถึงได้ง่าย อีกทั้งสัญญาณแถบกว้างยั้งมีการใช้กำลังงานที่ส่งต่ำจึงไม่ไปรบกวนสัญญาณอื่น และมีความถี่ส่วนมากเป็นอิสระจากเทคโนโลยีอื่นๆ จึงมักไม่ถูกรบกวนจากเทคโนโลยีอื่นๆ เมื่อเทียบกับการใช้สัญญาณพื้นฐานเช่น WLAN ซึ่งเมื่อนำมาใช้กับระบบการหาตำแหน่งจะมีการรบกวนเนื่องจากคลื่นหลายวิถีและถูกรบกวนจากเทคโนโลยีอื่นๆ ทำให้คุณภาพของสัญญาณลดลง [7] - [14]

ในเรื่องของการใช้อัลกอริทึมการจับคู่ในวิธีการของฟังก์ชันปริ้นต์ดิงนั้น มักนิยมใช้วิธีการวิเคราะห์เพื่อนบ้านใกล้เคียง (Nearest neighbor) ซึ่งใช้การคำนวณจากพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณที่จัดว่าใกล้เคียงกับพารามิเตอร์ในฐานข้อมูลมากที่สุดเท่าใด ใช้เพียงการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ไม่ได้

เรียนรู้ลักษณะของระบบ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการของโครงข่ายประสาทซึ่งมีจุดเด่นคือสามารถเรียนรู้ระบบต่างๆ ได้ โดยการปรับค่าน้ำหนักประสาทในแต่ละเซลล์ประสาท จึงทำให้โครงข่ายประสาทมีความสามารถในการประมาณค่าของข้อมูล อีกทั้งยังมีโครงสร้างเป็นแบบขนาน แม้ว่าบางเซลล์ประสาทจะเสียหายไป เซลล์ประสาทที่เหลือก็ยังสามารถทำงานต่อไปได้ ด้วยลักษณะเด่นดังกล่าวจึงทำให้โครงข่ายประสาท มีความเหมาะสมในการทำนายตำแหน่งมากกว่าวิธีการวิเคราะห์เพื่อนบ้านใกล้เคียง

เมื่อนำลักษณะเด่นของแต่ละวิธีการมาใช้ร่วมกัน จึงนับว่าคุ้มค่าและสามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสม มากกว่าวิธีการพื้นฐานที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษาการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาท โดยมีขอบเขตการวิจัย ดังนี้

1.6.1 ออกแบบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาท โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector network analyzer: VNA) โดยใช้ช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

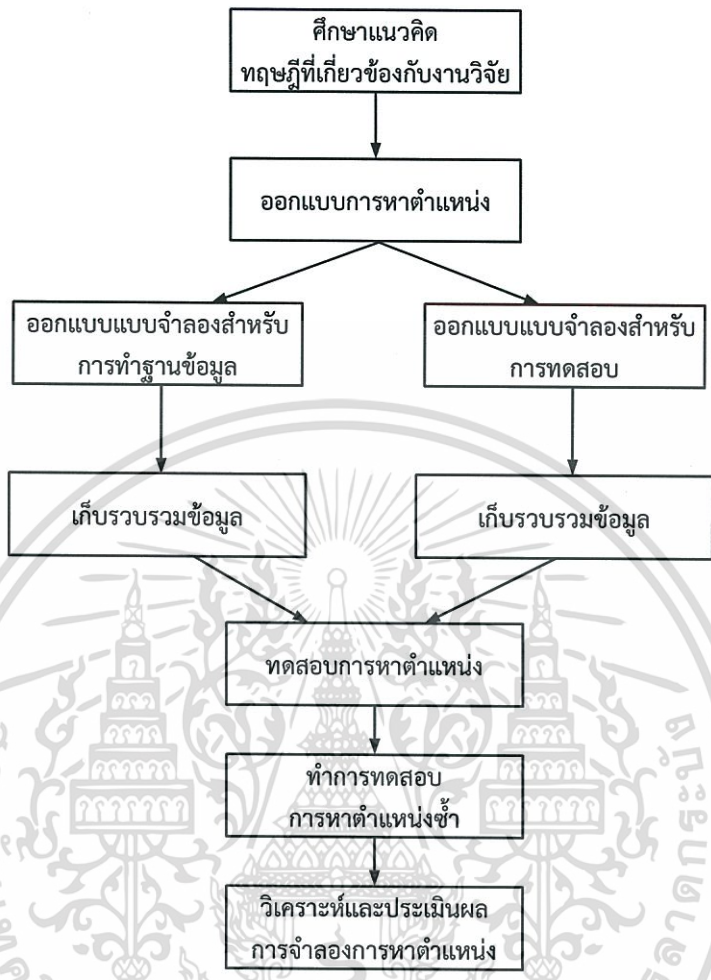
1.6.2 สร้างการจำลองการหาตำแหน่งในระนาบ 3 มิติ โดยใช้พารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ

1.6.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบการจำลองการหาตำแหน่งในระนาบ 3 มิติ

1.6.4 ประเมินผลความเที่ยงตรงในการหาตำแหน่งเทียบกับความต้องการของแอปพลิเคชันการหาตำแหน่งภายในอาคารที่ความแม่นยำที่ 1 เมตร [4] เป็น 75% จากการทดสอบทั้งหมด 6 ครั้ง

1.7 ขั้นตอนการศึกษา

สำหรับขั้นตอนการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในขั้นแรกทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาแนวคิด และทฤษฎีต่างๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัย หลังจากได้แนวคิดแล้ว ในขั้นต่อมาจึงได้ทำการออกแบบการจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบ 3 มิติ โดยทำการออกแบบแบบจำลองตามทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษา (วิธีการหาตำแหน่งแบบฟิงเกอร์ปริ้นท์ติ้ง) โดยแบ่งเป็น 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองสำหรับการทำฐานข้อมูล และแบบจำลองสำหรับการทดสอบ ในขั้นถัดมา ทำการเก็บข้อมูลลงแบบจำลองทั้งสอง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ ทดสอบการหาตำแหน่งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในขั้นต่อมาทำการทดสอบการหาตำแหน่งซ้ำ โดยการใส่ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบชุดใหม่ จากนั้น ทำการวิเคราะห์และประเมินผลที่ได้จากการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบ 3 มิติ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าว ได้ทำการแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนในการศึกษาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ
 บทที่ 1 กล่าวถึงความจำเป็นมาและความสำคัญของปัญหาซึ่งต้องวิจัย ความมุ่งหมายและ
 วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของการ
 วิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง และวิธีการใน
 การวิเคราะห์ตำแหน่ง ในเรื่องของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง จะกล่าวถึง นิยามของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง
 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง มาตรฐาน
 ของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ข้อดีของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง และการประยุกต์ใช้
 งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ทางด้านทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง จะกล่าวถึง วิธีการพิจารณา
 ความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งหรือวิธีการฟิงเกอร์ปริ้นท์ตั้ง และวิธีการฟิงเกอร์ปริ้นท์ตั้งร่วมกับ
 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง และในเรื่องของวิธีการในการวิเคราะห์ตำแหน่ง จะกล่าวถึง การวิเคราะห์แบบ
 เพื่อนบ้านใกล้เคียง และโครงข่ายประสาทเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง สัญญาณที่รับได้ พารามิเตอร์จากการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งคือ พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิธีของวิธีแรก พารามิเตอร์การประวิงเวลาของวิธีแรก พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิธีเฉลี่ย และ พารามิเตอร์การประวิงเวลาเฉลี่ย และท้ายสุดคือ การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่งในระนาบสามมิติ

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและจัดทำกรวิจัย ซึ่งได้แก่ การดำเนินการออกแบบการทดลอง แบ่งเป็น การออกแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ การออกแบบแบบจำลองการหาตำแหน่ง และการออกแบบโครงข่ายฟังก์ชันฐานรศมี เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และการออกแบบการจับเก็บผลการทดสอบ

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองวิจัย ได้แก่ ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารในแต่ละครั้ง และผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารในแต่ละตำแหน่ง รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลของการทดลองอีกด้วย

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะจากการศึกษาการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาท



บทที่ 2

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง และวิธีการวิเคราะห์ตำแหน่ง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ทั้งในเรื่องที่มาของทฤษฎีต่างๆ ซึ่งได้นำมาใช้ในงานวิจัยซึ่งได้แนวคิด และแรงจูงใจมาจากการทบทวนวรรณกรรมซึ่งเป็นหัวข้อต้นของบท จากนั้นจะกล่าวถึง ของความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง นิยามของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง มาตรฐานของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง รวมไปถึงข้อดีของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง จากนั้นจะกล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง และสุดท้ายจะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ตำแหน่ง ซึ่งทุกส่วนนี้จะถูกนำมาใช้ในการจำลองการหาตำแหน่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.2 ทบทวนวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อการทบทวนวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ จะนำเสนอเกี่ยวกับวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพียงส่วนหนึ่ง ซึ่งทำให้ผู้วิจัยได้แนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ และสรุปผลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีเนื้อความดังนี้

2.2.1 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2006 Xu Yong และคณะ ได้นำเสนอบทความเรื่อง “TDOA Algorithm for UWB Localization in Mobile Environments” IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Page 1 – 5, 2006 ได้ทำการใช้วิธีการ TDOA จำลองการหาตำแหน่ง 15 โหนดในพื้นที่ 20×50 ตารางเมตรโดยใช้จำนวนโหนด 3 – 5 โหนด พบว่าที่ระยะ 1 เมตร 5 โหนดให้ผลดีที่สุด แต่เกิดค่าผิดพลาดประมาณ 4 – 5 เมตร

ในปีเดียวกัน Chahé Nerguizian และคณะ ได้นำเสนอบทความเรื่อง “Geolocation in Mines With an Impulse Response Fingerprinting Technique and Neural Networks” IEEE Transactions On Wireless Communication, Vol. 5, No. 3, March 2006 ได้นำเสนอระบบการหาตำแหน่ง Wide Band Neural Network-Locate (WBNN – Locate) ซึ่งระบบดังกล่าวเป็นการใช้ WLAN ร่วมกับโครงข่ายประสาท ในบทความนี้ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการ range measurement technique และ fingerprinting technique ร่วมกับอัลกอริทึมอื่นๆ พบว่า ระบบดังกล่าวซึ่งใช้ WLAN ร่วมกับโครงข่ายประสาทให้ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด ที่ 2 เมตร ประมาณ 80%

ในปี ค.ศ. 2009 M.Stella และคณะ ได้นำเสนอบทความเรื่อง “Location Determination in indoor Environment based on RSS Fingerprinting and ANN” Telecommunications. 9th IEEE International Conference on 13-15 June, Zagreb, page 301 – 306, 2007 ได้นำเสนอ การ

ใช้ค่าความแรงของสัญญาณร่วมกับวิธีการฟิงเกอร์ปริ้นท์และใช้ WLAN ร่วมกับโครงข่ายประสาทในพื้นที่ขนาด 28×15 ตารางเมตร ใช้ Access Point (AP) 3 ตัว มีค่าผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ 1.79 เมตร

ในปี ค.ศ. 2010 Mu Zhou และคณะ ได้นำเสนอบทความเรื่อง “Multilayer ANN indoor location system with area division in WLAN environment” Systems Engineering and Electronics, Journal of Volume 21, 2010, Page 914 - 926 ได้นำ WLAN ร่วมกับโครงข่ายประสาท โดยทำการแยกพิกัดให้แต่ละโครงข่ายประสาทเรียนรู้ โดยการแบ่งพื้นที่ในการเรียนรู้ ในพื้นที่ขนาด 8×8 ตารางเมตร มีค่าผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ 1.91 เมตร

ในปี ค.ศ. 2010 Jirapat Sangthong และคณะ [2010] ได้นำเสนอบทความเรื่อง “Study on Indoor Localization Using UWB Fingerprinting” The 3rd TISD2010 Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand, 4-6 March 2010. ได้ทำการศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคาร โดยแบบแถบกว้างยิ่ง โดยใช้ กำลังสองน้อยที่สุด พบว่าที่ระยะ 1 เมตรมีค่าผิดพลาดระยะทางอยู่ที่ 68%

ในปี ค.ศ. 2011 Moisés Lisboa Rodrigues และคณะ [2011] ได้นำเสนอบทความเรื่อง “Fingerprinting-Based Radio Localization in indoor Environments Using Multiple Wireless Technologies” 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 33x22 ตารางเมตร ใช้อัลกอริทึมการจับคู่เป็น K-NN หรือวิธีการวิเคราะห์เพื่อนบ้านใกล้เคียงร่วมกับเทคโนโลยี WLAN, Zigbee และ Bluetooth พบว่าผลของแต่ละเทคโนโลยี WLAN ให้ผลที่ดีที่สุดแต่เมื่อใช้พร้อมกันทั้งสามเทคโนโลยีพบว่ามีความผิดพลาดเฉลี่ยของระยะทางเพิ่มขึ้น

2.2.2 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

1. บทความส่วนใหญ่กล่าวถึงวิธีการพื้นฐานในการหาตำแหน่ง เช่น วิธีการหาตำแหน่ง RSS TOA AOA และ TDOA ไม่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้การหาตำแหน่งภายในอาคารได้ เนื่องจากสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร กรณีที่สภาวะแวดล้อมเป็น NLOS จึงเป็นผลให้วิถีของคลื่นซึ่งใช้ในการคำนวณถูกรบกวน ดังนั้น วิธีการดังกล่าวจึงเกิดค่าความผิดพลาดระยะทางสูง

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอ วิธีการหาตำแหน่งแบบฟิงเกอร์ปริ้นท์ตั้งขึ้น

2. จากงานวิจัยส่วนใหญ่จะนำสัญญาณสัญญาณแบบแถบมาใช้ในการหาตำแหน่ง ซึ่งผลที่ได้มีความแม่นยำที่ลดลง เนื่องจากการซ้อนทับกันของสัญญาณอันเนื่องมาจากคลื่นหลายวิถี ดังนั้น จึงมีบางงานวิจัยซึ่งได้นำเสนอ ระบบการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างขึ้น และผลที่ได้พบว่าให้ความแม่นยำสูงกว่าแบบแถบแคบ เนื่องจากสัญญาณแบบแถบกว้างจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างเป็นผลให้สัญญาณในโดเมนของเวลาแคบ จึงทำให้มีความแม่นยำสูงขึ้น

3. การใช้สัญญาณ เช่น WLAN, Zigbee และ Bluetooth พร้อมกันจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบการหาตำแหน่งลดลง เนื่องจากสัญญาณทั้งสามเป็นสัญญาณที่อยู่ในช่วงความถี่เดียวกัน จึงเกิดการแทรกสอดกันและกัน จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบการหาตำแหน่งลดลง ซึ่งในปัจจุบันมีความเป็นไปได้มากที่จะพบสัญญาณจากเทคโนโลยีเหล่านี้

จากข้อ 2 และ 3 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง มาใช้ในการจำลองการหาตำแหน่ง

4. อัลกอริทึมวิเคราะห์เพื่อนบ้านใกล้เคียง เป็นอัลกอริทึมซึ่งนิยมใช้กันมากสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร เนื่องจากสามารถประมวลผลตำแหน่งได้อย่างรวดเร็วและมีความซับซ้อนไม่มาก แต่อัลกอริทึมดังกล่าวใช้เพียงแค่การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้ตำแหน่งที่ใกล้เคียงที่สุดเท่านั้น ไม่ได้เรียนรู้ลักษณะของระบบ

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำโครงข่ายประสาทมาใช้ เนื่องด้วยโครงข่ายประสาทมีความสามารถในการเรียนรู้ระบบต่างๆ ซึ่งไม่เป็นเชิงเส้นได้ อีกทั้งยังมีโครงสร้างที่เป็นแบบขนาน หากว่ามีเซลล์ประสาทใดเกิดความเสียหาย เซลล์ประสาทที่เหลือก็ยังสามารถที่จะทำงานต่อไปได้

5. การหาตำแหน่งในงานวิจัยส่วนมากจะทำการวิจัยในระนาบ 2 มิติ แต่ในแอปพลิเคชันส่วนมากไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงแค่ 2 ระนาบ จึงต้องคำนึงถึงระนาบที่ 3 อีกด้วย

ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการจำลองการหาตำแหน่งในระนาบสามมิติขึ้น

สำหรับการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งใช้วิธีหาตำแหน่งแบบฟังก์ชันปริ้นต์ตั้งร่วมกับโครงข่ายประสาท พบว่า ได้มีการนำเสนอเพียงแค่นี้ในระนาบ 2 มิติ ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้ จึงได้นำเสนอการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งมาใช้ร่วมกับวิธีการหาตำแหน่งแบบฟังก์ชันปริ้นต์ตั้งโครงข่ายประสาทในระนาบ 3 มิติ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทั้งสามระนาบ

2.3 เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง [7] - [14]

ความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งกล่าวได้ว่า มีพื้นฐานมาจากการพัฒนาของระบบการสื่อสารแบบไร้สาย ในปี ค.ศ. 1895 มาร์โกนี (Guglielmo Marconi) ได้สร้างเครื่องส่งซึ่งใช้ในการทดลองการส่งสัญญาณแบบไร้สายขึ้น จากนั้นในปี ค.ศ. 1901 มาร์โกนีได้ทำการทดลองการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณสปาร์คแก๊ป (Spark gap generator) ซึ่งสร้างขึ้นโดยริกกี (Righi) โดยใช้หลักการทำให้เกิดแรงดันสูงระหว่างช่องว่างของตัวนำสัญญาณหรือสปาร์คแก๊ป (Spark gap) เป็นผลให้อากาศบริเวณนั้นเกิดการแตกตัว กระแสไฟฟ้าจึงสามารถเดินทางผ่านอากาศได้ ต่อมาได้มีการนำวิธีดังกล่าว ทำให้เกิดสัญญาณคลื่นวิทยุรูปพัลส์ เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลเป็นตัวอักษร

และในเวลาต่อมา ปี ค.ศ. 1960 เครื่องส่งสัญญาณซึ่งใช้เทคนิคการส่งสัญญาณพัลส์ก็ถูกพัฒนาขึ้น และได้ถูกนำมาใช้ในงานทางด้านทหาร ซึ่งการใช้งานโดยทั่วไปจะถูกใช้งานสำหรับอุปกรณ์การสื่อสารด้วยเรดาร์ ซึ่งทำให้สามารถแสดงภาพของวัตถุที่ถูกบดบัง ด้วยการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีลักษณะเป็นพัลส์ ทะลุผ่านอุปสรรคกีดขวาง เช่น เรดาร์ทะลุพื้นดิน หรือจีพีอาร์ (Ground Penetration Radar: GPR) จนกระทั่งเทคโนโลยีทางด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ก้าวหน้า ทำให้เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการสื่อสารเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะในระบบสื่อสารไร้สาย ด้วยความสามารถในการส่งข้อมูลได้เป็นปริมาณมาก เพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลแบบสื่อประสม (Multimedia communications) ซึ่งต้องการอัตราการส่งข้อมูลสูง มีการใช้พลังงานต่ำและมีราคาถูกรวมทั้งการนำไปใช้ในการหาตำแหน่งวัตถุที่มีความแม่นยำสูง และทนทานต่อสัญญาณรบกวน

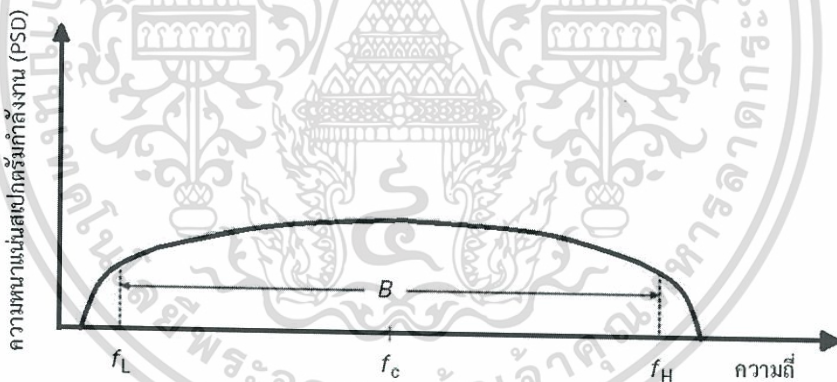
ค.ศ. 2000 ทางคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Communications Commission: FCC) ได้เชิญชวนในให้องค์กรต่างๆ ได้ร่วมแสดงความคิดเห็นและเริ่มตีพิมพ์เอกสารเกี่ยวกับข้อกำหนดต่างๆ ของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเป็นครั้งแรก

จากนั้น ในปี ค.ศ. 2002 คณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกาก็ได้ออกข้อกำหนดเกี่ยวกับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งขึ้น

ในหัวข้อเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนี้ ได้ถูกแบ่งเป็นหัวข้อย่อย ได้แก่ นิยามของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง มาตรฐานของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ข้อดีของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 นิยามของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

สัญญาณแถบกว้างยิ่งถูกกำหนดไว้เป็นนิยาม โดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งสหรัฐอเมริกา [3] ได้ให้คำนิยามของสัญญาณแถบกว้างยิ่งว่า จะต้องมีความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัม (Power Spectral Density: PSD) หลักอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และจะต้องมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz ดังรูปที่ 2.1 โดยที่แบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนและแบนด์วิดท์ของสัญญาณแถบกว้างยิ่งนิยามดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 สัญญาณแถบกว้างยิ่งซึ่งมีแถบมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 หรือมีแบนด์วิดท์มากกว่าหรือเท่ากับ 500 MHz [4]

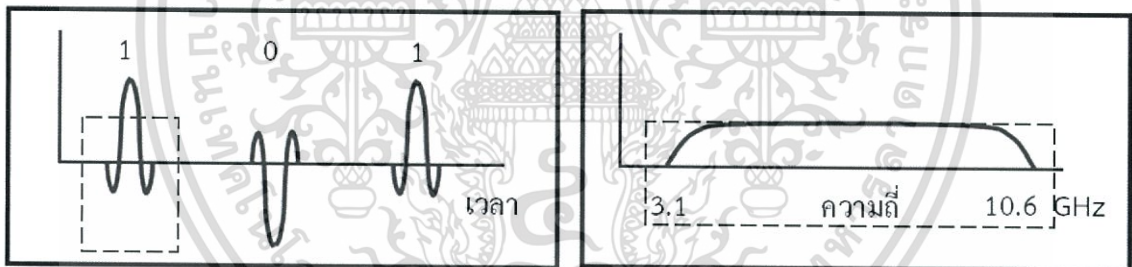
$$B_f = \frac{B}{f_c} = \frac{2(f_H - f_L)}{f_H + f_L} \quad (2.1)$$

$$B = f_H - f_L \quad (2.2)$$

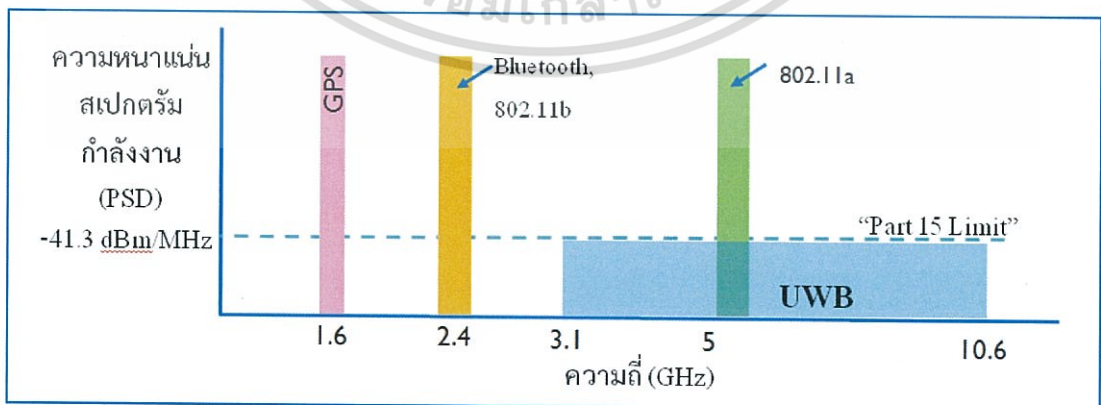
เมื่อ B_f คือแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วน B คือแบนด์วิดท์ f_L และ f_H คือความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุด และ f_c คือความถี่ศูนย์กลาง ตามลำดับ

2.3.2 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง เป็นการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้าง (Wide band communication) โดยใช้สัญญาณที่มีรูปคลื่นสัญญาณปรากฏเพียงชั่วขณะหรือเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณในทางเวลาที่แคบมาก [3] โดยอยู่ในระดับนาโนวินาที (Nano second: ns) หรือที่ระดับพิโควินาที (Pico second: ps) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับสัญญาณในอุดมคติที่เรียกว่าสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse signal) จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่งจะมีสัญญาณในทางเวลาที่แคบมาก (เส้นประ) จึงมีความหนาแน่นสเปกตรัมในเทอมของความถี่กว้างมาก อีกทั้งการส่งและรับสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งนั้น จะไม่ใช่คลื่นพาห์ (Carrierless) ในการผสมสัญญาณเหมือนในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ แต่เป็นการส่งสัญญาณที่มีรูปคลื่นของพัลส์ที่มีรูปคลื่นซึ่งไม่ต่อเนื่องในทางเวลาด้วยอัตราการส่งพัลส์ ในระดับจำนวนหลายร้อยล้านพัลส์ต่อหนึ่งวินาทีในการส่งและรับสัญญาณ ซึ่งทำให้พลังงานของสัญญาณถูกกระจายอยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมาก ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นที่มาของชื่อแถบกว้างยิ่ง นอกจากรูปที่ 2.3 จะแสดงให้เห็นถึงของสัญญาณถูกกระจายอยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมากแล้ว เมื่อลองเทียบกับเทคโนโลยีไร้สายอื่นๆ แล้วจะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งจะมีระดับกำลังงานที่ต่ำ จึงไม่ไปรบกวนสัญญาณของเทคโนโลยีอื่น อีกทั้งยังตรวจจับได้ยากเมื่อถูกนำไปใช้ทางการทหาร เนื่องจากระบบอื่น จะมองว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่งนั้นเป็นสัญญาณรบกวน แต่ทำการกรองออกจากระบบ ซึ่งข้อดีของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งนี้จะถูกกล่าวอีกครั้งในหัวข้อที่ 2.3.5



รูปที่ 2.2 สัญญาณแถบกว้างยิ่งซึ่งมีแถบความถี่กว้างมากในทางความถี่และมีพัลส์แคบในทางเวลา [15]



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการใช้งานแถบความถี่ของการสื่อสารแถบกว้างยิ่งกับการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบอื่นๆ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

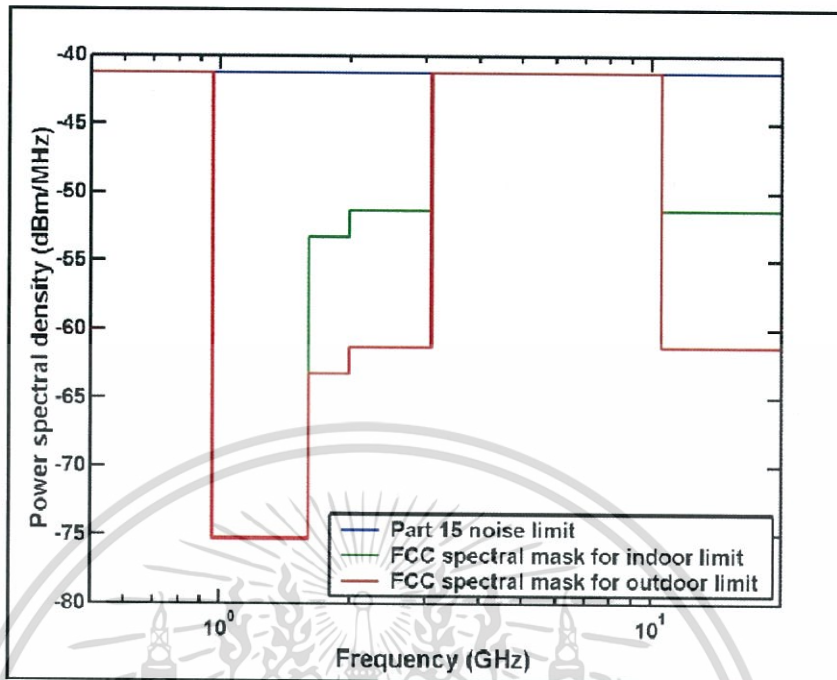
สัญญาณแบบแถบกว้างยังไม่ได้ถูกจำกัดเฉพาะกับสัญญาณในรูปแบบอิมพัลส์ที่ครอบคลุมความถี่ในช่วงเวลาที่กว้างมากเท่านั้น เทคโนโลยีแถบกว้างยังยังสามารถแบ่งออกเป็นแบบแถบความถี่เดี่ยว (Single band approach) และแบบหลายแถบความถี่ (Multiband approach) รวมทั้งใช้เรียกเทคนิคการใช้คลื่นพาห่อย่อยที่ไม่รบกวนกันจำนวนมากในการผสมสัญญาณ หรือการมอดูเลชันแบบที่เรียกว่ามัลติแบนด์ โอเอฟดีเอ็ม (MB-OFDM: Multiband OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing)) ซึ่งเป็นอีกเทคนิคที่ครอบคลุมการใช้ความถี่แถบกว้างมาก โดยประยุกต์ใช้ในการส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงเช่นเดียวกัน สัญญาณแถบกว้างยังแบบอิมพัลส์และมัลติแบนด์โอเอฟดีเอ็มได้รับการพิจารณาเพื่อนำไปใช้สำหรับมาตรฐานเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลของกลุ่มความร่วมมือไวมีเดีย (WiMedia alliance) โดยใช้เป็นเทคโนโลยีพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์เชื่อมต่อในรูปแบบยูเอสบีความเร็วสูงไร้สาย (High speed wireless universal serial bus (USB) interface) [17]

2.3.3 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ในระบบแถบกว้างยิ่งได้มีข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง คือการจัดสรรความถี่ในการใช้งาน โดยในประเทศสหรัฐอเมริกาจะถูกกำหนดโดย FCC เช่นเดียวกันกับในยุโรปก็ได้มีการหาข้อตกลงการจัดสรรคลื่นความถี่ และการแทรกสอดของความถี่วิทยุแถบกว้างยิ่ง โดยสถาบันกำหนดมาตรฐานทางโทรคมนาคมแห่งสหภาพยุโรป (European Telecommunications Standard Institute: ETSI) หรือ สหพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) สำหรับในประเทศญี่ปุ่นได้มีการกำหนดจัดสรรความถี่ในการใช้งาน โดยกระทรวงพาณิชย์ และการสื่อสารภายในประเทศ (Ministry of Internal Affairs and Communications: MIC) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ข้อกำหนดตามแบบของ FCC โดยมีประวัติความเป็นมาและข้อกำหนด ดังนี้

FCC ได้ออกประกาศในปี ค.ศ.1998 เกี่ยวกับการตรวจสอบหรือ (Notice of Inquiry: NOI) โดยถึงแม้ว่าจะได้คาดการณ์ถึงระดับกำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณที่มีระดับต่ำมาก ๆ แล้วก็ตาม ยังมีกลุ่มผู้ที่สนับสนุนในระบบเดิม ที่มีใช้งานกันอยู่ได้ทำการต่อต้านการนำระบบแถบกว้างยิ่งมาใช้งานสำหรับการสื่อสารของพลเรือน ซึ่งเรียกร้องโดยมากจะเกี่ยวข้องกับการคาดการณ์ถึงการเพิ่มขึ้นของระดับการสอดแทรกในแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น แถบความถี่ในการกระจายสัญญาณโทรทัศน์แถบความถี่ที่สำรองไว้ สำหรับคลื่นวิทยุทางดาราศาสตร์ และระบบ GPS โดยที่องค์การบริหารการบินแห่งสหรัฐอเมริกา หรือ Federal aviation administration (FAA) ได้แสดงความเป็นห่วงต่อการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบความปลอดภัยในกิจการการบินและทิศทางในการค้นคว้าเกี่ยวกับเครื่องส่งในระบบแถบกว้างยิ่งด้วยเช่นกัน

FCC ได้ออกกฎสำหรับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งเมื่อ 14 กุมภาพันธ์ ค.ศ.2002 ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของการแพร่กระจายของความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานฉบับที่หนึ่ง สำหรับเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง และยังอนุญาตให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในลักษณะทางการค้าอีกด้วย โดยกำหนดสเปกตรัมมาร์ค (Spectral mask) สำหรับการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมมาร์คสำหรับการจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นแถบกำลังงาน สำหรับการสื่อสารภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC [4]

ตารางที่ 2.1 การจำกัดการแพร่กระจายความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานสำหรับการสื่อสารแบบแถบกว้างภายในและภายนอกอาคารที่กำหนดโดย FCC [17]

| ความถี่ | ภายในอาคาร | ภายนอกอาคาร |
|---------------------|------------|-------------|
| | EIRP | EIRP |
| 960 MHz – 1.61 GHz | -75.3 dBm | -75.3 dBm |
| 1.61 GHz – 1.99 GHz | -53.3 dBm | -63.3 dBm |
| 1.99 GHz – 3.1 GHz | -51.3 dBm | -61.3 dBm |
| 3.1 GHz – 10.6 GHz | -41.3 dBm | -41.3 dBm |
| สูงกว่า 10.6 GHz | -51.3 dBm | -51.3 dBm |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 มาตรฐานของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง

ปัจจุบันมาตรฐานของระบบแถบกว้างยิ่งที่นิยมใช้มีอยู่ 3 มาตรฐาน คือ IEEE 802.15.3a ใช้สำหรับโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network: WPAN) ระยะทางใกล้ อัตราการส่งข้อมูลสูง IEEE 802.15.4a ใช้สำหรับ WPAN ระยะทางไกลอัตราส่งข้อมูลต่ำ และ IEEE 802.15.6 ใช้สำหรับระบบโครงข่ายพื้นที่ร่างกายไร้สาย (Wireless Body Area Network: WBAN)

มาตรฐาน IEEE 802.15.3a [4] ได้พยายามปรับปรุงอัตราการส่งของมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ให้สูงขึ้นโดยการนำเอาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมาใช้ ซึ่งมีจุดประสงค์จะนำมาใช้กับ WPAN โดยมีระยะทางการใช้งานถึง 10 เมตร ที่อัตราการส่งข้อมูล 110 Mbps และที่ระยะทางใกล้คือประมาณ 2 เมตร สามารถมีอัตราส่งข้อมูลได้สูงถึง 480 Mbps แต่ได้เกิดปัญหาขึ้นจากการไม่สามารถตกลงกันได้ว่าจะเลือกใช้เทคโนโลยีไหนระหว่างการใช้การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉากหลายแถบ (Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing: MB-OFDM) กับแถบกว้างยิ่งลำดับตรง (Direct Sequence Ultra Wideband: DS-UWB)

มาตรฐาน IEEE 802.15.4a [4] ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งมาประยุกต์ใช้สำหรับ WPAN โดยปรับปรุงให้มีระยะทางการใช้งานที่ไกลขึ้นได้ถึงประมาณ 100 เมตร โดยลดอัตราส่งข้อมูลลง มีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่นาน รวมทั้งมีราคาถูก สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบโครงข่ายการตรวจจ็ับไร้สาย และระบบการหาตำแหน่งที่มีความเที่ยงตรงสูง การส่งสัญญาณมีพื้นฐานอยู่บนเทคนิคการส่งพัลส์ที่มีความกว้างพัลส์แคบมากจึงสามารถประมาณเป็นอิมพัลส์ได้

มาตรฐาน IEEE 802.15.6 [18] เป็นมาตรฐานที่ตั้งขึ้นมาใหม่สำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับ WBAN โดยมีการใช้งานสำคัญคือตรวจสอบสุขภาพร่างกายของผู้ป่วย วินิจฉัยโรค รวมทั้งควบคุมเชื้อโรค WBAN ทำงานในบริเวณใกล้กับ ติดอยู่กับ หรือภายในร่างกายของมนุษย์ โดยมีการใช้งานส่งข้อมูลระหว่างโหนดภายในร่างกาย และส่งข้อมูลจากร่างกายไปยังอุปกรณ์ การประยุกต์ใช้ทั้งทางด้านการแพทย์หรือด้านอื่น

2.3.5 ข้อดีของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง [16]

ข้อดีหรือจุดเด่นที่น่าสนใจของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งโดยเราสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารไร้สายได้ ได้แก่

2.3.5.1 เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อยและต้นทุนต่ำ

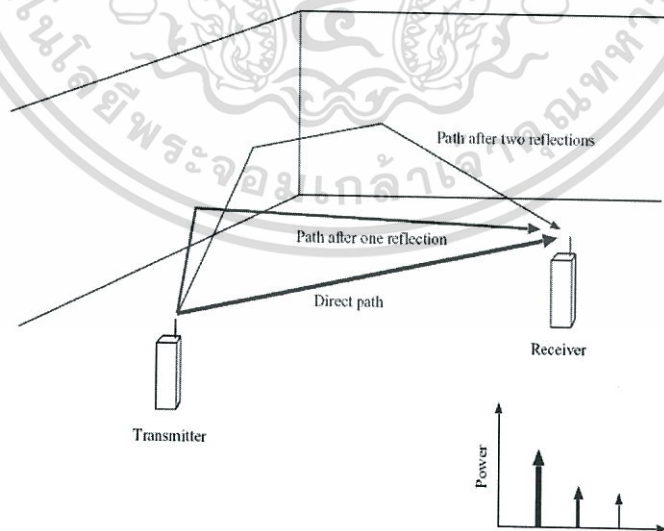
การเป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อยและต้นทุนต่ำของระบบสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่งเนื่องมาจากการส่งสัญญาณมีลักษณะเป็นเบสแบนด์ ซึ่งไม่เหมือนกับระบบการส่งสัญญาณความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF) แบบอื่นๆ โดยที่เครื่องส่งจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ ในโดเมนทางเวลาซึ่งสามารถที่จะแพร่กระจายคลื่นออกไปโดยปราศจากการเพิ่ม RF หรือรวมคลื่นพาห์เข้าไป ซึ่งในส่วนของกรรวมสัญญาณวิทยุนั้นจะเป็นการนำเอาสัญญาณเบสแบนด์รวมเข้าไปกับคลื่นพาห์ เพื่อย้ายสัญญาณไปยังแถบความถี่ที่มีคุณลักษณะในการแพร่กระจายคลื่นตามต้องการ

2.3.5.2 มีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน

การมีระดับของสัญญาณใกล้เคียงกับระดับสัญญาณรบกวน ทำให้การตรวจจับสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งทำได้ยาก นอกจากนั้น การส่งสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งนั้นไม่ก่อให้เกิดผลการแทรกสอดของสัญญาณที่มีต่อระบบคลื่น RF อื่นๆ เนื่องจากสัญญาณของระบบแถบกว้างยิ่งนั้น มีความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมของสัญญาณที่แผ่กระจายออกมาในระดับต่ำ ประมาณระดับของสัญญาณรบกวน จึงทำให้ระบบอื่นๆ มองว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เป็นสัญญาณรบกวนจึงถูกกำจัดออกจากการพิจารณาของระบบ

2.3.5.3 มีความต้านทานต่อสัญญาณหลายวิถี

การเกิดสัญญาณหลายวิถีเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการสื่อสารไร้สาย ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อน เลี้ยวเบน การกระจายตัว และการถูกดูดกลืนของสัญญาณอันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อม เช่นภายในอาคาร สัญญาณจะเกิดการสะท้อน เลี้ยวเบน การกระจายตัว และการถูกดูดกลืนจากวัสดุต่างๆ เช่น อาคาร โต๊ะ เพดาน หรืออุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น หรือจากพื้น หรือผนังต่างๆ ดังรูปที่ 2.5 จากรูปจะเห็นได้ว่าเกิดสัญญาณหลายวิถีขึ้น ผลของช่องสัญญาณหลายวิถีสำหรับสัญญาณแถบแคบจะเกิดขึ้นค่อนข้างมากกว่าสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เนื่องจากการรวมกันแบบต่างเฟสของสัญญาณหลายวิถี ทำให้ระดับของสัญญาณลดลงมาก หรือการรวมกันแบบเฟสตรงกันของสัญญาณหลายวิถี ทำให้ระดับของสัญญาณเพิ่มขึ้นมาก แต่ในเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งการส่งพัลส์ที่มีช่วงเวลาแคบมากๆ ทำให้เทคโนโลยีนี้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณหลายวิธีน้อยกว่า เนื่องจากช่วงเวลาการส่งผ่านของพัลส์ของแถบกว้างยิ่งสั้นระดับนาโนวินาที จึงทำให้พัลส์ที่เกิดจากการสะท้อน เลี้ยวเบน การกระจายมาถึงเครื่องรับที่หลังพัลส์ที่เป็นวิถีตรง ดังนั้น สัญญาณแถบกว้างยิ่งจึงมีความทนทานต่อสัญญาณหลายวิถี



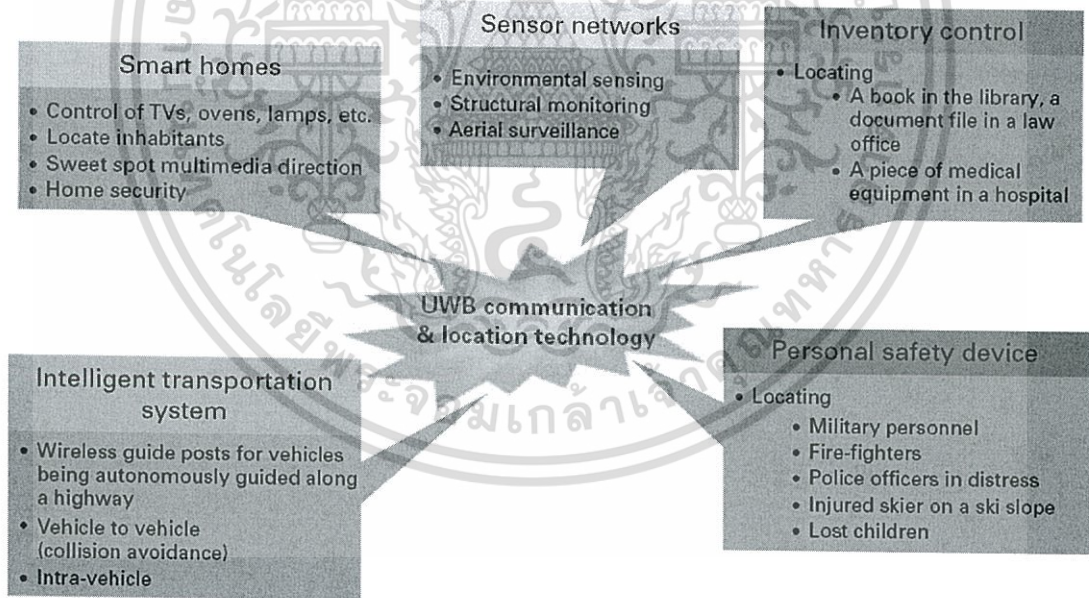
รูปที่ 2.5 สัญญาณหลายวิถีซึ่งเกิดจากการสะท้อนของสัญญาณแถบกว้างยิ่งภายในห้องจากเครื่องส่งถึงเครื่องรับ

2.3.5.4 มีความละเอียดสูงในโดเมนเวลาสำหรับการกำหนดตำแหน่ง และการประยุกต์ใช้ในระบบติดตาม (tracking)

สัญญาณแถบกว้างยังมีพัลส์ที่มีลักษณะทางโดเมนเวลาที่แคบมากๆ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณน้อยมากๆ นั้นหมายถึงระบบคลื่นวิทยุแบบแถบกว้างยิ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถควบคุมจังหวะ และคำนวณเวลาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่าระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global positioning system: GPS) และระบบคลื่นวิทยุแบบอื่นๆ อีกทั้งด้วยคุณสมบัติในการทะลุผ่านวัสดุได้ดี จึงทำให้สัญญาณแบบแถบกว้างยิ่งที่มีการมอดูเลตทางเวลาถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ระยะสั้น เช่น ในการช่วยเหลือชีวิต และปฏิบัติการป้องกันอาชญากรรมเช่นเดียวกับการใช้ในงานสำรวจ และในอุตสาหกรรมการทำเหมือง เป็นต้น

2.3.6 การประยุกต์ใช้งานของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง

จากข้อดีของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่งที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ทำให้เทคโนโลยีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น การประยุกต์ใช้งานเป็นตัวอุปกรณ์เพิ่มความปลอดภัยให้กับบุคคล ใช้ในการควบคุมรายการสิ่งของ ใช้ในระบบการขนส่งแบบชาญฉลาด บ้านอัจฉริยะ และเป็นเซนเซอร์ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างที่ได้กล่าวมาทั้งหมดแสดงให้เห็นเป็นแต่ละการประยุกต์ใช้ ดังรูปที่ 2.6



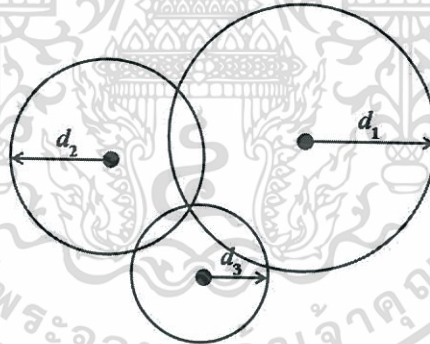
รูปที่ 2.6 การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง [4]

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง

ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง มีหลายเทคนิค เช่น การพิจารณาที่ความแรงของสัญญาณที่มาถึง (Received signal strength: RSS) , การพิจารณามุมของสัญญาณที่มาถึง (Angle of arrival: AOA), การพิจารณาเวลาของสัญญาณที่มาถึง (Time of arrival: TOA), การพิจารณาความต่างกันของเวลาที่สัญญาณที่มาถึง (Time difference of arrival: TDOA) และ การพิจารณาความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งหรือวิธีการฟิงเกอร์ปรี้นท์ตั้ง (Position pattern or Fingerprinting) [4] เป็นต้น สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำวิธีการฟิงเกอร์ปรี้นท์ตั้งมาใช้ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.4.1 การพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณ [19]

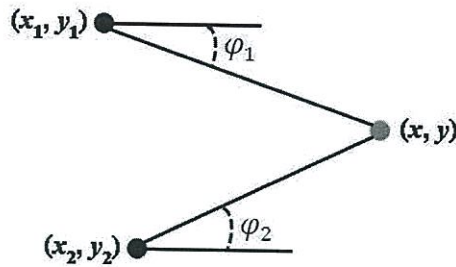
เป็นการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณมาใช้ในการพิจารณาค่าตำแหน่ง โดยขั้นแรกจะทำการหาระยะทางระหว่างเป้าหมายกับสถานีฐานแต่ละสถานีก่อน จากนั้นจึงใช้วิธีการ Trilateration ซึ่งเป็นวิธีการพื้นฐานในการหาตำแหน่ง โดยอาศัยหลักการตัดกันของวงกลมซึ่งเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะทางที่ภาครับอยู่ห่างจากสถานีฐาน วิธีการนี้จึงต้องใช้วงกลมอย่างน้อย 3 วงมาตัดกัน ดังรูปที่ 2.7 เพื่อให้ได้ตำแหน่งของเป้าหมาย อย่างไรก็ตามการหาตำแหน่งโดยวัดค่าความแรงของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์การจางหายหลายวิถี (Multipath fading) และการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากสิ่งกีดขวาง (Shadowing) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าความแรงของสัญญาณทำให้การหาตำแหน่งโดยวิธีนี้เกิดความคลาดเคลื่อนได้



รูปที่ 2.7 การหาตำแหน่งโดยวิธี Trilateration [19]

2.4.2 การพิจารณาทิศทางการมาถึงของสัญญาณ [19]

เป็นวิธีการหาตำแหน่งโดยดูจากทิศทางของสัญญาณ โดยการคำนวณความแตกต่างของเฟสของสัญญาณที่ไปถึงสายอากาศแต่ละตัว การหาตำแหน่งด้วยวิธีนี้จะต้องมีชุดของสายอากาศที่ทำงานเหมือนกันทุกประการจำนวนหนึ่งซึ่งเรียกว่า Phase array antenna อย่างน้อย 2 ตัวดังรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าการหาตำแหน่งด้วยวิธีการพิจารณาทิศทางการมาถึงของสัญญาณ ทำได้ยาก และมีค่าใช้จ่ายสูงอีกทั้งยังต้องเจอปัญหาความผิดพลาดจากปรากฏการณ์การกระเจิง (Scattering) ของคลื่นวิทยุอีกด้วยวิธีนี้จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมในการหาตำแหน่งมากนัก



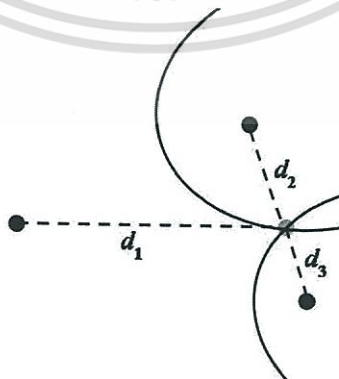
รูปที่ 2.8 การหาตำแหน่งโดยวิธีการพิจารณาทิศทางมาของสัญญาณ [19]

2.4.3 การพิจารณาเวลาการมาถึงของสัญญาณ [19]

เป็นการพิจารณานำค่าเวลาในการมาถึงของสัญญาณมาใช้ในการพิจารณาค่าตำแหน่ง โดยขั้นแรกจะทำการหาระยะทางระหว่างเป้าหมายกับสถานีฐานแต่ละสถานีก่อน จากนั้นจึงใช้วิธีการ Trilateration ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.4.1 หาตำแหน่งของเป้าหมาย วิธีการนี้ เมื่อนำมาใช้ภายในอาคารที่มีระยะทางที่สั้น เวลาที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณจะน้อยมากทำให้ยากในการพิจารณาหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคนี้

2.4.4 การพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ [19]

วิธีการหาตำแหน่งด้วยวิธีการพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ มีลักษณะคล้ายกับวิธีการพิจารณาเวลาการมาถึงของสัญญาณ วิธีการพิจารณาเวลาการมาถึงของสัญญาณจะพิจารณาเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทางของแต่ละสถานีฐาน แต่วิธีการพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณจะวัดความต่างของเวลาในแต่ละคู่สถานีฐานแล้วนำมาเขียนเป็นกราฟของ Hyperbolic ซึ่งบอกถึงระยะห่างระหว่างคู่สถานีฐาน ดังนั้นเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการจึงต้องใช้เส้นกราฟอย่างน้อย 2 เส้นมาตัดกัน ซึ่งเกิดจากสถานีฐานอย่างน้อย 3 สถานีดังแสดงในรูปที่ 2.9 สิ่งที่สำคัญของวิธีนี้คือแต่ละสถานีฐานต้องมีการซิงโครไนซ์กัน แต่เช่นเดียวกับวิธีการพิจารณาเวลาการมาถึงของสัญญาณ คือเมื่อนำมาใช้ภายในอาคารที่มีระยะทางที่สั้น เวลาที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณจะน้อยมากทำให้ยากในการพิจารณาหาตำแหน่ง

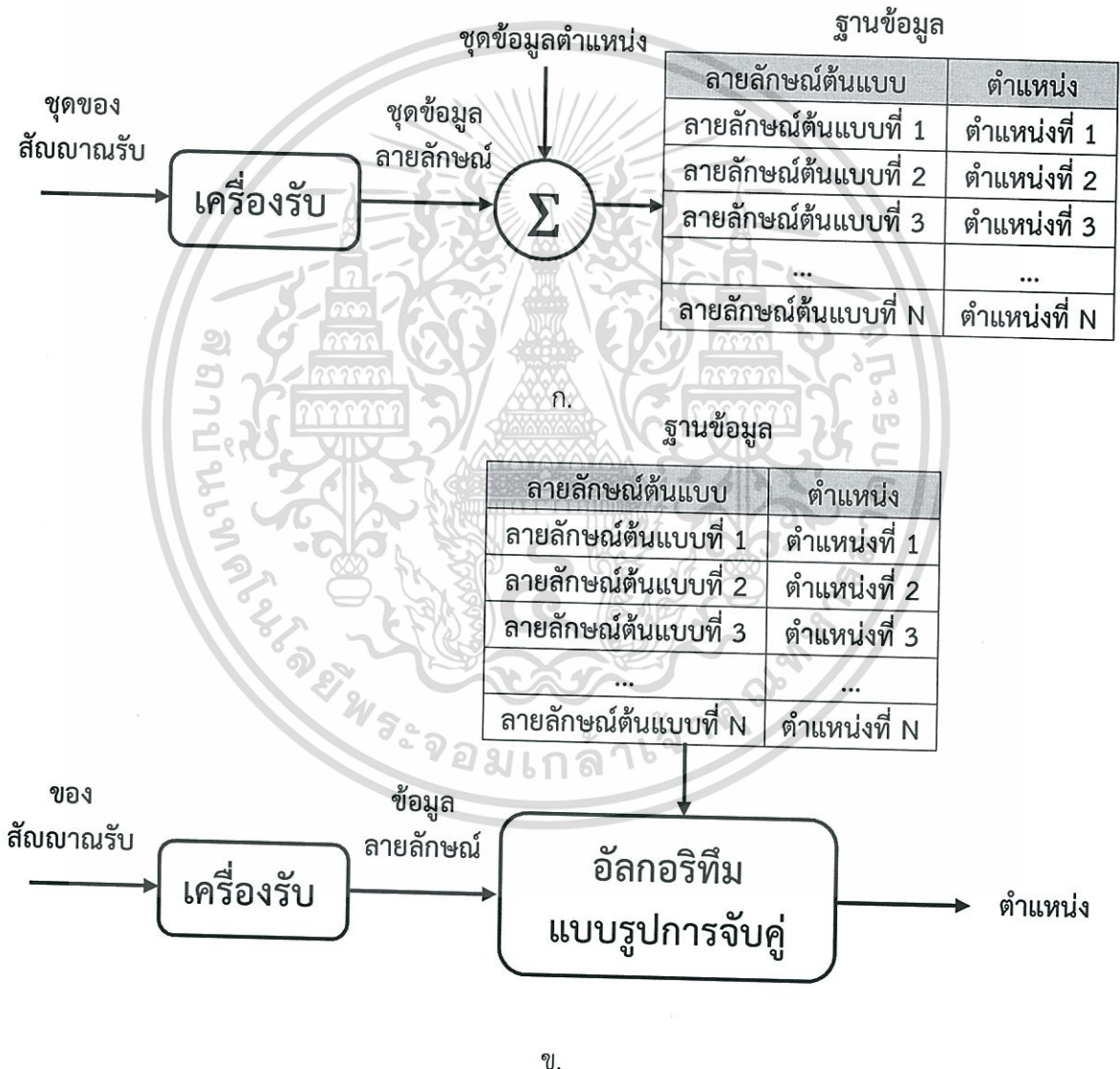


รูปที่ 2.9 การหาตำแหน่งโดยวิธีการพิจารณาความต่างของเวลาในการมาถึงของสัญญาณ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 วิธีการพิจารณาความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งหรือวิธีการฟังเกอร์ปรีนซ์ที่ตั้ง [4]

วิธีการฟังเกอร์ปรีนซ์ที่ตั้ง มีหลักการคล้ายกับวิธีการสแกนลายนิ้วมือของมนุษย์ ซึ่งการทำงานของวิธีการฟังเกอร์ปรีนซ์ที่ตั้ง ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการทำฐานข้อมูล และขั้นตอนการระบุตำแหน่งของผู้ใช้ ขั้นตอนแรกจะเริ่มด้วยการบันทึกชุดข้อมูลลายลักษณะและชุดข้อมูลตำแหน่งลงในฐานข้อมูลก่อน ดังรูปที่ 2.10ก. จากนั้น ในขั้นตอนที่สองเป็นการนำข้อมูลลายลักษณะซึ่งได้จากการวัดสัญญาณจากเครื่องรับมาเปรียบเทียบกับลายลักษณะต้นแบบที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูลด้วยอัลกอริทึมแบบรูปการจับคู่ ดังรูปที่ 2.10ข. จากนั้นอัลกอริทึมแบบรูปการจับคู่ จะทำการหาตำแหน่งซึ่งต้องการทราบอย่างเหมาะสม



รูปที่ 2.10 การทำงานของวิธีการฟังเกอร์ปรีนซ์ที่ตั้ง [4]

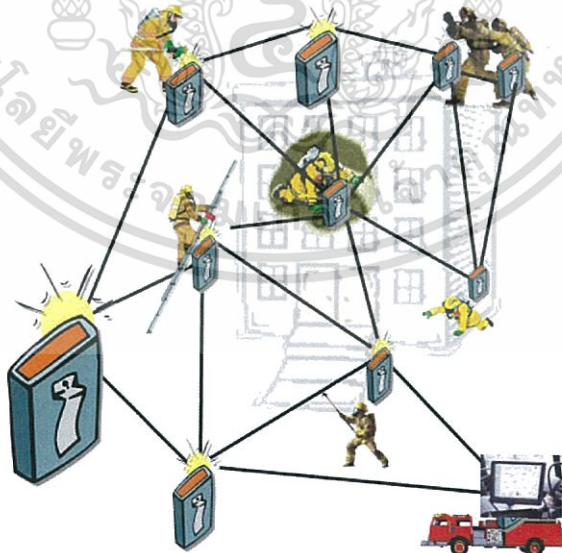
- ก. ขั้นตอนการทำฐานข้อมูล
- ข. ขั้นตอนการระบุตำแหน่งของผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สถานีฐานมากเหมือนวิธีอื่นๆ เพียงแค่มีสถานีฐานอย่างน้อย 1 ตัวก็สามารถหาตำแหน่งได้ และก็มีเหมาะสมกับการหาตำแหน่งที่เป็นแบบกรณีที่เราสายตามองไม่เห็น (Non – line of sight: NLOS) เนื่องจากใช้ระบบฐานข้อมูลจึงสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่เกิดคลื่นหลายวิถีได้ ส่วนข้อดีของการใช้วิธีนี้ในการหาตำแหน่งคือต้องใช้เวลามากในการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการพิจารณาไว้ในฐานข้อมูล ดังนั้นวิธีการนี้จึงนิยมนำมาใช้ในระบบหาตำแหน่งภายในอาคารมากกว่าระบบหาตำแหน่งภายนอกอาคาร เช่น การตรวจสอบสินค้าในคลังสินค้า ดังรูปที่ 2.11 หรือการระบุตำแหน่งของนักผจญเพลิงที่เข้าไปค้นหาผู้ประสบภัยที่ติดอยู่ในอาคารที่ถูกไฟไหม้ ดังรูปที่ 2.12 เป็นต้น



รูปที่ 2.11 การตรวจสอบสินค้าในคลังสินค้า [20]



รูปที่ 2.12 การหาตำแหน่งของนักผจญเพลิงที่เข้าไปค้นหาผู้ประสบภัยที่ติดอยู่ในอาคารที่ถูกไฟไหม้ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วิธีการวิเคราะห์ตำแหน่ง

วิธีการที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งมีด้วยกันหลายวิธีการด้วยกัน เช่น การเรียนรู้แบบเบย์ (Naïve – Bayes), การวิเคราะห์แบบเพื่อนบ้านใกล้เคียง (K-nearest neighbor: K-NN) และโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN) เป็นต้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำการวิเคราะห์แบบเพื่อนบ้านใกล้เคียง และโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่ง ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.5.1 การวิเคราะห์แบบเพื่อนบ้านใกล้เคียง

การวิเคราะห์แบบเพื่อนบ้านใกล้เคียง [11] เป็นเทคนิคซึ่งแตกต่างจากเทคนิคอื่นตรงที่ไม่ได้ใช้ข้อมูลฝึกหัด (Training data) ในการสร้างแบบจำลอง แต่จะใช้ข้อมูลนั้นมาเป็นตัวแบบจำลองเลย ในการใช้งาน K-NN algorithm นั้นเราต้องระบุค่าตัวเลขจำนวนเต็มบวกให้กับ K ซึ่งค่านี้จะเป็นตัวบอกจำนวนของกรณี (Case) ที่จะต้องค้นหาในการทำนายกรณีใหม่ algorithm แบบ K-NN ได้แก่ 1-NN, 2-NN, 3-NN, ..., K-NN โดยที่ K แทนเลขจำนวนเต็มบวก เช่น 4-NN หมายถึง algorithm นี้จะค้นหา 4 กรณีที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีใหม่ (4 nearest cases) ในการทำนายกรณีใหม่

K-NN เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้ในการหาค่าตำแหน่งได้ โดยใช้วิธีการหาค่าตำแหน่งจากค่าความแตกต่างกันของน้อยที่สุดของลายลักษณ์ต้นแบบกับลายลักษณ์ทดสอบ โดยมีสมการหาค่าความต่างดังสมการที่ 2.3

$$e_f(x, y) = \left(\frac{[A_m(x, y) - A_s(x, y)]^2}{\sigma_A^2} + \frac{[B_m(x, y) - B_s(x, y)]^2}{\sigma_B^2} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

เมื่อ A_m คือพารามิเตอร์ A ต้นแบบ, A_s คือพารามิเตอร์ A ทดสอบ, B_m คือพารามิเตอร์ B ต้นแบบ, B_s คือพารามิเตอร์ B ทดสอบ σ_A^2 คือ ค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์ A และ σ_B^2 คือ ค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์ B

จากนั้นสามารถหาพิกัด (x, y) ได้โดยการพิจารณาจากตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดหารด้วยจำนวนตำแหน่งที่ใช้หรือ K ดังสมการที่ 2.4

$$(x, y)_K = \frac{\sum_{j=1}^K (\arg \min e_f(x, y))_j}{K} \quad (2.4)$$

2.5.2 โครงข่ายประสาทเทียม [6], [21-31]

โครงข่ายประสาทเทียม เป็นแบบจำลองแบบหนึ่งในแขนงของงานวิจัยทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) โดยอ้างอิงมาจากการทำงานของเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์ เพื่อให้มีความสามารถในการเรียนรู้ การจดจำรูปแบบ และการอุปมาความรู้ เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองของมนุษย์

2.5.2.1 คุณลักษณะเด่นของโครงข่ายประสาทเทียม

คุณลักษณะเด่นที่เหมาะสมซึ่งทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งาน ได้แก่

1) การเชื่อมต่อแบบขนานเป็นจำนวนมาก (Massive parallel)

โครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลย่อยเป็นจำนวนมาก เชื่อมต่อกันเป็นแบบขนานหลายรูปแบบ

2) ข้อมูลและการคำนวณแบบกระจาย (Distributed data and computation)

แต่ละหน่วยประมวลผลย่อย มีโครงสร้างที่ง่ายมีความสามารถไม่มากนัก ประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายประสาทเทียมได้จากการทำงานร่วมกันแบบกระจายของหน่วยประมวลผลย่อยเป็นจำนวนมาก

3) ความสามารถในการเรียนรู้ (Learning)

คุณสมบัติที่เด่นที่สุดของเครือข่ายประสาทเทียม คือความสามารถในการเรียนรู้ กระบวนการดังกล่าวทำให้การแก้ปัญหาหลายๆ อย่างเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพแตกต่างไปจากการแก้ปัญหาด้วยวิธีแบบดั้งเดิมอย่างสิ้นเชิง

4) ความสามารถในการทำให้เป็นทั่วไป (Generalization)

เป็นผลพลอยได้จากความสามารถในการเรียนรู้ของเครือข่ายประสาทเทียม การเรียนรู้ด้วยข้อมูลในข้อมูลขาเข้า/ข้อมูลขาออก จากตัวอย่างบางส่วน นำไปสู่ความสามารถในการตอบสนองต่อข้อมูลขาเข้าทั้งหมดได้ แน่แน่นอนว่า ความสามารถในการทำให้เป็นทั่วไปนี้ย่อมขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลสำหรับฝึกสอนด้วย

5) การปรับตัว (Adaptation)

การเรียนรู้ของเครือข่ายนำไปสู่ความสามารถในการปรับตัวได้ คุณสมบัตินี้ทำให้โครงข่ายประสาทเทียม มีการทำงานที่น่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง (Dynamic) ได้เป็นอย่างดี

6) การประมวลผลข้อมูลเชิงเนื้อหา (Content-based processing)

รูปแบบข้อมูลของเครือข่ายประสาทเทียมอยู่ในรูปเชิงเนื้อหาไม่ใช่เชิงตัวเลขเหมือนระบบดั้งเดิมทั่วไป การประมวลผลข้อมูลเชิงเนื้อหาดังกล่าวจึงทำให้เครือข่ายประสาทเทียม มีการทำงานใกล้เคียงกับสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ

7) การทนต่อความพร่อง (Fault tolerance)

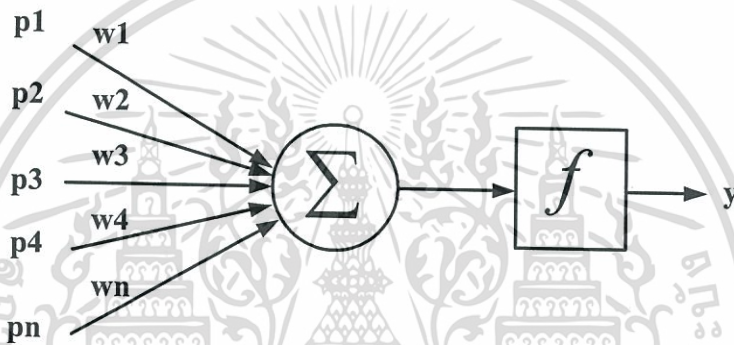
การเชื่อมต่อด้วยหน่วยประมวลผลย่อย ๆ จำนวนมาก ทำให้เกิดการทนต่อความพร่อง เมื่อส่วนใดส่วนหนึ่งของเครือข่ายเสียหาย ระบบโดยรวมจะยังคงทำงานได้ต่อไป

ในการพัฒนางานวิจัยทางด้านโครงข่ายประสาทเทียม ได้คาดหวังที่จะให้ระบบมีคุณลักษณะข้างต้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันกับสมองของมนุษย์ จะเห็นได้ชัดว่าคอมพิวเตอร์นั้นมีความเร็วในการประมวลผลเชิงตัวเลขที่เหนือกว่า แต่อย่างไรก็ตามสมองของมนุษย์นั้นสามารถแก้ปัญหาที่ซับซ้อนเชิงรับรู้ (Perceptual) ได้มีประสิทธิภาพกว่าคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.2 โครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วย

โครงข่ายประสาทเทียม เป็นการรวมกลุ่มแบบขนานของหน่วยประมวลผลย่อยหลายๆ หน่วย ในวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกหน่วยประมวลผลย่อยว่า เซลล์ประสาท โดยทั่วไปในโครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบไปด้วยข้อมูลขาเข้า (Input: p) ข้อมูลขาออก (Output: y) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight: w) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับข้อมูลขาเข้าและเป็นตัวกำหนดการเรียนรู้ การจดจำของเซลล์ประสาทรุ่นๆ และฟังก์ชันตัดสินใจหรือฟังก์ชันถ่ายโอน (Activation function or Transfer function: f) เป็นตัวกำหนดว่าค่าความสัมพันธ์กับข้อมูลขาเข้ากับค่าน้ำหนักว่า ต้องถึงระดับใดถึงจะส่งค่าออกไป หรือถึงระดับไหนต้องส่งค่าออกไปเท่าไรให้กับเซลล์ประสาทตัวอื่น แต่ในบางโครงข่ายประสาทเทียมแบบจะมีค่าเอนเอียงหรือไบอัสอยู่ด้วย โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมถูกแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งหน่วยหลายข้อมูลขาเข้า [6]

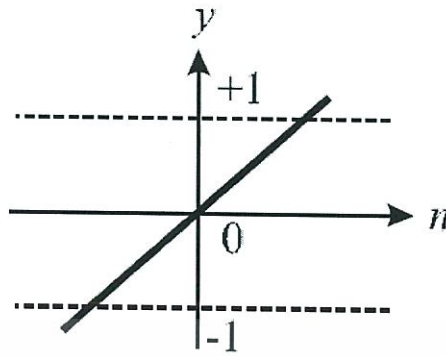
2.5.2.3 ฟังก์ชันถ่ายโอน

ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นอีกส่วนซึ่งทำหน้าที่รวมค่าเชิงตัวเลขของค่าความสัมพันธ์กับข้อมูลขาเข้ากับค่าน้ำหนักว่า ถึงระดับใดถึงจะส่งค่าออกไป หรือจะส่งค่าออกไปให้กับเซลล์ประสาทตัวอื่นในรูปแบบใด ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นได้ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น การเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่นำโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ ฟังก์ชันถ่ายโอนมีด้วยกันอยู่หลายแบบ ซึ่งโดยฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเส้นตรง และฟังก์ชันถ่ายโอนแบบฐานรัศมี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเส้นตรง

ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเส้นตรง ถูกแสดงดังรูปที่ 2.14 เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่เป็นแบบเชิงเส้น ตามสมการที่ 2.5

$$f(n) = n \quad (2.5)$$



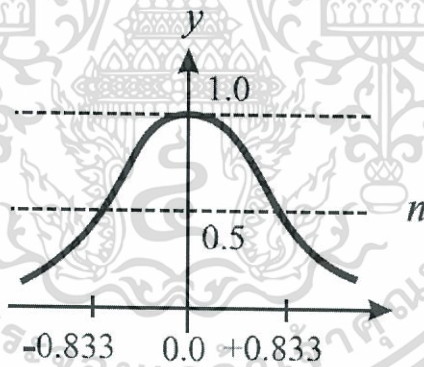
รูปที่ 2.14 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเส้นตรง [30]

2) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบฐานรัศมี

ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบฐานรัศมี หรือฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเกาส์เซียน ถูกแสดงดัง

รูปที่ 2.15 สมการที่ 2.6

$$f(n) = e^{-n^2} \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.15 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบฐานรัศมี [30]

2.5.2.4 กฎการเรียนรู้ (Learning rule or training algorithm)

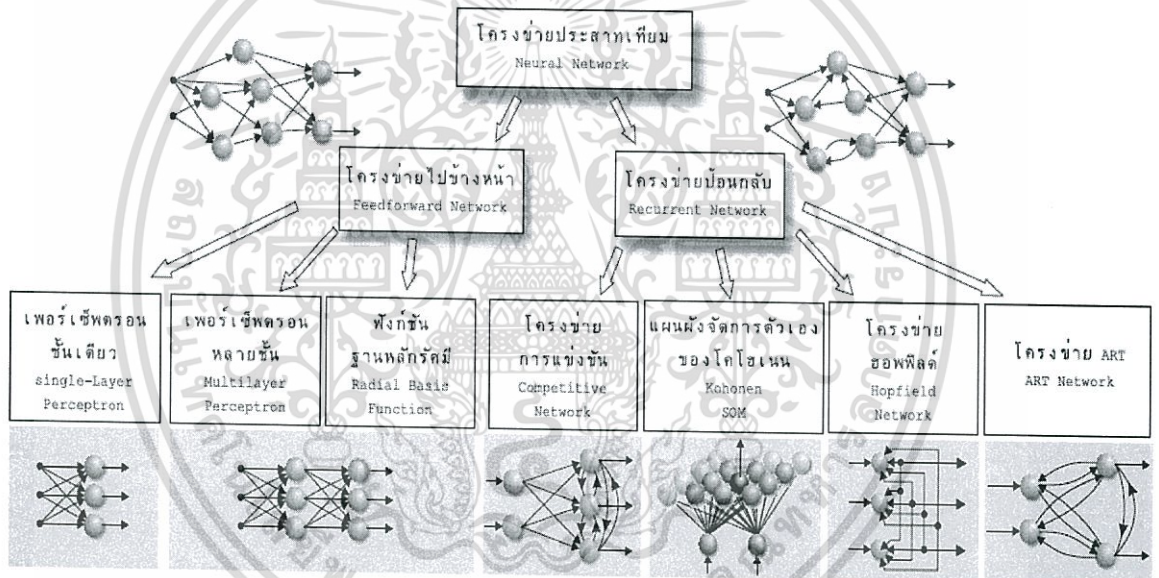
การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้งาน ถูกแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการฝึกหัดหรือเรียนรู้ (Training or learning) และขั้นตอนการทดสอบหรือใช้งานจริง (Testing or working) ซึ่งในกระบวนการเรียนรู้นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มตามกฎการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ การเรียนรู้แบบมีครูสอน (Supervised learning) และการเรียนรู้แบบไม่มีครูสอน (Unsupervised learning) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำกฎการเรียนรู้แบบมีครูสอนของโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการเรียนรู้แบบมีครูสอนนี้ เป็นการนำเสนอกลุ่มข้อมูลตัวอย่าง (Training set) ให้กับโครงข่ายในรูปแบบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลขาเข้าพร้อมเป้าหมาย (Target) ที่ต้องการให้กับโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายเรียนรู้ โดยเมื่อมีข้อมูลขาเข้าถูกป้อนให้กับโครงข่าย เป้าหมายของโครงข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมายของข้อมูลขาเข้า จากนั้นโครงข่ายจะทำการปรับค่าน้ำหนักประสาทและค่าไบอัส เพื่อให้ข้อมูลขาออกของโครงข่ายลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ

2.5.2.5 ชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมตามสถาปัตยกรรมโครงข่าย

การจำแนกชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมตามสถาปัตยกรรมโครงข่ายนั้น จะสามารถแบ่งโครงข่ายประสาทเทียมออกเป็น 2 ประเภท ซึ่งทั้ง 2 ประเภท ได้แก่ โครงข่ายไปข้างหน้า (Feed – forward network) ซึ่งจะมีการเชื่อมต่อระหว่างชั้นเป็นแบบทิศทางเดียว คือมีทิศทางจากข้อมูลขาเข้าไปยังข้อมูลขาออก และโครงข่ายป้อนกลับ (Recurrent network) ซึ่งมีการเชื่อมต่อภายในเป็นแบบป้อนกลับหรือวงรอบ การจำแนกชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมตามสถาปัตยกรรมโครงข่ายถูกแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การจำแนกชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมตามสถาปัตยกรรมโครงข่าย [6]

จากรูปที่ 2.16 การจำแนกชนิดของโครงข่ายประสาทเทียมตามสถาปัตยกรรมโครงข่าย จะเห็นได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีโครงสร้างตามสถาปัตยกรรมหลายแบบ แต่สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้นั้นมุ่งความสนใจไปที่โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี ซึ่งโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีนั้นเป็นโครงข่ายประสาทเทียมชนิดหนึ่ง ซึ่งมีสถาปัตยกรรมโครงข่ายเป็นแบบโครงข่ายไปข้างหน้า

2.5.2.6 โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี (Radian basis function network)

โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี เป็นโครงข่ายไปข้างหน้าประเภทหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงโครงข่ายหนึ่ง โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี แตกต่างไปจากโครงข่ายเพอร์เซ็ปตรอนแบบหลายชั้น (Multi – layer perceptron) ตรงที่โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี นั้นมีชั้นซ่อนเพียงชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

David Broomhead และ David Lowe ถือเป็นผู้บุกเบิกนำเอาฟังก์ชันฐานรัศมีมาประยุกต์ใช้ โครงข่ายฟังก์ชันรัศมีสามารถพิจารณาเป็นฟังก์ชันการส่ง (Mapping function) ของความสัมพันธ์ระหว่างคู่รูปแบบข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกได้ โดยการเรียนรู้ของโครงข่ายเป็นการปรับค่าน้ำหนักประสาทให้ได้ฟังก์ชันการส่งที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นเราสามารถกล่าวได้ว่า โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี คือกระบวนการปรับเส้นโค้ง (Curve fitting) ระหว่างข้อมูลข้อมูลขาเข้ากับข้อมูลขาออกนั่นเอง

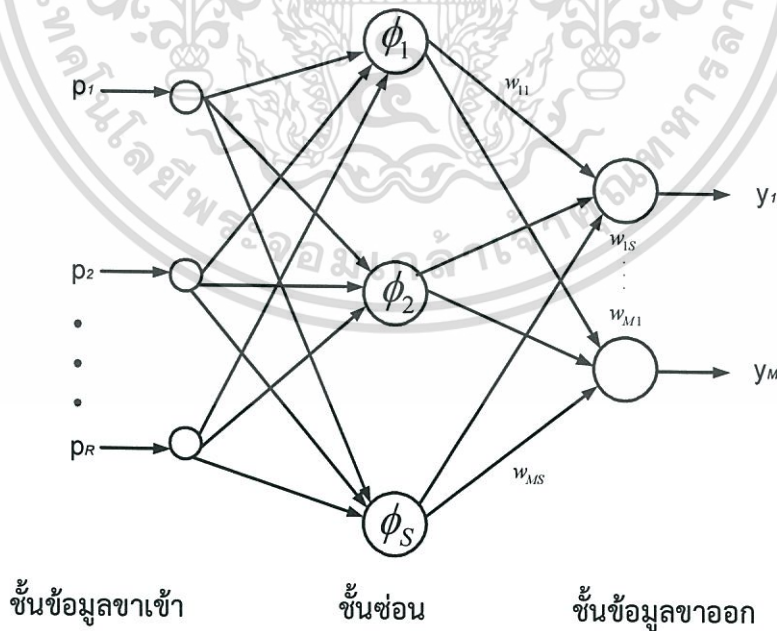
1) สถาปัตยกรรมของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี

สถาปัตยกรรมของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี ถูกแสดงดังรูปที่ 2.17 โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี ประกอบไปด้วยชั้นของเซลล์ประสาท 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นข้อมูลขาเข้า ชั้นซ่อน และชั้นข้อมูลขาออก ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

ชั้นข้อมูลขาเข้า: แต่ละข้อมูลขาเข้าจะแทนคุณลักษณะของเวกเตอร์ข้อมูลขาเข้า เหมือนกับในโครงข่ายเพอร์เซ็ปตรอนแบบหลายชั้นทั่วๆไป ซึ่งในที่นี้เวกเตอร์ข้อมูลขาเข้าจะถูกกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ R

ชั้นซ่อน: แต่ละเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนจะมีฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งมีลักษณะพิเศษที่ซึ่งให้ผลตอบสนองของฟังก์ชัน ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างข้อมูลขาเข้ากับจุดศูนย์กลางของฟังก์ชัน กล่าวคือถ้าเวกเตอร์ข้อมูลขาเข้าอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางมาก ข้อมูลขาออกที่ได้จะมาก ถ้าเวกเตอร์ข้อมูลขาเข้าอยู่ห่างออกจากจุดศูนย์กลาง ข้อมูลขาออกที่ได้จะลดลงตามลำดับ ในที่นี้จำนวนเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนมีขนาดเท่ากับ S

ชั้นข้อมูลขาออก: มีหน้าที่รวมข้อมูลขาออกที่ได้จากแต่ละเซลล์ประสาทในชั้นซ่อน โครงข่ายให้ข้อมูลขาออกในรูปของเวกเตอร์ขนาดเท่ากับ M



รูปที่ 2.17 โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี ที่มีขนาดของข้อมูลขาเข้าเท่ากับ R จำนวนเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนเท่ากับ S และขนาดของข้อมูลขาออกเท่ากับ M [6]

ดังนั้นเราสามารถพิจารณาโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี เป็นการฟังก์ชันการส่งระหว่างปริภูมิของข้อมูลขาเข้า $p \in R^{R \times 1}$ ไปยังปริภูมิของข้อมูลขาออก $y \in R^{M \times 1}$ ได้ จากโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีในรูปข้างต้น จะได้ว่าข้อมูลขาออกตัวที่ i ของโครงข่ายมีค่าเท่ากับ

$$y_i = \sum_{k=1}^s w_{ik} \phi_k(p, c_k) \quad (2.7)$$

$$y_i = \sum_{k=1}^s w_{ik} \phi_k(\|p - c_k\|_2) \quad (2.8)$$

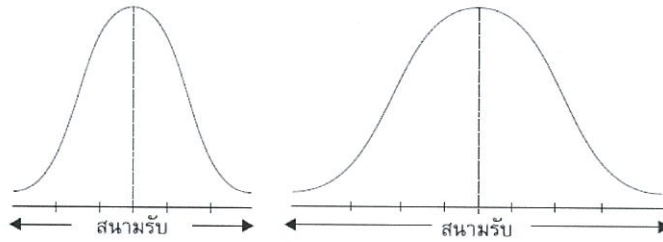
โดยที่

- $\phi_k(\cdot)$ = ฟังก์ชันส่งค่าจาก R^+ ไปยัง R ของเซลล์ประสาทตัวที่ k ในชั้นซ่อน
- $\|\cdot\|_2$ = ฟังก์ชันระยะทางแบบยูคลิด
- w_{ik} = ค่าน้ำหนักประสาทของเซลล์ประสาทตัวที่ k ในชั้นซ่อน
- S = จำนวนเซลล์ประสาททั้งหมดในชั้นซ่อน
- $c_k \in R^{R \times 1}$ = เวกเตอร์จุดศูนย์กลางในปริภูมิของเวกเตอร์ข้อมูลขาเข้าสำหรับเซลล์ประสาทเซลล์ที่ k ในชั้นซ่อน

สำหรับแต่ละเซลล์ประสาทในชั้นซ่อน ค่าระยะทางยูคลิดระหว่างเวกเตอร์จุดศูนย์กลาง c_k กับเวกเตอร์ข้อมูลขาเข้า p จะถูกคำนวณ ข้อมูลขาออกของเซลล์ประสาทในชั้นซ่อนนี้จะได้จากฟังก์ชัน $\phi_k(\cdot)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น สุดท้ายแล้ว ข้อมูลขาออกของโครงข่ายจะได้จากผลรวมของค่าน้ำหนักประสาท กับข้อมูลขาออกของเซลล์ประสาทจากชั้นซ่อนดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตัวอย่างของฟังก์ชัน $\phi_k(\cdot)$ ที่ใช้ในโครงข่ายฐานรัศมี เช่น

- ฟังก์ชันเกาส์เซียน = $\phi(p) = e^{-p^2/\sigma^2}$
- ฟังก์ชัน Hardy Multiquadratic = $\phi(p) = \sqrt{p^2 + c^2}/c ; c > 0$
- ฟังก์ชัน Inverse Multiquadratic = $\phi(p) = c/\sqrt{p^2 + c^2} ; c > 0$

การปรากฏของฟังก์ชัน ϕ ดังกล่าวเป็นที่มาของชื่อ Radial Basis Function หรือ RBF นั่นเอง ฟังก์ชันที่นิยมใช้ในฟังก์ชันฐานรัศมี มากที่สุดก็คือฟังก์ชันเกาส์เซียน รูปร่างของฟังก์ชันเกาส์เซียนแสดงในรูปที่ 2.18 โดยที่พารามิเตอร์ σ เป็นตัวควบคุมความกว้างของฟังก์ชันฐานรัศมี หรือเรียกว่าพารามิเตอร์การกระจาย (spread parameter)



รูปที่ 2.18 ผลของพารามิเตอร์การกระจาย σ [6]

เวกเตอร์ศูนย์กลาง c_k ของเซลล์ประสาทซ่อนตัวที่ k จะรับข้อมูลเข้าจากเวกเตอร์ p ที่มีมิติเท่ากับ R พารามิเตอร์ σ_k ทำหน้าที่ควบคุมความกว้างของแต่ละฟังก์ชันฐานรัศมีโดยปกติแล้ว ถ้าเวกเตอร์ข้อมูลเข้า p มีระยะห่างจากศูนย์กลาง c_k มากขึ้น กล่าวคือ $\|p - c_k\|_2$ มีค่ามากขึ้น ค่าที่ได้จากฟังก์ชัน ϕ_k จะลดลง พื้นที่ของฟังก์ชัน ϕ เรียกว่า สนามรับ (receptive field) ของเซลล์ประสาทรุ่นๆ ข้อมูลขาออก y_j ของโครงข่ายได้จากผลรวมของข้อมูลขาออกของฟังก์ชัน ϕ จากทุกเซลล์ประสาทในชั้นซ่อน โดยปกติแล้วเวกเตอร์จุดศูนย์กลาง c_k จะถูกเลือกจากปริภูมิของเวกเตอร์ข้อมูลเข้า ที่ซึ่งจะต้องมีจำนวนเวกเตอร์จุดศูนย์กลางหรือจำนวนเซลล์ประสาทในชั้นซ่อน เพียงพอและครอบคลุมปริภูมิของข้อมูลเข้าได้ รายละเอียดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2) การฝึกสอนโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี

การฝึกสอนโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี นั้นได้มีผู้นำเสนอไว้หลายรูปแบบ ในลักษณะเดียวกันกับการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบอื่นๆ การฝึกสอนโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี ก็คือการค้นหาพารามิเตอร์ของโครงข่ายซึ่งประกอบไปด้วย

- ค่าน้ำหนักประสาท w_{ik} สำหรับ $i = 1, \dots, M$ และ $k = 1, \dots, S$
- เวกเตอร์จุดศูนย์กลางของเซลล์ประสาทตัวที่ k ในชั้นซ่อน c_k สำหรับ $k = 1, \dots, S$
- ค่าพารามิเตอร์การกระจาย σ_k สำหรับ $k = 1, \dots, S$

ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้วิธีการฝึกสอนแบบจุดศูนย์กลางคงที่ (Fixed center) สำหรับในการฝึกสอนเวกเตอร์จุดศูนย์กลางจะถูกสุ่มมาจากเวกเตอร์ข้อมูลเข้า และจะไม่มีเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์กลางในระหว่างการฝึกสอน รายละเอียดการฝึกสอนมีดังต่อไปนี้

พิจารณาความสัมพันธ์ข้อมูลขาออกตัวที่ i ของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีจากสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะเห็นได้ว่า พารามิเตอร์ที่ควบคุมการส่งค่าระหว่างข้อมูลเข้ากับข้อมูลขาออกของโครงข่ายก็คือค่าน้ำหนักประสาท w_{ik} ในชั้นข้อมูลขาออกและเวกเตอร์จุดศูนย์กลาง c_k ของฟังก์ชันฐานรัศมี (ในปริภูมิตัดขวางนี้คือฟังก์ชันเกาส์เซียน) ดังนั้นการฝึกสอนโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีที่ง่ายที่สุดก็คือ

กำหนดให้เวกเตอร์จุดศูนย์กลางมีค่าคงที่ โดยปกติแล้วในขั้นตอนการฝึกสอนจะทำการสุ่มเลือกเวกเตอร์จุดศูนย์กลางจากเวกเตอร์ข้อมูลขาเข้า สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการฝึกสอนแบบนี้ก็คือ จำนวนเวกเตอร์จุดศูนย์กลางที่สุ่มเลือกมาจะต้องมีจำนวนเพียงพอที่จะครอบคลุมปริภูมิของข้อมูลขาเข้า ซึ่งไม่มีวิธีการที่แน่นอนในการหาว่าจำนวนของเวกเตอร์ดังกล่าวควรจะมีค่าเป็นเท่าไร หลักการอย่างหนึ่งก็คือ เลือกเวกเตอร์จุดศูนย์กลางให้มีจำนวนมากพอที่จะครอบคลุมปริภูมิของข้อมูลขาเข้า แล้วในขณะที่ฝึกสอนเราสามารถกำจัดเวกเตอร์จุดศูนย์กลางออกจากโครงข่าย โดยที่ไม่ทำให้โครงข่ายลดประสิทธิภาพลงแต่อย่างใด อัลกอริทึมการฝึกสอนโครงข่ายหลังจากที่กำหนดจำนวนเวกเตอร์จุดศูนย์กลางแล้ว มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) กำหนดให้จำนวนคู่เวกเตอร์ข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกมีทั้งหมด Q คู่ จะได้ว่าข้อมูลขาออก \tilde{y}_q ของเซลล์ประสาทตัวที่ q ของโครงข่าย คือ

$$\tilde{y}_q = \sum_{k=1}^s w_{ik} \phi(p_q, c_k), q=1, \dots, Q \quad (2.9)$$

สำหรับ เวกเตอร์ข้อมูลขาเข้า p_q ของชุดที่ q และเวกเตอร์จุดศูนย์กลาง c_k ของเซลล์ประสาทตัวที่ k ในชั้นซ่อน

2) เขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \vdots \\ \tilde{y}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi(p_1, c_1) \cdots \phi(p_1, c_s) \\ \vdots \\ \phi(p_Q, c_1) \cdots \phi(p_Q, c_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_s \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

หรือ

$$\tilde{y} = \Phi w \quad (2.11)$$

โดยที่ $\tilde{y} \in R^{Q \times 1}$ = ข้อมูลขาออกของโครงข่าย
 $w \in R^{s \times 1}$ = เวกเตอร์น้ำหนักประสาทในชั้นซ่อน
 $\Phi \in R^{Q \times s}$ = เมตริกซ์ของฟังก์ชันฐานรัศมี ในชั้นซ่อน

3) เนื่องจากจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันฐานรัศมี ถูกกำหนดให้คงที่ เนื่องจากจุดศูนย์กลางของฟังก์ชันฐานรัศมี ถูกกำหนดให้คงที่การฝึกสอน จะทำการคำนวณหาเพียงค่าของน้ำหนักประสาท โดยใช้ค่าวัตถุประสงค์เป็นค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (MSE หรือ Mean-Squared Error) ระหว่างข้อมูลขาออกของโครงข่าย \tilde{y} กับข้อมูลข้อมูลขาออกจริง y ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับฝึกสอนโครงข่ายคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J(w) = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q [\hat{y}_q - \tilde{y}_q]^2 \quad (2.12)$$

$$J(w) = \frac{1}{2} (\hat{y} - \tilde{y})^T (\hat{y} - \tilde{y}) \quad (2.13)$$

โดยที่ $\hat{y} \in R^{Q \times 1}$ คือเวกเตอร์ของข้อมูลขาออกที่ต้องการจากการคู่ข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออก

4) แทนสมการที่ 2.11 ลงในสมการที่ 2.13 จะได้

$$J(w) = \frac{1}{2} (\hat{y} - \Phi w)^T (\hat{y} - \Phi w) \quad (2.14)$$

ตั้งสมการที่ 2.15

5) ทำการอนุพันธ์เพื่อหาค่าน้อยที่สุดของ $J(w)$

$$\frac{\partial J(w)}{\partial w} = 0 \quad (2.15)$$

จะได้

$$-\Phi^T \hat{y} + \Phi^T \Phi w = 0 \quad (2.16)$$

แก้สมการข้างต้นด้วยเมตริกซ์ผกผันเทียม จะได้ค่าน้ำหนักประสาทของโครงข่ายจากค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด

$$w = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \hat{y} \quad (2.17)$$

$$w = \Phi^+ \hat{y} \quad (2.18)$$

โดยที่ Φ^+ คือเมตริกซ์ผกผันเทียมของฟังก์ชัน Φ

จากการฝึกสอนเครือข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีแบบจุดศูนย์กลางคงที่จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่กำหนดจุดศูนย์กลางฟังก์ชันฐานรัศมีให้คงที่ การฝึกสอนโครงข่ายจะให้ผลลัพธ์เป็นผลเฉลยรูปแบบปิด ดังนั้นการฝึกสอนจะสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีผู้สนใจนำเอาโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีไปใช้งานอย่างมากมาย นอกไปจากนั้นแล้ว ขนาดของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี ยังมีผลจากสมการที่ 2.16 ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าตอบของสมการได้แบบหนึ่งคำตอบอย่างเป็นทางการ (Underdetermined) หรือแบบหาได้เกิน (Overdetermined) กล่าวคือถ้าจุดศูนย์กลางหรือเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสาทในชั้นซ่อน มีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนของคู่ตัวอย่างข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออก สำหรับฝึกสอน ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการฝึกสอนโครงข่ายจะมีค่าน้อย โดยเฉพาะถ้าใช้สมการที่ 2.8 แล้ว ค่าความผิดพลาดจะเป็นศูนย์

ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันเกาเซียนเป็นฟังก์ชันฐานรัศมี พารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือ พารามิเตอร์การกระจาย σ ซึ่งโดยปกติแล้วจะกำหนดด้วยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\sigma = \frac{d_{\max}}{\sqrt{K}} \quad (2.19)$$

โดยที่ d_{\max} คือค่าระยะทางยูคลิดที่มากที่สุดระหว่างจุดศูนย์กลางที่กำลังพิจารณาและ K คือจำนวนของจุดศูนย์กลางที่กำลังพิจารณาและ K คือจำนวนของจุดศูนย์กลาง ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันฐานรัศมีของเซลล์ประสาทในชั้นซ่อน คือ

$$\phi(p, c_k) = e^{-\frac{K}{d_{\max}^2} \|p - c_k\|^2} \quad (2.20)$$

จากโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีที่ผ่านมานั้น จะเห็นได้ว่าโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี เป็นโครงข่ายที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน องค์ประกอบภายในโครงข่ายและวิธีการการเรียนรู้ของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีเอง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเป็นฟังก์ชันประมาณแบบเลขจำนวนจริงได้เป็นอย่างดี เมื่อเทียบกับกับโครงข่ายเพอร์เซ็ปตรอนแบบหลายชั้นแล้ว การฝึกสอนโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี จะใช้เวลาเร็วกว่าโครงข่ายแบบหลายชั้นมาก แต่เนื่องจากการที่เป็นโครงข่ายที่มีชั้นซ่อนเพียงชั้นเดียว จำนวนเซลล์ประสาทที่ต้องการสำหรับปัญหาหนึ่ง ๆ อาจจะต้องมีจำนวนที่มากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี ได้เป็นที่ยอมรับและถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างหลากหลาย

2.5.2.7 การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม

มีงานในหลายๆ ด้านที่นำเอาจุดเด่นหรือข้อดีของโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้งานและประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี เช่น

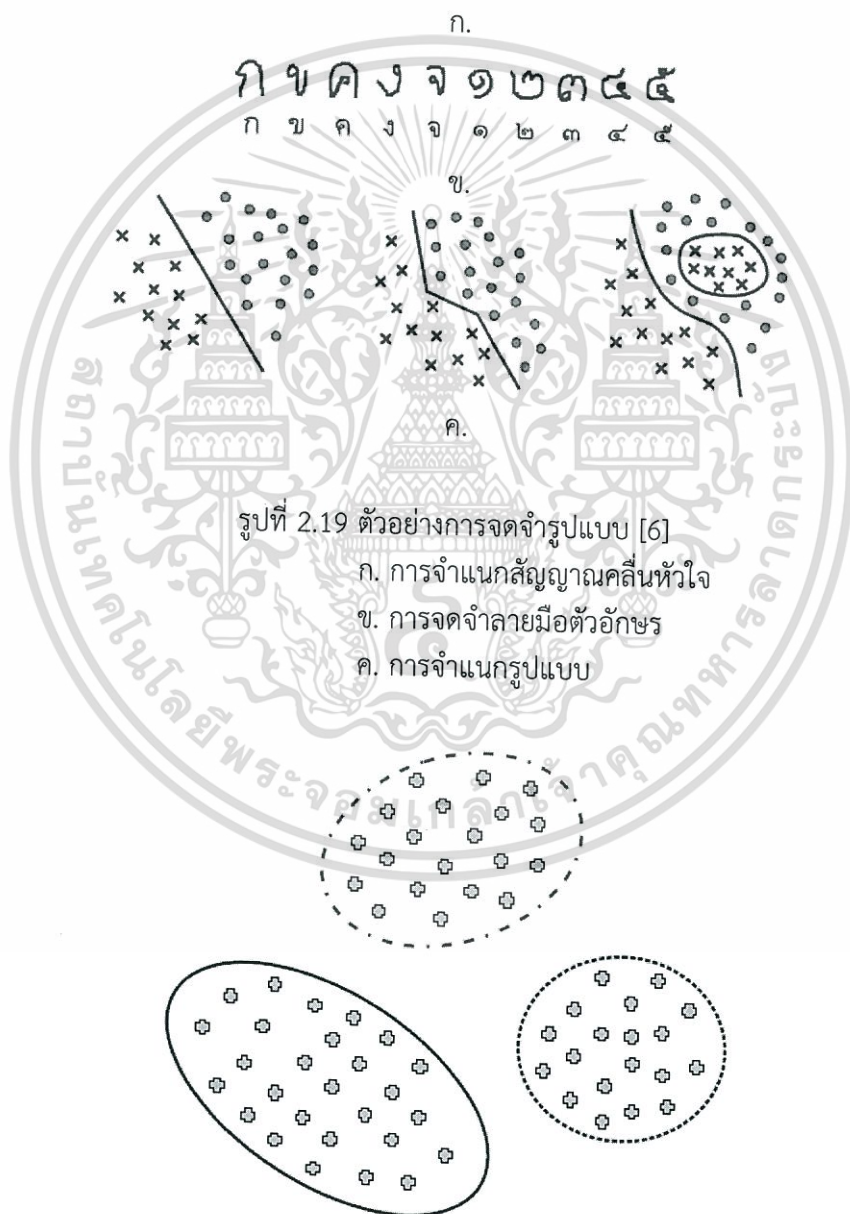
1) การจดจำรูปแบบ (Pattern recognition)

งานของการจดจำรูปแบบคือ การกำหนดหรือแปลงรูปแบบข้อมูลขาเข้า เช่น คลื่นเสียงพูดหรือลายมือเขียนตัวอักษร ให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ลักษณะ (Feature vector) ที่ซึ่งใช้แทนคลาสต่างๆ ดังรูปที่ 2.19 การประยุกต์ใช้งานที่เป็นที่รู้จักดี เช่นการจดจำลายมือตัวอักษร การจดจำเสียง การจำแนกรูปคลื่น EEG และ ECG การจำแนกเซลล์เม็ดเลือด และการตรวจสอบลายวงจร

2) การจับกลุ่ม (Clustering or categorization)

โดยปกติแล้ว ในงานการจับกลุ่มจะไม่มีข้อมูลล่วงหน้าให้สำหรับการฝึกสอน อัลกอริทึมการจับกลุ่มจะทำการค้นหาสถานะคล้าย (Similarity) ระหว่างข้อมูลรูปแบบ และทำการจับ

กลุ่มรูปแบบที่คล้ายกันไว้ด้วยกัน ดังรูปที่ 2.20 การจับกลุ่มนี้สามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็นการจำแนกรูปแบบแบบไม่มีผู้ฝึกสอน (Unsupervised pattern classification)



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการจับกลุ่ม [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้การจับกลุ่ม เช่นการทำเหมืองข้อมูล (Data mining) การบีบอัดข้อมูล (Data compression) และการวิเคราะห์ค้นหาข้อมูล

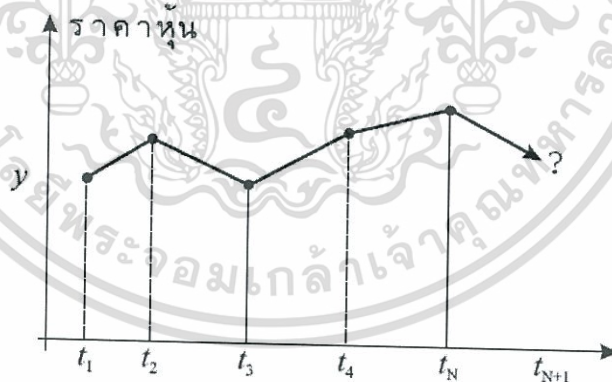
3) การประมาณค่าฟังก์ชัน (Function approximation)

พิจารณาข้อมูลรูปแบบสำหรับการเรียนรู้ N ชุด ในรูป {เวกเตอร์ข้อมูลขาเข้า, เวกเตอร์เป้าหมาย} ดังต่อไปนี้

$$\{x_1, y_1\} \{x_2, y_2\} \dots \{x_N, y_N\}$$



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างการประมาณค่าฟังก์ชัน จุดในรูปคือข้อมูลรูปแบบสำหรับการเรียนรู้ [6]



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการทำนายราคาหุ้น [6]

ข้อมูลดังกล่าวได้มาจากฟังก์ชัน $y = f(x)$ ที่ไม่ทราบค่า ในทางปฏิบัติอาจจะมีความยุ่งยากในการวิเคราะห์หาโครงสร้างของฟังก์ชัน และค่าของข้อมูลรูปแบบสำหรับการเรียนรู้นี้อาจจะมีสัญญาณรบกวนผสมอยู่ด้วย การประมาณค่าฟังก์ชันคือการหาค่าประมาณ $\hat{y} = \hat{f}(x)$ ของฟังก์ชัน $f(x)$ ที่ซึ่งให้เอาต์พุตตามข้อมูลรูปแบบสำหรับการเรียนรู้ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ในการสร้างแบบจำลองของหลาย ๆ ระบบในงานทางด้านวิศวกรรมจำเป็นจะต้องใช้การประมาณค่าฟังก์ชันนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การทำนาย (Prediction or forecasting)

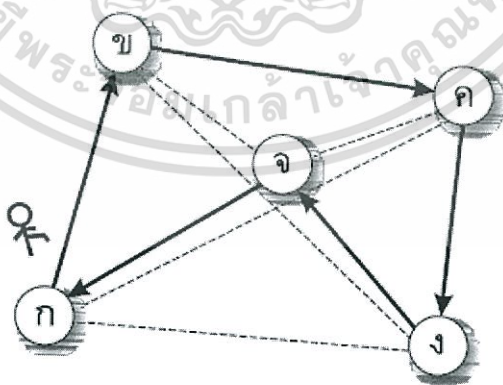
กำหนดเซตค่าตัวอย่าง N ค่าคือ t เป็นค่า ณ เวลา t_1, t_2, \dots, t_N ตามลำดับ การทำนายผลล่วงหน้าคือการทำนายค่าของ $y(t_{N-1})$ ซึ่งเป็นค่า ณ เวลา t_{N-1} ในอนาคต การทำนายผลมีการนำไปใช้กันมากในงานการตัดสินใจทางธุรกิจ วิทยาศาสตร์และวิศวกรรม ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเช่น การทำนายผลดัชนีตลาดหุ้นดังแสดงในรูปที่ 2.22 หรือการพยากรณ์อากาศล่วงหน้า

2) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)

ปัญหาหลายๆ อย่างทางด้านคณิตศาสตร์ สถิติ วิศวกรรม วิทยาศาสตร์ การแพทย์และเศรษฐกิจ สามารถพิจารณาเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้เป้าหมายของอัลกอริทึม การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ การหาคำตอบที่เป็นไปได้ตามเงื่อนไขข้อบังคับ และให้ค่าการประเมินจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด (สูงสุดหรือต่ำสุด) ตัวอย่างปัญหามตะได้แก่ปัญหาการเดินทางของเซลแมน (Traveling salesman problem หรือ TSP) ซึ่งถือเป็นปัญหา NP-สมบูรณ์ (NP-Complete) ดังแสดงในรูปที่ 2.23

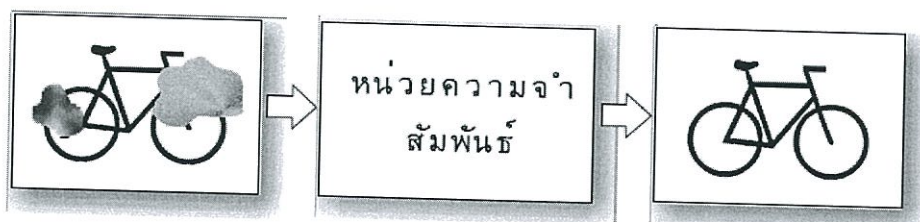
3) หน่วยความจำอ้างอิงด้วยเนื้อหา (Content-addressable memory)

ในคอมพิวเตอร์ประมวลผลต่างๆ ไปข้อมูลในหน่วยความจำจะถูกอ้างอิงด้วยเลขที่อยู่ (Address) ที่ซึ่งไม่ได้มีความสัมพันธ์กับเนื้อหาของข้อมูลในหน่วยความจำแต่อย่างใด นอกไปจากนั้นแล้ว ถ้ามีการคำนวณเลขที่อยู่ผิดพลาด แม้เพียงเล็กน้อย ข้อมูลที่ได้จากเลขที่อยู่นั้นจะแตกต่างไปจากข้อมูลที่ต้องการอย่างสิ้นเชิง หน่วยความจำสัมพันธ์ (Associative memory or content-addressable memory) สามารถถูกอ้างอิงที่อยู่ด้วยเนื้อหาของข้อมูล ถึงแม้ว่าการอ้างอิงจะใช้ข้อมูลข้อมูลเข้าเพียงบางส่วน (ไม่สมบูรณ์) หรือมีความผิดพลาด เนื้อหาในหน่วยความจำยังคงสามารถถูกเรียกใช้ได้อย่างถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.24 หน่วยความจำสัมพันธ์นี้มีประโยชน์มากในงานทางด้านฐานข้อมูลแบบสื่อประสม (Multimedia database)



รูปที่ 2.23 ตัวอย่างปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา TSP [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างหน่วยความจำอ้างอิงด้วยเนื้อหาหรือหน่วยความจำสัมพันธ์ [6]

4) ระบบควบคุม (Control system)

ระบบควบคุมถือเป็นงานที่นำเอาโครงข่ายประสาทเทียมมาประยุกต์ใช้งานมากที่สุดงานหนึ่ง พิจารณาระบบพลวัตที่ซึ่งกำหนดคู่ผลตอบสนองเป็น $\{u(t), y(t)\}$ โดยที่ $u(t)$ เป็นสัญญาณข้อมูลขาเข้าสำหรับควบคุมระบบ และ $y(t)$ เป็นสัญญาณข้อมูลขาออกที่ออกมาจากระบบ ณ เวลา t ในระบบควบคุมแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง (model-reference adaptive control) เป้าหมายของระบบคือสร้างสัญญาณควบคุม $u(t)$ ป้อนให้กับระบบที่ซึ่งทำให้ระบบมีผลตอบสนองตามแบบจำลองที่อ้างอิง ตัวอย่างเช่น การควบคุมความเร็วมอเตอร์ เป็นต้น

โครงข่ายประสาทเทียม ได้รับความสนใจนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อย่างมากมาย รายละเอียดข้างต้นนำเสนอไว้เพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น นอกจากนั้นแล้วยังมีงานอีกหลากหลาย ที่นำเอาโครงข่ายประสาทเทียมด้านความสามารถในการเรียนรู้ เป็นปัจจัยหลักในการนำไปใช้ร่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.6 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง ทั้งในเรื่องที่มาของทฤษฎีต่างๆ ซึ่งได้นำมาใช้ในงานวิจัยซึ่งได้แนวคิด และแรงจูงใจมาจากการทบทวนวรรณกรรมซึ่งเป็นหัวข้อต้นของบท จากนั้นได้กล่าวถึง ของความเป็นมาของเทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง นิยามของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแถบกว้างยิ่ง มาตรฐานของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง รวมไปถึงข้อดีของระบบการสื่อสารแบบแถบกว้างยิ่ง จากนั้นจะกล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานในการหาตำแหน่ง และสุดท้ายได้กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ตำแหน่ง ซึ่งทุกส่วนนี้จะถูกนำมาใช้ในการจำลองการหาตำแหน่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 3

ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ที่ใช้ในการหาตำแหน่ง โดยขั้นแรกจะกล่าวถึงการจำลองสัญญาณแถบกว้างยิ่งเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่ง ได้แก่ สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง สัญญาณที่รับได้ ในขั้นถัดมาจะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้สำหรับการสร้างพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณเพื่อใช้สร้างเป็นลายลักษณะต้นแบบในกระบวนการทำงานของวิธีฟังก์ชันปริ้นท์ที่ตั้งกล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ในส่วนท้ายกล่าวถึงการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของการหาตำแหน่งในระนาบสามมิติ ซึ่งจะเป็นส่วนที่จะนำมาใช้ประเมินผลของการหาตำแหน่งในตอนท้ายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.2 สัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่ง

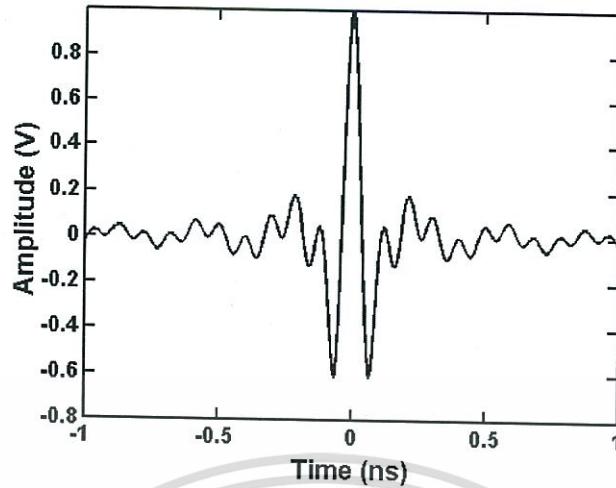
รูปคลื่นสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ได้กำหนดให้มีลักษณะเป็นรูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยม [10] – [14] ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยที่รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมในโดเมนเวลา (Time domain) และฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมในโดเมนความถี่ (Frequency domain) สามารถแสดงในสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 ตามลำดับ ได้ดังนี้

$$v_i(t) = \frac{A}{f_B} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)] \quad (3.1)$$

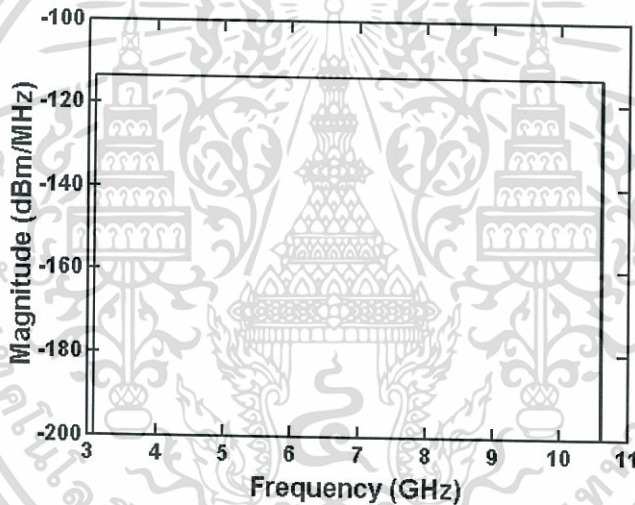
$$V_i(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_b} & \|f - f_c\| \leq \frac{f_b}{2} \\ 0 & \|f - f_c\| > \frac{f_b}{2} \end{cases} \quad (3.2)$$

| | | | |
|-------|-------|-----|-----------------|
| เมื่อ | A | คือ | แอมพลิจูดสูงสุด |
| | f_b | คือ | แบนด์วิดท์ |
| | f_c | คือ | ความถี่กลาง |
| | f_L | คือ | ความถี่ต่ำสุด |
| | f_H | คือ | ความถี่สูงสุด |

รูปคลื่นแถบผ่านสี่เหลี่ยมนี้มีความหนาแน่นสเปกตรัมเป็นรูปสี่เหลี่ยมทั้งในด้านความถี่บวกและความถี่ลบ โดยความหนาแน่นสเปกตรัมจะมีขนาดคงที่เท่ากับ $A/(2f_b)$ อยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ $-f_H$ ถึง $-f_L$ และ f_L ถึง f_H และจะมีเฟสเป็นศูนย์ รูปคลื่นนี้จะมีคุณสมบัติแบบฟังก์ชันคู่และมีส่วนประกอบลักษณะกระแสตรง (Direct current: DC) เป็นศูนย์



รูปที่ 3.1 รูปคลื่นของสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนเวลา [3]



รูปที่ 3.2 สเปกตรัมของสัญญาณส่งแบบแถบกว้างยิ่งในโดเมนความถี่ [3]

3.3 สัญญาณที่รับได้

สำหรับสัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่ หรือความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้นั้น สามารถวิเคราะห์หาได้จากการนำฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่งคูณกับฟังก์ชันการถ่ายโอนความถี่ของช่องสัญญาณ [10] - [14] สัญญาณที่รับได้ในโดเมนความถี่หรือความหนาแน่นของสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_c(f) \quad (3.3)$$

เมื่อ $V_t(f)$ คือ ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณส่ง

$H_c(f)$ คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของช่องสัญญาณ ซึ่งได้จากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสัญญาณที่รับได้ในโดเมนเวลานั้น สามารถหาได้โดยใช้การแปลงฟูริเยร์ย้อนกลับ (Inverse fourier transform) ของความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ สัญญาณที่รับได้ในโดเมนเวลา $v_r(t)$ สามารถเขียนในรูปสมการ ได้ดังนี้

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df \quad (3.4)$$

3.4 พารามิเตอร์จากการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง

พารามิเตอร์จากการวัดช่องสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ได้แก่ กำลังของสัญญาณแต่ละวิถี (Power signal), กำลังของสัญญาณเฉลี่ย (Average power signal), การสูญเสียเชิงวิถีของแต่ละวิถี (Path loss), การสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ย (Average path loss), การประวิงเวลาแต่ละวิถี (Delay time) และ การประวิงเวลาเฉลี่ย (Average delay time) เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถี การประวิงเวลา การสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ย และการประวิงเวลาเฉลี่ย ดังนี้

3.4.1 พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีและพารามิเตอร์การประวิงเวลา

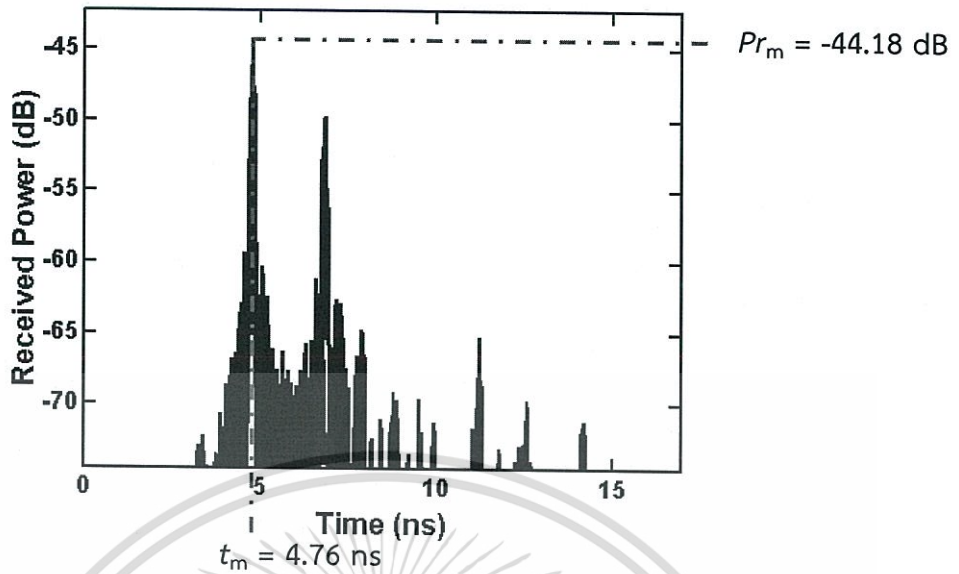
พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีและพารามิเตอร์การประวิงเวลา [11] สามารถหาได้มาจากกำลังของสัญญาณที่รับได้ โดยกำลังของสัญญาณที่รับได้ในหน่วยเดซิเบล สามารถหาได้จากสมการ

$$P_r(t)[dB] = 20 \log |v_r(t)| \quad (3.5)$$

$$PL_m = -P_{rm} \quad (3.6)$$

เมื่อ PL_m คือ พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถี

เนื่องจากสัญญาณแถบกว้างยิ่ง เป็นสัญญาณที่มีความละเอียดทางเวลามาก ทำให้สามารถสังเกตกำลังงานของรูปคลื่นที่มาจากวิถีต่างๆได้ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการพิจารณารูปคลื่นที่มีกำลังงานของสัญญาณสูงสุดเพียงวิถีเดียว จากนั้นนำมาเปลี่ยนเป็นพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีดังสมการที่ 3.6 ส่วนพารามิเตอร์การประวิงเวลาสามารถหาได้จากเวลาของวิถีซึ่งมีกำลังของสัญญาณสูงสุดที่มาถึงเช่นเดียวกับพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถี ดังรูปที่ 3.3 ที่ค่ากำลังงานของสัญญาณสูงสุด เท่ากับ -44.18 เดซิเบล จะได้พารามิเตอร์การประวิงเวลาจากค่ากำลังงานของสัญญาณสูงสุด เท่ากับ 4.76 นาโนวินาที



รูปที่ 3.3 การสร้างพารามิเตอร์สูญเสียเชิงสถิติและพารามิเตอร์การประวิงเวลาของสัญญาณแถบกว้างยิ่ง

3.4.2 การสูญเสียเชิงสถิติเฉลี่ย

พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงสถิติเฉลี่ย [13] คือการนำค่าการสูญเสียเชิงสถิติซึ่งเกิดจากสัญญาณหลายวิธีมาหาค่าเฉลี่ย กล่าวคือ นำวิธีที่เกิดขึ้นทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยนั่นเอง พารามิเตอร์ดังกล่าวถูกแสดงดังสมการที่ 3.7

$$PL_{av} = -\frac{1}{\tau_s} \int_0^{\tau_s} P_r(t) dt \tag{3.7}$$

เมื่อ PL_{av} คือ การสูญเสียเชิงสถิติเฉลี่ย
 τ_s คือ ช่วงเวลาในการพิจารณา

3.4.3 การประวิงเวลาเฉลี่ย

พารามิเตอร์การประวิงเวลาเฉลี่ย [13] คือการนำการประวิงเวลาเฉลี่ยซึ่งเกิดจากสัญญาณหลายวิธีมาหาค่าเฉลี่ย กล่าวคือ นำวิธีที่เกิดขึ้นทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเวลากันนั่นเอง พารามิเตอร์ดังกล่าวถูกแสดงดังสมการที่ 3.8

$$\tau_{av} = \frac{\int_0^{\tau_s} P_r(t) \cdot t dt}{\int_0^{\tau_s} P_r(t) dt} \tag{3.8}$$

เมื่อ τ_{av} คือ การสูญเสียเชิงสถิติเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของการหาตำแหน่งแถบกว้างยิ่งในระนาบสามมิติ

การวิเคราะห์หาความเที่ยงตรงของการหาตำแหน่งแถบกว้างยิ่งในระนาบสามมิตินั้นจะพิจารณาในเทอมของค่าความผิดพลาดของระยะทางยูคลีเดียน (Euclidean distance error) [32] โดยให้พิกัดตำแหน่ง (x_c, y_c, z_c) เป็นพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลตำแหน่งของระบบการหาตำแหน่ง และกำหนดให้พิกัดตำแหน่ง (x_e, y_e, z_e) เป็นพิกัดที่ถูกต้อง ค่าความผิดพลาดของระยะทาง e_d จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.9

$$e_d = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2 + (z_c - z_e)^2} \quad (3.9)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้ ค่าผิดพลาดระยะทางยูคลีเดียน จะถูกใช้เป็นพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของการหาตำแหน่งด้วยสัญญาณแถบกว้างยิ่ง ซึ่งถ้าระบบมีความเที่ยงตรงมาก ค่าของความผิดพลาดของระยะทางจะมีค่าน้อย แต่ถ้าระบบมีความเที่ยงตรงน้อย ค่าของความผิดพลาดของระยะทางจะมีค่ามาก

3.6 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ ซึ่งจะเป็นเรื่องของสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง ซึ่งใช้ส่ง โดยสัญญาณดังกล่าวเป็นสัญญาณซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองขึ้นตามมาตรฐาน IEEE802.15.3a ซึ่งถูกกำหนดโดย FCC ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 GHz จนถึง 10.6 GHz เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่ง จากนั้นได้กล่าวถึงสัญญาณที่รับได้ ซึ่งเกิดจากการนำสัญญาณส่งในโดเมนความถี่คูณเข้ากับช่องสัญญาณซึ่งได้จากการวัดของแต่ละตำแหน่ง ซึ่งสัญญาณที่รับได้จะไปเชื่อมโยงเข้ากับการสร้างพารามิเตอร์ ซึ่งใช้เป็นอินพุตให้กับการหาตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งได้แก่ พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึง พารามิเตอร์การประวิงเวลาของวิถีแรก พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ย และพารามิเตอร์การประวิงเวลาเฉลี่ยนั่นเอง ส่วนท้ายสุดของบทจะเป็นการวิเคราะห์หาความเที่ยงตรงของการหาตำแหน่งแถบกว้างยิ่งในระนาบสามมิติ ซึ่งเป็นการหาค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งทดสอบกับตำแหน่งซึ่งได้จากการหาตำแหน่ง ซึ่งจะถูกใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลต่อไป

บทที่ 4

การออกแบบและจัดทำกรวิจัย

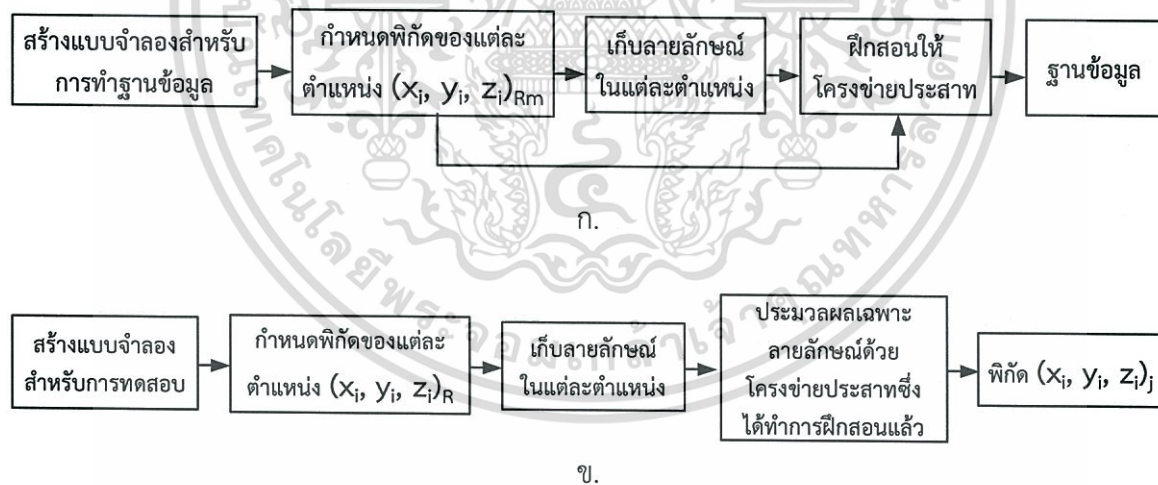
4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาท โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงการดำเนินออกแบบการทดลอง ซึ่งจะแบ่งหัวข้อออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ บล็อกไดอะแกรมของการดำเนินการ การออกแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ การออกแบบแบบจำลองการหาตำแหน่ง และการออกแบบโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี ในส่วนกลางจะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และส่วนท้ายสุดจะกล่าวถึง การออกแบบการจัดเก็บผลการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2 การดำเนินการออกแบบการทดลอง

4.2.1 บล็อกไดอะแกรมของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบสามมิติ โดยมีขั้นตอนในการวิจัยอยู่ 2 ประเด็น ได้แก่ ประเด็นแรก เป็นการจำลองการหาตำแหน่งในระนาบสามมิติ ซึ่งสามารถขยายความได้ดังรูปที่ 4.1 และประเด็นที่ 2 เป็นการวิเคราะห์และประเมินผลระบบจำลองการหาตำแหน่ง ซึ่งสามารถขยายความได้ดังรูปที่ 4.2



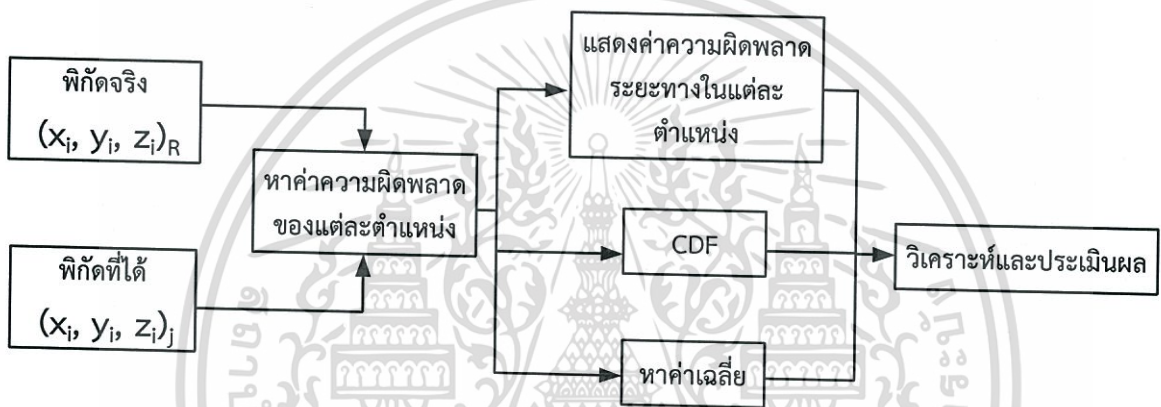
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการจำลองการหาตำแหน่งในระนาบสามมิติ

ก. การดำเนินการในการทำฐานข้อมูล

ข. การดำเนินการสำหรับการทดสอบ

จากบล็อกไดอะแกรมการจำลองการหาตำแหน่งในระนาบสามมิติ จะเห็นได้ว่าการหาตำแหน่งที่ได้จำลองขึ้นจะแบ่งเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการทำฐานข้อมูล โดยขั้นตอนการทำฐานข้อมูลจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองสำหรับการทำฐานข้อมูลก่อน ซึ่งในแบบจำลองจะทำการกำหนดพิกัดจริงไว้ จากนั้น ทำการวางพิกัดจริงที่กำหนดขึ้นในแบบจำลองในสภาวะแวดล้อมจริง แล้วทำการวัดสัญญาณที่พิกัดนั้นๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ นำผลจากการวัดช่องสัญญาณมาวิเคราะห์เป็นลายไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะในแต่ละตำแหน่งตามที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ต่อมาเป็นการนำลายลักษณะในแต่ละตำแหน่ง และ พิกัดจริงที่ได้กำหนดไว้ ผูกสอนให้กับโครงข่ายประสาทด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้จากขั้นตอนนี้ก็คือ ฐานข้อมูลของการหาตำแหน่งซึ่งเกิดจากการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาท การดำเนินการในการทำ ฐานข้อมูลได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1ก. ส่วนขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนของการทดสอบตำแหน่ง โดยในขั้นตอนนี้ จะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองสำหรับการทดสอบก่อน โดยจะทำการกำหนดพิกัดสำหรับการทดสอบให้มีความละเอียดมากกว่าพิกัดที่ใช้ทำฐานข้อมูล เป็นการแสดงให้เห็นว่า การหาตำแหน่งที่ได้จำลองขึ้นนี้ สามารถประมาณพิกัดซึ่งระบบไม่รู้จักได้ หลังจากการออกแบบแล้ว ทำการเก็บลายลักษณะ ณ ตำแหน่ง นั้นๆ จากนั้น นำเฉพาะลายลักษณะที่ได้ไปประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทที่ได้ทำการฝึกสอนแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นพิกัดซึ่งได้จากการประมาณของการหาตำแหน่งที่ได้จำลองขึ้น การดำเนินการสำหรับการทดสอบ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1ข.



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์และประเมินผล

จากบล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์และประเมินผล จะเห็นได้ว่าระบบที่ได้จำลองขึ้น จะถูกนำมา วิเคราะห์และประเมินผลโดยวิธีการเปรียบเทียบกันระหว่างพิกัดจริงซึ่งได้ถูกกำหนดขึ้นในขั้นตอนการ สร้างแบบจำลอง และพิกัดที่ได้จากการหาตำแหน่งที่ทำการจำลองขึ้นด้วยค่าความผิดพลาดระยะทางยูคลี ดีียนในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นค่าผิดพลาดดังกล่าวจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ย และแสดงในรูปแบบของ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function: CDF) เนื่องจากค่าผิดพลาดระยะทาง สูงสุด ค่ามัธยฐาน และเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดระยะทาง ซึ่งใช้เป็นตัวแสดงความแม่นยำของระบบ สามารถดูได้ง่ายจากรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม อีกทั้งค่าผิดพลาดระยะทางในแต่ละตำแหน่ง จะถูกแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินผลต่อไป

4.2.2 การออกแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ

การออกแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร จะทำการทดสอบ ณ บริเวณระเบียบทางเดิน อาคาร 12 ชั้น ชั้นที่ 3 โดยพารามิเตอร์ในการวัดช่องสัญญาณได้กำหนดไว้ เป็นดังตารางที่ 4.1

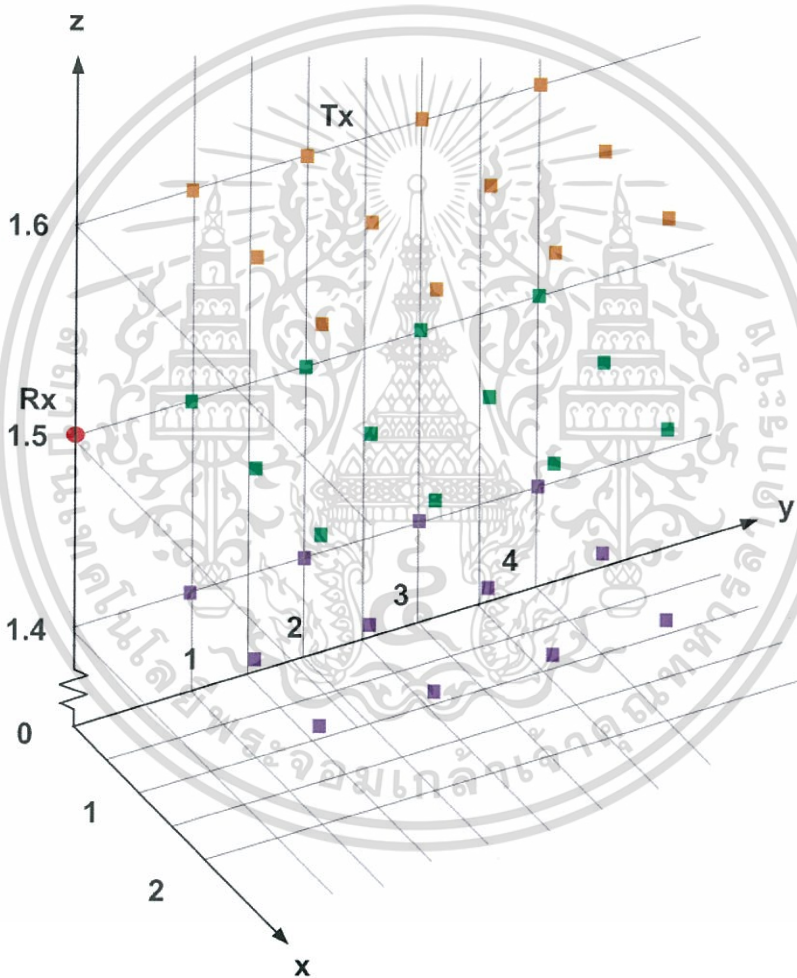
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร

| พารามิเตอร์ | ค่าที่ใช้ในการทดสอบ |
|----------------------------------|-----------------------|
| ช่วงความถี่ | 3 GHz – 11 GHz |
| จำนวนจุดความถี่ | 801 จุด |
| สายอากาศที่ใช้ในการวัดช่องสัญญาณ | สายอากาศโบโคนิคอลล |
| การวางสายอากาศด้านส่ง | แนวตั้ง |
| การวางสายอากาศด้านรับ | แนวตั้ง |
| ความสูงของสายอากาศด้านส่ง | 1.4, 1.5 และ 1.6 เมตร |
| ความสูงของสายอากาศด้านรับ | 1.5 เมตร |
| ระยะห่างระหว่างตำแหน่งฐานข้อมูล | 1 เมตร |
| ระยะห่างระหว่างตำแหน่งทดสอบ | 0.5 เมตร |

การออกแบบพารามิเตอร์ในการจำลองการวัดช่องสัญญาณภายในอาคาร โดยเลือกช่วงความถี่เป็น 3 GHz ถึง 11 GHz เนื่องจากต้องการให้ครอบคลุมช่วงความถี่ของสัญญาณแลบกว้างยิ่ง จำนวนจุดความถี่เป็น 801 จุด เนื่องจากเป็นจำนวนจุดสูงสุดที่เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์สามารถวัดได้ ซึ่งจำนวนจุดยิ่งมากจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดมากขึ้น ลักษณะการวางสายอากาศในแนวตั้ง เนื่องจากต้องการให้ลักษณะการแพร่กระจายความเข้มของสัญญาณเป็นแบบรอบทิศทาง เพื่อให้ง่ายต่อการรับส่งสัญญาณและเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์กับระบบจริง ทางด้านความสูงของสายอากาศด้านรับจะถูกกำหนดให้คงที่ที่ 1.5 เมตร และความสูงของสายอากาศด้านส่งจะถูกกำหนดให้เปลี่ยนแปลง 3 ระดับ ได้แก่ 1.4, 1.5 และ 1.6 เมตร เนื่องจากหากนำมาประยุกต์ใช้กับมนุษย์ในลักษณะที่มักนิยมใช้คือลักษณะของป้ายชื่อคีย์บอร์ด ซึ่งจากระดับความสูงของคนไทยโดยส่วนมากแล้วเมื่อนำมาคีย์บอร์ด จะมีความสูงอยู่ในช่วงนี้จากพื้น และระยะห่างระหว่างตำแหน่งฐานข้อมูล ก็ระยะห่างระหว่างตำแหน่งทดสอบ ถูกกำหนดให้ไม่เท่ากันนั้น เนื่องจากในระบบการหาตำแหน่งจริง ไม่สามารถเก็บพิกัดได้ในทุกๆ ตำแหน่ง จึงได้ทำการออกแบบระยะห่างระหว่างตำแหน่งทดสอบให้ละเอียดมากกว่าระยะห่างระหว่างตำแหน่งฐานข้อมูล เพื่อทดสอบและประเมินผลของวิธีการที่ใช้ ว่าสามารถหาตำแหน่งที่ไม่ได้มีอยู่ในฐานข้อมูลได้จริง ส่วนสายอากาศที่ใช้ในการวัดช่องสัญญาณนั้นได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.2 ต่อไป

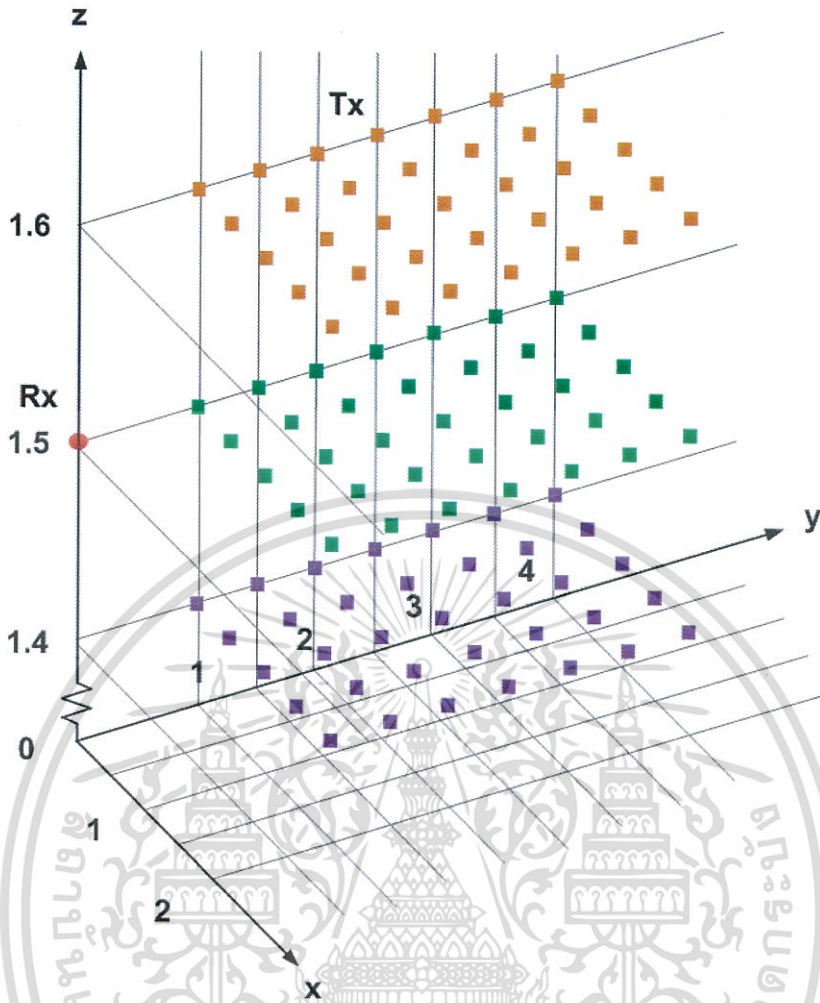
4.2.3 การออกแบบแบบจำลองการหาตำแหน่ง

ในวิทยานิพนธ์นี้ การออกแบบแบบจำลองการหาตำแหน่งจะแบ่งเป็น แบบจำลองสำหรับการทำฐานข้อมูลดังรูปที่ 4.4 โดยมีจำนวนตำแหน่งทั้งหมด 36 ตำแหน่งทั้งสามระนาบ โดยแต่ละตำแหน่งในระนาบแกน x และ y จะมีระยะห่างระหว่างจุด 1 เมตร ส่วนในระนาบแกน z จะมีระยะห่างระหว่างจุด 10 เซนติเมตร และแบบจำลองสำหรับการทดสอบ มีจำนวนตำแหน่งทั้งหมด 105 ตำแหน่งทั้งสามระนาบ แต่ละตำแหน่งในระนาบแกน x และ y จะมีระยะห่างระหว่างจุด 0.5 เมตร ส่วนในระนาบแกน z จะมีระยะห่างระหว่างจุด 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแบบจำลองสำหรับฐานข้อมูลจะมีจำนวนข้อมูลที่น้อยกว่าแบบจำลองสำหรับการทดสอบซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 อีกทั้งการใช้งานจริงเป็นไปได้ยากที่จะเก็บข้อมูลทุกๆ ตำแหน่งอีกด้วย



รูปที่ 4.4 แบบจำลองสำหรับการทำฐานข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แบบจำลองสำหรับการทดสอบ

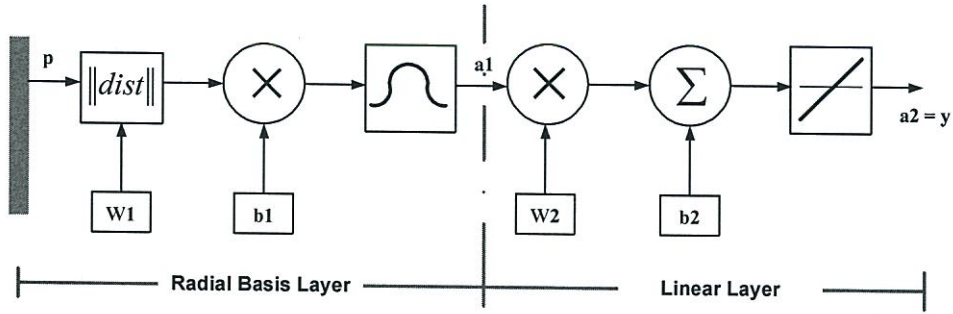
4.2.4 การออกแบบโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี

โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีเป็นอัลกอริทึมหลักที่วิทยานิพนธ์นี้นำมาใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่ง เนื่องจากโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีใช้เวลาในการเรียนรู้เร็วกว่าโครงข่ายไปข้างหน้าแบบหลายชั้นชนิดอื่นๆ อีกทั้งโครงสร้างของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีก็ไม่ซับซ้อนเท่ากับโครงข่ายไปข้างหน้าแบบหลายชั้นชนิดอื่นๆ คำน้ำหนักประสาทของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีก็เป็นคำตอบแบบปิดหรือมีค่านิ่ง อีกทั้งโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีนั้น มีความสามารถในการประมาณค่า ด้วยเหตุนี้วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีมาประยุกต์ใช้ โดยแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี และขั้นตอนการเรียนรู้ของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

4.2.4.1 การออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี

โครงสร้างของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี จะประกอบด้วย 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นซ่อน และชั้นข้อมูลขาออก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกออกแบบให้เซลล์ประสาทชั้นซ่อนแต่ละตัวมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบเกาส์เซียน และเซลล์ประสาทชั้นข้อมูลขาออกกำหนดให้ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นจะได้โครงสร้างของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีเป็นดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

การทำงานของโครงสร้างนี้คือ เมื่อมีข้อมูลขาเข้า (P) ถูกส่งเข้ามา ค่าน้ำหนักประสาท (W) ซึ่งในขั้นแรกจะถูกกำหนดค่าให้มีค่าเป็น P^T ข้อมูลขาเข้าและค่าน้ำหนักประสาทจะถูกนำมาคำนวณหาระยะห่าง จากนั้นจะถูกส่งไปคูณกับค่าไบอัส (b) ซึ่งเป็นค่าสำหรับปรับความไวของโครงข่าย ค่าที่ได้จะถูกส่งผ่านไปยังฟังก์ชันฐานรัศมีซึ่งมีสมการดังสมการที่ 2.4 ข้อมูลขาออกที่ได้จากฟังก์ชันนี้ (a_1) จึงมีค่ามากที่สุดได้เป็น 1 หรือระยะทางของข้อมูลขาเข้ากับค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0 และค่าของฟังก์ชันนี้จะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างขาเข้ากับค่าถ่วงน้ำหนักมีค่ามากขึ้น จากนั้นข้อมูลขาออกจากชั้นซ่อนนี้จะถูกกำหนดให้เป็นข้อมูลขาเข้าของชั้นข้อมูลขาออกโดยการทำงานของชั้นนี้ คือเมื่อมีข้อมูลขาเข้าเข้ามา ข้อมูลขาเข้าจะถูกนำมาคูณกับค่าน้ำหนักประสาท จากนั้นจะถูกส่งไปบวกกับค่าไบอัส (b) ค่าที่ได้จะถูกส่งผ่านไปยังฟังก์ชันแบบเส้นตรงซึ่งมีสมการดังสมการที่ 2.3 ข้อมูลขาออกที่ได้จากฟังก์ชันนี้คือ a_2

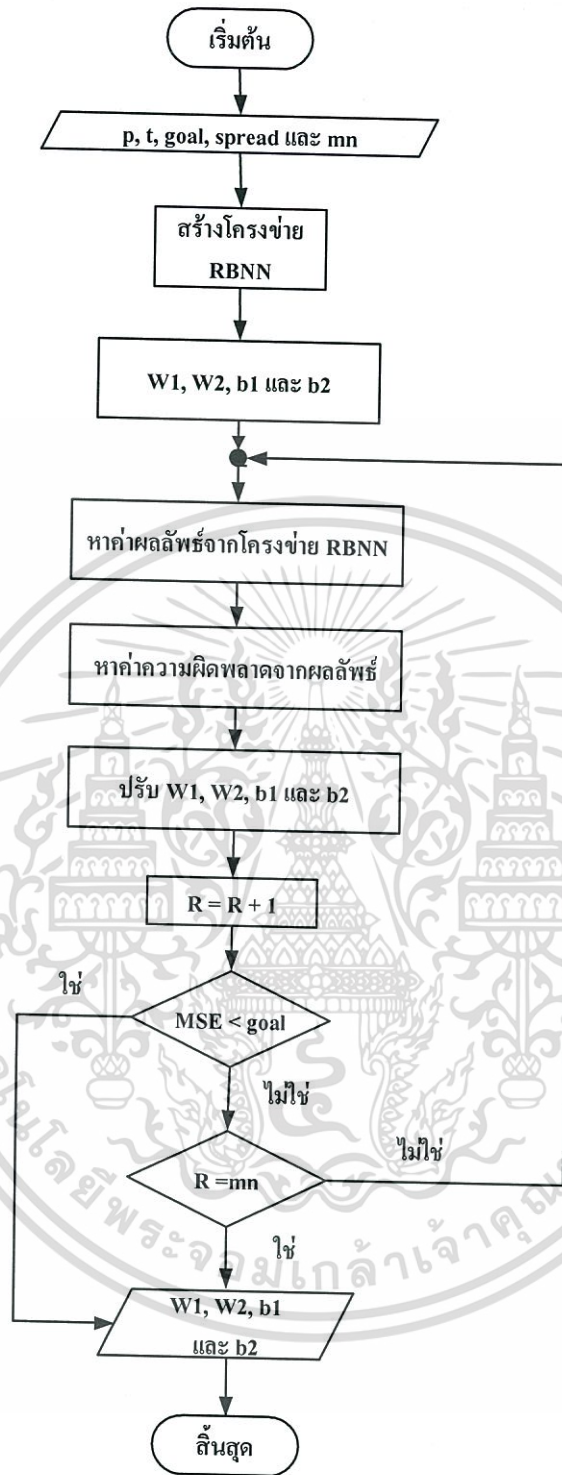
4.2.4.2 ขั้นตอนการเรียนรู้ของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี

จากการออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี การทำงานของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีนั้นมีเพียงแค่ออกแบบโครงสร้างยังไม่สามารถทำให้โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีทำงานได้ ดังนั้นการจะทำให้โครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีทำงานได้นั้น จะต้องให้โครงข่ายมีการเรียนรู้ข้อมูลก่อนที่จะนำมาใช้งาน โดยโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีมีขั้นตอนการเรียนรู้ของโครงข่าย ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งตัวแปรในรูปที่ 4.7 มีความหมายดังต่อไปนี้

| | | |
|--------|---|---|
| P | = | เวกเตอร์ข้อมูลขาเข้า (p) |
| T | = | เวกเตอร์ข้อมูลขาออก (t) |
| goal | = | ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย โดยปกติจะกำหนดให้เป็น 0 |
| spread | = | ค่าพารามิเตอร์การกระจาย |
| mn | = | จำนวนเซลล์ประสาทสูงสุด |
| R | = | จำนวนเซลล์ประสาทในโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี |
| W | = | ค่าน้ำหนักประสาทของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี |
| b | = | ไบอัสของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี |

ส่วนทางด้านการใช้งานโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีนั้น เพียงแค่ป้อนข้อมูลที่ ต้องการให้โครงข่ายหาคำตอบให้เข้าไปยังโครงข่ายที่ถูกฝึกสอนแล้วเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

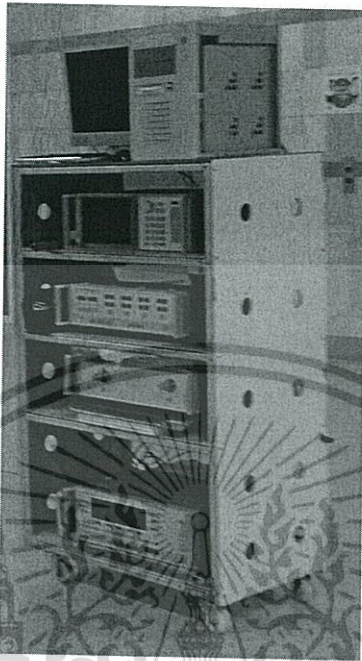


รูปที่ 4.7 การทำงานของโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมีชั้นการเรียนรู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

4.3.1 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์



รูปที่ 4.8 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวิจัย

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์มีอุปกรณ์อื่นๆประกอบอยู่ด้วยโดยรายชื่อเครื่องที่ประกอบอยู่เมื่อเรียงลำดับจากบนลงล่าง คือ

- 4.3.1.1 จอแสดงผล (Monitor)
- 4.3.1.2 ชุดทดสอบพารามิเตอร์การกระจาย (S-Parameter Test)
- 4.3.1.3 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบสองพอร์ต (Network Analyzer)
- 4.3.1.4 เครื่องสังเคราะห์ความถี่ (Synthesized Sweeper)

4.3.2 ชุด Calibrate

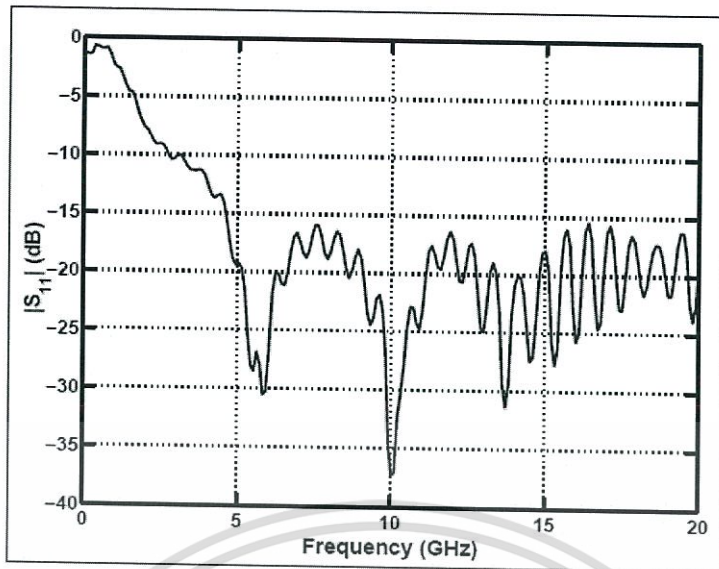
4.3.3 สายนำสัญญาณ

4.3.4 คอมพิวเตอร์

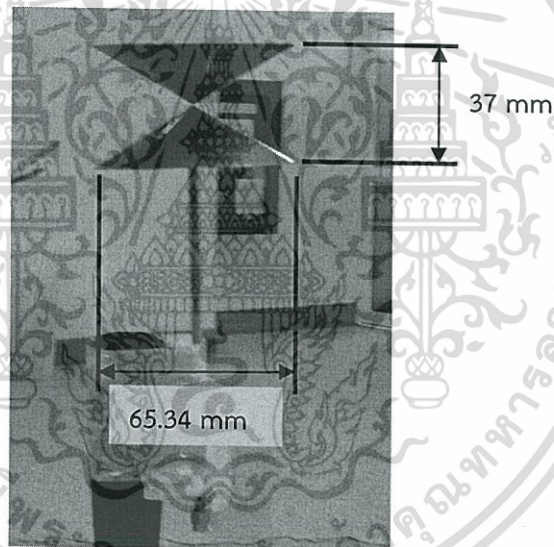
4.3.5 สายอากาศแบบกรวยคู่

คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบกรวยคู่นี้ เป็นแบบรอบทิศทางในมุมกวาด (Azimuth) มีอัตราขยาย (Gain) อยู่ในช่วง 1.5 dBi ถึง 15.0 dBi จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบกรวยคู่นี้ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ 3 GHz ถึง 11 GHz แสดงว่าสายอากาศแบบกรวยคู่มีช่วงความถี่การแผ่กระจายที่กว้างครอบคลุมช่วงความถี่ที่ใช้ทดสอบ อีกทั้งลักษณะของเฟสมีความเป็นเชิงเส้นสูง และมีสนามระยะไกล (Farfield) ที่ระยะ 0.26 เมตร โครงสร้างของสายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานของแต่ละกรวยเป็น 65.34 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างฐานกรวยทั้งสองเป็น 37 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 สายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในจำลองระบบการหาตำแหน่ง [33]

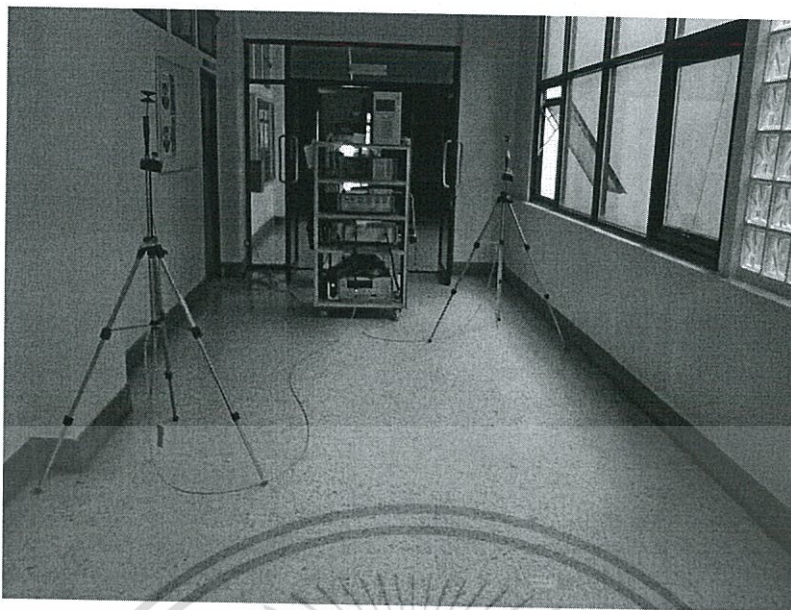


รูปที่ 4.10 สายอากาศแบบกรวยคู่ที่ใช้ในจำลองระบบการหาตำแหน่ง [33]

4.4 การออกแบบการจัดเก็บผลการทดสอบ

การออกแบบการจำลองช่องสัญญาณการแพร่กระจายแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร จะทำการเก็บผลของช่องสัญญาณทั้งหมด 11 ครั้ง โดยในผลของช่องสัญญาณ 5 ครั้งแรกจะใช้ทำฐานข้อมูล ส่วน 6 ครั้งหลังจะใช้ในการทดสอบ โดยลักษณะการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การทดสอบการจำลองช่องสัญญาณการแพร่กระจายแถบกว้างยิ่ง
สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร

4.4.1 ติดตั้งสายอากาศไบโคเนคคอล ตามพารามิเตอร์การวัดในหัวข้อที่ 4.2.2 ใช้การ Calibrate แบบ Full two-port สำหรับการเก็บผลของช่องสัญญาณ

4.4.2 จัดเก็บข้อมูลแบบจำลองสำหรับฐานข้อมูล โดยเลื่อนสายอากาศส่งไปตามตำแหน่งต่างๆ ตามแบบจำลองการทำฐานข้อมูลที่ละเอียด

4.4.3 จัดเก็บผลการทดสอบในแต่ละตำแหน่งเป็นฐานข้อมูล

4.4.4 จัดเก็บข้อมูลแบบจำลองสำหรับการทดสอบ โดยเลื่อนสายอากาศส่งไปตามตำแหน่งต่างๆ ตามแบบจำลองสำหรับการทดสอบที่ละเอียด

4.4.5 จัดเก็บผลการทดสอบในแต่ละตำแหน่งเป็นข้อมูลสำหรับการทดสอบ

4.4.6 ทำซ้ำในข้อที่ 4.4.1 ถึงข้อที่ 4.4.6 ใหม่อีก 10 ครั้ง

4.4.7 นำข้อมูลจากฐานข้อมูลข้อที่ 3 และข้อมูลจากการทดสอบข้อที่ 5 มาวิเคราะห์ตำแหน่ง และจัดเก็บผลการทดสอบ

4.4.8 จัดเก็บผลการทดสอบ

4.4.9 วิเคราะห์และประเมินผลของระบบจำลองการหาตำแหน่ง

4.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง การออกแบบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาท โดยได้กล่าวถึงการดำเนินออกแบบการทดลอง ซึ่งแบ่งหัวข้อออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ บล็อกไดอะแกรมของการดำเนินการ การออกแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ การออกแบบแบบจำลองการหาตำแหน่ง และการออกแบบโครงข่ายฟังก์ชันฐานรัศมี จากนั้นได้กล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และในหัวข้อสุดท้ายได้กล่าวถึง การออกแบบการจัดเก็บผลการทดสอบ ซึ่งนำไปสู่การได้ผลการทดสอบในบทถัดไปนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองวิจัย

5.1 บทนำ

จากการการออกแบบการจำลองห้องสัญญาณการแพร่กระจายแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารในบทที่ 4 ได้มีการดำเนินการจัดเก็บผลการทดสอบ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร และผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตามด้วยการประเมินผล และจบท้ายด้วยสรุป ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร

ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร ในขั้นแรกได้ทำการแสดงผลแยกแยะเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในแต่ละแกน ผลที่ได้จะถูกแสดงในรูปแบบของตาราง จากนั้นจึงได้แสดงผลเป็นค่าผิดพลาดระยะทางในรูปของ CDF เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์หาค่ามัธยฐานของความผิดพลาดระยะทาง ความผิดพลาดระยะทางสูงสุดของการหาตำแหน่งระหว่างตำแหน่งทดสอบและตำแหน่งจริง และค่าความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร

5.2.1 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 1

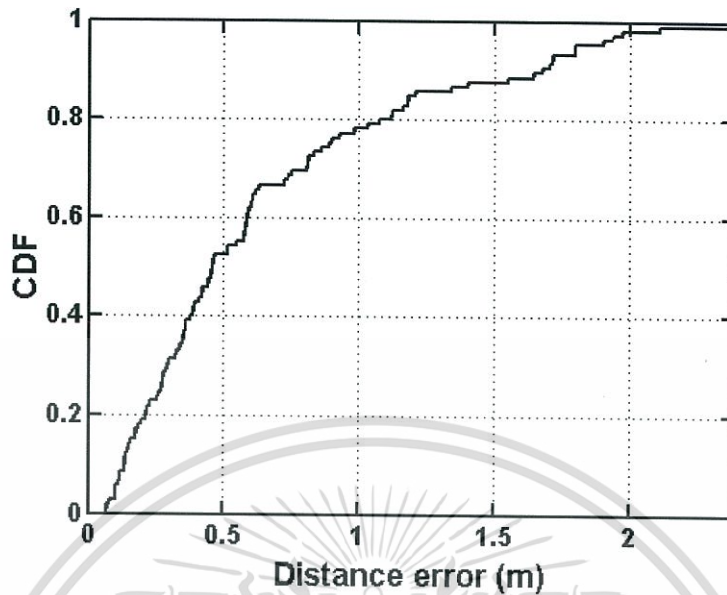
ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 1 ค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y, z และทั้งสามระนาบได้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 1

| แนวแกน | ค่าเฉลี่ยของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | มัธยฐานของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | ค่าผิดพลาด ระยะทางสูงสุด (เมตร) |
|---------|--|--|---------------------------------------|
| x | 0.56 | 0.40 | 2.17 |
| y | 0.28 | 0.23 | 0.99 |
| z | 0.07 | 0.08 | 0.17 |
| 3 ระนาบ | 0.66 | 0.46 | 2.39 |

จากตารางบันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 1 พบว่าค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกนของการหาตำแหน่งอยู่ในแนวแกน x มากที่สุด และผลของค่าความผิดพลาดทั้ง 3 ระนาบได้แสดงในรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 1)

จากรูปที่ 5.1 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 1) พบว่า ค่าความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร มีค่าเป็น 79.05% ของข้อมูลทดสอบทั้งหมด

5.2.2 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 2

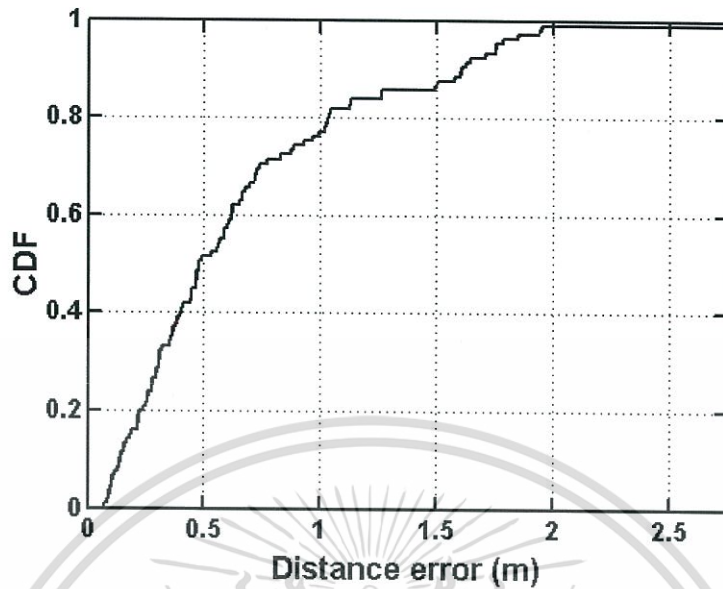
ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 2 ค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y, z และทั้งสามระนาบได้แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 2

| แนวแกน | ค่าเฉลี่ยของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | มัธยฐานของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | ค่าผิดพลาด ระยะทางสูงสุด (เมตร) |
|---------|--|--|---------------------------------------|
| X | 0.57 | 0.42 | 2.46 |
| Y | 0.28 | 0.22 | 1.21 |
| Z | 0.07 | 0.08 | 0.16 |
| 3 ระนาบ | 0.67 | 0.48 | 2.75 |

จากตารางบันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 2 พบว่าค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกนของการหาตำแหน่งอยู่ในแนวแกน x มากที่สุด และผลของค่าความผิดพลาดทั้ง 3 ระนาบได้แสดงในรูปที่ 5.2

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 2)

จากรูปที่ 5.2 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 2) พบว่า ค่าความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร มีค่าเป็น 78.10% ของข้อมูลทดสอบทั้งหมด

5.2.3 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 3

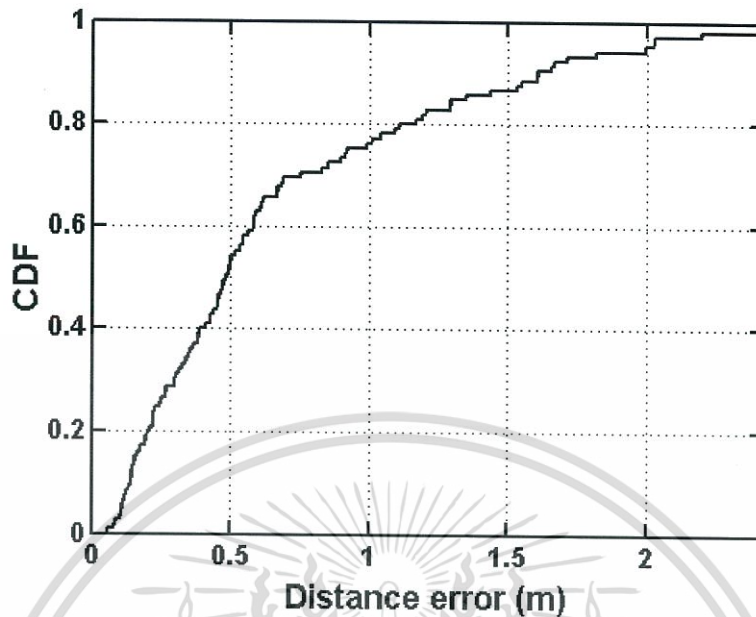
ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 3 ค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y, z และทั้งสามระนาบได้แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 3

| แนวแกน | ค่าเฉลี่ยของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | มัธยฐานของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | ค่าผิดพลาด ระยะทางสูงสุด (เมตร) |
|---------|--|--|---------------------------------------|
| x | 0.58 | 0.42 | 2.19 |
| y | 0.29 | 0.22 | 1.16 |
| z | 0.07 | 0.07 | 0.18 |
| 3 ระนาบ | 0.68 | 0.48 | 2.42 |

จากตารางบันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 3 พบว่าค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกนของการหาตำแหน่งอยู่ในแนวแกน x และผลของค่าความผิดพลาดทั้ง 3 ระนาบได้แสดงในรูปที่ 5.3

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 3)

จากรูปที่ 5.3 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 3) พบว่า ค่าความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร มีค่าเป็น 77.14% ของข้อมูลทดสอบทั้งหมด

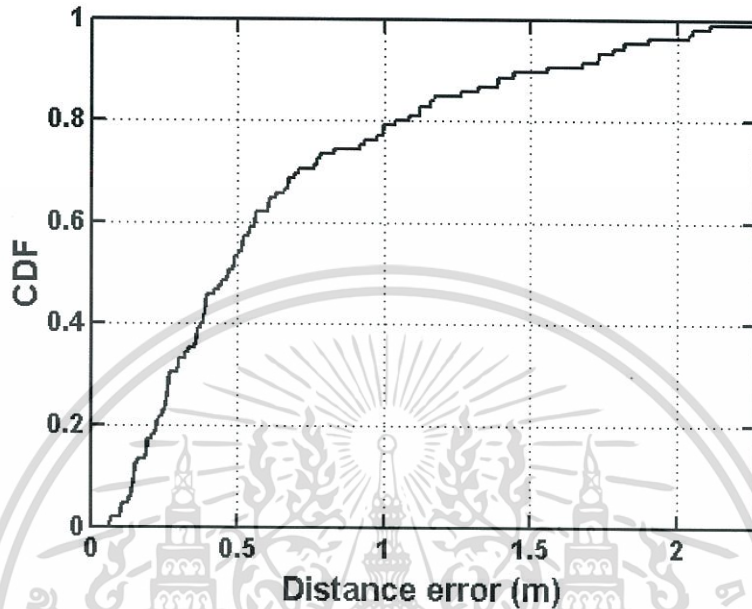
5.2.4 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 4

ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 4 ค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y, z และทั้งสามระนาบได้แสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 4

| แนวแกน | ค่าเฉลี่ยของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | มัธยฐานของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | ค่าผิดพลาด ระยะทางสูงสุด (เมตร) |
|---------|--|--|---------------------------------------|
| x | 0.55 | 0.39 | 2.06 |
| y | 0.27 | 0.22 | 0.95 |
| z | 0.08 | 0.08 | 0.18 |
| 3 ระนาบ | 0.65 | 0.47 | 2.27 |

จากตารางบันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 4 พบว่าค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกนของการหาตำแหน่งอยู่ในแนวแกน x และผลของค่าความผิดพลาดทั้ง 3 ระนาบได้แสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 4)

จากรูปที่ 5.4 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 4) พบว่า ค่าความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร มีค่าเป็น 79.05% ของข้อมูลทดสอบทั้งหมด

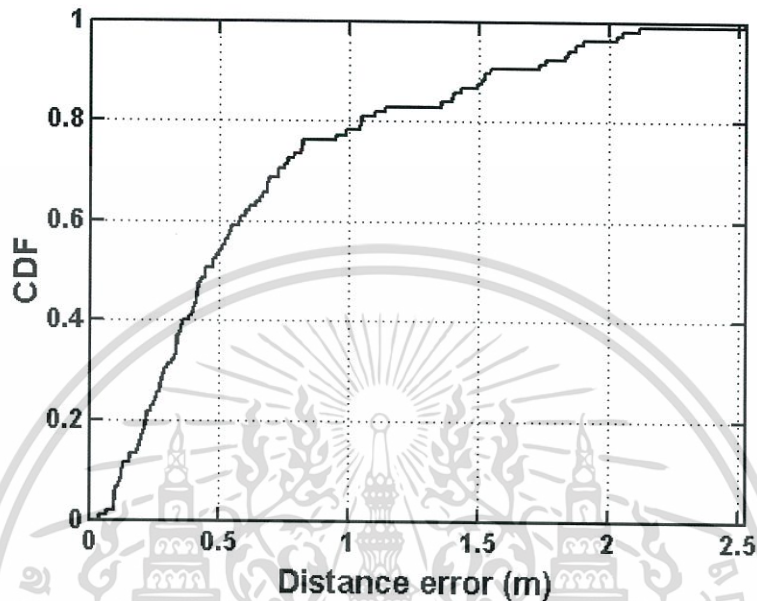
5.2.5 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 5

ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 5 ค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y, z และทั้งสามระนาบได้แสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 5

| แนวแกน | ค่าเฉลี่ยของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | มัธยฐานของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | ค่าผิดพลาด ระยะทางสูงสุด (เมตร) |
|---------|--|--|---------------------------------------|
| x | 0.57 | 0.39 | 2.26 |
| y | 0.27 | 0.22 | 1.12 |
| z | 0.07 | 0.08 | 0.17 |
| 3 ระนาบ | 0.66 | 0.44 | 2.53 |

จากตารางบันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 5 พบว่าค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกนของการหาตำแหน่งอยู่ในแนวแกน x และผลของค่าความผิดพลาดทั้ง 3 ระนาบได้แสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 5)

จากรูปที่ 5.5 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 5) พบว่า ค่าความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร มีค่าเป็น 78.10% ของข้อมูลทดสอบทั้งหมด

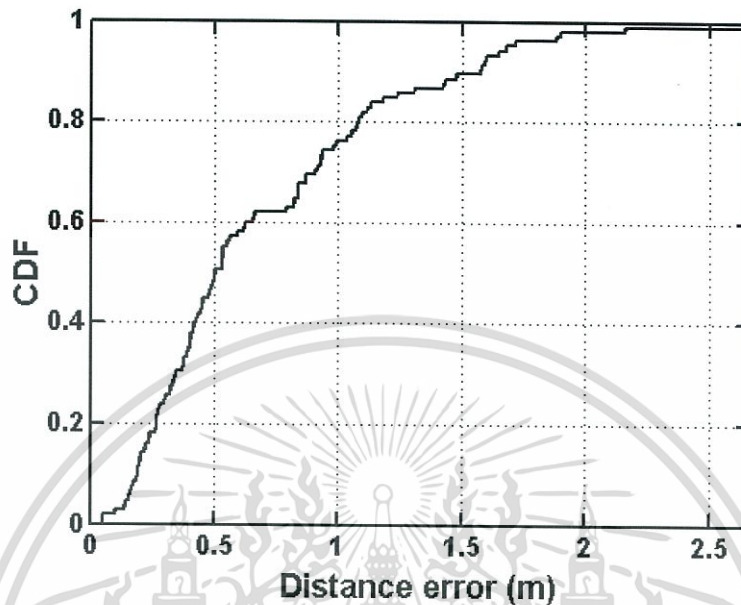
5.2.6 ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 6

ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 3 ค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y, z และทั้งสามระนาบได้แสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z การทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 6

| แนวแกน | ค่าเฉลี่ยของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | มัธยฐานของ ความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | ค่าผิดพลาด ระยะทางสูงสุด (เมตร) |
|---------|--|--|---------------------------------------|
| x | 0.59 | 0.46 | 2.43 |
| Y | 0.30 | 0.22 | 1.08 |
| Z | 0.07 | 0.07 | 0.20 |
| 3 ระนาบ | 0.70 | 0.50 | 2.67 |

จากตารางบันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารครั้งที่ 6 พบว่าค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกนของการหาตำแหน่งอยู่ในแนวแกน x และผลของค่าความผิดพลาดทั้ง 3 ระนาบได้แสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 6)

จากรูปที่ 5.6 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 6) พบว่า ค่าความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร มีค่าเป็น 76.19% ของข้อมูลทดสอบทั้งหมด

5.2.7 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร

จากผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารทั้ง 6 ครั้ง ค่าความผิดพลาดระยะทางตามแนวแกน x, y และ z และค่าความผิดพลาดระยะทางและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความผิดพลาดระยะทางต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 บันทึกค่าเฉลี่ยความผิดพลาดระยะทางต่างๆ รวมทั้งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลนั้นๆจากการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารทั้ง 6 ครั้ง

| ค่าความผิดพลาดระยะทาง | ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาด (เมตร) | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร) | ค่าเฉลี่ยของมัธยฐานของค่าผิดพลาด (เมตร) | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร) | ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดระยะทางสูงสุด (เมตร) | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร) |
|-----------------------|--|----------------------------|---|----------------------------|--|----------------------------|
| ในแนวแกน x | 0.57 | 0.0120 | 0.41 | 0.0267 | 2.26 | 0.1566 |
| ในแนวแกน y | 0.28 | 0.0096 | 0.22 | 0.0055 | 1.09 | 0.1016 |
| ในแนวแกน z | 0.07 | 0.0011 | 0.08 | 0.0037 | 0.18 | 0.0143 |
| ทั้ง 3 ระนาบ | 0.67 | 0.0168 | 0.47 | 0.0204 | 2.50 | 0.1794 |

จากตารางที่ 5.7 พบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยค่าความผิดพลาดจากการทดสอบทั้ง 6 ครั้งทั้ง 3 ระบาย มีค่า 0.67 เมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0168 เมตร ค่าเฉลี่ยของมัธยฐานค่าความผิดพลาด มีค่า 0.47 เมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.0204 เมตร และค่าเฉลี่ยค่าผิดพลาดระยะทางสูงสุด มีค่า 2.50 เมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.01794 เมตร จะเห็นได้ว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อย แสดงว่าผลการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการวัดแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกันมาก

5.2.8 การวิเคราะห์ผล CDF ของค่าความผิดพลาดระยะทางการทดสอบครั้งที่ 1-6 เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร แสดงดังตารางที่ 8

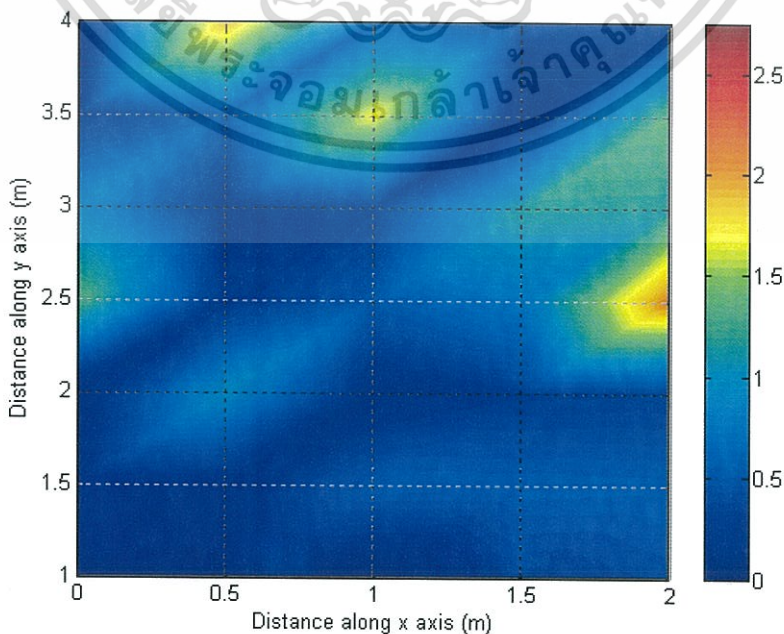
ตารางที่ 5.8 บันทึกผล CDF ของค่าความผิดพลาดระยะทางการทดสอบครั้งที่ 1-6 เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร

| การทดสอบ (ครั้ง) | ความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร (คิดเป็น %) |
|------------------|--|
| ครั้งที่ 1 | 79.05 |
| ครั้งที่ 2 | 78.10 |
| ครั้งที่ 3 | 77.14 |
| ครั้งที่ 4 | 79.05 |
| ครั้งที่ 5 | 78.10 |
| ครั้งที่ 6 | 76.19 |
| รวมครั้งที่ 1-6 | 77.94 |

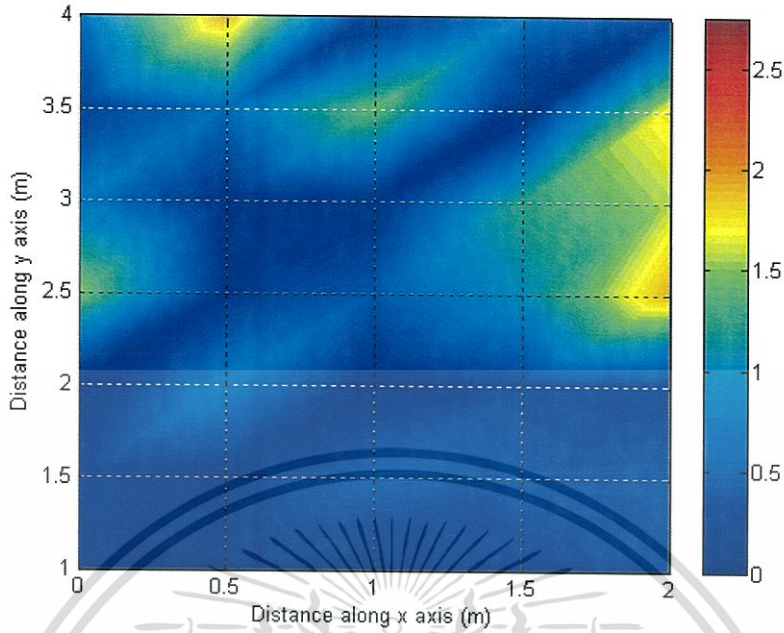
จากตารางที่ 5.8 และจากรูปที่ 5.1-5.6 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง (การทดสอบครั้งที่ 1-6) พบว่า ค่าความแม่นยำของการหาตำแหน่งในช่วง 1 เมตร มีค่าเฉลี่ย 6 ครั้งเท่ากับ 77.94 %

5.3 ผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารในแต่ละตำแหน่ง

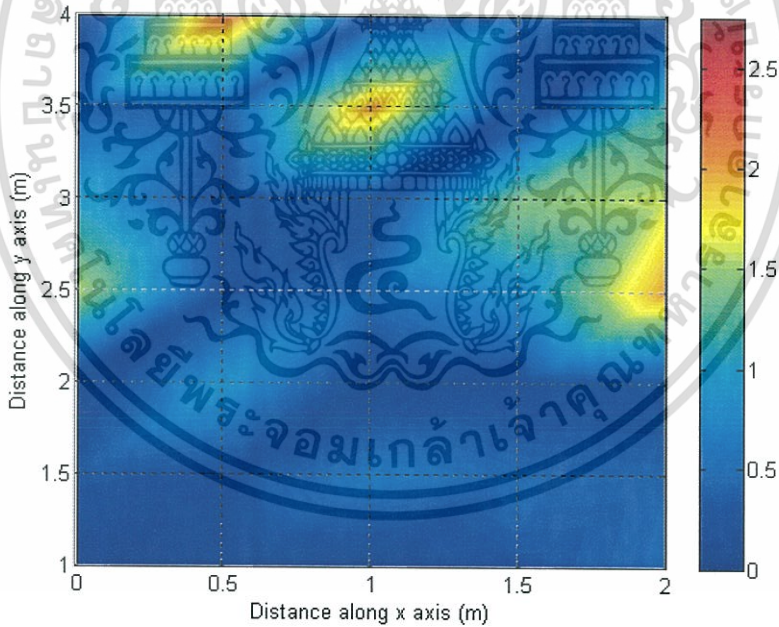
5.3.1 ผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้นเพื่อออกนอกระบบหากนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย
รูปที่ 5.7 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 1
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

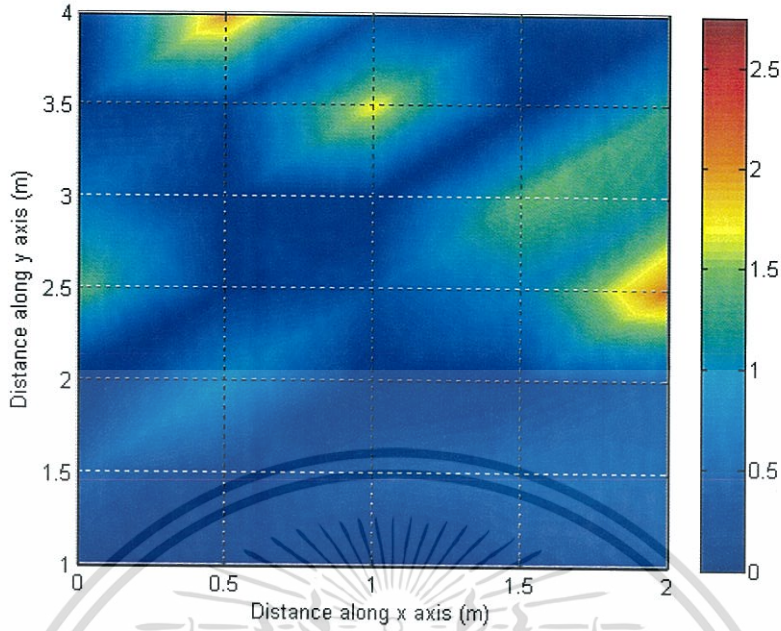


รูปที่ 5.8 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 2

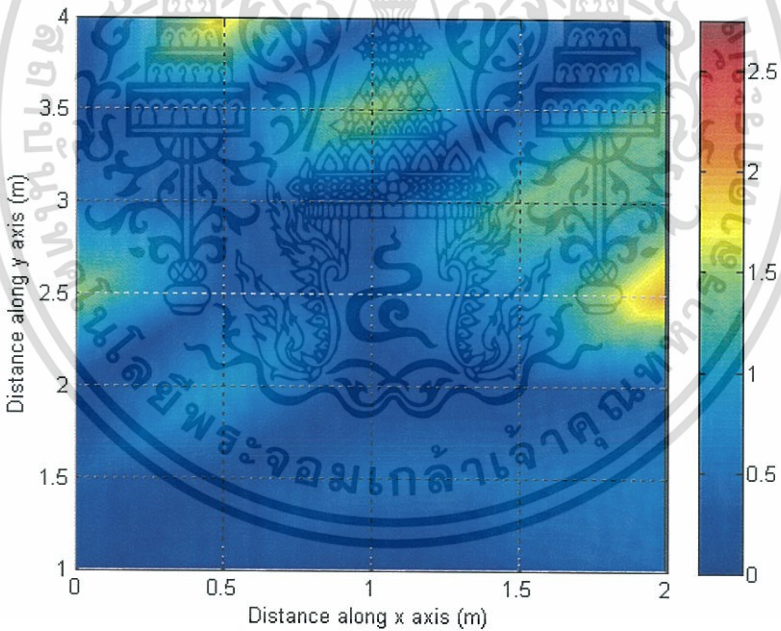


รูปที่ 5.9 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

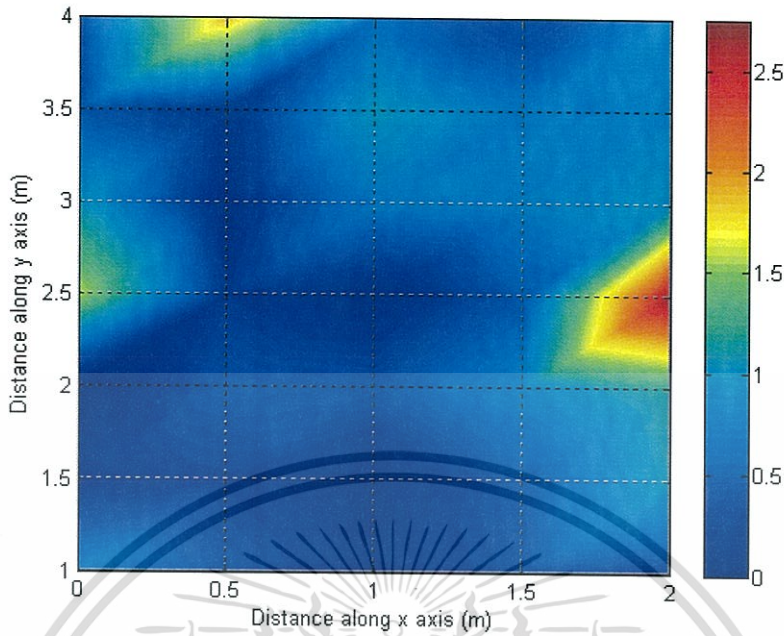


รูปที่ 5.10 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาดำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 4



รูปที่ 5.11 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาดำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 5

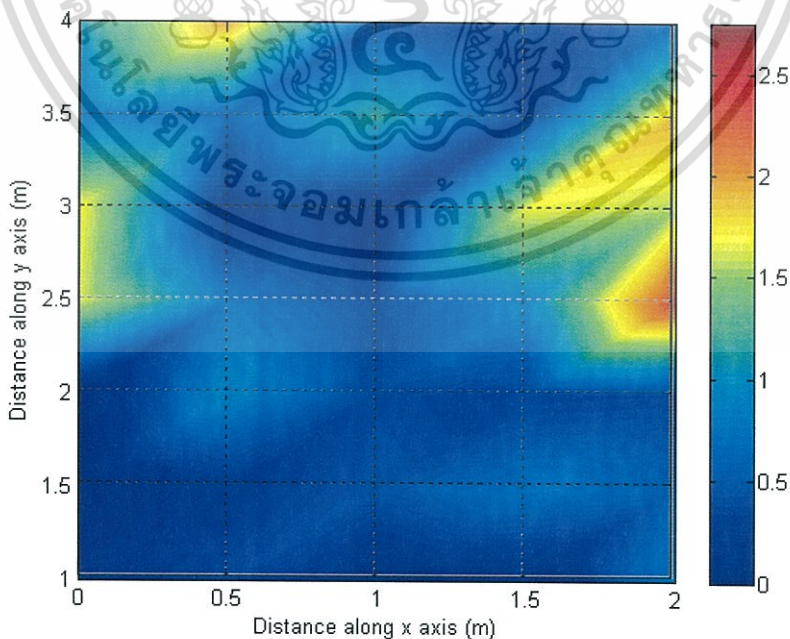
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ครั้งที่ 6

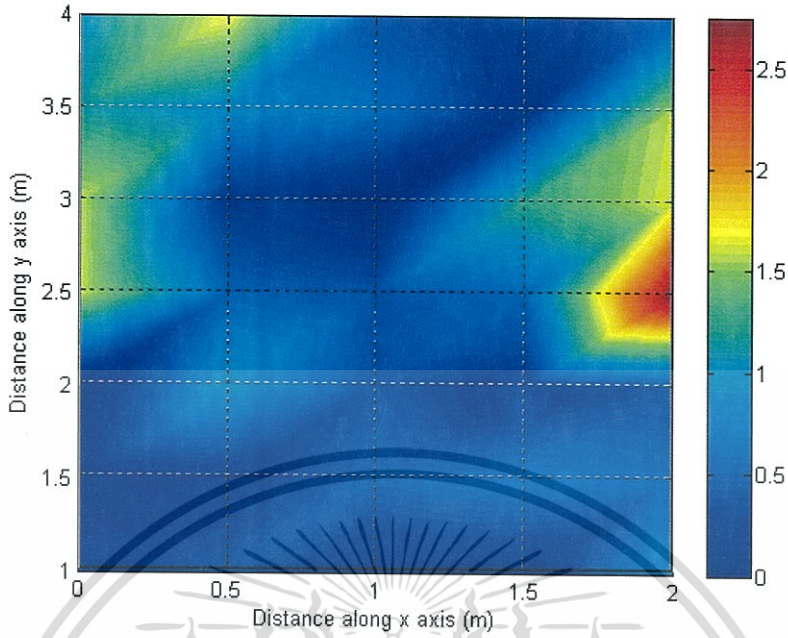
จากผลค่าความผิดพลาดระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.4$ เมตร ทั้ง 6 ครั้งการทดสอบ พบว่า ความผิดพลาดระยะทางที่สูงส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในบริเวณส่วนท้ายและทางด้านข้างของแบบจำลอง

5.3.2 ผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร

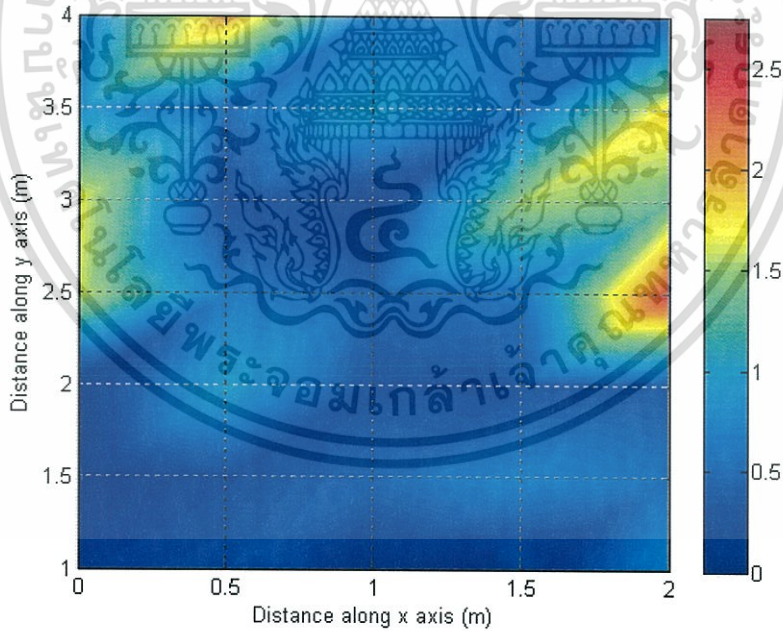


รูปที่ 5.13 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

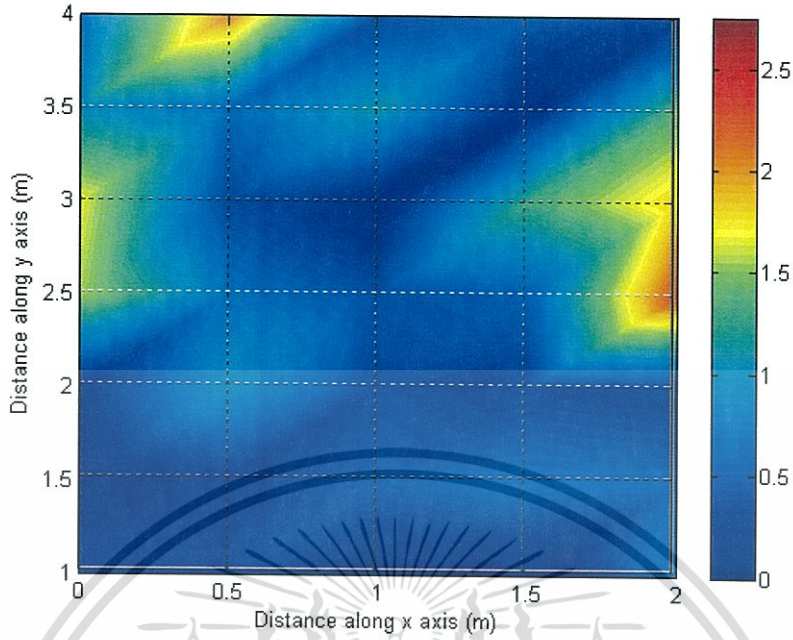


รูปที่ 5.14 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 2

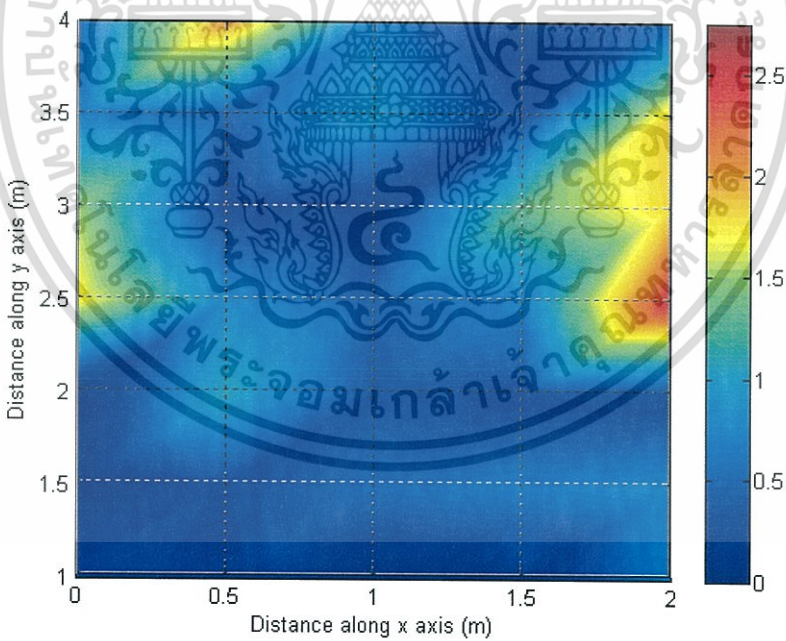


รูปที่ 5.15 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

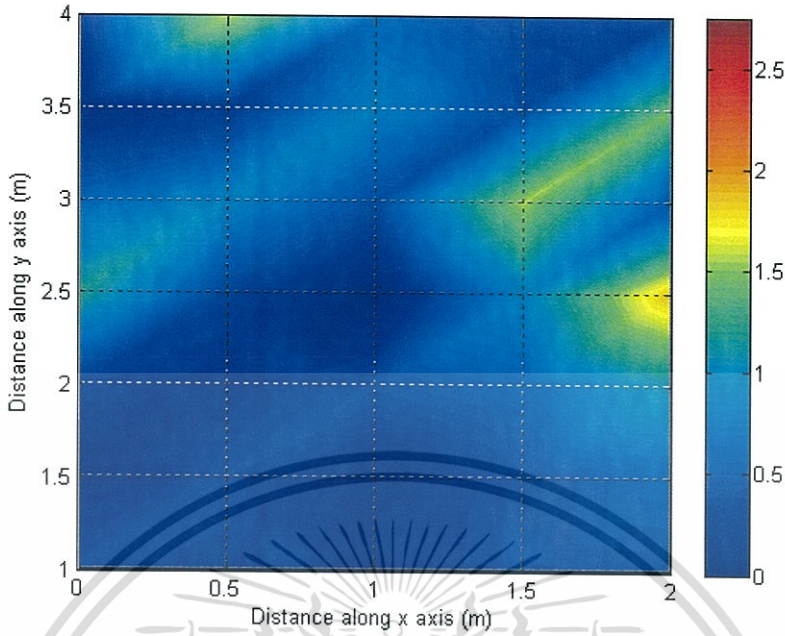


รูปที่ 5.16 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาดำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 4



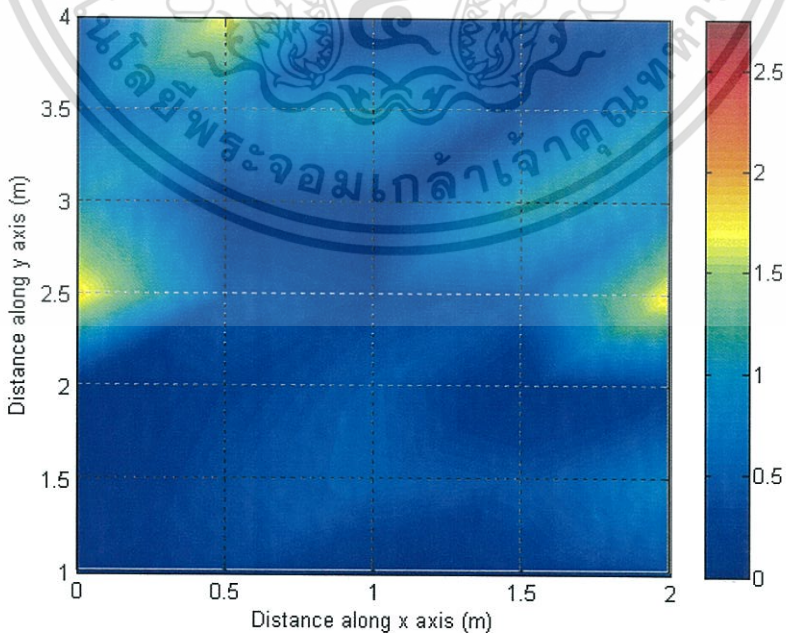
รูปที่ 5.17 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาดำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

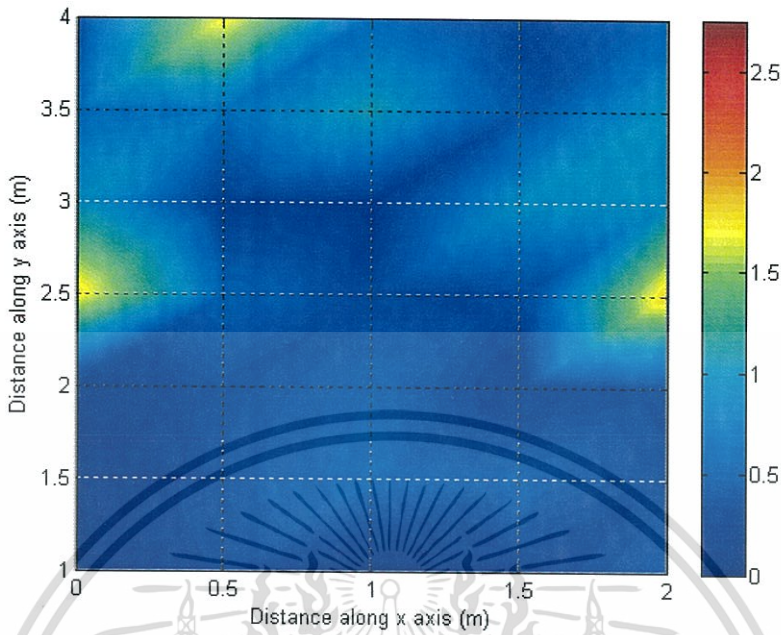


รูปที่ 5.18 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 6 จากผลค่าความผิดพลาดระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.5$ เมตร ทั้ง 6 ครั้งการทดสอบ พบว่า ความผิดพลาดระยะทางที่สูงส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในบริเวณส่วนท้าย และทางด้านข้างของแบบจำลอง

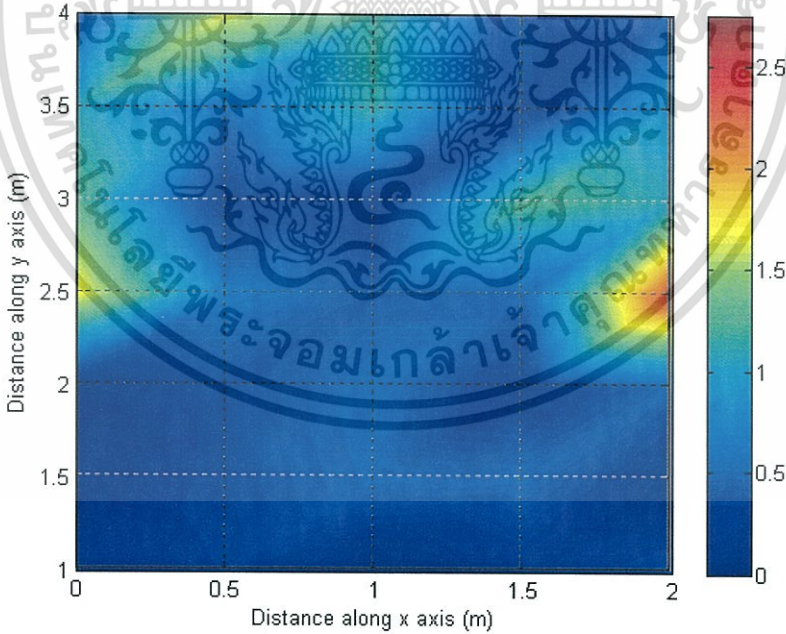
5.3.3 ผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร



รูปที่ 5.19 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

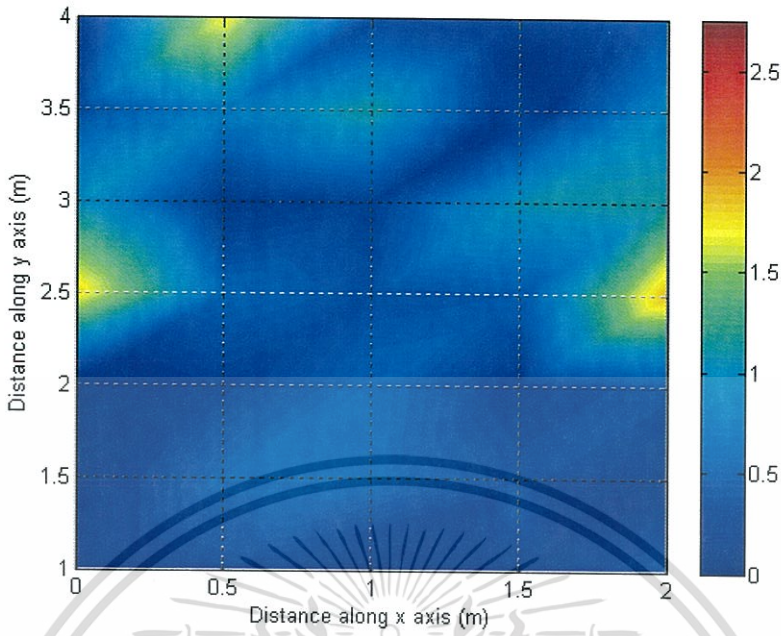


รูปที่ 5.20 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 2

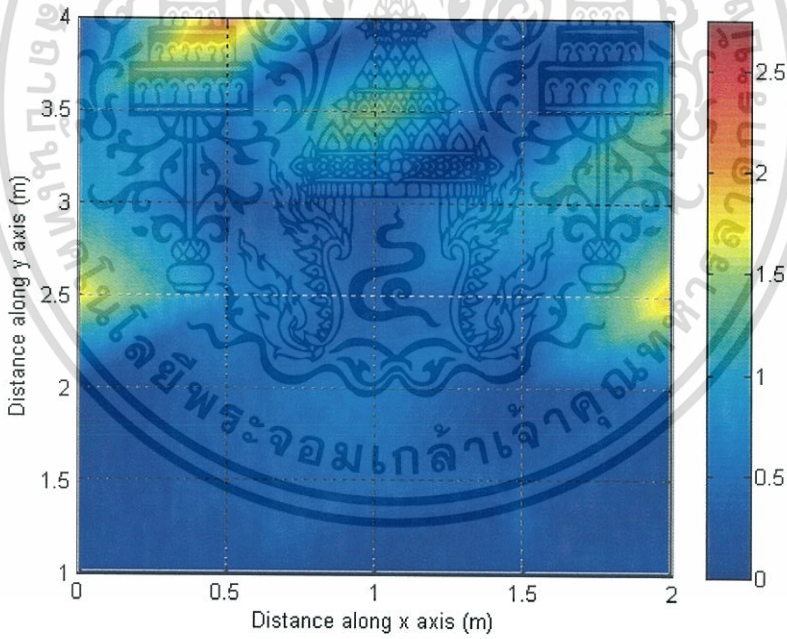


รูปที่ 5.21 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

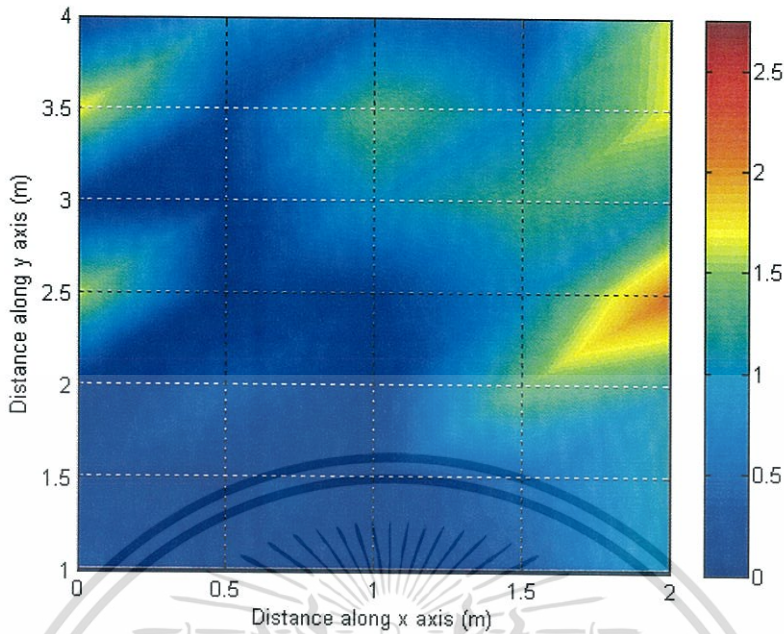


รูปที่ 5.22 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 4



รูปที่ 5.23 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ครั้งที่ 6

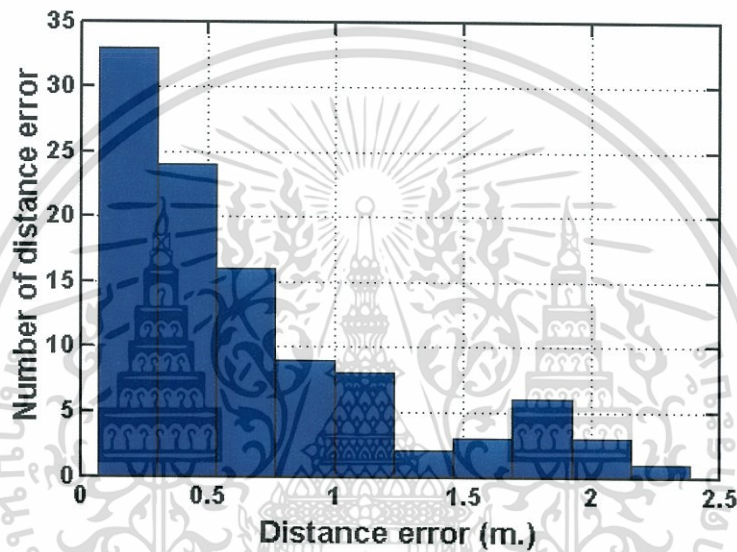
จากรูปที่ 5.24 ผลค่าความผิดพลาดระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคารเมื่อ $z = 1.6$ เมตร ทั้ง 6 ครั้งการทดสอบ พบว่า ความผิดพลาดระยะทางที่สูงส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในบริเวณส่วนท้ายและทางด้านข้างของแบบจำลอง

จากผลการค่าความผิดพลาดระยะทางของการหาตำแหน่งภายในอาคาร ทั้ง 3 หัวข้อที่ผ่านมา พบว่า ตำแหน่งซึ่งเกิดค่าความผิดพลาดระยะทางที่สูงส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อสายอากาศส่ง มีความสูงเท่ากับ 1.5 เมตรจากระดับพื้นดิน แต่เนื่องจากระดับความสูงในตอนออกแบบเปลี่ยนแปลงไม่มาก ในวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการวิเคราะห์ในเรื่องนี้ยังไม่ได้ข้อมูลไม่เพียงพอ และค่าผิดพลาดระยะทางซึ่งมีค่ามากจะเกิดขึ้นบริเวณส่วนท้ายด้านซ้าย และทางด้านข้างของแบบจำลองในทุกๆ ระดับความสูง

5.4 วิเคราะห์ผลการจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบสามมิติ

5.4.1 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของค่ากลางความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคาร

จากตารางที่ 5.6 จะเห็นได้ว่า ได้ทำการแสดงค่ากลางทั้งค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยเลขคณิต และค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยค่ามัธยฐาน เนื่องด้วยการกระจายของข้อมูลเป็นการกระจายแบบไม่ปกติ ยกตัวอย่าง เช่น รูปที่ 5.25 แสดงการกระจายของค่าผิดพลาดระยะทางในรูปแบบของกราฟแท่ง จากรูปจะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะเบ้ไปทางขวา ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยค่ามัธยฐานจึงเป็นค่ากลางที่เหมาะสมสำหรับการประเมินผลของระบบนั่นเอง

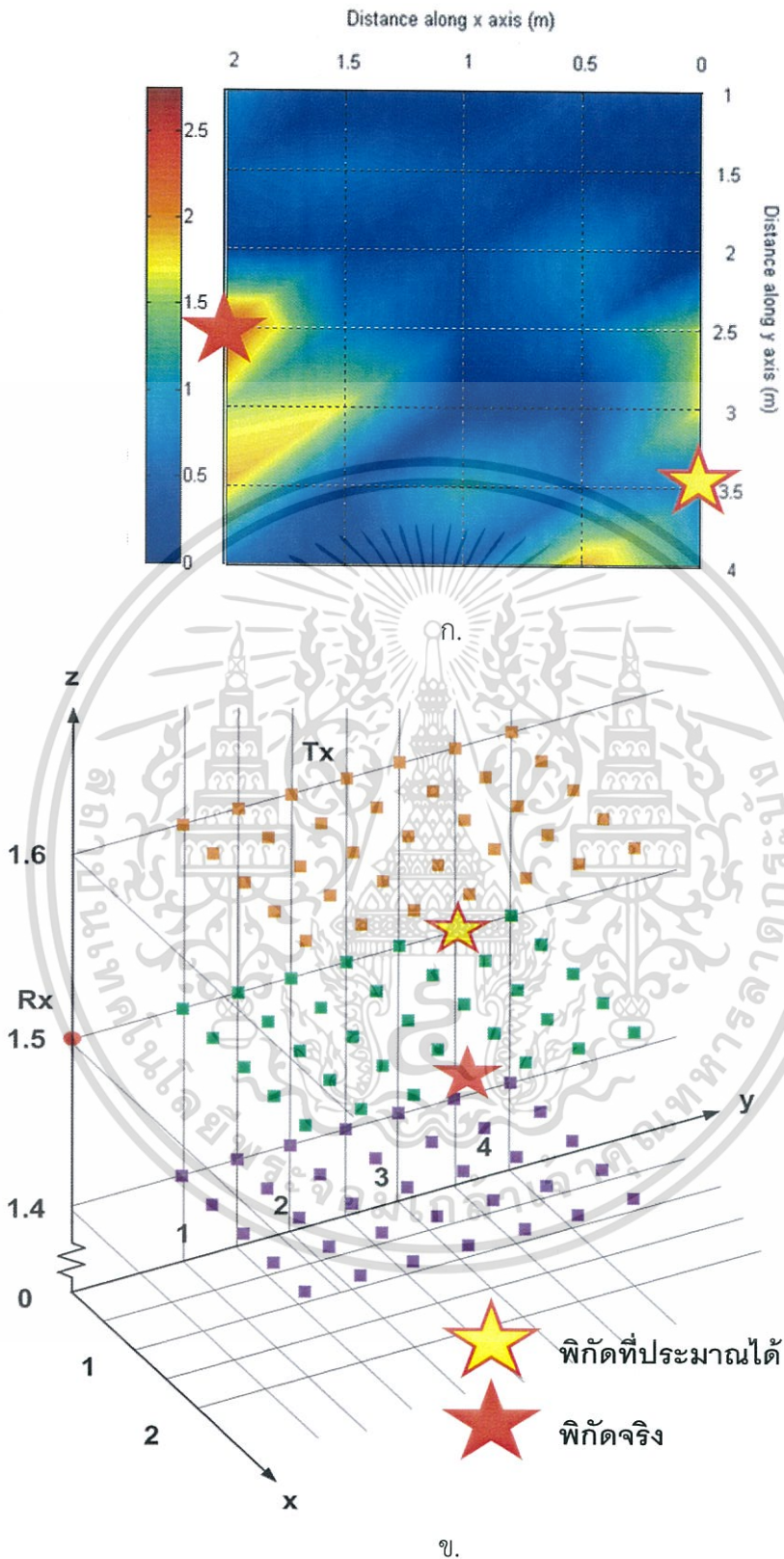


รูปที่ 5.25 การกระจายของค่าผิดพลาดระยะทางในรูปแบบของกราฟแท่ง

5.4.2 วิเคราะห์สาเหตุค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคาร จากค่าความแปรปรวนของตำแหน่ง

จากผลการจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบสามมิติที่ผ่านมา พบว่า ตำแหน่งซึ่งเกิดค่าความผิดพลาดระยะทางที่สูงส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อสายอากาศส่ง มีความสูงเท่ากับ 1.5 เมตรจากระดับพื้นดิน และค่าผิดพลาดระยะทางซึ่งมีค่ามากจะเกิดขึ้นในบริเวณส่วนท้ายของแบบจำลองของการทดลองในทุกๆ ระดับความสูง เมื่อได้ทำการตรวจดูในตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูง เช่น ตำแหน่งจริงที่ (2, 3.5, 1.5) ตำแหน่งที่ได้จากการทดสอบ คือ ตำแหน่ง (0.19, 4.18, 1.51) มีสาเหตุเนื่องมาจากพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณบริเวณนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจมีผลมาจากค่าความไวในการส่งรับสัญญาณของสายอากาศ หรืออื่นๆ เป็นต้น

ทำการตรวจสอบในตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูง เช่น ตำแหน่งจริงที่ (2, 2.5, 1.5) ตำแหน่งที่ได้จากการทดสอบ คือ ตำแหน่ง (0.17, 3.48, 1.53)



รูปที่ 5.26 ตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูงจากการหาตำแหน่งภายในอาคาร
เมื่อ $z = 1.5$ เมตร ครั้งที่ 1

ก. ตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดระยะทางสูงในรูปของกราฟพื้นผิว

ข. ตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดระยะทางสูงในรูปของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.26ก. จะเห็นได้ว่าตำแหน่งซึ่งกราฟพื้นผิวเป็นสีแดง นั่นคือ มีค่าความผิดพลาดสูงคือ ตำแหน่งจริงที่ (2, 2.5, 1.5) กำหนดสัญลักษณ์เป็นดาวสีแดง จากนั้นทำการตรวจสอบตำแหน่งที่ได้จากการทดสอบ คือ ตำแหน่ง (0.17, 3.48, 1.53) กำหนดสัญลักษณ์เป็นดาวสีเหลือง เมื่อลองเทียบกับตำแหน่งจากแบบจำลองดังรูปที่ 5.26ข. หรือรูปที่ 5.27 พบว่า ตำแหน่งทั้งคู่เป็นตำแหน่งที่อยู่ขอบด้านข้างของแบบจำลอง แต่กลับด้านซ้ายและขวากัน วิเคราะห์ผลที่ได้โดยการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของทั้งสองจุด แต่ตำแหน่ง (0.17, 3.48, 1.53) ซึ่งได้จากการทดสอบนั้น ไม่มีข้อมูลพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงได้ทำการประมาณเป็นตำแหน่งซึ่งใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ได้จากการทดสอบซึ่งคือ ตำแหน่ง (0, 3.5, 1.5) ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำการเทียบกันแสดงดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 พารามิเตอร์ ณ ตำแหน่งจริง (2, 2.5, 1.5) เทียบกับตำแหน่ง (0, 3.5, 1.5) ที่ประมาณได้ จากการทดสอบทั้ง 6 ครั้ง

| | | พารามิเตอร์ | ครั้งที่ 1 | | ครั้งที่ 2 | | ครั้งที่ 3 | |
|-----------|----------------------------|------------------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| | | | พิกัดจริง | | พิกัดจริง | | พิกัดจริง | |
| พิกัดจริง | พิกัดใกล้เคียงที่ประมาณได้ | $PL_m (dB)$ | 54.83 | 54.15 | 55.05 | 53.92 | 54.82 | 54.08 |
| 2 | 0 | $PL_{av} (dB)$ | 50.71 | 50.53 | 50.67 | 50.53 | 50.67 | 50.52 |
| 2.5 | 3.5 | $t_m (ns)$ | 12.11 | 13.08 | 12.11 | 13.08 | 12.11 | 13.08 |
| 1.5 | 1.5 | $\tau_{av} (ns)$ | 15.38 | 15.80 | 15.60 | 15.80 | 15.44 | 15.92 |

| | | พารามิเตอร์ | ครั้งที่ 4 | | ครั้งที่ 5 | | ครั้งที่ 6 | |
|-----------|----------------------------|------------------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| | | | พิกัดจริง | | พิกัดจริง | | พิกัดจริง | |
| พิกัดจริง | พิกัดใกล้เคียงที่ประมาณได้ | $PL_m (dB)$ | 54.88 | 53.91 | 55.01 | 54.15 | 54.99 | 56.36 |
| 2 | 0 | $PL_{av} (dB)$ | 50.84 | 50.42 | 50.77 | 50.44 | 51.19 | 52.08 |
| 2.5 | 3.5 | $t_m (ns)$ | 12.11 | 13.08 | 12.11 | 13.08 | 11.97 | 12.75 |
| 1.5 | 1.5 | $\tau_{av} (ns)$ | 15.44 | 15.77 | 15.60 | 15.95 | 15.43 | 15.96 |

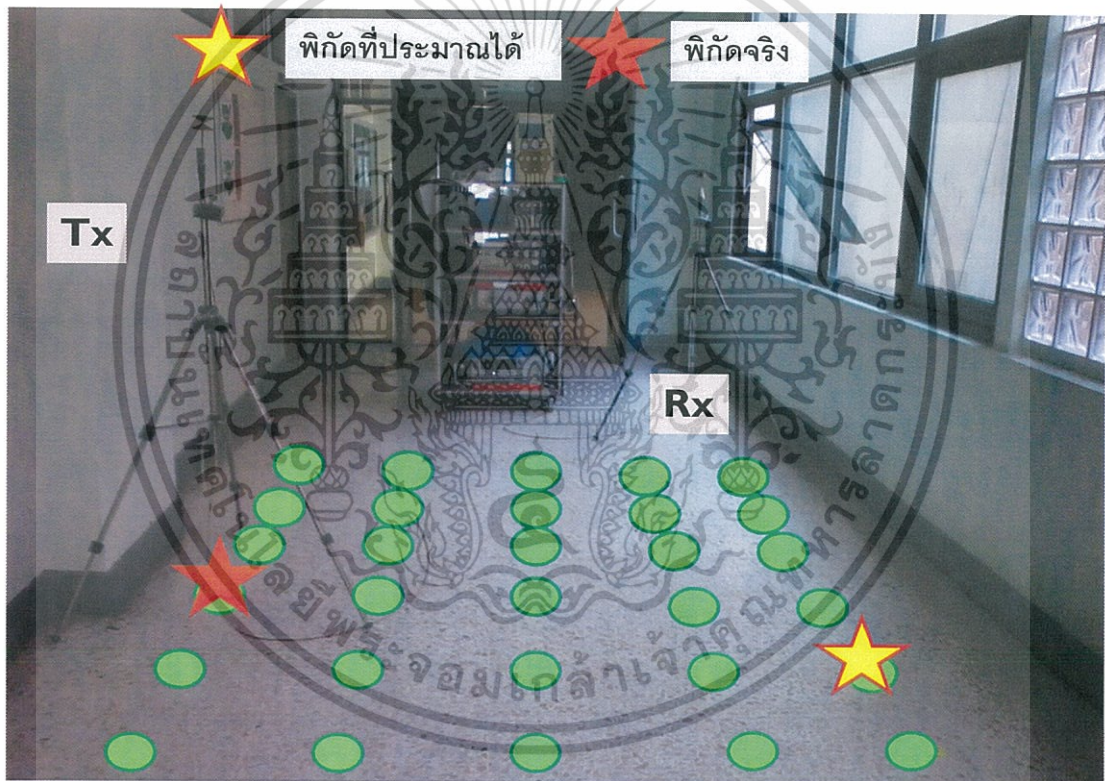
หมายเหตุ: พารามิเตอร์ของพิกัดจริง ตำแหน่ง (2, 2.5, 1.5) จะแสดงในตารางสีเทา ส่วนพารามิเตอร์พิกัด (0, 3.5, 1.5) จะแสดงในตารางสีขาว

จากตารางที่ 5.9 นำค่าพารามิเตอร์ในแต่ละครั้งมาหาค่าความแปรปรวนของแต่ละพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์แต่ละตัว ณ ตำแหน่ง (0, 3.5, 1.5)

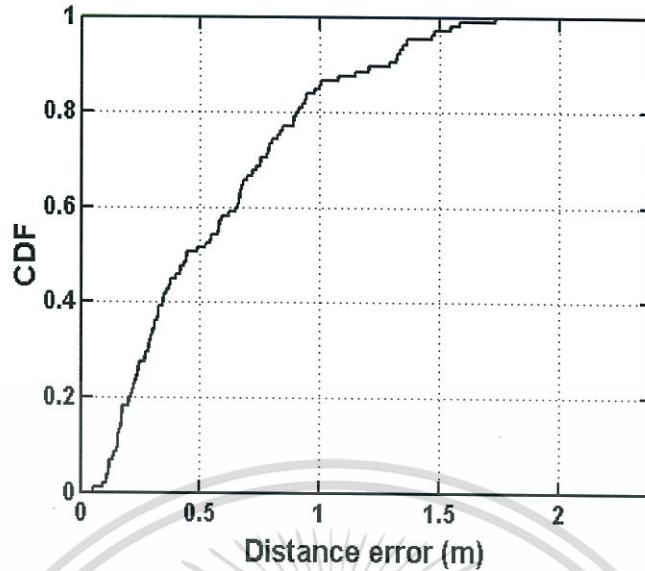
| พารามิเตอร์ | PL_m | PL_{av} | t_m | τ_{av} |
|-------------|--------|-----------|--------|-------------|
| ความแปรปรวน | 0.9094 | 0.4221 | 0.0071 | 0.0182 |

จากตารางที่ 5.10 จะเห็นว่าค่าความแปรปรวนของแต่ละพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึงนั้นมีค่าความแปรปรวนมากกว่าพารามิเตอร์อื่นๆ มาก ดังนั้นจึงเป็นผล ณ ตำแหน่งนี้มีการแกว่งของค่าพารามิเตอร์มาก ซึ่งเป็นผลให้ไปคล้ายคลึงกับพารามิเตอร์ ณ ตำแหน่งอื่น จึงทำให้การประมวลผลในการหาตำแหน่งนั้นเกิดความผิดพลาดขึ้นสูง

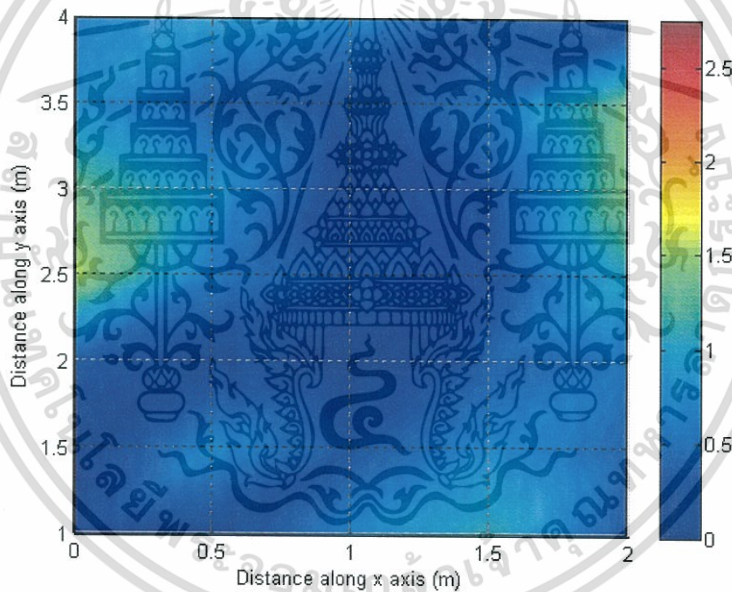


รูปที่ 5.27 ตำแหน่งซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูงจากการหาตำแหน่งภายในอาคารในสภาวะแวดล้อมจริง

เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วว่าค่าการสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึงส่งผลให้เกิดค่าผิดพลาดระยะทางที่สูง ดังนั้น ทำการทดสอบใหม่โดยใช้ข้อมูลเดิมในการทดสอบครั้งที่ 1 โดยไม่ใช้ค่าพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึง กล่าวคือพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นอินพุต ได้แก่ พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ย พารามิเตอร์การประวิงเวลา และพารามิเตอร์การประวิงเวลาเฉลี่ย เพียง 3 พารามิเตอร์เท่านั้น ผลการทดสอบถูกแสดงดังรูปที่ 5.28



ก.



ข.

รูปที่ 5.28 ผลการทดสอบโดยใช้พารามิเตอร์อินพุตเพียง 3 พารามิเตอร์

ก. CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง

ข. ค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคาร

จากรูปที่ 5.28ก. จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของการหาตำแหน่งที่ระยะ 1 เมตร มีความแม่นยำถึง 86.67% หมายความว่า ค่าผิดพลาดระยะทางที่เกิดขึ้น 86.67% มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เมตร ของข้อมูลทั้งหมด ค่าผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.57 เมตร และค่าผิดพลาดระยะทางสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.73 เมตร ส่วนในรูปที่ 5.28ข. เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.13 ซึ่งต่างกันเพียงการใช้พารามิเตอร์สำหรับอินพุตเป็น 3 และ 4 ตัวตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดระยะทางในแต่ละตำแหน่งนั้นมีค่าลดลงมาก ผลการทดสอบดังกล่าวได้นำมาเปรียบเทียบกับดังตารางที่ 5.11 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นดำนการค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 การเปรียบเทียบระหว่างการใช้พารามิเตอร์ 4 พารามิเตอร์ และ 3 พารามิเตอร์

| จำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ (พารามิเตอร์) | เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำที่ระยะ 1 เมตร (%) | ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | ค่าความผิดพลาดระยะทางสูงสุด (เมตร) |
|--------------------------------------|---|---------------------------------------|------------------------------------|
| 4 | 79.05 | 0.66 | 2.39 |
| 3 | 86.67 | 0.57 | 1.73 |

จากตารางที่ 5.11 พบว่าการตัดพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึงออกจากกลุ่มพารามิเตอร์อื่นพุดนั้น สามารถเพิ่มความแม่นยำให้กับการทำงานตำแหน่งให้เพิ่มขึ้นได้

5.4.3 วิเคราะห์สาเหตุค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารในตำแหน่งที่สายอากาศอยู่ระยะไกล

นอกจากผลจากความแปรปรวนของพารามิเตอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆ แล้ว จะเห็นได้ว่าบริเวณที่เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นนั้น จะเป็นบริเวณที่อยู่ไกลจากสายอากาศตัวรับซึ่งถูกกำหนดให้คงที่ ดังรูปที่ 5.27 จึงเป็นผลให้สัญญาณจากตัวส่งไปยังตัวรับจึงมีกำลังงานของสัญญาณที่ต่ำลง ประกอบสัญญาณรบกวนอันเกิดจากเครื่องมือวัด ออณหภูมิ และอื่นๆ จึงทำให้ กำลังงานของสัญญาณที่จะไปยังตัวรับเกิดการแกว่งขึ้น ผลที่เกิด ทำให้บริเวณที่อยู่ไกลจากสายอากาศตัวรับ มีความคล้ายคลึงกันในเรื่องของพารามิเตอร์ขึ้น จึงทำให้การประมวลผลในการหาตำแหน่งนั้นเกิดความผิดพลาดขึ้น

5.4.4 วิเคราะห์สาเหตุค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารซึ่งเกิดค่าผิดพลาดขึ้นตามแนวแกน x

การที่ค่าผิดพลาดระยะทางส่วนมากเกิดขึ้นในแกน x เนื่องจากแกน x เป็นแกนที่อยู่ในแนวขวางซึ่งอยู่ระหว่างผนังทั้งสองข้าง เมื่อสังเกตจากค่าความผิดพลาดระยะทางซึ่งมีค่าสูงนั้น พบว่า จะเกิดบริเวณที่อยู่ชิดผนัง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สัญญาณเกิดการสะท้อนจากผนังด้านข้าง ทำให้เกิดสัญญาณหลายวิถีขึ้น ดังนั้น บริเวณที่อยู่ชิดผนังทั้งซ้ายและขวาจึงเกิดสัญญาณหลายวิถีขึ้นในลักษณะที่คล้ายๆ กัน และค่อนข้างมีกำลังงานที่สูงใกล้เคียงกับคลื่นวิถีตรง จึงเป็นผลให้พารามิเตอร์ที่อยู่ในบริเวณขอบของการทดสอบนั้น เกิดขึ้นในลักษณะที่คล้ายกัน จึงเป็นผลให้การทำงานเกิดค่าความผิดพลาดขึ้นนั่นเอง

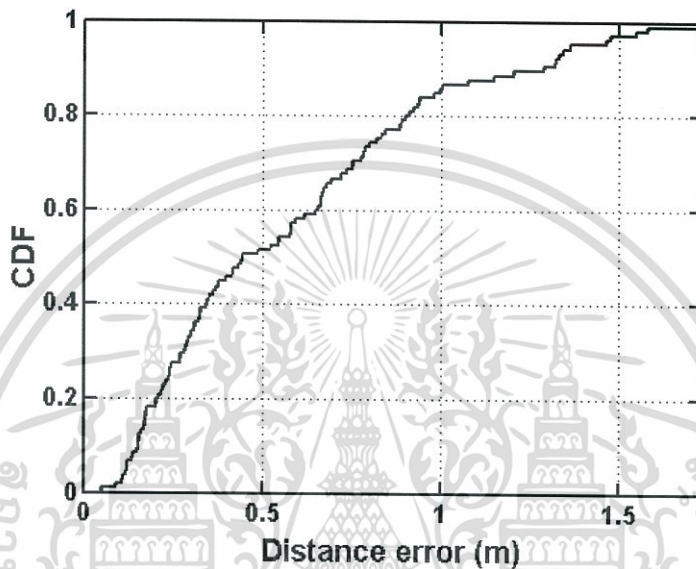
5.4.5 วิเคราะห์สาเหตุซึ่งค่าพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึงนั้น ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารสูง

พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึงนั้น มีค่าความแปรปรวนมาก เนื่องจากใช้ข้อมูลจากช่องสัญญาณซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพียงแคจุดเดียว เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีเฉลี่ย และพารามิเตอร์การประวิงเวลาเฉลี่ย ซึ่งใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของช่องสัญญาณตลอดช่วงที่ทำการสังเกต อีกทั้งยังพบปัญหาซึ่งเกิดการลดทอน เช่น สัญญาณรบกวนอันเกิดจากเครื่องมือ หรืออุณหภูมิ หรืออื่นๆ ซึ่งทำให้พารามิเตอร์นี้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์การประวิงเวลาของวิถีแรกที่มาถึง ซึ่งจะอยู่ที่ค่าของเวลานั้นเลย จึงมักไม่ค่อยได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมอื่น ดังนั้น พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึงนั้น จึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ในการหาตำแหน่ง

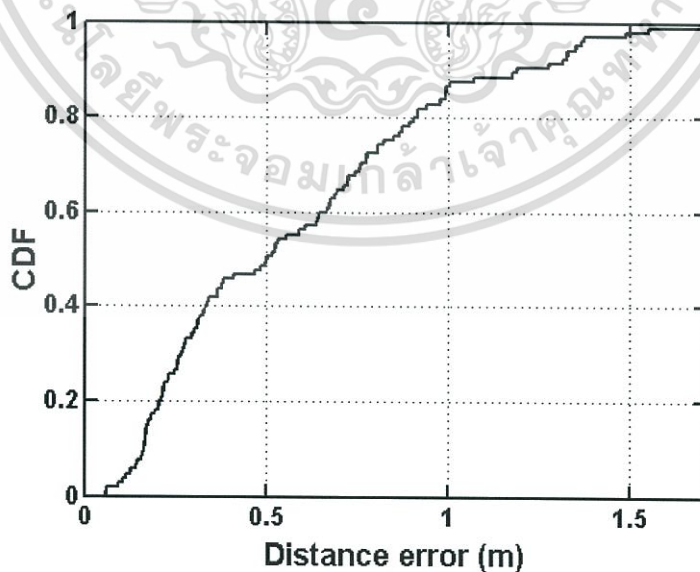
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ประเมินผลการจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบสามมิติเมื่อปรับปรุงพารามิเตอร์อินพุต

การประเมินผล เมื่อได้ทำการวิเคราะห์แล้วว่าค่าพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึงนั้น มีผลทำให้ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารลดลงมาก ดังนั้น ในแต่ละครั้งของการทดสอบ จึงได้ทำการนำพารามิเตอร์ดังกล่าวออกจากพารามิเตอร์อินพุต โดยได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5.29 ถึง 5.34 และได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 5.12

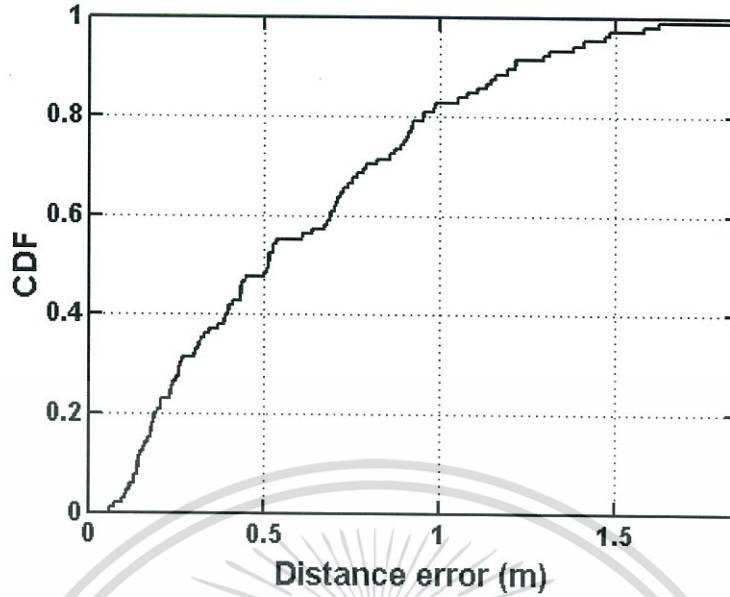


รูปที่ 5.29 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 1)

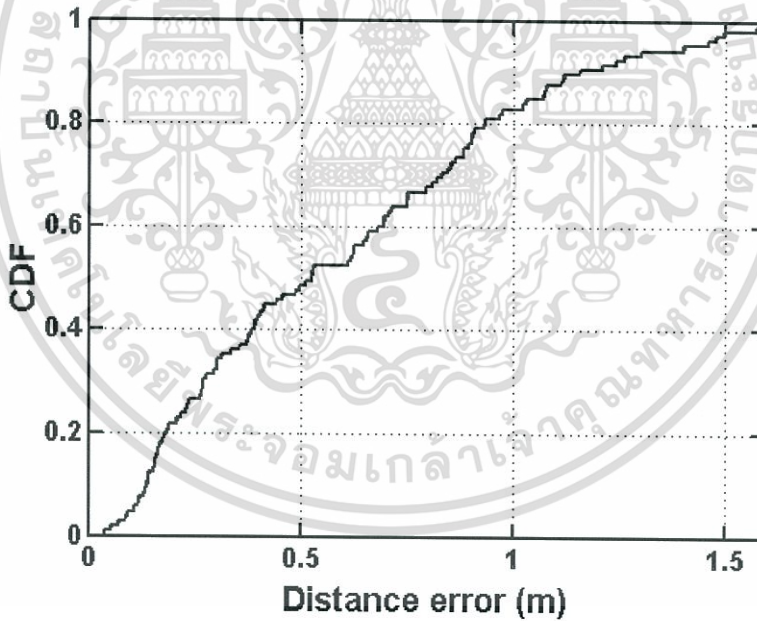


รูปที่ 5.30 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

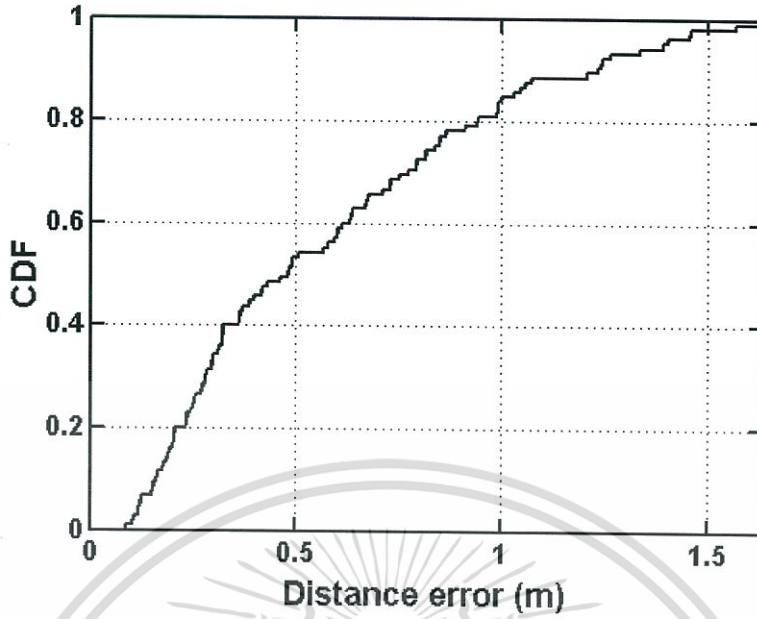


รูปที่ 5.31 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 3)

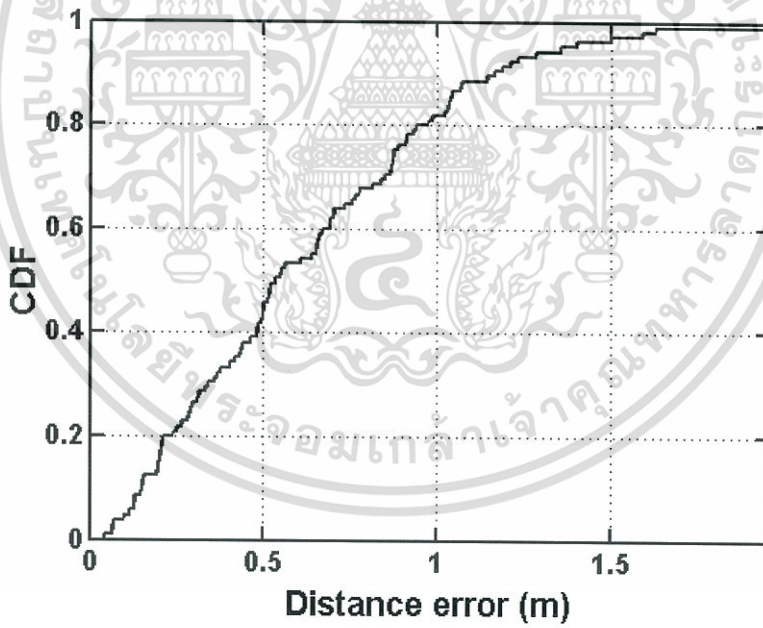


รูปที่ 5.32 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 5)



รูปที่ 5.34 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์ (ครั้งที่ 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบเมื่อใช้พารามิเตอร์อินพุต 3 พารามิเตอร์

| การทดสอบครั้งที่ | ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | ค่าความผิดพลาดระยะทางสูงสุด (เมตร) | ความแม่นยำที่ระยะ 1 เมตร (%) |
|------------------|--|------------------------------------|------------------------------|
| 1 | 0.57 | 1.73 | 86.67 |
| 2 | 0.57 | 1.71 | 87.62 |
| 3 | 0.60 | 1.73 | 86.67 |
| 4 | 0.59 | 1.59 | 82.86 |
| 5 | 0.57 | 1.63 | 84.76 |
| 6 | 0.62 | 1.95 | 81.90 |
| ค่าเฉลี่ย | 0.59 | 1.72 | 85.08 |

จากตารางที่ 5.12 พบว่าการจำลองการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบสามมิติ จากเดิมซึ่งใช้พารามิเตอร์ 4 พารามิเตอร์ เมื่อได้ทำการปรับโดยนำพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึงออก ทำให้ความแม่นยำของการหาตำแหน่งมีมากยิ่งขึ้น โดยจากเดิมมีค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยผิดพลาดระยะทางอยู่ที่ 0.67 เมตร ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดระยะทางสูงสุดที่ 2.5 เมตร และความแม่นยำของการหาตำแหน่งโดยเฉลี่ย 77.94 เปอร์เซ็นต์ หลังจากทำการวิเคราะห์ผลแล้วทำการประเมินผลเมื่อได้ปรับปรุงการหาตำแหน่งขึ้น พบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยผิดพลาดระยะทางอยู่ที่ 0.59 เมตร ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดระยะทางสูงสุดที่ 1.72 เมตร และความแม่นยำของการหาตำแหน่งโดยเฉลี่ย 85.05 เปอร์เซ็นต์ โดยการจำลองการหาตำแหน่งดังกล่าวมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นถึง 7.14 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะ 1 เมตร

หมายเหตุ: คำว่าที่ระยะ 1 เมตร ในวิทยานิพนธ์นี้ให้ตีความหมายว่า ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นไม่เกิน 1 เมตร เป็นที่เปอร์เซ็นต์

5.6 สรุป

จากผลการทดลองวิจัยที่ได้กล่าวไว้ในบทนี้ เริ่มต้นจากการดำเนินการจัดเก็บผลการทดสอบ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ผลการทดสอบการจำลองระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร และผลค่าความผิดพลาดระยะทางจากการหาตำแหน่งภายในอาคารในแต่ละตำแหน่ง จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตามด้วยการประเมินผล ซึ่งผลจากการวิเคราะห์และประเมินผลจะถูกนำมาใช้ในการสรุปถัดไป

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาทในระนาบ 3 มิติ ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนข้อมูลซึ่งได้จากการวัด การทำการทดสอบได้ทำในสภาวะแวดล้อมจริง โดยกระทำซ้ำเป็นจำนวน 11 ครั้ง โดย 5 ครั้งใช้สำหรับการทำฐานข้อมูล และอีก 6 ครั้งนำมาทำการทดสอบ และจากผลการทดสอบ พบว่า

1. จากการวิเคราะห์การกระจายของค่าผิดพลาดระยะทาง พบว่า ค่าผิดพลาดระยะทางส่วนมากจะกระจายแบบเส้นโค้งเบ้ขวา ซึ่งไม่ใช่การแจกแจงแบบปกติ ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของมัธยฐานของค่าผิดพลาดระยะทางจึงเป็นค่ากลางที่เหมาะสม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.47 เมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 0.0168 ดังนั้น หากทำการวัดในครั้งต่อไป การหาตำแหน่งที่ได้จะมีค่าของมัธยฐานเหมือนหรือใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของมัธยฐานของค่าผิดพลาดระยะทางนั่นเอง

2. การจำลองช่องสัญญาณการแพร่กระจายแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารในระนาบ 3 มิติมีความแม่นยำของการหาตำแหน่งที่ระยะ 1 เมตร โดยเฉลี่ย 77.94 % จากการวิเคราะห์ผลแล้วทำการปรับเปลี่ยนโดยนำพารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิถีของวิถีแรกที่มาถึงออกจากพารามิเตอร์อื่นพบว่าคุณค่าความแม่นยำเป็น 85.08 % โดยเฉลี่ย โดยมีความแม่นยำของการหาตำแหน่งเพิ่มขึ้นถึง 7.14 %

3. จากการวิเคราะห์ผล ระยะทางซึ่งมีค่าผิดพลาดสูงเกิดขึ้นส่วนมากเกิดขึ้นมีสาเหตุเนื่องมาจาก

3.1 บริเวณดังกล่าวมีค่าความแปรปรวนของกำลังงานของช่องสัญญาณสูง

3.2 บริเวณดังกล่าวอยู่ไกลจากสายอากาศตัวรับ

ดังนั้น จึงทำให้พารามิเตอร์ของช่องสัญญาณบริเวณนั้นไปใกล้เคียงกับพารามิเตอร์ในบริเวณอื่นๆ จึงทำให้การประมาณตำแหน่งเกิดความผิดพลาดขึ้น ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.4 แล้ว

4. วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยในบางตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณมาก ทำให้ประสิทธิภาพของการหาตำแหน่งลดลง แต่เมื่อวิเคราะห์ที่ความแปรปรวนของพารามิเตอร์แต่ตัวแล้ว จะเห็นได้ว่า พารามิเตอร์ของช่องสัญญาณทางเวลามีความแปรปรวนที่ต่ำ นั่นคือ ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสิ่งที่สามารถยืนยันได้ว่า เทคโนโลยีแถบกว้างยิ่ง มีความเหมาะสมสำหรับการหาตำแหน่งนั่นเอง

5. การที่ค่าผิดพลาดส่วนใหญ่เกิดขึ้นในพิกัดแกน x เนื่องจากพิกัดแกน x อยู่ระหว่างผนังทั้งสองข้าง ค่าความผิดพลาดระยะทางซึ่งมีค่าสูงนั้น พบว่า จะเกิดบริเวณที่อยู่ชิดผนัง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สัญญาณเกิดการสะท้อนจากผนังด้านข้าง ทำให้เกิดสัญญาณหลายวิถีขึ้น ดังนั้น บริเวณที่อยู่ชิดผนังทั้งซ้ายและขวาจึงเกิดสัญญาณหลายวิถีขึ้นในลักษณะที่คล้ายๆ กัน และค่อนข้างมีกำลังงานที่สูงใกล้เคียงกับคลื่นวิถีตรง จึงเป็นผลให้พารามิเตอร์ที่อยู่บริเวณขอบของการทดสอบนั้น เกิดขึ้นในลักษณะที่คล้ายกัน จึงเป็นผลให้การหาตำแหน่งเกิดค่าความผิดพลาดขึ้นนั่นเอง

6. พารามิเตอร์การสูญเสียเชิงวิธีของวิธีแรกที่มาถึงนั้น มีค่าความแปรปรวนมาก เนื่องจากใช้ข้อมูลจากช่องสัญญาณซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพียงแค่จุดเดียว อีกทั้งยังพบปัญหาซึ่งเกิดการลดทอน เช่น สัญญาณรบกวนอันเกิดจากเครื่องวัด หรืออุณหภูมิ หรืออื่นๆ ซึ่งทำให้พารามิเตอร์นี้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์อื่นๆ จึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ในการหาตำแหน่ง

1.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบแถบกว้างยิ่งสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยโครงข่ายประสาทเท่านั้น ยังมีวิธีการอื่นๆ ซึ่งสามารถเพิ่มความแม่นยำของระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารให้สูงขึ้น เช่น

1. การเพิ่มพารามิเตอร์บางตัวเข้าไปในแบบจำลองสำหรับการอ้างอิง เพื่อที่จะลดค่าความผิดพลาดระยะทางอันเกิดจากลักษณะพื้นที่ เช่น การสลับพิกัดซ้ายและขวา
2. การใช้วิธีการอื่นๆ ในการวิเคราะห์ตำแหน่ง ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการหาตำแหน่งได้
3. การเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นที่ โดยใช้พื้นที่ที่เป็นลักษณะอื่นซึ่งนอกเหนือจากผนังแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งอาจส่งผลให้จุดที่ทำการทดสอบมีค่าความแปรปรวนสูง เป็นผลให้พารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา หรือใช้วิธีอื่นๆ ต่อไป
4. การเลือกพารามิเตอร์ซึ่งใช้เป็นอินพุตของแบบจำลองควรเลือกให้เหมาะสมกับแต่ละพื้นที่
5. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเฉพาะสภาวะแวดล้อมที่เป็นแบบคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงไม่มากเท่านั้น แต่ในการใช้งานจริงสภาวะแวดล้อมจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งควรที่จะศึกษาเพิ่มเติม
6. วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการวิเคราะห์ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงในระนาบความสูงยังไม่ได้ เนื่องจาก ข้อมูลซึ่งออกแบบไว้ไม่เพียงพอ ดังนั้น การศึกษาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงในระนาบความสูง อาจทำให้ค่าความแม่นยำในการหาตำแหน่งในระนาบ 3 มิติเพิ่มขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nonthawat L, “Surveillance Technology Overview,” [Slide]. Bangkok : AeroThai. 2010.
- [2] Robert F. and Cherie K, “Low Frequency Ultra-Wideband for Positioning and Networking,” [Slide]. Intel-MURI UWB Workshop : Aether Wire and Location, Inc. 2002.
- [3] Federal Communications Commission, “Revision of Part 15 of the Commission’s Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems,” First Report and Order, FCC 02-48, Apr. 2002.
- [4] Sahinoglu Z., Gezici S and Guvenc I, “Ultra-wideband Positioning Systems,” New York : Cambridge University, Inc. 2008.
- [5] Chahé N., Charles D. and Sofiène A, “Geolocation in Mines With an Impulse Response Fingerprinting Technique and Neural Networks,” 2006 IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 5, no. 3, March 2006.
- [6] อาทิตย์ ศรีแก้ว, “ปัญหาเชิงคำนวณ,” นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.
- [7] Nekoogar F, “Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications,” New Jersey: Prentice Hall, 2005.
- [8] Gratton D. A., “Developing Practical Wireless Applications,” Boston, MA: Elsevier Inc., 2006.
- [9] Oppermann I., Hämäläinen M. and Linatti J, “UWB Theory and Application,” John Wiley and Sons, 2004.
- [10] Sangthong j., Promwong S. and Supanakoon P, “Comparison of UWB Fingerprinting with Vertical and Horizontal Polarizations for Indoor Localization,” 2010 IEEE Conference on Publication, pp. 588-592, 2010.
- [11] Limpisawat K., Sandthong J., Promwong S. and Supanakoon P, “Comparison of 2-D Interpolation and K-Nearest Neighbor Based on Measurement Data for UWB Localization,” School of Information Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2011.
- [12] จิรพัฒน์ แสงทอง, “การศึกษาการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคเสมือนการสแกนลายนิ้วมือแบบแถบกว้างยิ่ง,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.

- [13] Leechaikitjaroen K., Promwong S., Supanakoon P., Chensirikul S. and Kaewmechai S, "Indoor Measurement Results of UWB Impulse Radio for Shot-Range Wireless Systems with RMS Delay Spread and Path Loss," ISCIT2005, pp. 662-666, 2005.
- [14] Promwong S., Supanakoon P. and Takada J, "Waveform Distortion and Transmission Gain on Ultra Wideband Impulse Radio", IEICE TRANS. COMMUN., Vol. E93-B, No. 10, pp. 2644-2650, October 2010.
- [15] Robert S, "UWB: Technology and implications for sensor networks.", [Slide]. Ohio State University: Ohio State University NEST group. 2004.
- [16] Chang C. C, "Chapter 14: Recent Advances in Wireless Networks," www.cs.wichita.edu/~chang/lecture/cs898t/.../adv-wireless.ppt.
- [17] Nekoogar H. and Prasad R, "Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications," Springer Science, 2009.
- [18] Yazdandoost K. Y. and Sayraffian-Pour K, "Channel Model for Body Area Network (BAN)," IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), 10 November, 2010.
- [19] Sahinoglu Z., Gezici S. and Guvenc I, "Ultra-wideband Positioning Systems," Cambridge University Press. 2008.
- [20] Zwiorello L., Janson M., Ascher C. and Schwesinger U, "Localization in Industrial Halls via Ultra-Wideband Signals," 2010 Workshop on Positioning Navigation and Communication, pp. 144-149, Mar. 2010.
- [21] Toak A., Kandil N., Affes S., and Georges S, "Fingerprinting localization using Ultra-Wideband and neural networks," 2007 International Symposium on Signals, Systems and Electronics, pp. 529 - 532, July-August 2007.
- [22] Toak A., Kandil N., Affes S. and Georges S, "Neural Networks for Fingerprinting-Based indoor Localization Using Ultra-Wideband," Journal of Communications, Vol. 4, No. 4, pp. 267-275, May 2009.
- [23] วิชัย ศรีสุรภักษ์, "ระบบระบุตำแหน่งตนเองโดยใช้ความแรงของคลื่นด้วยเทคนิควิธีเชิงปัญญาประดิษฐ์," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2550.
- [24] Thanaphat Sittithumwat, "Backpropagation Neural Networks versus Radial Basis Function Networks," วารสารวิศวกรรมมหาวิทยาลัยสยาม.: pp 1 - 12.
- [25] Fauselt Lauvene, "Fundamentals of Neural Networks Architectures, Algorithms and Applications," The United States of America: Prentice - Hall, Inc, 1994.
- [26] Wasserman D.Philip, "Advanced Methods in Neural Computing," The United States of America: Van Nostrand Reinhold, 1993.

- [27] Stamatios V. Kartalopoulos, "Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic," The United States of America: IEEE Press, 1996.
- [28] Kung S.Y., "Digital Neural Networks," The United States of America: Prentice Hall, International, Inc., 1993.
- [29] Schalkoff R. J., "Artificial Neural Networks," Singapore: McGraw – Hill, 1997.
- [30] Howard Demuth., Mark Beale. and Martin Hagan, "Neural Network Toolbox," www.mathworks.com/help/pdf_doc/nnet/nnet_ug.pdf.
- [31] สุรินทร์ คำฝอย, "โครงข่ายประสาทเทียมเชิงปฏิบัติสำหรับงานวิศวกรรมไฟฟ้า," กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [32] ชนศักดิ์ ป่ายเที่ยง. และศรีบุตร์ แววจริญ, "คณิตศาสตร์วิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ Series 8," กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.
- [33] Promwong S., Hachitani W. and Takada J., 2003. "Experimental evaluation scheme of UWB antenna performance," Tech. on Instrumentation and Measurements, IEEE Japan, IM-03-35.





ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Performance Comparison of UWB-Fingerprinting Positioning with RBF Neural Network and k-Nearest Neighbor in an Indoor Environment

Wipassorn Winitchaikul¹, Jirapat Sangthong², Kannika Limpisawat¹,
Pichaya Supanakoon¹ and Sathaporn Promwong¹

¹ Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

² Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
Mahanakorn University of Technology, Bangkok Thailand

Emails: s1011219@kmitl.ac.th, jirapat@mut.ac.th, s3611403@kmitl.ac.th,
kspichay@kmitl.ac.th, kpsathap@kmitl.ac.th

ABSTRACT – In recent years, an indoor positioning system has been widely used in medical, industrial, public safety and transportation. In addition, its important requirement is high accuracy in dense multipath fading environments. This paper studies on indoor positioning using radial basis function (RBF) neural network and k-nearest-neighbor (k-NN) based on ultra wideband (UWB) signal. The channel transfer function was measured using vector network analyzer (VNA) at the frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz. The path losses and the delay times of first three paths were investigated to build the fingerprints and signatures. The accuracy of this work is studied and shown in the term of cumulative distribution function (CDF). From the results, RBF neural network provides better accuracy than k-NN. Thus, RBF neural network is more suitable for an indoor positioning.

KEYWORDS -- ultra wideband (UWB); indoor positioning; radial basis function (RBF) neural network; k-nearest-neighbor (k-NN)

1. Introduction

Nowadays, the indoor positioning systems provide widely researched in many applications such as industrial sensors and equipments control [1], emergency services, people's position detection and many others. The positioning system is based on wireless technologies such as wireless local area network (WLAN), ZigBee, Bluetooth, ultrasonic, radio frequency identification (RFID) and ultra wideband (UWB). However, this system requires high accuracy and precision in an indoor environment. This leads the utilization of UWB for indoor positioning.

UWB is one of many technologies that are used widely in the indoor positioning because UWB has many characteristics such as low power, high data rate (high bandwidth) and robustness to multipath fading. There are many methods, which are used for the indoor positioning, such as received signal strength (RSS), time of arrival (TOA), time difference of arrival (TDOA), angle of arrival (AOA)

and fingerprinting [2]. The fingerprinting technique is appropriate for indoor positioning because the indoor environment has more multipath fading. This technique can use the characteristics of multipath fading to build fingerprint stored in database and signature. The target signature will be compared with the fingerprint in database to estimate the position. Furthermore, there are some methods that are used to estimate position such as probabilistic method, interpolation, artificial neural network (ANN), k-nearest neighbor (k-NN) [3] and other methods.

The ANN is a method base on the human brain working that can be learned and adapted to the environment. Furthermore, the ANN has a strong structure. If some neurons are damaged, the remaining neurons are still able to run. Therefore, neural networks are used in many applications including pattern recognition, clustering, prediction, optimization, function approximation and so on [4]-[5].

The k-NN is an algorithm for classifying objects based on closest training examples in the feature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณี JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY | VOL 3 | ISSUE 1 | JAN-JUN 2012

space. It is amongst the simplest of all machine learning algorithms: an object is classified by a majority vote of its neighbors, with the object being assigned to the class most common amongst its k -NN (k is a positive integer, typically small).

In this paper, the biconical antennas with horizontal polarization are used as both transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The vector network analyzer (VNA) was used to measure channel transfer function with frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz for covering the full band of UWB spectrum, which is specified by Federal Communications Commission (FCC). The path losses and delay times of first three paths were evaluated and used as both fingerprints and target signatures. Then, the positions were analyzed by using RBF neural network and k-NN. The comparison performance is shown in the term of cumulative distribution function (CDF).

The remainder of this paper is organized as follows. In Section 2, the positioning technique such as signal model, UWB fingerprint, RBF neural network and k-NN are described. Then, the measurement setup and results of this paper are explained in Sections 3 and 4, respectively. Finally, the conclusion is given in section 5.

2. Positioning Technique

2.1 UWB Signal

For UWB signal, the rectangular passband waveform is used as the UWB transmitted waveform. The rectangular passband waveform in time domain and its spectral density function in frequency domain can be defined by

$$v_t(t) = \frac{A}{f_B} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)] \quad (1)$$

$$V_t(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_B} & \|f - f_c\| \leq \frac{f_B}{2} \\ 0 & \|f - f_c\| > \frac{f_B}{2} \end{cases} \quad (2)$$

Where A is the maximum amplitude, f_B is the bandwidth, f_c is the center frequency, f_L and f_H are the lowest and highest frequencies, respectively.

Then, we can find the spectral density function of received signal $V_r(f)$ by using

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_c(f) \quad (3)$$

where $V_t(f)$ is transmitted signal in frequency domain and $H_c(f)$ is the frequency transfer function of channel obtained by using measurement scheme described in Section 3.

After that, the received signal in time domain $v_r(t)$ is evaluated by using inverse Fourier transform:

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df \quad (4)$$

2.2 Fingerprinting Technique

The fingerprinting positioning technique concept is based on the notion identifying a specified position by relying on some data that can represent this location. It has the same concept as human fingerprinting. In a given area, different information can be used to construct a fingerprint that can identify different parts of the area. This technique consists of two phases. First comprises the choice of the appropriate data to build a fingerprint and collect this information to database. The second phase consists of using the already built database in order to find locations by comparing a target signature with the database content (fingerprint). Theoretically, any information can be used to perform unique fingerprints. Here, the path losses and the delay times of first three paths of received power are comprised to build the fingerprint and signature of each specific position. The received power $p_r(t)$ in decibel is presented by

$$p_r(t)[dB] = -20 \log |v_r(t)| \quad (5)$$

Figure 1 shows the consideration of path losses and delay times from received power. These parameters were used to build the fingerprints and signatures. From this figure, path losses of first, second and third paths are $PL_1 = -P_1$, $PL_2 = -P_2$ and $PL_3 = -P_3$.

Similarly, the delay times of the first, the second and the third paths are t_1 , t_2 and t_3 respectively.

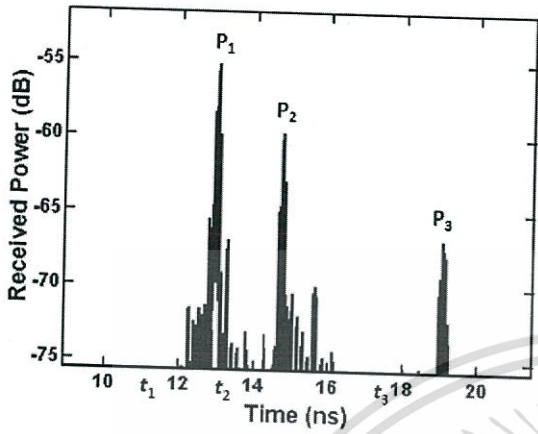


Figure 1. Received power waveform.

2.3 RBF Neural Network

The RBF neural network is a class of feed-forward neural networks that consists of one input layer, one hidden layer and one output layer, the kind of activation functions at hidden layer is nonlinear whereas at output layer is linear. The RBF structure is shown in Figure 2.

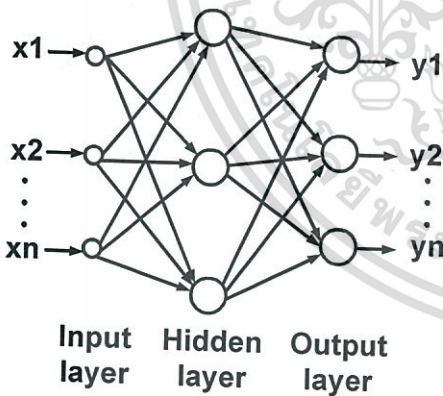


Figure 2. The structure of the RBF neural network

The RBF neural network has properties of the approximation and less time of training. The most important of structure is the hidden layer; the hidden layer outputs are found from activation functions then will be calculated with inputs from the input layer. Finally, neural network outputs are found from addition of weights and the hidden layer outputs. The neural network outputs can be written as

$$y_i = \sum_{k=1}^s w_{ik} \phi_k(\|p - c_k\|) \quad (6)$$

where s is number of neurons in the hidden layer, w_{ik} is value of the neural weight from the neurons k , $\phi_k(\cdot)$ is the activation functions, $\|p - c_k\|$ is the distance from the point of the input (p) to the center of the activation functions (c_k) at neurons k as is shown by norm, y_i is the output of the network.

The activation function, which is used in this paper, is a Gaussian activation function, which is the most popular of the RBF neural network. This Gaussian activation function can be expressed as

$$\phi(p) = \exp\left(-\frac{p^2}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

where σ is spread of the RBF neural networks as it is determined to width of the Gaussian activation function.

The RBF neural network training based on solve of equation. From the RBF neural network output can be written in matrix form as

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \vdots \\ \tilde{y}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi(p_1, c_1) \cdots \phi(p_1, c_s) \\ \vdots \\ \phi(p_Q, c_1) \cdots \phi(p_Q, c_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

Thus, the simple equation of RBF neural network output can be written as

$$\tilde{y} = \Phi w \quad (9)$$

The objective function is defined as

$$J(w) = 0.5 \sum_{q=1}^Q [\hat{y}_q - \tilde{y}_q]^2 \quad (10)$$

This equation can be written in the simple form as

$$J(w) = \frac{1}{2} (\hat{y} - \Phi w)^T (\hat{y} - \Phi w) \quad (11)$$

Finally, the weight can be adjusted by find the least objective function from that shows in equation (12) – (14)

$$\frac{\partial J(w)}{\partial w} = 0 \quad (12)$$

$$-\Phi^T \hat{y} + \Phi^T \Phi w = 0 \quad (13)$$

$$w = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \hat{y} = \Phi^{-1} \Phi^T \hat{y} \quad (14)$$

Where \hat{y}_q is the target, \tilde{y}_q is the output from neural network and Q is number of output.

The weight is occurred as RBF neural network training. It shows about ability of learning and approximation the data which unknown.

2.4 k-Nearest Neighbor

The estimated position is considered from the position that has minimum difference between its signature and fingerprint. The fingerprint error at (x, y) position $e_f(x, y)$ is defined as

$$e_f(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{[PL_i(x, y) - PL_{si}]^2}{\sigma_{PL_i}^2} + \frac{[t_i(x, y) - t_{si}]^2}{\sigma_{t_i}^2} \right\}} \quad (15)$$

where $PL_i(x, y)$ and $t_i(x, y)$ are the path losse and delay time of fingerprint at (x, y) position of path i^{th} , $PL_{si}(x, y)$ and $t_{si}(x, y)$ are the path loss and delay time of signature of path i^{th} , σ_{PL_i} and σ_{t_i} are the standard deviation of path loss and delay time of fingerprint of path i^{th} .

The estimated position of k-NN (x_e, y_e) is considered as the position with minimum estimated error divide by k which k is 1,2,...,n, and can be written as

$$(x_e, y_e)_k = \frac{\sum_{j=1}^k (\arg \min e_f(x, y))_j}{k} \quad (16)$$

Finally, the accuracy of UWB fingerprinting is considered in the term of distance error. The distance error e_d can be defined as

$$e_d = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2} \quad (17)$$

where (x_e, y_e) is the correct position.

3. Measurements

The measurements were done at the corridor of 12th floor, E-Building, Faculty of Engineering, King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang, VNA was used to measure the UWB channel at the frequencies ranging from 3 GHz to 11 GHz, which cover the full band of UWB spectrum specified by Federal Communications Commission (FCC) [8]. The biconical antennas were used with horizontal polarization as both Tx and Rx antennas. The geometry and dimension of the biconical antenna are shown in Figure 3. The positions models were divided 2 models. The first model was reference data measurement that is the database content in fingerprinting technique and the second model was testing data measurement that is the target signature in fingerprinting technique.

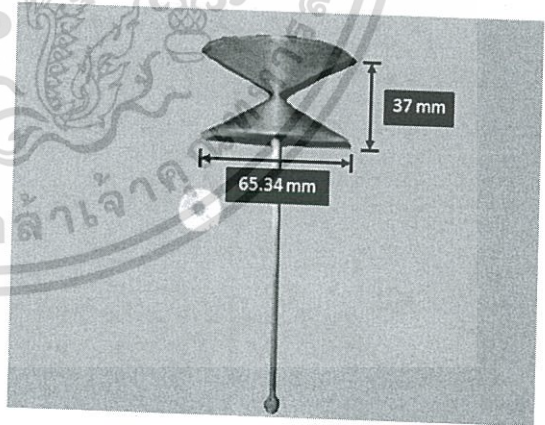


Figure 3. The geometry and dimension of the UWB biconical antenna

The measurement model for reference data is shown in Figure 4. It has 18 data points with 1 m space between each data points. The obtained data are fingerprints, which are stored in database. The same process of reference data measurement was done, but changed the measurement model as shown in Figure

5. The data points are changed from 18 to 55 with space reduced to 0.5 m.

4.2. k-Nearest Neighbor Results

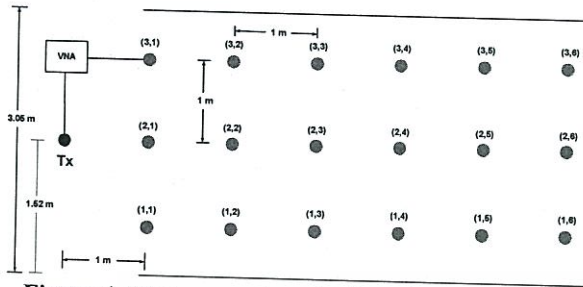


Figure 4. Measurement model for reference data.

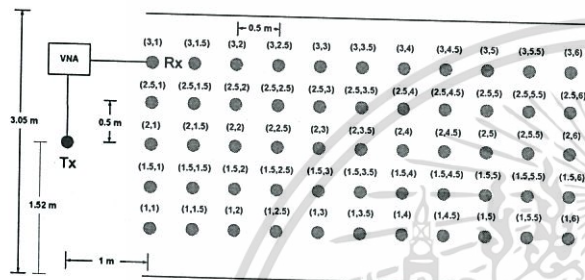


Figure 5. Measurement model for testing data.

The CDFs of distance error for k-NN with k equal to 1, 2 and 3 are shown in Figures 7, 8 and 9, respectively. The maximum distance errors for k-NN with k equal to 1, 2 and 3 are 2.06 m, 1.50 m and 1.43 m., respectively. The case of 3-NN has the lowest of the maximum distance error. Furthermore, the average distance errors for k-NN with k equal to 1, 2 and 3 are 0.54 m, 0.58 m and 0.63 m, respectively. The case of 1-NN has the lowest of the average distance error. Generally, the distance error of each case of k-NN is not much different. However, k-NN with k equal to 1 is chosen to be the best case of k-NN by considering the average distance error.

4. Experimental Results

After obtained all data from the measurements, the RBF neural network and the k-NN are used for analyzing the position.

4.1. RBF Neural Network Result

For the best results, the RBF neural network spread is 12.5 with 10 neurons in hidden layer. The CDF of distance error is shown in Figure 6. The average distance error is 0.48 m, and the maximum distance error is 1.27 m.



Figure 7. CDF of distance error for k-NN with k equal to 1.

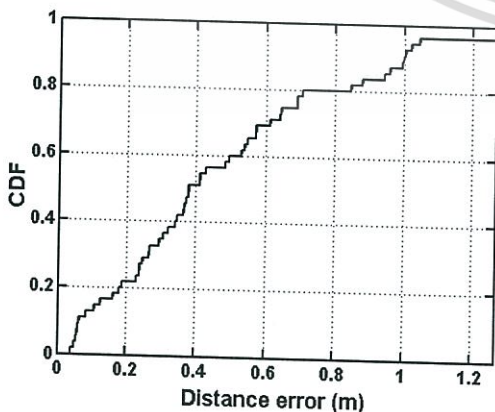


Figure 6. CDF of distance error for RBF neural network.

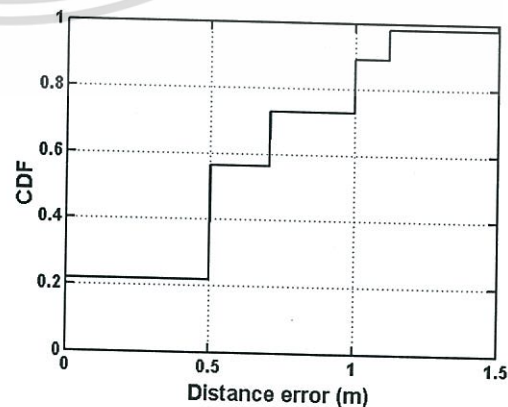


Figure 8. CDF of distance error for k-NN with k equal to 2.

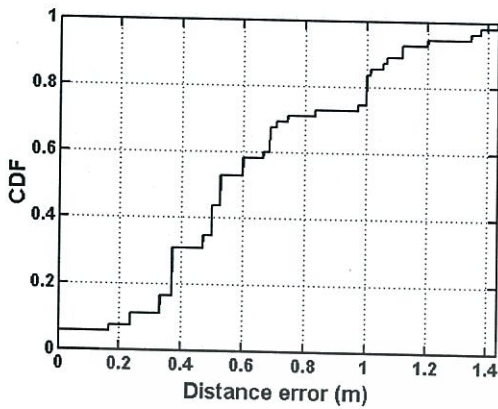


Figure 9. CDF of distance error for k-NN with k equal to 3.

4.3. Comparison Result

The comparison between CDFs of distance error for RBF neural network and k-NN with k equal to 1, 2 and 3 are shown in Figure 10. The RBF neural network has lower average, median and maximum distance errors than all cases of k-NN.

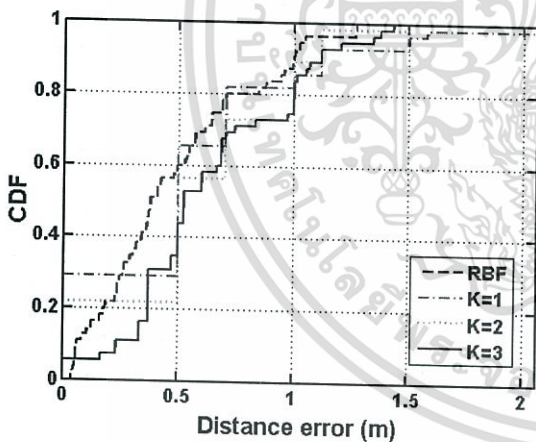


Figure 10. CDFs for RBF neural network and k-NN.

Table 1. Distance errors of RBF neural network and k-NN.

| Distance Error | RBF Neural Network (m) | 1-NN (m) | 2-NN (m) | 3-NN (m) |
|----------------|------------------------|----------|----------|----------|
| Maximum | 1.27 | 2.06 | 1.50 | 1.43 |
| Median | 0.38 | 0.50 | 0.50 | 0.53 |
| Average | 0.48 | 0.54 | 0.58 | 0.63 |

4.4. Analysis of Result Error

The distance errors of RBF neural network and k-NN are listed in Table 1. The distance errors of RBF neural network are significantly lower than k-NN. Thus, RBF neural network is chosen to analyze the distance errors in this section.

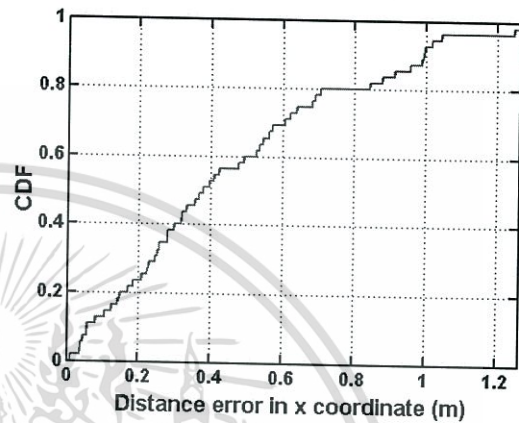


Figure 11. CDF of distance error in x coordinate

The CDF of distance error in x coordinate is shown in Figure 11. The maximum distance error is 1.29 m and the average distance error is 0.54 m.

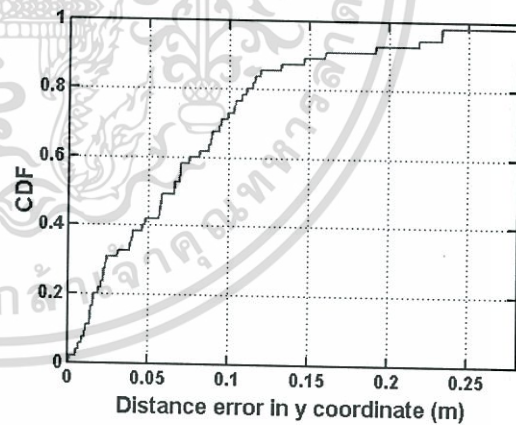


Figure 12. CDF of distance error in y coordinate

Figure 12 shows the CDF of distance error in y coordinate. The distance error in y coordinate has 1.29 m maximum distance error and 0.54 m average distance error.

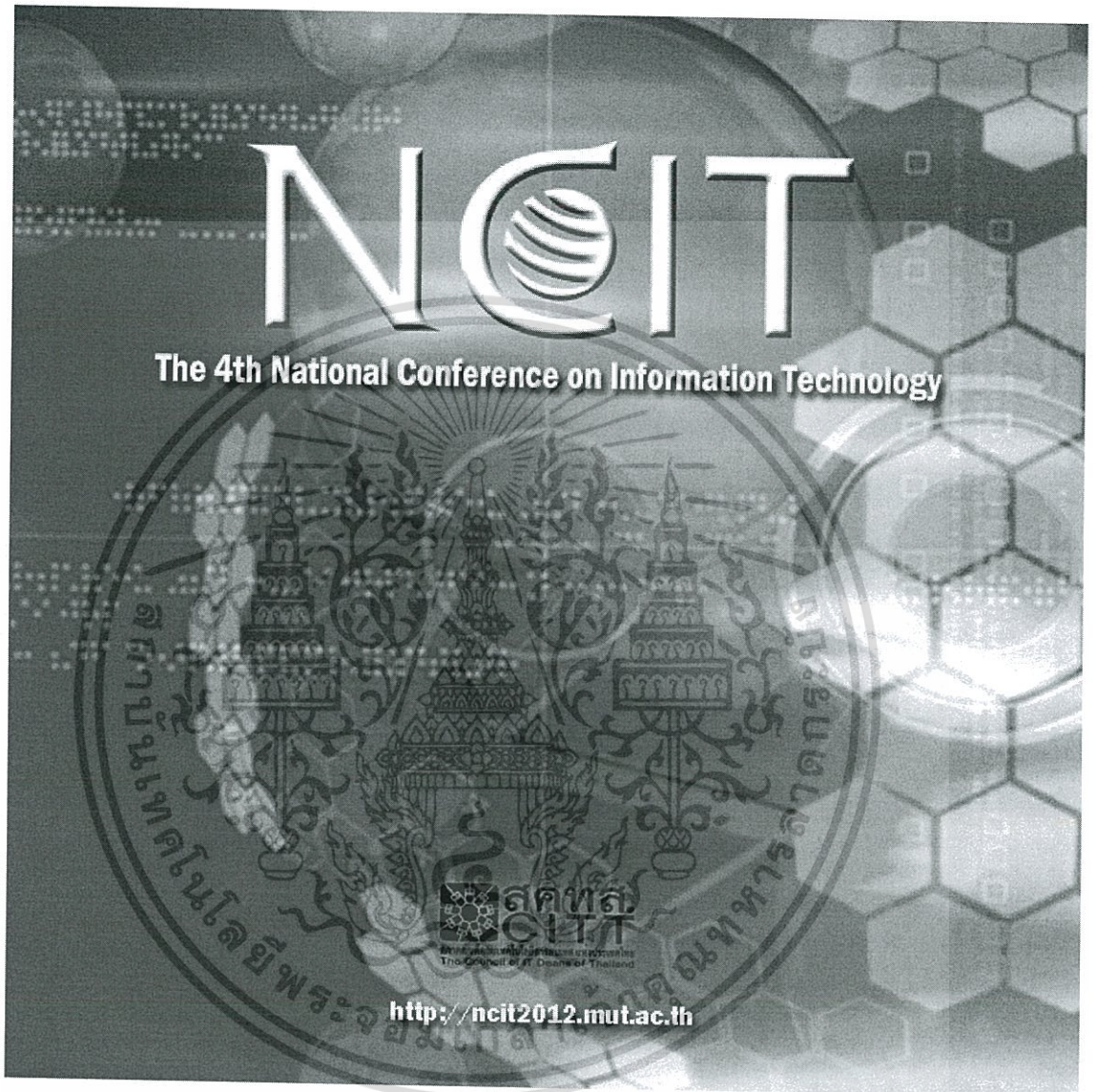
Moreover, the distance error in y coordinate is lower than that in x coordinate. The distance error of x coordinate is higher because of symmetry. The Tx antenna is at the center of x coordinate. Therefore, the reference data at right and left sides of x coordinate are almost the same.

5. Conclusion

This paper is studies on indoor positioning using RBF neural network and k-NN based on UWB signal. From the results, the most distance error is in x coordinate. The RBF neural network has the average distance error between the target and approximate positions of 0.48 m and the maximum distance error is 1.27 m., while the k-NN with k equal to 1, the best case of k-NN, has average distance error of 0.54 m. and the maximum distance error of 2.06 m. That shows the accuracy of the RBF neural network is better than that of the k-NN. Therefore, the RBF neural network is more suitable to identify the position.

References

- [1] L. Zwirello, M. Janson, C. Ascher and U. Schwesinger, "Localization in Industrial Halls via Ultra-Wideband Signals," *2010 Workshop on Positioning Navigation and Communication*, pp. 144-149, Mar. 2010.
- [2] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, Nov. 2007.
- [3] R. Uppahad, J. Sangthong, and S. Promwong, "UWB Localization with 2-D Interpolation and K-Nearest Neighbor Based on Measurement Data," *2011 International Symposium on Antennas and Propagation*, Oct. 2011.
- [4] A. Toak, N. Kandil, S. Affes and S. Georges, "Neural Networks for Fingerprinting-Based Indoor Localization Using Ultra-Wideband," *Journal of Communications*, Vol. 4, No. 4, pp. 267-275, May 2009.
- [5] N. K. Bose and P. Liang, *Neural Network fundamentals with graphs, algorithm, and applications*, 1st ed., NY: McGraw-Hill, 1996.
- [6] K. Limpisawat, P. Supanakoon, S. Promwong, and J. Sangthong, "UWB Localization Measurement in an Indoor Environment," *2010 International Workshop on Information Communication Technology*, Aug. 2010.
- [7] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C*, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, Nov. 2007.
- [8] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, Jan.-Mar. 2009.
- [9] F. Lauvene. *Fundamentals of Neural Networks Architectures, Algorithms and Applications*. The United States of America: Prentice - Hall, Inc, 1994.
- [10] W. D. Philip. *Advanced Methods in Neural Computing*. The United States of America: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [11] Stamatios V. Kartalopoulos. *Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic*. The United States of America: IEEE Press, 1996.
- [12] S.Y. Kung. *Digital Neural Networks*. The United States of America: Prentice Hall, International, Inc., 1993.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE COMPARISON OF UWB-FINGERPRINTING POSITIONING WITH RBF NEURAL NETWORKS AND K-NEAREST NEIGHBOR IN AN INDOOR ENVIRONMENT

Wipassorn Winitchaikul¹ Jirapat Sangthong² Kannika Limpisawat¹ Pichaya Supanakoon¹ and Sathaporn Promwong¹
¹ Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok, Thailand

² Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
Mahanakorn University of Technology, Bangkok Thailand

Emails: s1011219@kmitl.ac.th, jirapat@mut.ac.th, s3611403@kmitl.ac.th, kspichay@kmitl.ac.th, kpsathap@kmitl.ac.th

ABSTRACT

In recent years, an indoor positioning system has been widely used in medical, industrial, public safety and transportation. In addition, its important requirement is high accuracy in dense multipath fading environments. This paper studies on indoor positioning using radial basis function (RBF) neural network and K-nearest-neighbor (K-NN) based on ultra wideband (UWB) signal. The channel transfer function was measured using vector network analyzer (VNA) at the frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz. The path losses and the delay times of first three paths were investigated to build the fingerprints and signatures. The accuracy of this work is studied and shown in the term of cumulative distribution function (CDF). From the results, RBF neural network can identify the position more correct than K-NN. Thus, RBF neural network is more suitable for an indoor positioning.

Index Terms -- ultra wideband (UWB); indoor positioning; radial basis function (RBF) neural network; K-nearest-neighbor (K-NN)

1. INTRODUCTION

Nowadays, the indoor positioning systems provide widely researched in many applications such as industrial sensors and equipments control [1], emergency services, people's position detection and many others. The positioning system is based on wireless technologies such as wireless local area network (WLAN), ZigBee, Bluetooth, ultrasonic, radio frequency identification (RFID) and ultra wideband (UWB). However, this system requires high accuracy and precision in an indoor environment. This leads the utilization of UWB for indoor positioning.

UWB is one of many technologies which are used widely in the indoor positioning because UWB has many characteristics such as low power, high data rate (high bandwidth) and robustness to multipath fading. Besides, there are many methods which are used for the indoor positioning such as received signal strength (RSS), time of arrival (TOA), time difference of arrival (TDOA), angle of arrival (AOA) and fingerprinting [2]. The fingerprinting technique concept, which is based on the same concept as human fingerprinting, can be identified

different paths of area. This technique consists of two phases. First, fingerprints are built and collected in database. Finally, a target signature is compared with the database to find the position. Furthermore, there are some methods that are used for position analysis such as probabilistic method, interpolation, artificial neural network (ANN), K-nearest neighbor (K-NN) [3] and other methods.

The ANN is a method base on the human brain working that can be learned and adapted to the environment. Furthermore, the ANN has a strong structure. If some neurons are damaged, the remaining neurons are still able to run. Therefore, neural networks are used in many applications including pattern recognition, clustering, prediction, optimization, function approximation and so on [4]-[5].

The K-NN is an algorithm for classifying objects based on closest training examples in the feature space. It is amongst the simplest of all machine learning algorithms: an object is classified by a majority vote of its neighbors, with the object being assigned to the class most common amongst its k nearest neighbors (k is a positive integer, typically small).

In this paper, we studied continuous from [6] which studied on indoor positioning using UWB. The purpose of this paper is to increase the accuracy of indoor positioning by changing algorithm. For our measurement, we used biconical antennas with horizontal polarization for both transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The vector network analyzer (VNA) was used to measure channel transfer function with frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz for covering the full band of UWB spectrum, which is specified by Federal Communications Commission (FCC). The path losses and delay times of first three paths were evaluated and used as both fingerprints and target signatures. Then, the positions were analyzed by using RBF neural network and K-NN. The comparison performance is shown in the term of cumulative distribution function (CDF).

The remainder of this paper is organized as follows. In Section 2, the positioning technique such as signal model, UWB fingerprint, RBF neural network and K-NN are described. Then, the measurement setup and results of this paper are explained in Sections 3 and 4, respectively. Finally, the conclusion is given in section 5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. POSITIONING TECHNIQUE

2.1. Signal Model

For UWB signal, we considered the rectangular passband waveform as the UWB transmitted waveform. The rectangular passband waveform in time domain and its spectral density function in frequency domain can be defined by

$$v_t(t) = \frac{A}{f_B} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)] \quad (1)$$

$$V_t(f) = \begin{cases} \frac{A}{f} & \|f - f_c\| \leq \frac{f_B}{2} \\ 0 & \|f - f_c\| > \frac{f_B}{2} \end{cases} \quad (2)$$

Where A is the maximum amplitude, f_B is the bandwidth, f_c is the center frequency, f_L and f_H are the lowest and highest frequencies, respectively.

Then, we can find the spectral density function of received signal $V_r(f)$ by using

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_c(f) \quad (3)$$

where $V_t(f)$ is transmitted signal in frequency domain and $H_c(f)$ is the frequency transfer function of channel obtained by using measurement scheme described in Section 3.

After that, the received signal in time domain $v_r(t)$ is evaluated by using inverse Fourier transform:

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi ft} df \quad (4)$$

2.2. UWB-Fingerprint

The fingerprinting positioning technique concept is based on the notion identifying a specified position by relying on some data that can represent this location. It has the same concept as human fingerprinting. In a given area, different information can be used to construct a fingerprint that can identify different parts of the area. This technique consists of two phases. First comprises the choice of the appropriate data to build a fingerprint and collect this information to database. The second phase consists of using the already built database in order to find locations by comparing a target signature with the database content (fingerprint). Theoretically, any information can be used to perform unique fingerprints. Here, the path losses and the delay times of first three paths of received power are comprised to build the fingerprint and signature of each specific position. The received power $p_r(t)$ in decibel is presented by

$$p_r(t)[dB] = -20 \log |v_r(t)| \quad (5)$$

Figure 1 shows the consideration of path losses and delay times from received power. These parameters were used to build the fingerprint and signature. From this figure, path losses of first, second and third paths are $PL_1 = -P_1$, $PL_2 = -P_2$ and $PL_3 = -P_3$. Similarly, the delay times of the first, the second and the third paths are t_1 , t_2 and t_3 respectively.

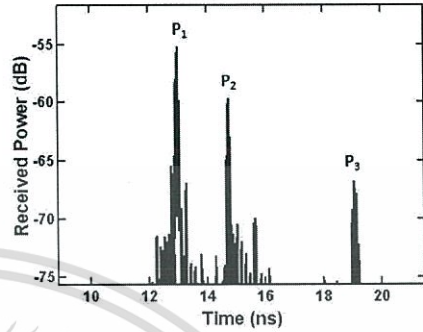


Figure 1. Received power waveform.

2.3. RBF Neural Network

The RBF neural network is a class of feed-forward neural networks which consists of one input layer, one hidden layer and one output layer, the kind of activation functions at hidden layer is nonlinear whereas at output layer is linear. The RBF structure is shown in Figure 2.

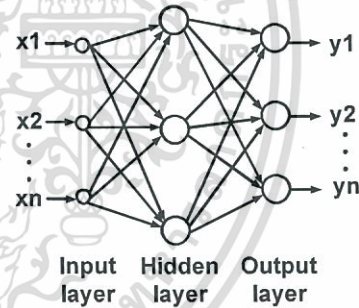


Figure 2. The structure of the RBF neural network

The RBF neural network has properties of the approximation and less time of training. The most important of structure is the hidden layer; the hidden layer outputs are found from activation functions then will be calculated with inputs from the input layer. Finally, neural network outputs are found from addition of weights and the hidden layer outputs. The neural network outputs can be written as

$$y_i = \sum_{k=1}^s w_{ik} \phi_k(\|p - c_k\|) \quad (6)$$

where s is number of neurons in the hidden layer, w_{ik} is value of the neural weight from the neurons k , $\phi_k(\cdot)$ is the activation functions, $\|p - c_k\|$ is the distance from the point of the input (p) to the center of the activation functions (c_k) at neurons k as is shown by norm, y_i is the output of the network.

The activation function used in this paper is a Gaussian activation function, which is the most popular of the RBF neural network. This Gaussian activation function can be expressed as

$$\phi(p) = \exp\left(\frac{-p^2}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

where σ is spread of the RBF neural networks as it is determined to width of the Gaussian activation function.

2.4. K-Nearest Neighbor

The estimated position is considered from the position that has minimum difference between its signature and fingerprint. The fingerprint error at (x, y) position $e_f(x, y)$ is defined as

$$e_f(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left\{ \frac{[PL_i(x, y) - PL_{si}]^2}{\sigma_{PL_i}^2} + \frac{[t_i(x, y) - t_{si}]^2}{\sigma_{t_i}^2} \right\}} \quad (8)$$

where $PL_i(x, y)$ and $t_i(x, y)$ are the path loss and delay time of fingerprint at (x, y) position of path i^{th} , $PL_{si}(x, y)$ and $t_{si}(x, y)$ are the path loss and delay time of signature of path i^{th} , PL_i and t_i are the standard deviation of path loss and delay time of fingerprint of path i^{th} .

The estimated position of K-NN (x_e, y_e) is considered as the position with minimum estimated error divide by k which k is $1, 2, \dots, n$, and can be written as

$$(x_e, y_e)_k = \frac{\sum_{j=1}^k (\arg \min e_f(x, y))_j}{k} \quad (9)$$

Finally, the accuracy of UWB fingerprinting is considered in the term of distance error. The distance error e_d can be defined as

$$e_d = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2} \quad (10)$$

where (x_e, y_e) is the correct position.

3. MEASUREMENTS

The measurements were done at the corridor of 12th floor, E-Building, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

3.1. Measurements Setup

3.1.1. Frequencies range

The VNA was used to measure the channel transfer function with frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz for covering the full band of UWB spectrum specified by FCC.

3.1.2. Antennas setup

The biconical antennas with horizontal polarization are used as Tx and Rx antennas.

3.2. Measurements Process

3.2.1. Reference data measurement

The measurement model for reference data is shown in Figure 3 (A) has 18 data points with 1 m space between each data points. The obtained data are fingerprints, which are stored in database.

3.2.2. Testing data measurement

The same process of Subsection 3.2.1 was done, but changed the measurement model as shown in Figure 4. The data points are changed from 18 to 55 with space reduced to 0.5 m.

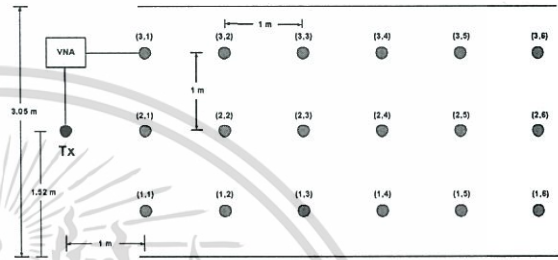


Figure 3. Measurement model for reference data.

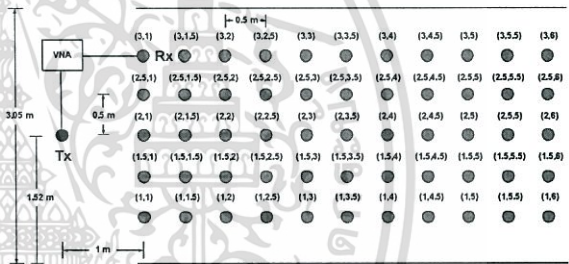


Figure 4. Measurement model for testing data.

4. RESULTS

After obtained all data from the measurements, the RBF neural network and the K-NN are used for analyzing the position.

4.1. RBF Neural Network Result

For the best results, the RBF neural network spread is 12.5 with 10 neurons in hidden layer. The CDF of distance error, which is the distance error from testing scenario, is shown in Figure 5. The average of distance error is 0.4786 m, and the maximum of distance error is 1.2690 m.

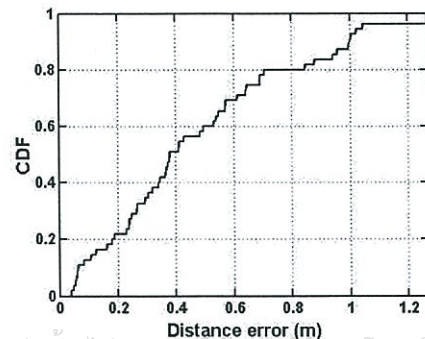


Figure 5. CDF of distance error for RBF neural network.

4.2. K-Nearest Neighbor Results

The CDFs of distance error for K-NN with K equal to 1, 2 and 3 are shown in Figures 6, 7 and 8, respectively. The maximum of error distance for K-NN with K equal to 1, 2 and 3 are 2.5000 m, 2.2360 m and 2.6034 m., respectively. 2-NN is the lowest of the maximum error distance for K-NN. Furthermore, the average of distance error for K-NN with K equal to 1, 2 and 3 are 1.4525 m, 1.4098 m and 1.4443 m.

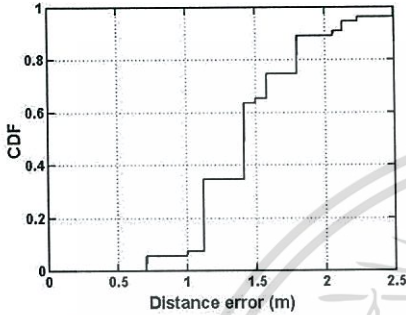


Figure 6. CDF of distance error for K-NN with K equal to 1.

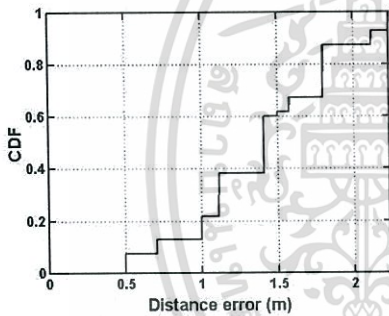


Figure 7. CDF of distance error for K-NN with K equal to 2.

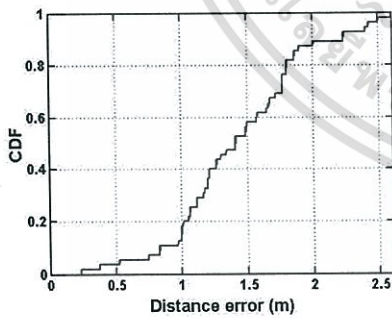


Figure 8. CDF of distance error for K-NN with K equal to 3.

4.3. Comparison Result

The comparison between CDFs of distance error for RBF neural network and K-NN with K equal to 1, 2 and 3 is shown in Figure 9. The RBF neural network has lower average of distance error and maximum distance error than the K-NN.

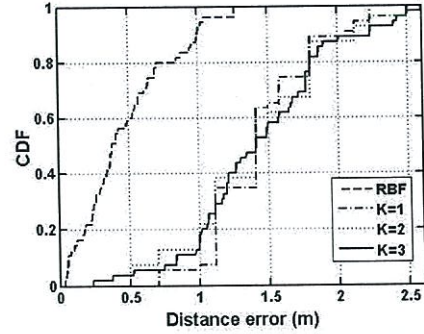


Figure 9. CDFs for RBF neural network and K-NN.

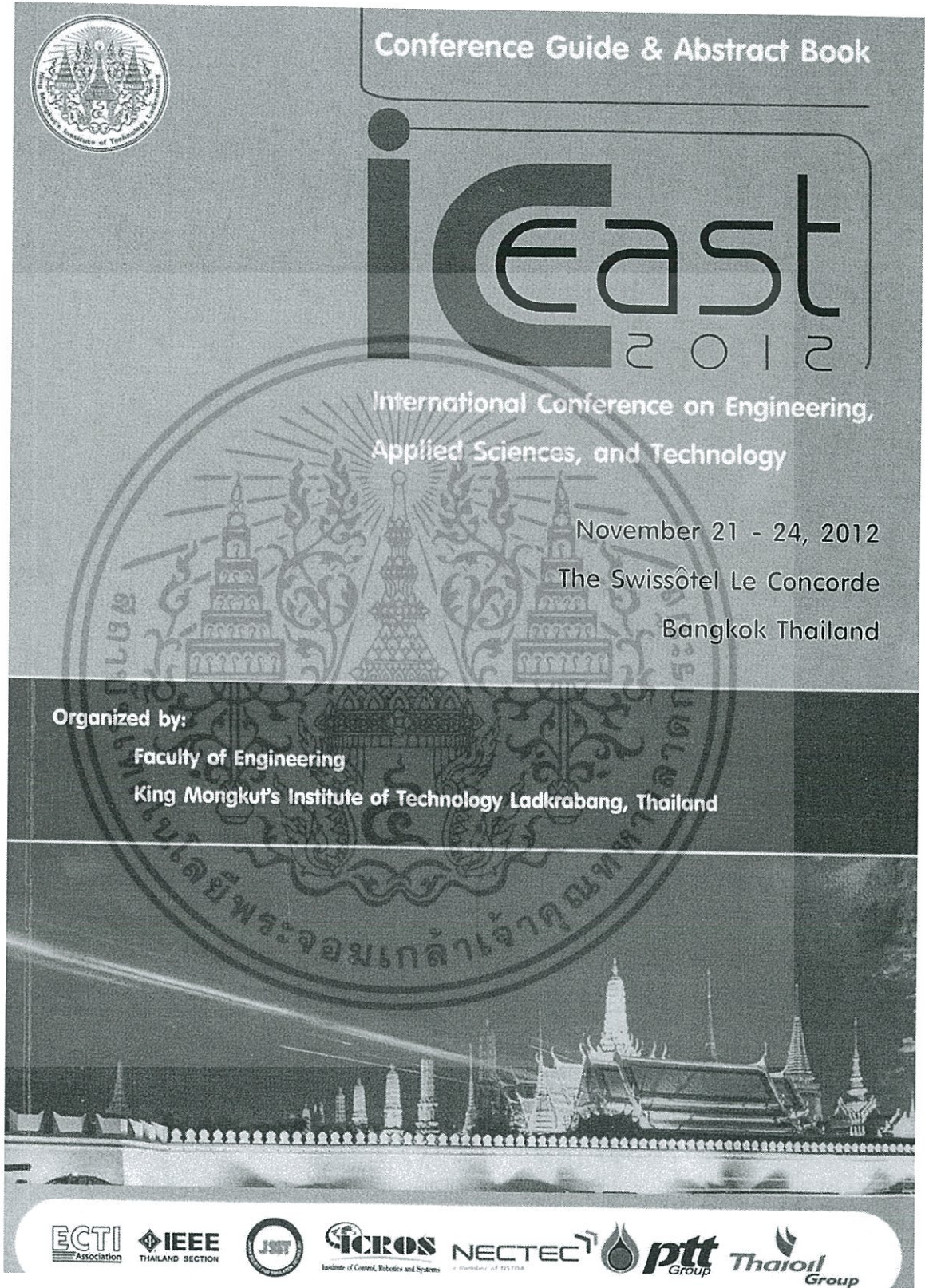
5. CONCLUSIONS

This paper studies on indoor positioning using RBF neural network and K-NN based on UWB signal. From the results, the RBF neural network has the average of distance error between the target positions and the approximate positions of 0.4786 m. and the maximum of distance error is 1.2690 m., while the K-NN with K equal to 2, the best case of K-NN, has average of distance error of 1.4098 m. and the maximum of error distance of 2.2360 m. That shows the accuracy of the RBF neural network is better than that of the K-NN. Therefore, the RBF neural network is more suitable to identify the position.

For the future work, we will study the possibility of accuracy improvement by adding some parameters to build the reference fingerprints and using another algorithm such as multi-layer perceptron (MLP) of neural networks, interpolation and other methods.

REFERENCES

- [1] L. Zwirello, M. Janson, C. Ascher and U. Schwesinger, "Localization in Industrial Halls via Ultra-Wideband Signals," *2010 Workshop on Positioning Navigation and Communication*, pp. 144–149, Mar. 2010.
- [2] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C*, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, Nov. 2007.
- [3] R. Uppahad, J. Sangthong, and S. Promwong, "UWB Localization with 2-D Interpolation and K-Nearest Neighbor Based on Measurement Data," *2011 International Symposium on Antennas and Propagation*, Oct. 2011.
- [4] A. Toak, N. Kandil, S. Affes and S. Georges, "Neural Networks for Fingerprinting-Based indoor Localization Using Ultra-Wideband," *Journal of Communications*, Vol. 4, No. 4, pp. 267-275, May 2009.
- [5] N.K.Bose and P.Liang, *Neural Network fundamentals with graphs, algorithm, and applications*, 1st ed., NY: McGraw-Hill, 1996.
- [6] K. Limpisawat, P. Supanakoon, S. Promwong, and J. Sangthong, "UWB Localization Measurement in an Indoor Environment," *2010 International Workshop on Information Communication Technology*, Aug. 2010.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Evaluation of Indoor Ultra Wideband Positioning with RBF and BP Neural Network

Wipassorn Vinichayakul*, Jirapat Sangthong**, Pichaya Supanakoon* and Sathaporn Promwong*

*Department of Telecommunication Engineering, **Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
{s5611932, s4610123, kspichay, kpsathap}@kmitl.ac.th

Abstract—Indoor positioning system has been applied for many applications such as in medical, industrial, public safety and transportation. Its important requirement is high accuracy in dense multipath fading environments. This paper evaluates the indoor positioning using radial basis function (RBF) neural network and back-propagation (BP) neural network based on ultra wideband (UWB) signal. The channel transfer function was measured using vector network analyzer (VNA) at the frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz. The path losses and the delay times of first three paths were investigated to build the fingerprints and signatures. In this work is studied and shown in the term of cumulative distribution function (CDF) and the average distance error. The distance errors are shown in surface graph at the x and y coordinates. As the results, RBF neural network can identify the position more correct than BP neural network and the training time of RBF neural network is less than the training of BP neural network. Thus, RBF neural network is more suitable for indoor positioning system. Moreover, both of neural networks indicate the high distance error in x coordinate because the location and measurement model are symmetric.

Keywords—component; UWB positioning; indoor positioning; radian basis function (RBF) neural network; back-propagation (BP) neural network

I. INTRODUCTION

Nowadays, indoor positioning systems are researched in many applications such as for item positioning in industries, positioning of controllable equipment [1], detection of human position (firefighters in fireplace or patient in hospital), and so on. Most positioning systems use wireless technologies such as wireless local area network (WLAN), ZigBee, Bluetooth, radio frequency identification (RFID), ultra wideband (UWB) [2]-[3] and so on. Nevertheless, the indoor positioning system requires technology with high accuracy and precision. Therefore, UWB will be a good choice for indoor positioning system.

Characteristics of UWB are appropriate for indoor positioning system such as low power, it doesn't interfere with other signals, high bandwidth: if the some frequencies of band are absorbed by objects, the remaining frequencies can pass into the receiver and robustness to multipath fading: it is hard

to get the interference from itself. For accuracy enhancement, indoor positioning method is one of the processes that have to be considered. Fingerprinting technique is the one of the popular techniques for indoor environment with more multipath fading. This technique its can be build fingerprint by using characteristics of multipath fading and then stored in database. After that, the positions are estimated using the target signature compared with the fingerprints in database. Furthermore, the important thing is the method which can estimate and detect positions. It has many methods such as probabilistic method, interpolation, k-nearest neighbor (k-NN) [4], neural network and other methods.

Neural networks are used widely in many applications. The neural network process is based on the human brain working which the neural networks have ability that can learn and adapt itself in many environments. Moreover, it has a strong structure. Although some neurons are damaged, the remaining neurons are still able to run. The popular neural network type is feed-forward, multilayer perceptron neural network. Therefore, it can solve many non-linear problems. There are many researches that studies about the neuron network such as pattern recognition, clustering, prediction, optimization, function approximation and so on [5]-[10].

Biconical antennas are used for both transmitter (Tx) and receiver (Rx) with horizontal polarization for channel measurement [11]. Transfer function between antennas was measured by the vector network analyzer (VNA) along 3 GHz to 11 GHz of frequency range covering the entire full-band of UWB spectrum of Federal Communications Commission (FCC). Path losses and delay times of first three paths were used as both fingerprints and target signatures. Then, the positions were analyzed by using radian basis function (RBF) neural network and back-propagation (BP) neural network. The results are shown in the cumulative distribution function (CDF) term, the distance errors in 3D graph at x and y coordinates and the time of training process term.

The rest of this paper is organized as follows. In Section II, the positioning technique such as signal model, UWB fingerprint, RBF neural network and BP neural network are

described. Then, the measurement setup and experimental results of this paper are explained in Sections III and IV, respectively. Finally, the conclusion is given in section V.

II. POSITIONING TECHNIQUE

A. UWB Signal Model

For UWB signal, the rectangular passband waveform is used as the UWB transmitted waveform. The rectangular passband waveform in time domain $v_t(t)$ and its spectral density function in frequency domain $V_t(f)$ can be defined by

$$v_t(t) = \frac{A}{f_B} [f_H \text{sinc}(2f_H t) - f_L \text{sinc}(2f_L t)], \quad (1)$$

$$V_t(f) = \begin{cases} \frac{A}{2f_B} & \|f - f_c\| \leq \frac{f_B}{2} \\ 0 & \|f - f_c\| > \frac{f_B}{2} \end{cases}, \quad (2)$$

where A is the maximum amplitude, f_B is the bandwidth, f_c is the center frequency, f_L and f_H are the lowest and highest frequencies, respectively.

The spectral density of received signal $V_r(f)$ is evaluated by using

$$V_r(f) = V_t(f) \cdot H_c(f), \quad (3)$$

where $H_c(f)$ is the frequency transfer function of channel obtained by using measurement scheme described in Section III.

After that, the received signal in time domain $v_r(t)$ is evaluated by using inverse Fourier transform:

$$v_r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_r(f) e^{j2\pi f t} df. \quad (4)$$

B. Fingerprinting Technique

The fingerprinting positioning technique concept is based on the notion identifying a specified position by relying on some data that can represent this location. It has the same concept as human fingerprinting. In a given area, different information can be used to construct a fingerprint that can identify different parts of the area. This technique consists of two phases. First comprises the choice of the appropriate data to build a fingerprint and collect this information to database. The second phase consists of using the already built database in order to find locations by comparing a target signature with the database content. Theoretically, any information can be used to perform unique fingerprints. Here, the path losses and the delay times of first three paths of received power are comprised to build the fingerprint and signature of each specific position. The received power p_r [dB] in decibel is presented by

$$p_r[\text{dB}] = -20 \log |v_r(t)|. \quad (5)$$

These parameters were used to build the fingerprints and signatures. From this figure, path losses of first, second and third paths are $PL_1 = -P_1$, $PL_2 = -P_2$ and $PL_3 = -P_3$. Similarly, the delay times of the first, the second and the third paths are t_1 , t_2 and t_3 , respectively.

C. RBF Neural Network

The RBF neural network is a class of feed-forward neural network that consists of one input layer, one hidden layer and one output layer, the kind of activation functions at hidden layer is nonlinear whereas at output layer is linear, the learning process is supervised learning. The RBF structure is shown in Fig 1.

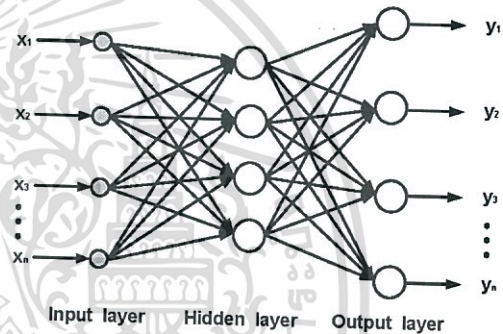


Figure 1. The structure of RBF neural network.

The most important of the structure is the hidden layer; the hidden layer outputs are found from activation functions then will be calculated with inputs from the input layer. Finally, neural network outputs are found from addition of weights and the hidden layer outputs. The neural network outputs can be written as

$$y_i = \sum_{k=1}^s w_{ik} \phi_k(\|p - c_k\|), \quad (6)$$

where s is number of neurons in the hidden layer, w_{ik} is value of the neural weight from the neurons k , $\phi_k(\cdot)$ is the activation functions, $\|p - c_k\|$ is the distance from the point of the input (p) to the center of the activation functions (c_k) at neurons k as is shown by norm, y_i is the output of the network.

The Gaussian activation function was used in hidden layer and the linear activation function was used in output layer [12]. The activation function is the most popular of the RBF neural network. This Gaussian activation function can be expressed as

$$\phi(p) = \exp\left(\frac{-p^2}{\sigma^2}\right), \quad (7)$$

where σ is spread of the RBF neural networks as it is determined to width of the Gaussian activation function.

The RBF neural network has properties of the approximation and less time of training since the weight of RBF neural network is obtained from the equation solving [10], the RBF neural network can create the function for learning.

D. BP Neural Network

The BP neural network is a class of feed-forward neural networks that consists of one input layer, many hidden layers and one output layer, the learning process is supervised learning. The BP neural network structure is shown in Fig. 2.

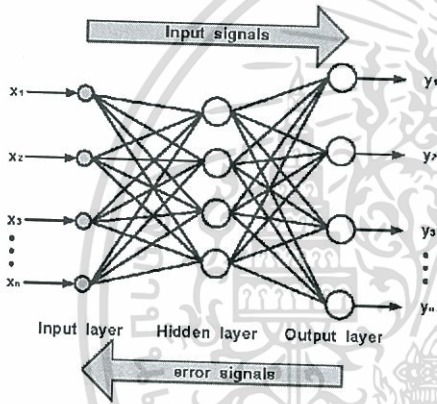


Figure 2. The structure of three layers BP neural network [13].

The BP neural network training has 3 stages [14] as forward – propagation, back – propagation of error and the weights and biases adjustment respectively.

The first stage, the output of hidden layers and output layer can be calculated as:

$$y_i = f\left(b_i + \sum_{k=1}^s w_{ik} p_k\right), \quad (8)$$

where $f(\cdot)$ is the activation functions and b_i is value of the biases from the neurons of each layer. The tanh activation function is used in hidden layer and liner activation functions are used in output layer.

The second stage, the outputs first stage are compared with the target in order to find the different result of error. After that, backward this value to adjacent layers in order to find the different value of weights (Δw) and biases (Δb) in each layer.

The final stage, the weights and biases are adjusted by the value from second stage until the outputs from this network

have the value less than required. In this paper, the mean square error (MSE) is used as following formula:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2, \quad (9)$$

where N is the number of training patterns and t_i is the target value.

III. MEASUREMENTS SETUP

The measurements were done at the corridor at E-Building, Faculty of Engineering, King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang. The VNA was used to measure the UWB channel at the frequency ranging from 3 GHz to 11 GHz. The biconical antennas were used with horizontal polarization as both Tx and Rx antennas. The positions models were divided 2 models. The first model was reference data measurement that is the database content in fingerprinting technique and the second model was testing data measurement that is the target signature in fingerprinting technique.

The measurement model for reference data is shown in Fig. 3. It has 18 data points with 1 m space between each data points. The obtained data are fingerprints, which are stored in database. The same process of reference data measurement was done, but changed the measurement model as shown in Fig. 4. The data points are changed from 18 to 55 data points with space reduced to 0.5 m.

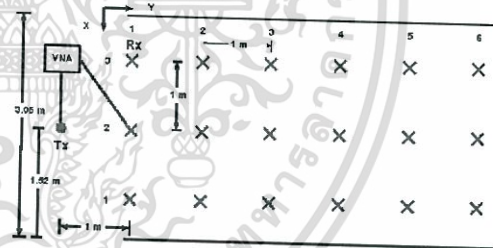


Figure 3. Measurement model of reference data.

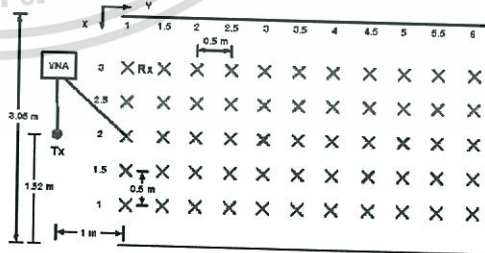


Figure 4. Measurement model of testing data.

IV. EXPERIMENTAL RESULTS

After obtained all data from the measurements, the RBF neural network and the BP neural network are used for analyzing the position.

A. RBF Neural Network Result

For the best results, the RBF neural network spread is 12.5 with 10 neurons in hidden layer. The CDF of distance error is shown in Fig. 5. The average distance error is 0.48 m, and the maximum distance error is 1.27 m.

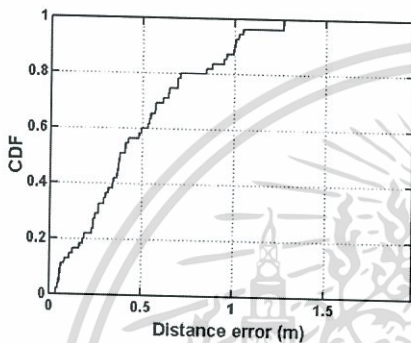


Figure 5. The cumulative distribution function of distance error of RBF neural network.

The distance error at x and y coordinates is shown in Fig. 6. From this figure, it can be seen the distance error of each position point but the most coordinates of high distance error is in x coordinate such as the distance error 1.05 m of coordinate (2.5, 1) is approximated as (1.46, 0.95), the distance error 1.27 m coordinate (2.5, 4.5) is approximated as (1.24, 4.38) and so on.

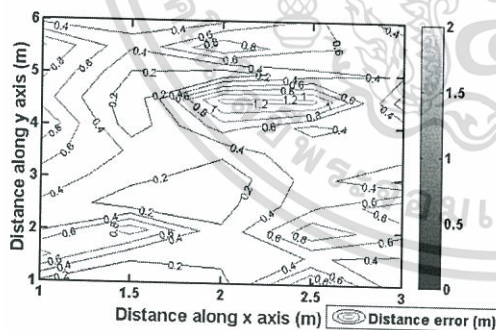


Figure 6. The distance error of RBF neural network.

B. BP Neural Network Result

In this paper, the BP neural network uses a hidden layer with 10 neurons in hidden layer. The activation function of

hidden layer is hyperbolic tangent sigmoid and the activation function of output layer is linear. The training process uses 300 epochs. The CDF of distance error is shown in Fig. 7. The average distance error is 0.57 m, and the maximum distance error is 1.98 m.

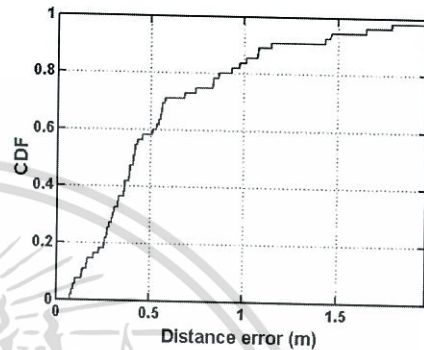


Figure 7. The cumulative distribution function of distance error of BP neural network.

The distance error at x and y coordinates is shown in Fig. 8. From this figure, it can be seen that the most coordinates of high distance error of x such as the distance error 1.43 m of the coordinate (1, 1.5) is approximated as (2.42, 1.57), the distance error 1.79 m of the coordinate (3, 2.5) is approximated as (1.23, 2.25) and so on.

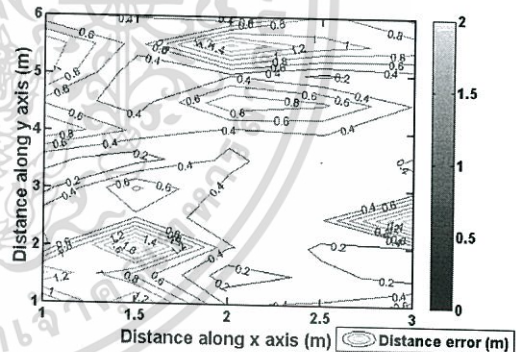


Figure 8. The distance error of BP neural network.

From the results, we analyze the coordinates detected by the both neural networks compared with the real coordinates. We found that the distance error of x coordinate is higher because of the symmetric location of the measurement model where the Tx antenna is at the center of x coordinate. Therefore, the reference data at the right and left sides of x coordinate are almost similar. The rest of coordinates which have low distance error are caused by the approximation of algorithm. Overall, the most low distance errors are in the middle of model. The results of the both neural networks are shown in Table I.

TABLE I. PERFORMANCE OF RBF AND BP NEURAL NETWORK.

| Neural Network Type | Average Distance Error (m) | Median Distance Error (m) | Maximum Distance Error (m) | Training Time (s) |
|---------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------|
| RBF | 0.48 | 0.38 | 1.27 | 0.88 |
| BP | 0.57 | 0.41 | 1.98 | 5.81 |

V. CONCLUSION

This paper evaluates the UWB indoor positioning using RBF and BP neural networks based on data of measurement. From the results, the RBF neural network has the average distance error between the target and approximate positions of 0.48 m and the maximum distance error is 1.27 m, while the BP neural network has average distance error of 0.57 m, and the maximum distance error of 1.98 m. It implies that the accuracy of RBF neural network is better than BP neural network. Moreover, the time of training process using RBF neural network is less than BP neural network. Therefore, the RBF neural network is more suitable to identify the position. We found that the high distance errors in both neural networks are in x coordinate because the location and measurement model are symmetric. For future work, we will study the possibility of accuracy improvement by adding some parameters to build the reference fingerprints in order to decrease the distance error from symmetric location and using another algorithm such as other multi-layer perceptron (MLP) of neural networks. The alternatives are to increase the performance of BP neural network by changing the training pattern, using forgetting factor, interpolation or other methods.

REFERENCES

- [1] L. Zwirello, M. Janson, C. Ascher and U. Schwesinger, "Localization in Industrial Halls via Ultra-Wideband Signals," 2010 Workshop on Positioning Navigation and Communication, pp. 144-149, Mar. 2010.
- [2] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, Nov. 2007.
- [3] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, Jan.-Mar. 2009.
- [4] R. Uppahad, J. Sangthong, and S. Promwong, "UWB Localization with 2-D Interpolation and K-Nearest Neighbor Based on Measurement Data," 2011 International Symposium on Antennas and Propagation, Oct. 2011.
- [5] A. Toak, N. Kandil, S. Affès and S. Georges, "Neural Networks for Fingerprinting-Based indoor Localization Using Ultra-Wideband," Journal of Communications, Vol. 4, No. 4, pp. 267-275, May 2009.
- [6] C. Nerguizian, C. Despins and S. Affès, "Geolocation in Mines With an Impulse Response Fingerprinting Technique and Neural Networks," Journal of Communications, Vol. 5, No. 3, pp. 603-611, March 2006.
- [7] N. K. Bose and P. Liang, Neural Network fundamentals with graphs, algorithm, and applications, 1st ed., NY: McGraw-Hill, 1996.
- [8] Fauselt Lauvene. Fundamentals of Neural Networks Architectures, Algorithms and Applications. The United States of America: Prentice - Hall, Inc, 1994.
- [9] Wasserman D.Philip. Advanced Methods in Neural Computing. The United States of America: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [10] A. Sniakaew. "Computational Intelligence Book," <https://sites.google.com/site/ComputationalIntelligencebook/download>.
- [11] J. Sangthong, P. Supanakoon, S. Promwong, "Comparison of UWB Fingerprinting with Vertical and Horizontal Polarizations for Indoor Localization," 2010 7th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2010), pp.617-621, Chiang Mai, Thailand, May 19-21, 2010.
- [12] H. Demuth, M. Beale and M. Hagan. "Neural Network Toolbox," www.mathworks.com/help/pdf_doc/nnet/nnet_ug.pdf
- [13] M. Negnevitsky, Artificial Intelligence. England: Addison - Wesley, 2002.
- [14] Y. Zhou, Y. Wang, Q. Yao, "Segmentation of Rice Disease Spots Based on Improved BPNN," 2010 International Conference on Digital Object Identifier, pp.575-578, 2010.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับสร้างฐานข้อมูล

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------|-----------|
| 0 | 1 | 1.4 | 44.1832641 | 42.32812848 | 4.76 | 6.0747471 |
| 0 | 1 | 1.4 | 44.07007746 | 42.20310812 | 4.76 | 6.0780968 |
| 0 | 1 | 1.4 | 43.90752451 | 42.07570658 | 4.76 | 6.0903088 |
| 0 | 1 | 1.4 | 43.81078345 | 41.94109221 | 4.76 | 6.0370258 |
| 0 | 1 | 1.4 | 43.64633331 | 41.76699126 | 4.76 | 6.0088468 |
| 0 | 2 | 1.4 | 50.0766485 | 46.58376284 | 8.07 | 10.362202 |
| 0 | 2 | 1.4 | 50.07235795 | 46.56608203 | 8.07 | 10.516802 |
| 0 | 2 | 1.4 | 49.84661924 | 46.42074448 | 8.07 | 10.289333 |
| 0 | 2 | 1.4 | 49.85796049 | 46.40569502 | 8.07 | 10.238885 |
| 0 | 2 | 1.4 | 49.66851122 | 46.2274062 | 8.07 | 10.444816 |
| 0 | 3 | 1.4 | 54.01668736 | 50.74771597 | 11.36 | 14.58762 |
| 0 | 3 | 1.4 | 54.26455423 | 50.79203528 | 11.35 | 14.644964 |
| 0 | 3 | 1.4 | 54.14265073 | 50.75632533 | 11.36 | 14.910687 |
| 0 | 3 | 1.4 | 54.11991315 | 50.83584559 | 11.36 | 14.755719 |
| 0 | 3 | 1.4 | 54.02647641 | 50.81067589 | 11.36 | 14.539465 |
| 0 | 4 | 1.4 | 55.40694355 | 50.85004594 | 14.71 | 17.770589 |
| 0 | 4 | 1.4 | 55.1686752 | 50.59277588 | 14.71 | 17.660245 |
| 0 | 4 | 1.4 | 55.29177774 | 50.82761955 | 14.71 | 17.499782 |
| 0 | 4 | 1.4 | 55.10934401 | 50.73933208 | 14.71 | 17.041779 |
| 1 | 4 | 1.4 | 55.25233428 | 50.72279305 | 14.71 | 17.23548 |
| 1 | 1 | 1.4 | 47.65977844 | 46.37709229 | 6.11 | 8.1387891 |
| 1 | 1 | 1.4 | 47.46891291 | 46.20058654 | 6.11 | 8.1858086 |
| 1 | 1 | 1.4 | 47.42691304 | 46.1561856 | 6.11 | 8.1168091 |
| 1 | 1 | 1.4 | 47.33986719 | 46.06965573 | 6.11 | 7.9997679 |
| 1 | 1 | 1.4 | 47.22228777 | 46.01135137 | 6.11 | 8.0391914 |
| 1 | 2 | 1.4 | 51.66852183 | 48.51480145 | 8.9 | 12.018044 |
| 1 | 2 | 1.4 | 51.67999519 | 48.46245731 | 8.9 | 12.261296 |
| 1 | 2 | 1.4 | 51.41072972 | 48.28043441 | 8.9 | 12.116402 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับสร้างฐานข้อมูล (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------|-----------|
| 1 | 2 | 1.4 | 51.29114105 | 48.21893717 | 8.9 | 12.125043 |
| 1 | 2 | 1.4 | 51.24509083 | 48.19049168 | 8.9 | 12.189691 |
| 1 | 3 | 1.4 | 54.25907876 | 50.73721795 | 11.87 | 15.207497 |
| 1 | 3 | 1.4 | 54.07360915 | 50.62460346 | 11.87 | 15.092096 |
| 1 | 3 | 1.4 | 53.65915654 | 50.2736989 | 11.87 | 14.925328 |
| 1 | 3 | 1.4 | 53.78777342 | 50.43579011 | 11.87 | 14.967642 |
| 1 | 3 | 1.4 | 53.71723782 | 50.41698283 | 11.86 | 14.828646 |
| 1 | 4 | 1.4 | 56.38532537 | 52.303422 | 15.13 | 18.537105 |
| 1 | 4 | 1.4 | 56.33804613 | 52.03432144 | 15.13 | 18.364761 |
| 1 | 4 | 1.4 | 56.48309481 | 51.9869354 | 15.13 | 18.706569 |
| 1 | 4 | 1.4 | 56.32961815 | 51.98102418 | 15.13 | 18.461686 |
| 1 | 4 | 1.4 | 55.93788575 | 51.71332591 | 15.13 | 18.688592 |
| 2 | 1 | 1.4 | 50.86252936 | 48.81993275 | 8.83 | 11.370807 |
| 2 | 1 | 1.4 | 50.78278723 | 48.74972989 | 8.83 | 11.282408 |
| 2 | 1 | 1.4 | 50.62249935 | 48.47897623 | 8.83 | 11.51305 |
| 2 | 1 | 1.4 | 50.64593244 | 48.48726285 | 8.83 | 11.613022 |
| 2 | 1 | 1.4 | 50.46054351 | 48.35453298 | 8.83 | 11.508066 |
| 2 | 2 | 1.4 | 53.26255839 | 50.73708532 | 10.8 | 14.01377 |
| 2 | 2 | 1.4 | 53.11703818 | 50.51330311 | 10.8 | 14.053151 |
| 2 | 2 | 1.4 | 52.81150891 | 50.27551774 | 10.8 | 13.957619 |
| 2 | 2 | 1.4 | 52.93862603 | 50.44677513 | 10.8 | 13.925826 |
| 2 | 2 | 1.4 | 52.62436229 | 50.10761727 | 10.8 | 13.935908 |
| 2 | 3 | 1.4 | 54.84796646 | 51.06264904 | 13.42 | 16.5017 |
| 2 | 3 | 1.4 | 54.72581271 | 50.93679025 | 13.42 | 16.835594 |
| 2 | 3 | 1.4 | 54.55932316 | 50.90370409 | 13.42 | 16.688768 |
| 2 | 3 | 1.4 | 54.52525951 | 50.70805709 | 13.42 | 16.775298 |
| 2 | 3 | 1.4 | 54.39518778 | 50.7545157 | 13.42 | 16.368699 |
| 2 | 4 | 1.4 | 56.70816171 | 52.14415935 | 16.29 | 19.42011 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับสร้างฐานข้อมูล (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------|-----------|
| 2 | 4 | 1.4 | 56.4225195 | 51.94083171 | 16.29 | 19.4981 |
| 2 | 4 | 1.4 | 56.85748962 | 52.2078773 | 16.29 | 19.589538 |
| 2 | 4 | 1.4 | 56.3010213 | 51.55455999 | 16.29 | 19.400156 |
| 2 | 4 | 1.4 | 56.19747919 | 51.5904023 | 16.29 | 19.510105 |
| 0 | 1 | 1.5 | 43.69538857 | 41.83779162 | 4.76 | 6.2467305 |
| 0 | 1 | 1.5 | 43.54866718 | 41.72450885 | 4.76 | 6.1850819 |
| 0 | 1 | 1.5 | 43.53565828 | 41.68496735 | 4.76 | 6.2104307 |
| 0 | 1 | 1.5 | 43.49130895 | 41.65106427 | 4.76 | 6.159434 |
| 0 | 1 | 1.5 | 43.36824042 | 41.52449714 | 4.76 | 6.2100735 |
| 0 | 2 | 1.5 | 49.5353498 | 46.06601967 | 8.07 | 10.277611 |
| 0 | 2 | 1.5 | 49.57513767 | 45.9536971 | 8.07 | 10.439476 |
| 0 | 2 | 1.5 | 49.37852703 | 45.8830871 | 8.07 | 10.315838 |
| 0 | 2 | 1.5 | 49.53573164 | 45.98454698 | 8.07 | 10.369669 |
| 0 | 2 | 1.5 | 49.41992229 | 45.91052339 | 8.07 | 10.241315 |
| 0 | 3 | 1.5 | 53.18158394 | 50.12929407 | 11.32 | 14.470891 |
| 0 | 3 | 1.5 | 52.94262818 | 50.02113538 | 11.32 | 14.378536 |
| 0 | 3 | 1.5 | 53.05912263 | 50.01003228 | 11.32 | 14.469848 |
| 0 | 3 | 1.5 | 52.56349543 | 49.70867467 | 11.32 | 14.198563 |
| 0 | 3 | 1.5 | 52.42583432 | 49.68016227 | 11.32 | 14.090897 |
| 0 | 4 | 1.5 | 55.97205968 | 51.80803634 | 14.71 | 17.89498 |
| 0 | 4 | 1.5 | 55.68893618 | 51.60842645 | 14.71 | 17.506844 |
| 0 | 4 | 1.5 | 55.82740057 | 51.43717748 | 14.71 | 17.564638 |
| 0 | 4 | 1.5 | 55.39879373 | 51.41790284 | 14.71 | 17.67494 |
| 1 | 4 | 1.5 | 55.6407205 | 51.43603936 | 14.71 | 17.655697 |
| 1 | 1 | 1.5 | 46.64885282 | 45.25490192 | 6.06 | 7.9359561 |
| 1 | 1 | 1.5 | 46.52401978 | 45.13391712 | 6.06 | 7.8636682 |
| 1 | 1 | 1.5 | 46.39969801 | 45.02937943 | 6.06 | 7.8538984 |
| 1 | 1 | 1.5 | 46.29740781 | 44.90684269 | 6.06 | 7.7552251 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับสร้างฐานข้อมูล (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------|-----------|
| 1 | 1 | 1.5 | 46.26758671 | 44.95248295 | 6.06 | 7.8707021 |
| 1 | 2 | 1.5 | 51.02149983 | 48.38319762 | 8.83 | 11.600571 |
| 1 | 2 | 1.5 | 50.84645371 | 48.11060739 | 8.83 | 11.696392 |
| 1 | 2 | 1.5 | 50.68978051 | 47.95319006 | 8.83 | 11.839303 |
| 1 | 2 | 1.5 | 50.63423097 | 47.92694458 | 8.83 | 11.603212 |
| 1 | 2 | 1.5 | 50.60407363 | 47.76513832 | 8.83 | 11.732935 |
| 1 | 3 | 1.5 | 53.96118186 | 50.6664564 | 11.94 | 15.176484 |
| 1 | 3 | 1.5 | 53.99372093 | 50.56993327 | 11.94 | 15.319783 |
| 1 | 3 | 1.5 | 53.94196218 | 50.64841109 | 11.94 | 15.170865 |
| 1 | 3 | 1.5 | 53.78287881 | 50.33106593 | 11.94 | 15.022892 |
| 1 | 3 | 1.5 | 53.73403851 | 50.41827776 | 11.94 | 15.075035 |
| 1 | 4 | 1.5 | 55.9279272 | 51.60680985 | 15.2 | 18.96455 |
| 1 | 4 | 1.5 | 55.68442002 | 51.41835635 | 15.2 | 18.581386 |
| 1 | 4 | 1.5 | 55.42974059 | 51.18781797 | 15.2 | 18.646202 |
| 1 | 4 | 1.5 | 55.35022536 | 51.17505017 | 15.2 | 18.895586 |
| 1 | 4 | 1.5 | 55.48908176 | 51.21298427 | 15.2 | 18.898881 |
| 2 | 1 | 1.5 | 51.79309764 | 49.32172734 | 8.82 | 11.552775 |
| 2 | 1 | 1.5 | 51.54245712 | 49.12287242 | 8.82 | 11.396602 |
| 2 | 1 | 1.5 | 51.47631235 | 48.95468026 | 8.82 | 11.655111 |
| 2 | 1 | 1.5 | 51.30896203 | 48.8444209 | 8.82 | 11.558047 |
| 2 | 1 | 1.5 | 51.17555092 | 48.73909734 | 8.82 | 11.462048 |
| 2 | 2 | 1.5 | 52.38602091 | 49.75100069 | 10.8 | 13.422361 |
| 2 | 2 | 1.5 | 52.17735504 | 49.58787858 | 10.79 | 13.64079 |
| 2 | 2 | 1.5 | 52.38083326 | 49.72635942 | 10.8 | 13.569965 |
| 2 | 2 | 1.5 | 52.20861832 | 49.4544088 | 10.8 | 13.605217 |
| 2 | 2 | 1.5 | 52.01190515 | 49.31397774 | 10.8 | 13.517849 |
| 2 | 3 | 1.5 | 56.08330399 | 52.10601105 | 13.5 | 17.244295 |
| 2 | 3 | 1.5 | 55.73709067 | 51.80933461 | 13.5 | 16.856775 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับสร้างฐานข้อมูล (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------|-----------|
| 2 | 3 | 1.5 | 56.0103382 | 51.99350601 | 13.5 | 16.954581 |
| 2 | 3 | 1.5 | 55.77620822 | 51.87376317 | 13.5 | 16.960831 |
| 2 | 3 | 1.5 | 55.75532836 | 51.92499998 | 13.5 | 16.807858 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.61317582 | 53.54026096 | 16.34 | 19.993026 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.21794342 | 53.37529993 | 16.34 | 19.832451 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.75559585 | 53.41733438 | 16.33 | 20.017827 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.52490995 | 53.35531134 | 16.34 | 20.206348 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.60942674 | 53.33361108 | 16.33 | 20.213454 |
| 0 | 1 | 1.6 | 43.5113454 | 41.65069061 | 4.71 | 6.032728 |
| 0 | 1 | 1.6 | 43.37940743 | 41.57153931 | 4.71 | 5.991041 |
| 0 | 1 | 1.6 | 43.35576195 | 41.51119646 | 4.71 | 5.9978423 |
| 0 | 1 | 1.6 | 43.31577028 | 41.45778134 | 4.71 | 6.0277828 |
| 0 | 1 | 1.6 | 43.3676244 | 41.46067233 | 4.71 | 6.0321949 |
| 0 | 2 | 1.6 | 49.74861512 | 46.07667879 | 8.11 | 10.359035 |
| 0 | 2 | 1.6 | 49.80719309 | 46.06013129 | 8.1 | 10.372539 |
| 0 | 2 | 1.6 | 49.80382575 | 46.11681537 | 8.1 | 10.349291 |
| 0 | 2 | 1.6 | 49.60264145 | 45.90583726 | 8.1 | 10.295015 |
| 0 | 2 | 1.6 | 49.67787327 | 45.98290047 | 8.11 | 10.3129 |
| 0 | 3 | 1.6 | 53.84484463 | 50.46144811 | 11.36 | 14.774402 |
| 0 | 3 | 1.6 | 53.58181818 | 50.33440569 | 11.36 | 14.374281 |
| 0 | 3 | 1.6 | 53.44513973 | 50.1789841 | 11.36 | 14.677521 |
| 0 | 3 | 1.6 | 53.39031088 | 50.1824407 | 11.36 | 14.640002 |
| 0 | 3 | 1.6 | 53.5166005 | 50.28179957 | 11.36 | 14.580346 |
| 0 | 4 | 1.6 | 57.06722854 | 52.54385042 | 14.68 | 17.908033 |
| 0 | 4 | 1.6 | 56.7108761 | 52.53944872 | 14.68 | 17.89612 |
| 0 | 4 | 1.6 | 56.94074646 | 52.58075347 | 14.68 | 17.627359 |
| 0 | 4 | 1.6 | 57.02828024 | 52.58494784 | 14.68 | 18.053542 |
| 1 | 4 | 1.6 | 56.8679966 | 52.51131782 | 14.68 | 17.949891 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับสร้างฐานข้อมูล (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------|-----------|
| 1 | 1 | 1.6 | 47.00461179 | 45.65019371 | 6.14 | 8.1452752 |
| 1 | 1 | 1.6 | 46.74247732 | 45.40651235 | 6.14 | 8.0984056 |
| 1 | 1 | 1.6 | 46.66740271 | 45.36079514 | 6.14 | 8.0549799 |
| 1 | 1 | 1.6 | 46.49458907 | 45.16509703 | 6.14 | 8.0220232 |
| 1 | 1 | 1.6 | 46.5393839 | 45.12616257 | 6.14 | 8.164073 |
| 1 | 2 | 1.6 | 50.37443896 | 47.6871536 | 8.85 | 11.555536 |
| 1 | 2 | 1.6 | 50.41413897 | 47.66722148 | 8.85 | 11.722358 |
| 1 | 2 | 1.6 | 50.13551102 | 47.47361674 | 8.85 | 11.642333 |
| 1 | 2 | 1.6 | 49.97284644 | 47.24748403 | 8.85 | 11.524952 |
| 1 | 2 | 1.6 | 49.90778859 | 47.14626691 | 8.85 | 11.566556 |
| 1 | 3 | 1.6 | 54.23544187 | 50.82956895 | 11.95 | 15.159229 |
| 1 | 3 | 1.6 | 54.0503339 | 50.71225546 | 11.95 | 15.472041 |
| 1 | 3 | 1.6 | 53.85935495 | 50.51348973 | 11.95 | 14.952186 |
| 1 | 3 | 1.6 | 53.69498716 | 50.37472765 | 11.95 | 15.032904 |
| 1 | 3 | 1.6 | 53.76190357 | 50.45199138 | 11.95 | 14.947312 |
| 1 | 4 | 1.6 | 55.94511152 | 51.88711308 | 15.11 | 18.507179 |
| 1 | 4 | 1.6 | 56.28285681 | 51.91229814 | 15.11 | 18.671419 |
| 1 | 4 | 1.6 | 55.7633126 | 51.62144934 | 15.11 | 18.695653 |
| 1 | 4 | 1.6 | 55.85423174 | 51.36584743 | 15.11 | 18.863465 |
| 1 | 4 | 1.6 | 56.02667566 | 51.69020753 | 15.11 | 18.583413 |
| 2 | 1 | 1.6 | 50.4316857 | 48.05270671 | 8.79 | 11.490427 |
| 2 | 1 | 1.6 | 50.06777266 | 47.7659348 | 8.79 | 11.454909 |
| 2 | 1 | 1.6 | 49.87892631 | 47.56248817 | 8.79 | 11.353846 |
| 2 | 1 | 1.6 | 49.30729191 | 44.6927511 | 8.79 | 14.173148 |
| 2 | 1 | 1.6 | 49.69975522 | 47.34262568 | 8.79 | 11.262901 |
| 2 | 2 | 1.6 | 51.97079577 | 49.4805326 | 10.72 | 13.352816 |
| 2 | 2 | 1.6 | 51.78639487 | 49.19338007 | 10.72 | 13.602695 |
| 2 | 2 | 1.6 | 51.72391758 | 49.14281607 | 10.72 | 13.455744 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับสร้างฐานข้อมูล (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------|-----------|
| 2 | 2 | 1.6 | 51.46492127 | 48.97685021 | 10.72 | 13.355545 |
| 2 | 2 | 1.6 | 51.51152376 | 49.0594518 | 10.72 | 13.445135 |
| 2 | 3 | 1.6 | 54.61118448 | 51.04496362 | 13.32 | 16.407634 |
| 2 | 3 | 1.6 | 54.48894397 | 50.83537817 | 13.32 | 16.526125 |
| 2 | 3 | 1.6 | 54.5930784 | 50.85061205 | 13.32 | 16.801735 |
| 2 | 3 | 1.6 | 54.49198327 | 50.85249372 | 13.32 | 16.672815 |
| 2 | 3 | 1.6 | 54.13150324 | 50.60510751 | 13.32 | 16.472888 |
| 2 | 4 | 1.6 | 56.96578391 | 51.97429882 | 16.26 | 19.800205 |
| 2 | 4 | 1.6 | 56.98637841 | 52.08580523 | 16.26 | 19.742718 |
| 2 | 4 | 1.6 | 56.89157109 | 51.85951395 | 16.26 | 19.438 |
| 2 | 4 | 1.6 | 56.77469205 | 51.88838187 | 16.26 | 19.422731 |
| 2 | 4 | 1.6 | 56.68786358 | 51.87486796 | 16.26 | 19.419881 |

หมายเหตุ: แกน x แกน y และ แกน z มีหน่วยเป็น เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 1

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 0 | 1 | 1.4 | 43.64839803 | 41.740013 | 4.76 | 6.0692242 |
| 0 | 1.5 | 1.4 | 47.29109023 | 44.7223659 | 6.37 | 8.2036396 |
| 0 | 2 | 1.4 | 49.55895877 | 46.1278382 | 8.07 | 10.25482 |
| 0 | 2.5 | 1.4 | 51.96719791 | 49.1182697 | 9.72 | 12.636215 |
| 0 | 3 | 1.4 | 53.95381449 | 50.6982538 | 11.36 | 14.509514 |
| 0 | 3.5 | 1.4 | 54.98286779 | 50.7920094 | 13.07 | 16.457584 |
| 0 | 4 | 1.4 | 55.16420062 | 50.6569055 | 14.71 | 17.347054 |
| 0.5 | 1 | 1.4 | 45.51550926 | 44.5448658 | 5.13 | 6.6145531 |
| 0.5 | 1.5 | 1.4 | 48.30707382 | 46.1138809 | 6.68 | 8.9983233 |
| 0.5 | 2 | 1.4 | 50.65520891 | 48.0295711 | 8.28 | 11.579418 |
| 0.5 | 2.5 | 1.4 | 51.61510962 | 48.0465981 | 9.81 | 12.894473 |
| 0.5 | 3 | 1.4 | 53.16948998 | 49.5866897 | 11.51 | 14.060291 |
| 0.5 | 3.5 | 1.4 | 54.86913693 | 51.3305717 | 13.15 | 16.532547 |
| 0.5 | 4 | 1.4 | 56.42354706 | 52.7531533 | 14.79 | 18.589541 |
| 1 | 1 | 1.4 | 47.26526818 | 46.0021439 | 6.11 | 7.8294112 |
| 1 | 1.5 | 1.4 | 49.52169265 | 47.6130643 | 7.42 | 9.9946886 |
| 1 | 2 | 1.4 | 51.17444482 | 48.146383 | 8.9 | 12.140793 |
| 1 | 2.5 | 1.4 | 52.79574246 | 49.1191377 | 10.38 | 13.749082 |
| 1 | 3 | 1.4 | 53.71023059 | 50.2803256 | 11.87 | 14.749791 |
| 1 | 3.5 | 1.4 | 55.77836866 | 51.0340572 | 13.5 | 16.96752 |
| 1 | 4 | 1.4 | 56.07380041 | 51.9781484 | 15.13 | 18.452943 |
| 1.5 | 1 | 1.4 | 49.39981972 | 47.9315079 | 7.37 | 9.7073164 |
| 1.5 | 1.5 | 1.4 | 50.76820185 | 48.8338745 | 8.48 | 11.495638 |
| 1.5 | 2 | 1.4 | 52.07483225 | 49.1630216 | 9.72 | 12.803789 |
| 1.5 | 2.5 | 1.4 | 52.67269204 | 49.0953471 | 11.08 | 14.441174 |
| 1.5 | 3 | 1.4 | 53.80270924 | 49.9045338 | 12.56 | 15.667287 |
| 1.5 | 3.5 | 1.4 | 55.12196999 | 51.5613195 | 14.04 | 17.273059 |
| 1.5 | 4 | 1.4 | 56.16909043 | 51.3498649 | 15.61 | 19.582799 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 1 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 2 | 1 | 1.4 | 50.58865446 | 48.4312196 | 8.83 | 11.534726 |
| 2 | 1.5 | 1.4 | 51.50263188 | 48.8071965 | 9.72 | 12.965251 |
| 2 | 2 | 1.4 | 52.66393718 | 50.1371818 | 10.8 | 13.647413 |
| 2 | 2.5 | 1.4 | 53.96468687 | 49.9412347 | 12.09 | 15.366569 |
| 2 | 3 | 1.4 | 54.32376284 | 50.6864608 | 13.42 | 16.34302 |
| 2 | 3.5 | 1.4 | 55.78742325 | 51.2333696 | 14.87 | 18.493377 |
| 2 | 4 | 1.4 | 56.1418913 | 51.4781811 | 16.29 | 19.529576 |
| 0 | 1 | 1.5 | 43.33963572 | 41.5103999 | 4.76 | 6.1590868 |
| 0 | 1.5 | 1.5 | 46.8829883 | 44.4826001 | 6.38 | 8.1109151 |
| 0 | 2 | 1.5 | 49.42877043 | 45.8678603 | 8.07 | 10.301931 |
| 0 | 2.5 | 1.5 | 50.96055697 | 48.3179455 | 9.67 | 12.112979 |
| 0 | 3 | 1.5 | 52.62251386 | 49.8619091 | 11.32 | 14.177453 |
| 0 | 3.5 | 1.5 | 54.15043187 | 50.5341351 | 13.08 | 15.80195 |
| 0 | 4 | 1.5 | 55.44545423 | 51.398827 | 14.71 | 17.740764 |
| 0.5 | 1 | 1.5 | 43.99990314 | 42.9426212 | 5.13 | 6.3551305 |
| 0.5 | 1.5 | 1.5 | 46.78887412 | 44.6108309 | 6.64 | 8.6363761 |
| 0.5 | 2 | 1.5 | 49.34597629 | 46.5999915 | 8.21 | 11.159969 |
| 0.5 | 2.5 | 1.5 | 50.64303919 | 47.2181709 | 9.85 | 12.709009 |
| 0.5 | 3 | 1.5 | 52.77124783 | 49.0431079 | 11.51 | 14.236258 |
| 0.5 | 3.5 | 1.5 | 54.48408085 | 50.9236377 | 13.09 | 16.57793 |
| 0.5 | 4 | 1.5 | 56.03508228 | 52.3664972 | 14.85 | 18.774537 |
| 1 | 1 | 1.5 | 46.25172861 | 44.8270882 | 6.06 | 7.9385083 |
| 1 | 1.5 | 1.5 | 48.70160646 | 46.6878994 | 7.4 | 9.9696226 |
| 1 | 2 | 1.5 | 50.52412162 | 47.7680985 | 8.83 | 11.788814 |
| 1 | 2.5 | 1.5 | 52.47823691 | 48.9202994 | 10.34 | 13.40181 |
| 1 | 3 | 1.5 | 53.581703 | 50.0932212 | 11.94 | 15.408666 |
| 1 | 3.5 | 1.5 | 54.79944681 | 50.2589736 | 13.57 | 17.055953 |
| 1 | 4 | 1.5 | 55.18763437 | 50.8680681 | 15.2 | 18.714251 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 1 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 1.5 | 1 | 1.5 | 47.64595723 | 45.9214253 | 7.19 | 9.3040453 |
| 1.5 | 1.5 | 1.5 | 49.12547793 | 47.1478701 | 8.57 | 11.219781 |
| 1.5 | 2 | 1.5 | 50.36394071 | 47.5786204 | 9.79 | 12.464971 |
| 1.5 | 2.5 | 1.5 | 52.7978273 | 49.2563093 | 11.16 | 14.282231 |
| 1.5 | 3 | 1.5 | 53.91560262 | 49.649204 | 12.61 | 15.742783 |
| 1.5 | 3.5 | 1.5 | 54.87042998 | 51.377638 | 14.1 | 17.697492 |
| 1.5 | 4 | 1.5 | 56.13442902 | 51.5600891 | 15.63 | 19.257006 |
| 2 | 1 | 1.5 | 51.25419706 | 48.818571 | 8.82 | 11.325142 |
| 2 | 1.5 | 1.5 | 52.33886495 | 49.7659515 | 9.66 | 12.790417 |
| 2 | 2 | 1.5 | 51.97077308 | 49.3851745 | 10.79 | 13.278186 |
| 2 | 2.5 | 1.5 | 54.8305342 | 50.7119323 | 12.11 | 15.379563 |
| 2 | 3 | 1.5 | 55.78103237 | 51.8527599 | 13.5 | 16.743662 |
| 2 | 3.5 | 1.5 | 57.13905534 | 52.3028387 | 14.88 | 18.095213 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.74614916 | 53.2532749 | 16.34 | 19.98273 |
| 0 | 1 | 1.6 | 43.28911778 | 41.3631716 | 4.71 | 6.0285907 |
| 0 | 1.5 | 1.6 | 46.73680337 | 44.4035147 | 6.36 | 8.0426834 |
| 0 | 2 | 1.6 | 49.55221143 | 45.8642128 | 8.1 | 10.445501 |
| 0 | 2.5 | 1.6 | 51.53922133 | 49.0735165 | 9.69 | 12.363944 |
| 0 | 3 | 1.6 | 53.24056779 | 50.0954147 | 11.36 | 14.426983 |
| 0 | 3.5 | 1.6 | 55.7493735 | 51.2916731 | 13.03 | 16.009779 |
| 0 | 4 | 1.6 | 57.1624477 | 52.6507384 | 14.68 | 17.611788 |
| 0.5 | 1 | 1.6 | 44.54035502 | 43.5368259 | 5.14 | 6.5766881 |
| 0.5 | 1.5 | 1.6 | 48.46538958 | 45.7707395 | 6.65 | 8.9340056 |
| 0.5 | 2 | 1.6 | 51.09538593 | 47.9245445 | 8.29 | 11.579513 |
| 0.5 | 2.5 | 1.6 | 51.39243633 | 48.060055 | 9.85 | 12.80611 |
| 0.5 | 3 | 1.6 | 52.83784924 | 48.7292424 | 11.49 | 14.895612 |
| 0.5 | 3.5 | 1.6 | 54.38000981 | 50.9986679 | 13.1 | 16.370106 |
| 0.5 | 4 | 1.6 | 55.50482188 | 51.9029452 | 14.83 | 18.251504 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 1 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 1 | 1 | 1.6 | 46.41434583 | 45.0300358 | 6.14 | 7.9848066 |
| 1 | 1.5 | 1.6 | 48.43758197 | 46.5745504 | 7.41 | 9.7440992 |
| 1 | 2 | 1.6 | 49.90763126 | 47.2175893 | 8.85 | 11.466132 |
| 1 | 2.5 | 1.6 | 50.93212662 | 47.4646744 | 10.26 | 13.367982 |
| 1 | 3 | 1.6 | 53.56593041 | 50.2785636 | 11.95 | 14.976796 |
| 1 | 3.5 | 1.6 | 55.28994805 | 50.8207885 | 13.47 | 17.265649 |
| 1 | 4 | 1.6 | 55.96067384 | 51.5000552 | 15.11 | 18.617709 |
| 1.5 | 1 | 1.6 | 49.60212556 | 47.802211 | 7.39 | 9.9855937 |
| 1.5 | 1.5 | 1.6 | 50.68835962 | 48.668907 | 8.46 | 11.333219 |
| 1.5 | 2 | 1.6 | 51.77375367 | 48.9734024 | 9.75 | 12.910461 |
| 1.5 | 2.5 | 1.6 | 52.70477182 | 49.4706882 | 11.17 | 14.167483 |
| 1.5 | 3 | 1.6 | 53.57410428 | 49.5749266 | 12.6 | 15.785276 |
| 1.5 | 3.5 | 1.6 | 55.55364251 | 51.7796941 | 14.09 | 17.481516 |
| 1.5 | 4 | 1.6 | 56.23376512 | 51.6513171 | 15.59 | 19.131053 |
| 2 | 1 | 1.6 | 49.39975195 | 47.1095603 | 8.79 | 11.175336 |
| 2 | 1.5 | 1.6 | 50.7864211 | 46.0857179 | 9.6 | 15.789835 |
| 2 | 2 | 1.6 | 51.51343038 | 48.9488796 | 10.72 | 13.271936 |
| 2 | 2.5 | 1.6 | 53.28409969 | 49.3619294 | 11.94 | 15.119343 |
| 2 | 3 | 1.6 | 54.22004988 | 50.7629898 | 13.32 | 16.298617 |
| 2 | 3.5 | 1.6 | 55.46934278 | 51.3167371 | 14.72 | 17.972772 |
| 2 | 4 | 1.6 | 56.50496365 | 51.7931578 | 16.26 | 19.485195 |

หมายเหตุ: แกน x แกน y และ แกน z มีหน่วยเป็น เมตร

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 2

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|------------|------------|---------|-----------|
| 0 | 1 | 1.4 | 43.6501284 | 41.691552 | 4.76 | 6.086408 |
| 0 | 1.5 | 1.4 | 47.2621403 | 44.700279 | 6.37 | 8.183281 |
| 0 | 2 | 1.4 | 49.6734372 | 46.188916 | 8.07 | 10.35992 |
| 0 | 2.5 | 1.4 | 51.6980664 | 48.942296 | 9.72 | 12.65893 |
| 0 | 3 | 1.4 | 54.0333204 | 50.711456 | 11.36 | 14.65034 |
| 0 | 3.5 | 1.4 | 54.6535798 | 50.823655 | 13.07 | 15.95541 |
| 0 | 4 | 1.4 | 54.8579747 | 50.67264 | 14.71 | 17.34747 |
| 0.5 | 1 | 1.4 | 45.5175334 | 44.527845 | 5.13 | 6.611212 |
| 0.5 | 1.5 | 1.4 | 48.3790948 | 46.165986 | 6.68 | 9.040995 |
| 0.5 | 2 | 1.4 | 50.6143971 | 47.957366 | 8.28 | 11.36666 |
| 0.5 | 2.5 | 1.4 | 51.5548451 | 47.968744 | 9.81 | 12.95936 |
| 0.5 | 3 | 1.4 | 53.0860729 | 49.404094 | 11.51 | 14.17174 |
| 0.5 | 3.5 | 1.4 | 54.5925062 | 51.123956 | 13.15 | 16.5831 |
| 0.5 | 4 | 1.4 | 56.3422029 | 52.613173 | 14.8 | 18.8335 |
| 1 | 1 | 1.4 | 47.2888716 | 45.967173 | 6.11 | 8.05267 |
| 1 | 1.5 | 1.4 | 49.4423049 | 47.560674 | 7.42 | 9.833871 |
| 1 | 2 | 1.4 | 51.1349119 | 48.138018 | 8.9 | 12.00152 |
| 1 | 2.5 | 1.4 | 52.7485659 | 49.021358 | 10.38 | 13.88975 |
| 1 | 3 | 1.4 | 53.5671994 | 50.162719 | 11.86 | 14.97299 |
| 1 | 3.5 | 1.4 | 55.5860206 | 50.987911 | 13.5 | 16.91766 |
| 1 | 4 | 1.4 | 56.4116577 | 51.931029 | 15.13 | 18.56691 |
| 1.5 | 1 | 1.4 | 49.306759 | 47.734485 | 7.37 | 9.767569 |
| 1.5 | 1.5 | 1.4 | 50.7019076 | 48.675183 | 8.48 | 11.35569 |
| 1.5 | 2 | 1.4 | 51.9421722 | 49.000563 | 9.72 | 12.71866 |
| 1.5 | 2.5 | 1.4 | 52.9145149 | 49.207249 | 11.08 | 14.47112 |
| 1.5 | 3 | 1.4 | 54.0002334 | 50.117269 | 12.56 | 15.55435 |
| 1.5 | 3.5 | 1.4 | 54.9987501 | 51.479367 | 14.03 | 17.31598 |
| 1.5 | 4 | 1.4 | 56.1925389 | 51.341438 | 15.61 | 19.02939 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 2 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|------------|------------|---------|-----------|
| 2 | 1 | 1.4 | 50.4801977 | 48.352033 | 8.83 | 11.55104 |
| 2 | 1.5 | 1.4 | 51.3130181 | 48.717004 | 9.72 | 12.7629 |
| 2 | 2 | 1.4 | 52.722865 | 50.175613 | 10.8 | 14.02898 |
| 2 | 2.5 | 1.4 | 53.8812287 | 50.060119 | 12.09 | 14.88633 |
| 2 | 3 | 1.4 | 54.5518695 | 50.5876 | 13.42 | 16.66359 |
| 2 | 3.5 | 1.4 | 56.0974656 | 51.373888 | 14.87 | 18.40176 |
| 2 | 4 | 1.4 | 56.3056395 | 51.638763 | 16.29 | 19.51446 |
| 0 | 1 | 1.5 | 43.2962034 | 41.472318 | 4.76 | 6.162804 |
| 0 | 1.5 | 1.5 | 46.9145068 | 44.44149 | 6.38 | 8.097071 |
| 0 | 2 | 1.5 | 49.3611404 | 45.79746 | 8.07 | 10.26899 |
| 0 | 2.5 | 1.5 | 51.2043911 | 48.560716 | 9.67 | 12.25722 |
| 0 | 3 | 1.5 | 52.5946956 | 49.699256 | 11.32 | 14.40082 |
| 0 | 3.5 | 1.5 | 53.9242881 | 50.528363 | 13.08 | 15.80214 |
| 0 | 4 | 1.5 | 55.4709789 | 51.425845 | 14.71 | 17.54726 |
| 0.5 | 1 | 1.5 | 43.9280558 | 42.871698 | 5.13 | 6.356655 |
| 0.5 | 1.5 | 1.5 | 46.7784513 | 44.56368 | 6.64 | 8.499876 |
| 0.5 | 2 | 1.5 | 49.2468599 | 46.555916 | 8.2 | 11.12206 |
| 0.5 | 2.5 | 1.5 | 50.7120475 | 47.232662 | 9.85 | 12.72869 |
| 0.5 | 3 | 1.5 | 52.5506343 | 48.897289 | 11.51 | 14.02196 |
| 0.5 | 3.5 | 1.5 | 54.4690367 | 51.150904 | 13.09 | 16.45157 |
| 0.5 | 4 | 1.5 | 55.7423377 | 52.092134 | 14.85 | 18.38074 |
| 1 | 1 | 1.5 | 46.2048315 | 44.889891 | 6.06 | 7.808015 |
| 1 | 1.5 | 1.5 | 48.7698924 | 46.82928 | 7.4 | 9.967206 |
| 1 | 2 | 1.5 | 50.3849308 | 47.668249 | 8.83 | 11.5982 |
| 1 | 2.5 | 1.5 | 52.5989813 | 48.950576 | 10.34 | 13.48823 |
| 1 | 3 | 1.5 | 53.536924 | 50.162113 | 11.94 | 15.23523 |
| 1 | 3.5 | 1.5 | 54.526948 | 50.352769 | 13.57 | 16.63949 |
| 1 | 4 | 1.5 | 55.1756995 | 51.010273 | 15.2 | 18.42443 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 2 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|------------|------------|---------|-----------|
| 1.5 | 1 | 1.5 | 47.7166462 | 45.905004 | 7.19 | 9.468499 |
| 1.5 | 1.5 | 1.5 | 49.0447909 | 47.060995 | 8.57 | 11.12115 |
| 1.5 | 2 | 1.5 | 50.497372 | 47.4842 | 9.79 | 12.67022 |
| 1.5 | 2.5 | 1.5 | 52.6621751 | 49.263773 | 11.16 | 14.18451 |
| 1.5 | 3 | 1.5 | 53.564925 | 49.50355 | 12.61 | 15.76454 |
| 1.5 | 3.5 | 1.5 | 54.6231553 | 51.136423 | 14.1 | 17.11244 |
| 1.5 | 4 | 1.5 | 56.1132351 | 51.498257 | 15.63 | 19.34466 |
| 2 | 1 | 1.5 | 51.2976677 | 48.745434 | 8.82 | 11.65105 |
| 2 | 1.5 | 1.5 | 52.3051268 | 49.694331 | 9.66 | 12.82732 |
| 2 | 2 | 1.5 | 51.8717722 | 49.266805 | 10.79 | 13.28478 |
| 2 | 2.5 | 1.5 | 55.0533693 | 50.665439 | 12.11 | 15.60195 |
| 2 | 3 | 1.5 | 55.9255045 | 51.870884 | 13.5 | 17.015 |
| 2 | 3.5 | 1.5 | 57.202922 | 52.384424 | 14.88 | 18.5985 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.9550404 | 53.357331 | 16.34 | 20.08089 |
| 0 | 1 | 1.6 | 43.3321015 | 41.381785 | 4.71 | 6.033475 |
| 0 | 1.5 | 1.6 | 46.8084945 | 44.403792 | 6.36 | 8.211055 |
| 0 | 2 | 1.6 | 49.4973297 | 45.828404 | 8.1 | 10.32181 |
| 0 | 2.5 | 1.6 | 51.4010714 | 48.919095 | 9.69 | 12.2843 |
| 0 | 3 | 1.6 | 53.3445167 | 50.185241 | 11.36 | 14.19704 |
| 0 | 3.5 | 1.6 | 55.9585091 | 51.476966 | 13.03 | 15.95022 |
| 0 | 4 | 1.6 | 57.3052861 | 52.678533 | 14.68 | 17.92591 |
| 0.5 | 1 | 1.6 | 44.5448844 | 43.529497 | 5.14 | 6.60646 |
| 0.5 | 1.5 | 1.6 | 48.6112091 | 45.829352 | 6.65 | 9.126651 |
| 0.5 | 2 | 1.6 | 50.9121155 | 47.826788 | 8.29 | 11.42284 |
| 0.5 | 2.5 | 1.6 | 51.1590875 | 47.895847 | 9.85 | 12.60148 |
| 0.5 | 3 | 1.6 | 52.9199913 | 49.029592 | 11.49 | 14.14656 |
| 0.5 | 3.5 | 1.6 | 54.3529167 | 50.932648 | 13.1 | 16.27353 |
| 0.5 | 4 | 1.6 | 55.4152115 | 51.806947 | 14.83 | 18.347 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 2 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|------------|------------|---------|-----------|
| 1 | 1 | 1.6 | 46.4535229 | 45.032546 | 6.14 | 8.029786 |
| 1 | 1.5 | 1.6 | 48.3781632 | 46.492296 | 7.41 | 9.803012 |
| 1 | 2 | 1.6 | 49.9078012 | 47.192304 | 8.85 | 11.45138 |
| 1 | 2.5 | 1.6 | 51.0227871 | 47.619893 | 10.26 | 13.4849 |
| 1 | 3 | 1.6 | 53.8185967 | 50.3387 | 11.95 | 15.11319 |
| 1 | 3.5 | 1.6 | 55.2899481 | 50.820789 | 13.47 | 17.26565 |
| 1 | 4 | 1.6 | 55.7374237 | 51.445787 | 15.11 | 18.9827 |
| 1.5 | 1 | 1.6 | 49.8220482 | 47.842443 | 7.39 | 10.26911 |
| 1.5 | 1.5 | 1.6 | 50.7221169 | 48.725203 | 8.46 | 11.50055 |
| 1.5 | 2 | 1.6 | 51.9758828 | 49.091266 | 9.75 | 12.93949 |
| 1.5 | 2.5 | 1.6 | 52.6511376 | 49.446055 | 11.17 | 14.40511 |
| 1.5 | 3 | 1.6 | 53.3484216 | 49.439145 | 12.6 | 15.6384 |
| 1.5 | 3.5 | 1.6 | 55.8441169 | 51.93463 | 14.08 | 17.55747 |
| 1.5 | 4 | 1.6 | 56.4100341 | 51.628036 | 15.59 | 19.55673 |
| 2 | 1 | 1.6 | 49.6291138 | 47.270795 | 8.79 | 11.35332 |
| 2 | 1.5 | 1.6 | 50.4518801 | 47.574245 | 9.6 | 12.94983 |
| 2 | 2 | 1.6 | 51.4054917 | 48.772714 | 10.72 | 13.30057 |
| 2 | 2.5 | 1.6 | 53.23153 | 49.258647 | 11.93 | 15.08374 |
| 2 | 3 | 1.6 | 54.1049033 | 50.49558 | 13.32 | 16.47534 |
| 2 | 3.5 | 1.6 | 55.4238176 | 51.174158 | 14.72 | 18.25172 |
| 2 | 4 | 1.6 | 56.7696275 | 51.817063 | 16.26 | 19.71687 |

หมายเหตุ: แกน x แกน y และ แกน z มีหน่วยเป็น เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 3

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 0 | 1 | 1.4 | 43.57862939 | 41.6731647 | 4.76 | 6.0527998 |
| 0 | 1.5 | 1.4 | 47.22654304 | 44.6220225 | 6.37 | 8.0886603 |
| 0 | 2 | 1.4 | 49.56253367 | 46.0939207 | 8.07 | 10.268339 |
| 0 | 2.5 | 1.4 | 51.58602201 | 48.8970972 | 9.72 | 12.461445 |
| 0 | 3 | 1.4 | 53.96343949 | 50.6906925 | 11.36 | 14.947142 |
| 0 | 3.5 | 1.4 | 54.60904041 | 50.8751453 | 13.07 | 15.718758 |
| 0 | 4 | 1.4 | 55.14231282 | 50.6898452 | 14.71 | 17.024525 |
| 0.5 | 1 | 1.4 | 45.55684257 | 44.5495755 | 5.13 | 6.5915852 |
| 0.5 | 1.5 | 1.4 | 48.21419026 | 45.9891421 | 6.68 | 9.1985543 |
| 0.5 | 2 | 1.4 | 50.56454745 | 47.9143724 | 8.28 | 11.438208 |
| 0.5 | 2.5 | 1.4 | 51.54611463 | 47.9013254 | 9.81 | 13.119781 |
| 0.5 | 3 | 1.4 | 53.1946203 | 49.4372113 | 11.51 | 14.417184 |
| 0.5 | 3.5 | 1.4 | 55.00366258 | 51.2915515 | 13.15 | 16.727287 |
| 0.5 | 4 | 1.4 | 56.26809435 | 52.761394 | 14.79 | 18.624201 |
| 1 | 1 | 1.4 | 47.25994752 | 45.9993278 | 6.11 | 8.0648792 |
| 1 | 1.5 | 1.4 | 49.23305775 | 47.4878925 | 7.42 | 9.6991275 |
| 1 | 2 | 1.4 | 51.18730823 | 48.0432096 | 8.9 | 12.222355 |
| 1 | 2.5 | 1.4 | 52.74576802 | 49.071384 | 10.38 | 13.784546 |
| 1 | 3 | 1.4 | 53.60981238 | 50.2082395 | 11.86 | 15.113465 |
| 1 | 3.5 | 1.4 | 55.78830251 | 50.8511351 | 13.5 | 16.951968 |
| 1 | 4 | 1.4 | 56.15668734 | 51.8217865 | 15.13 | 18.554464 |
| 1.5 | 1 | 1.4 | 49.42292792 | 47.8837654 | 7.37 | 9.7778488 |
| 1.5 | 1.5 | 1.4 | 50.69170452 | 48.7367701 | 8.48 | 11.265912 |
| 1.5 | 2 | 1.4 | 51.88716124 | 49.0830552 | 9.72 | 12.815997 |
| 1.5 | 2.5 | 1.4 | 52.74853039 | 49.1990991 | 11.08 | 14.291674 |
| 1.5 | 3 | 1.4 | 53.97998948 | 49.9876835 | 12.56 | 15.458588 |
| 1.5 | 3.5 | 1.4 | 55.30861629 | 51.6937322 | 14.03 | 17.416668 |
| 1.5 | 4 | 1.4 | 56.05130385 | 51.3548831 | 15.61 | 19.028014 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 3 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 2 | 1 | 1.4 | 50.39429596 | 48.1816435 | 8.83 | 11.367565 |
| 2 | 1.5 | 1.4 | 51.32013807 | 48.6755859 | 9.72 | 13.007334 |
| 2 | 2 | 1.4 | 52.45595263 | 49.9761021 | 10.8 | 13.848305 |
| 2 | 2.5 | 1.4 | 53.96181606 | 50.0042776 | 12.09 | 15.34878 |
| 2 | 3 | 1.4 | 54.4398184 | 50.5031402 | 13.42 | 16.420906 |
| 2 | 3.5 | 1.4 | 55.76891465 | 51.4005183 | 14.87 | 18.309749 |
| 2 | 4 | 1.4 | 55.90346731 | 51.3873663 | 16.29 | 19.365436 |
| 0 | 1 | 1.5 | 43.24358821 | 41.4262594 | 4.76 | 6.1550388 |
| 0 | 1.5 | 1.5 | 46.77127273 | 44.3431187 | 6.38 | 8.1089447 |
| 0 | 2 | 1.5 | 49.27429969 | 45.759607 | 8.07 | 10.275959 |
| 0 | 2.5 | 1.5 | 51.08319633 | 48.4203636 | 9.67 | 12.156969 |
| 0 | 3 | 1.5 | 52.47491845 | 49.6528915 | 11.32 | 14.12937 |
| 0 | 3.5 | 1.5 | 54.07513645 | 50.5166882 | 13.08 | 15.92257 |
| 0 | 4 | 1.5 | 55.61345643 | 51.2578803 | 14.71 | 17.92786 |
| 0.5 | 1 | 1.5 | 43.94609995 | 42.8560583 | 5.13 | 6.3689534 |
| 0.5 | 1.5 | 1.5 | 46.59848388 | 44.4473045 | 6.64 | 8.5963477 |
| 0.5 | 2 | 1.5 | 49.04165917 | 46.3386947 | 8.2 | 11.111057 |
| 0.5 | 2.5 | 1.5 | 50.69121772 | 47.1355094 | 9.85 | 12.917085 |
| 0.5 | 3 | 1.5 | 52.77476904 | 49.0050437 | 11.51 | 14.08313 |
| 0.5 | 3.5 | 1.5 | 54.39831156 | 50.8602247 | 13.1 | 16.327585 |
| 0.5 | 4 | 1.5 | 55.94700236 | 52.392738 | 14.85 | 18.519719 |
| 1 | 1 | 1.5 | 46.17675785 | 44.8132533 | 6.06 | 7.8597072 |
| 1 | 1.5 | 1.5 | 48.61056127 | 46.6860373 | 7.4 | 9.8082961 |
| 1 | 2 | 1.5 | 50.46304213 | 47.6117172 | 8.83 | 11.693152 |
| 1 | 2.5 | 1.5 | 52.4292043 | 48.8402703 | 10.34 | 13.330457 |
| 1 | 3 | 1.5 | 53.50354114 | 50.1015749 | 11.94 | 15.216263 |
| 1 | 3.5 | 1.5 | 54.51270823 | 50.1321662 | 13.57 | 16.759956 |
| 1 | 4 | 1.5 | 55.33454146 | 51.0432585 | 15.2 | 18.904289 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 3 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 1.5 | 1 | 1.5 | 47.67740185 | 46.0337182 | 7.19 | 9.2840618 |
| 1.5 | 1.5 | 1.5 | 48.99247364 | 47.0575569 | 8.57 | 11.10147 |
| 1.5 | 2 | 1.5 | 50.40249165 | 47.5628386 | 9.79 | 12.462398 |
| 1.5 | 2.5 | 1.5 | 52.49474531 | 49.1247821 | 11.16 | 14.202725 |
| 1.5 | 3 | 1.5 | 53.74801456 | 49.5747633 | 12.61 | 15.628649 |
| 1.5 | 3.5 | 1.5 | 54.40871955 | 51.1306649 | 14.1 | 17.337612 |
| 1.5 | 4 | 1.5 | 56.23507792 | 51.5033253 | 15.63 | 18.993806 |
| 2 | 1 | 1.5 | 51.15362209 | 48.6692437 | 8.82 | 11.501399 |
| 2 | 1.5 | 1.5 | 52.37096233 | 49.7721526 | 9.66 | 12.840355 |
| 2 | 2 | 1.5 | 51.92865381 | 49.2921831 | 10.79 | 13.45432 |
| 2 | 2.5 | 1.5 | 54.81926702 | 50.6682783 | 12.11 | 15.442894 |
| 2 | 3 | 1.5 | 55.58742115 | 51.6526242 | 13.5 | 17.3303 |
| 2 | 3.5 | 1.5 | 56.9475595 | 52.2442555 | 14.88 | 17.981428 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.90347081 | 53.5030846 | 16.34 | 19.924292 |
| 0 | 1 | 1.6 | 43.21305403 | 41.3369116 | 4.71 | 6.0546519 |
| 0 | 1.5 | 1.6 | 46.82861213 | 44.3603365 | 6.36 | 8.1039877 |
| 0 | 2 | 1.6 | 49.42110211 | 45.786205 | 8.1 | 10.344439 |
| 0 | 2.5 | 1.6 | 51.55957473 | 49.013463 | 9.69 | 12.424149 |
| 0 | 3 | 1.6 | 53.09805843 | 50.0578203 | 11.36 | 14.424036 |
| 0 | 3.5 | 1.6 | 56.17033735 | 51.438571 | 13.03 | 15.644997 |
| 0 | 4 | 1.6 | 56.99236925 | 52.5014282 | 14.68 | 17.635971 |
| 0.5 | 1 | 1.6 | 44.58656723 | 43.5974073 | 5.14 | 6.5612858 |
| 0.5 | 1.5 | 1.6 | 48.35838249 | 45.719726 | 6.65 | 8.9530846 |
| 0.5 | 2 | 1.6 | 50.85544663 | 47.7781376 | 8.29 | 11.328931 |
| 0.5 | 2.5 | 1.6 | 51.22832743 | 48.0142462 | 9.85 | 12.659187 |
| 0.5 | 3 | 1.6 | 52.87421005 | 49.0653526 | 11.49 | 14.332823 |
| 0.5 | 3.5 | 1.6 | 54.28467883 | 50.7568751 | 13.1 | 16.309239 |
| 0.5 | 4 | 1.6 | 55.43909176 | 51.7740857 | 14.83 | 18.349372 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 3 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 1 | 1 | 1.6 | 46.33669 | 44.9729376 | 6.14 | 8.0198223 |
| 1 | 1.5 | 1.6 | 48.33884557 | 46.4090148 | 7.41 | 9.8075222 |
| 1 | 2 | 1.6 | 49.79119149 | 47.0911213 | 8.85 | 11.487095 |
| 1 | 2.5 | 1.6 | 50.94538746 | 47.583129 | 10.26 | 13.197601 |
| 1 | 3 | 1.6 | 53.3714199 | 50.0664702 | 11.95 | 14.961473 |
| 1 | 3.5 | 1.6 | 55.25004458 | 50.8147102 | 13.47 | 17.000889 |
| 1 | 4 | 1.6 | 55.86859087 | 50.1610244 | 15.11 | 19.918335 |
| 1.5 | 1 | 1.6 | 49.80465835 | 47.800308 | 7.39 | 10.201124 |
| 1.5 | 1.5 | 1.6 | 50.58683197 | 48.6024159 | 8.46 | 11.436304 |
| 1.5 | 2 | 1.6 | 51.79707187 | 49.0442767 | 9.75 | 12.81781 |
| 1.5 | 2.5 | 1.6 | 52.75557615 | 49.5535269 | 11.17 | 14.192918 |
| 1.5 | 3 | 1.6 | 53.56342334 | 49.4669881 | 12.6 | 15.79736 |
| 1.5 | 3.5 | 1.6 | 55.36559307 | 51.6218177 | 14.09 | 17.682072 |
| 1.5 | 4 | 1.6 | 56.25513435 | 51.5936104 | 15.59 | 19.527869 |
| 2 | 1 | 1.6 | 49.39413485 | 47.0353009 | 8.79 | 11.300773 |
| 2 | 1.5 | 1.6 | 50.55428967 | 48.1106904 | 9.6 | 12.456089 |
| 2 | 2 | 1.6 | 51.42101187 | 48.492452 | 10.72 | 13.512747 |
| 2 | 2.5 | 1.6 | 53.03434031 | 48.1494629 | 11.94 | 16.050799 |
| 2 | 3 | 1.6 | 54.19364431 | 50.6040735 | 13.31 | 16.256587 |
| 2 | 3.5 | 1.6 | 55.15785079 | 51.070562 | 14.72 | 17.923341 |
| 2 | 4 | 1.6 | 56.54578941 | 51.785663 | 16.26 | 19.500779 |

หมายเหตุ: แกน x แกน y และ แกน z มีหน่วยเป็น เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 4

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 0 | 1 | 1.4 | 43.55125749 | 41.5941435 | 4.76 | 6.0336293 |
| 0 | 1.5 | 1.4 | 47.24834392 | 44.5266893 | 6.36 | 8.0908015 |
| 0 | 2 | 1.4 | 49.58757892 | 46.0765275 | 8.07 | 10.376755 |
| 0 | 2.5 | 1.4 | 51.68455749 | 48.8736718 | 9.72 | 12.45511 |
| 0 | 3 | 1.4 | 54.06402633 | 50.6037447 | 11.36 | 15.092397 |
| 0 | 3.5 | 1.4 | 54.68642159 | 50.8559179 | 13.07 | 15.862614 |
| 0 | 4 | 1.4 | 55.26744983 | 50.7452821 | 14.71 | 17.492471 |
| 0.5 | 1 | 1.4 | 45.47018421 | 44.5230226 | 5.13 | 6.62606 |
| 0.5 | 1.5 | 1.4 | 48.33856254 | 46.1796145 | 6.68 | 9.0022494 |
| 0.5 | 2 | 1.4 | 50.51348085 | 47.9284441 | 8.28 | 11.395713 |
| 0.5 | 2.5 | 1.4 | 51.4251617 | 47.8057286 | 9.81 | 12.832889 |
| 0.5 | 3 | 1.4 | 53.16405636 | 49.3879027 | 11.51 | 14.429224 |
| 0.5 | 3.5 | 1.4 | 54.95576899 | 50.9202562 | 13.15 | 17.115193 |
| 0.5 | 4 | 1.4 | 56.16448099 | 52.4881592 | 14.79 | 18.871864 |
| 1 | 1 | 1.4 | 47.10961902 | 45.858603 | 6.11 | 7.8738736 |
| 1 | 1.5 | 1.4 | 49.40737476 | 47.4612781 | 7.42 | 9.8131632 |
| 1 | 2 | 1.4 | 50.96016486 | 47.955957 | 8.9 | 11.753186 |
| 1 | 2.5 | 1.4 | 52.70912097 | 49.0918837 | 10.38 | 13.671194 |
| 1 | 3 | 1.4 | 53.33776082 | 49.9929748 | 11.87 | 14.961448 |
| 1 | 3.5 | 1.4 | 55.46191864 | 50.7382627 | 13.5 | 16.782224 |
| 1 | 4 | 1.4 | 55.77433224 | 51.6093637 | 15.13 | 18.352326 |
| 1.5 | 1 | 1.4 | 49.29818546 | 47.7806487 | 7.37 | 9.7039643 |
| 1.5 | 1.5 | 1.4 | 50.53743779 | 48.619281 | 8.48 | 11.288242 |
| 1.5 | 2 | 1.4 | 51.82736406 | 48.9032415 | 9.72 | 12.93388 |
| 1.5 | 2.5 | 1.4 | 52.76812481 | 49.1519344 | 11.08 | 14.350134 |
| 1.5 | 3 | 1.4 | 53.96956831 | 49.8730978 | 12.56 | 15.844611 |
| 1.5 | 3.5 | 1.4 | 54.89821022 | 51.4310643 | 14.03 | 17.130907 |
| 1.5 | 4 | 1.4 | 56.01638624 | 51.5002724 | 15.61 | 19.197192 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 4 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 2 | 1 | 1.4 | 50.41491077 | 48.3016056 | 8.83 | 11.302431 |
| 2 | 1.5 | 1.4 | 51.54538756 | 48.9086155 | 9.72 | 12.904697 |
| 2 | 2 | 1.4 | 52.68603425 | 49.980869 | 10.8 | 14.061347 |
| 2 | 2.5 | 1.4 | 53.8120022 | 49.7818408 | 12.09 | 15.223411 |
| 2 | 3 | 1.4 | 54.28747073 | 50.5121634 | 13.42 | 16.912914 |
| 2 | 3.5 | 1.4 | 55.6558235 | 51.2976171 | 14.87 | 18.145205 |
| 2 | 4 | 1.4 | 56.33913577 | 51.569761 | 16.29 | 19.763805 |
| 0 | 1 | 1.5 | 43.18219815 | 41.3410977 | 4.76 | 6.1504746 |
| 0 | 1.5 | 1.5 | 46.79745033 | 44.3795554 | 6.38 | 8.1201465 |
| 0 | 2 | 1.5 | 49.21575514 | 45.7653803 | 8.07 | 10.394481 |
| 0 | 2.5 | 1.5 | 51.02100854 | 48.3254703 | 9.67 | 12.066547 |
| 0 | 3 | 1.5 | 52.40538596 | 49.5378595 | 11.32 | 14.300537 |
| 0 | 3.5 | 1.5 | 53.90698865 | 50.4241734 | 13.08 | 15.768653 |
| 0 | 4 | 1.5 | 55.3583492 | 51.0527831 | 14.71 | 17.786289 |
| 0.5 | 1 | 1.5 | 43.97085876 | 42.8120857 | 5.13 | 6.4180293 |
| 0.5 | 1.5 | 1.5 | 46.73252685 | 44.5215221 | 6.64 | 8.6353118 |
| 0.5 | 2 | 1.5 | 49.04969117 | 46.3835283 | 8.2 | 10.968589 |
| 0.5 | 2.5 | 1.5 | 50.52053201 | 47.1211405 | 9.85 | 12.560099 |
| 0.5 | 3 | 1.5 | 52.31643405 | 48.7649652 | 11.51 | 14.050178 |
| 0.5 | 3.5 | 1.5 | 54.50501488 | 51.0144858 | 13.09 | 16.585147 |
| 0.5 | 4 | 1.5 | 55.80588003 | 52.2381581 | 14.85 | 18.664235 |
| 1 | 1 | 1.5 | 46.18044471 | 44.8591674 | 6.06 | 7.7733133 |
| 1 | 1.5 | 1.5 | 48.63779711 | 46.725954 | 7.4 | 9.8129277 |
| 1 | 2 | 1.5 | 50.38369502 | 47.6074911 | 8.83 | 11.665556 |
| 1 | 2.5 | 1.5 | 52.43535787 | 48.7944632 | 10.34 | 13.361925 |
| 1 | 3 | 1.5 | 53.51886871 | 50.1014109 | 11.94 | 15.131581 |
| 1 | 3.5 | 1.5 | 54.32027711 | 49.9000178 | 13.57 | 16.468386 |
| 1 | 4 | 1.5 | 55.44306162 | 51.0835072 | 15.2 | 18.783889 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 4 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 1.5 | 1 | 1.5 | 47.63345379 | 45.9303641 | 7.19 | 9.3576746 |
| 1.5 | 1.5 | 1.5 | 49.03066246 | 47.0217675 | 8.57 | 11.121719 |
| 1.5 | 2 | 1.5 | 50.34148537 | 47.4466629 | 9.79 | 12.704409 |
| 1.5 | 2.5 | 1.5 | 52.56121185 | 49.1501534 | 11.16 | 14.322234 |
| 1.5 | 3 | 1.5 | 53.60062956 | 49.5157711 | 12.61 | 15.721944 |
| 1.5 | 3.5 | 1.5 | 54.49491614 | 50.9595614 | 14.1 | 17.399163 |
| 1.5 | 4 | 1.5 | 56.09938094 | 51.3111758 | 15.63 | 19.180884 |
| 2 | 1 | 1.5 | 51.02054431 | 48.6054097 | 8.82 | 11.401921 |
| 2 | 1.5 | 1.5 | 52.23285389 | 49.6509082 | 9.66 | 12.665148 |
| 2 | 2 | 1.5 | 51.85122914 | 49.2561252 | 10.79 | 13.578648 |
| 2 | 2.5 | 1.5 | 54.88279688 | 50.8372003 | 12.11 | 15.437944 |
| 2 | 3 | 1.5 | 55.92956884 | 51.821099 | 13.5 | 16.794206 |
| 2 | 3.5 | 1.5 | 57.05319039 | 52.3864858 | 14.88 | 18.560372 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.51600265 | 53.3065049 | 16.34 | 19.998999 |
| 0 | 1 | 1.6 | 43.2351281 | 41.2843438 | 4.71 | 5.9966654 |
| 0 | 1.5 | 1.6 | 46.78837447 | 44.3699034 | 6.36 | 8.0755587 |
| 0 | 2 | 1.6 | 49.36938645 | 45.7284023 | 8.1 | 10.229165 |
| 0 | 2.5 | 1.6 | 51.41968524 | 48.9104513 | 9.69 | 12.434116 |
| 0 | 3 | 1.6 | 53.32797583 | 50.1224944 | 11.36 | 14.480104 |
| 0 | 3.5 | 1.6 | 55.68806624 | 51.3262803 | 13.03 | 16.005711 |
| 0 | 4 | 1.6 | 57.0992924 | 52.4755104 | 14.68 | 17.634538 |
| 0.5 | 1 | 1.6 | 44.54779827 | 43.5435496 | 5.14 | 6.5412748 |
| 0.5 | 1.5 | 1.6 | 48.60567434 | 45.7574287 | 6.65 | 8.9771636 |
| 0.5 | 2 | 1.6 | 50.9784344 | 47.8334563 | 8.29 | 11.493836 |
| 0.5 | 2.5 | 1.6 | 51.23659479 | 47.9830263 | 9.85 | 12.781235 |
| 0.5 | 3 | 1.6 | 53.00266316 | 49.1303928 | 11.49 | 14.310669 |
| 0.5 | 3.5 | 1.6 | 54.02011296 | 50.6489117 | 13.1 | 16.178436 |
| 0.5 | 4 | 1.6 | 55.31168706 | 51.7769328 | 14.83 | 18.105013 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 4 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 1 | 1 | 1.6 | 46.2856294 | 44.8887851 | 6.14 | 8.0863809 |
| 1 | 1.5 | 1.6 | 48.27629473 | 46.4142799 | 7.41 | 9.7441766 |
| 1 | 2 | 1.6 | 49.68571361 | 47.0200657 | 8.85 | 11.422867 |
| 1 | 2.5 | 1.6 | 50.90827759 | 47.5649502 | 10.26 | 13.316624 |
| 1 | 3 | 1.6 | 53.19907352 | 50.0554156 | 11.95 | 14.802788 |
| 1 | 3.5 | 1.6 | 55.09446794 | 50.7350287 | 13.47 | 16.643799 |
| 1 | 4 | 1.6 | 55.79714145 | 51.3148082 | 15.11 | 18.978254 |
| 1.5 | 1 | 1.6 | 49.63740208 | 47.8287572 | 7.39 | 9.9704459 |
| 1.5 | 1.5 | 1.6 | 50.6250213 | 48.56135 | 8.46 | 11.24407 |
| 1.5 | 2 | 1.6 | 52.05553982 | 49.1756776 | 9.75 | 12.869043 |
| 1.5 | 2.5 | 1.6 | 52.66612368 | 49.3546684 | 11.17 | 14.252158 |
| 1.5 | 3 | 1.6 | 53.45016625 | 49.4866847 | 12.6 | 15.770682 |
| 1.5 | 3.5 | 1.6 | 55.30630763 | 51.6852715 | 14.09 | 17.318231 |
| 1.5 | 4 | 1.6 | 55.95819055 | 51.3962982 | 15.59 | 19.281202 |
| 2 | 1 | 1.6 | 49.40238944 | 47.0194931 | 8.79 | 11.314591 |
| 2 | 1.5 | 1.6 | 50.59223362 | 48.1512853 | 9.6 | 12.569672 |
| 2 | 2 | 1.6 | 51.42674727 | 48.6715262 | 10.72 | 13.358873 |
| 2 | 2.5 | 1.6 | 53.05209023 | 49.0254442 | 11.93 | 14.846089 |
| 2 | 3 | 1.6 | 54.21875714 | 50.6170206 | 13.31 | 16.196709 |
| 2 | 3.5 | 1.6 | 55.33192316 | 51.1963146 | 14.72 | 18.071958 |
| 2 | 4 | 1.6 | 56.36722286 | 51.763572 | 16.26 | 19.169678 |

หมายเหตุ: แกน x แกน y และ แกน z มีหน่วยเป็น เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 5

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 0 | 1 | 1.4 | 43.43779866 | 41.5107337 | 4.76 | 6.0289708 |
| 0 | 1.5 | 1.4 | 47.1620957 | 44.4968376 | 6.36 | 8.133106 |
| 0 | 2 | 1.4 | 49.40204567 | 45.9728144 | 8.07 | 10.237338 |
| 0 | 2.5 | 1.4 | 51.53076538 | 48.8260188 | 9.72 | 12.343508 |
| 0 | 3 | 1.4 | 54.22916066 | 50.7514615 | 11.35 | 14.68779 |
| 0 | 3.5 | 1.4 | 54.70733303 | 50.8095979 | 13.07 | 15.890933 |
| 0 | 4 | 1.4 | 55.21979129 | 50.5218142 | 14.71 | 17.655166 |
| 0.5 | 1 | 1.4 | 45.45851311 | 44.4711636 | 5.13 | 6.6928894 |
| 0.5 | 1.5 | 1.4 | 48.22668605 | 46.0173168 | 6.68 | 8.9925887 |
| 0.5 | 2 | 1.4 | 50.5290981 | 47.9049753 | 8.28 | 11.539272 |
| 0.5 | 2.5 | 1.4 | 51.43479436 | 47.9283787 | 9.81 | 12.864635 |
| 0.5 | 3 | 1.4 | 53.39736437 | 49.5429114 | 11.51 | 14.4315 |
| 0.5 | 3.5 | 1.4 | 54.92668563 | 51.3102887 | 13.15 | 16.642576 |
| 0.5 | 4 | 1.4 | 56.32329165 | 52.7202036 | 14.79 | 18.337562 |
| 1 | 1 | 1.4 | 47.20060871 | 45.9303426 | 6.11 | 8.0207272 |
| 1 | 1.5 | 1.4 | 49.27699195 | 47.3842277 | 7.42 | 9.9295954 |
| 1 | 2 | 1.4 | 51.00417101 | 47.9528762 | 8.9 | 12.08461 |
| 1 | 2.5 | 1.4 | 52.57004724 | 49.0022577 | 10.38 | 13.625068 |
| 1 | 3 | 1.4 | 53.56469311 | 50.1840066 | 11.87 | 15.049411 |
| 1 | 3.5 | 1.4 | 55.50929383 | 50.9059614 | 13.5 | 16.798924 |
| 1 | 4 | 1.4 | 55.63161708 | 51.4646676 | 15.13 | 18.116763 |
| 1.5 | 1 | 1.4 | 49.23862108 | 47.7196347 | 7.37 | 9.8150102 |
| 1.5 | 1.5 | 1.4 | 50.50306016 | 48.5955463 | 8.48 | 11.283665 |
| 1.5 | 2 | 1.4 | 51.8322396 | 48.9923285 | 9.72 | 12.820876 |
| 1.5 | 2.5 | 1.4 | 52.76756072 | 49.221027 | 11.08 | 14.427099 |
| 1.5 | 3 | 1.4 | 53.8192456 | 49.8329048 | 12.56 | 15.406829 |
| 1.5 | 3.5 | 1.4 | 54.71843449 | 51.3320426 | 14.03 | 17.269915 |
| 1.5 | 4 | 1.4 | 56.32155146 | 51.3524758 | 15.61 | 19.40137 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 5 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 2 | 1 | 1.4 | 50.22089132 | 48.0182871 | 8.83 | 11.338 |
| 2 | 1.5 | 1.4 | 51.43523823 | 48.6909059 | 9.72 | 12.786619 |
| 2 | 2 | 1.4 | 52.70840692 | 50.1268646 | 10.8 | 13.770509 |
| 2 | 2.5 | 1.4 | 53.87304991 | 49.8887057 | 12.09 | 15.369289 |
| 2 | 3 | 1.4 | 54.21584381 | 50.4166038 | 13.42 | 16.914546 |
| 2 | 3.5 | 1.4 | 55.55531179 | 51.1477843 | 14.87 | 17.986608 |
| 2 | 4 | 1.4 | 56.11372605 | 51.4472836 | 16.29 | 19.756801 |
| 0 | 1 | 1.5 | 43.16292295 | 41.3206138 | 4.76 | 6.1723831 |
| 0 | 1.5 | 1.5 | 46.57104928 | 44.048563 | 6.38 | 8.1827765 |
| 0 | 2 | 1.5 | 49.50348729 | 45.8506691 | 8.07 | 10.403201 |
| 0 | 2.5 | 1.5 | 50.93365248 | 48.3173164 | 9.67 | 12.358799 |
| 0 | 3 | 1.5 | 52.71846932 | 49.7143118 | 11.32 | 14.685107 |
| 0 | 3.5 | 1.5 | 54.14589957 | 50.4483842 | 13.08 | 15.947859 |
| 0 | 4 | 1.5 | 55.51735337 | 51.175814 | 14.71 | 17.640308 |
| 0.5 | 1 | 1.5 | 44.00308812 | 42.8460643 | 5.13 | 6.3285945 |
| 0.5 | 1.5 | 1.5 | 46.61797446 | 44.4812529 | 6.64 | 8.6037489 |
| 0.5 | 2 | 1.5 | 48.94962914 | 46.2865293 | 8.21 | 11.0833 |
| 0.5 | 2.5 | 1.5 | 50.44945693 | 46.9946126 | 9.85 | 12.740635 |
| 0.5 | 3 | 1.5 | 52.59630657 | 48.8003732 | 11.5 | 14.106491 |
| 0.5 | 3.5 | 1.5 | 54.47029497 | 50.8066003 | 13.1 | 16.624424 |
| 0.5 | 4 | 1.5 | 55.77762202 | 52.261916 | 14.85 | 18.527791 |
| 1 | 1 | 1.5 | 46.18458525 | 44.8105071 | 6.06 | 7.8069497 |
| 1 | 1.5 | 1.5 | 48.65855237 | 46.7056058 | 7.4 | 9.9524346 |
| 1 | 2 | 1.5 | 50.36976809 | 47.5427494 | 8.83 | 11.732096 |
| 1 | 2.5 | 1.5 | 52.44058937 | 48.8155937 | 10.34 | 13.480391 |
| 1 | 3 | 1.5 | 53.68500831 | 50.2723648 | 11.94 | 15.195027 |
| 1 | 3.5 | 1.5 | 54.39265516 | 50.0026818 | 13.57 | 16.837226 |
| 1 | 4 | 1.5 | 54.71724372 | 50.5610256 | 15.2 | 18.584867 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 5 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 1.5 | 1 | 1.5 | 47.6721886 | 45.9125746 | 7.19 | 9.3783446 |
| 1.5 | 1.5 | 1.5 | 48.95625357 | 46.9125282 | 8.57 | 11.131466 |
| 1.5 | 2 | 1.5 | 50.31854965 | 47.3688977 | 9.79 | 12.595195 |
| 1.5 | 2.5 | 1.5 | 52.616695 | 49.172037 | 11.16 | 14.162215 |
| 1.5 | 3 | 1.5 | 53.58271801 | 49.4332371 | 12.61 | 15.837292 |
| 1.5 | 3.5 | 1.5 | 54.68243645 | 51.1912067 | 14.1 | 17.612446 |
| 1.5 | 4 | 1.5 | 55.77424727 | 51.2360179 | 15.63 | 19.097883 |
| 2 | 1 | 1.5 | 51.12417103 | 48.7025856 | 8.82 | 11.481469 |
| 2 | 1.5 | 1.5 | 52.40732316 | 49.645061 | 9.66 | 12.999388 |
| 2 | 2 | 1.5 | 51.7927335 | 49.2180613 | 10.79 | 13.498376 |
| 2 | 2.5 | 1.5 | 55.00658348 | 50.7688927 | 12.11 | 15.60091 |
| 2 | 3 | 1.5 | 55.77396829 | 51.6516163 | 13.5 | 16.875931 |
| 2 | 3.5 | 1.5 | 57.11866621 | 52.3154822 | 14.88 | 18.121603 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.55165553 | 53.2438261 | 16.34 | 19.801367 |
| 0 | 1 | 1.6 | 43.16481463 | 41.2515755 | 4.71 | 5.9961286 |
| 0 | 1.5 | 1.6 | 46.73377455 | 44.2739306 | 6.36 | 7.9948744 |
| 0 | 2 | 1.6 | 49.40045158 | 45.7197652 | 8.11 | 10.25823 |
| 0 | 2.5 | 1.6 | 51.42359751 | 48.8653625 | 9.69 | 12.461104 |
| 0 | 3 | 1.6 | 53.25854953 | 50.0174944 | 11.37 | 14.629582 |
| 0 | 3.5 | 1.6 | 56.02549006 | 51.4302157 | 13.03 | 16.009771 |
| 0 | 4 | 1.6 | 57.06912841 | 52.4210352 | 14.68 | 17.901363 |
| 0.5 | 1 | 1.6 | 44.56714668 | 43.5371941 | 5.14 | 6.5262403 |
| 0.5 | 1.5 | 1.6 | 48.35250192 | 45.710601 | 6.65 | 8.9079351 |
| 0.5 | 2 | 1.6 | 50.84697952 | 47.8328483 | 8.29 | 11.4715 |
| 0.5 | 2.5 | 1.6 | 51.11757528 | 47.8779912 | 9.85 | 12.831511 |
| 0.5 | 3 | 1.6 | 52.87938611 | 49.1005501 | 11.49 | 13.982639 |
| 0.5 | 3.5 | 1.6 | 54.15289665 | 50.6831941 | 13.1 | 16.137144 |
| 0.5 | 4 | 1.6 | 55.22568792 | 51.8602937 | 14.83 | 18.239711 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 5 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|-------------|------------|---------|-----------|
| 1 | 1 | 1.6 | 46.28718488 | 44.8118578 | 6.14 | 8.1500909 |
| 1 | 1.5 | 1.6 | 48.19816534 | 46.2774931 | 7.41 | 9.6642353 |
| 1 | 2 | 1.6 | 49.70568953 | 47.0677453 | 8.85 | 11.458607 |
| 1 | 2.5 | 1.6 | 50.91789474 | 47.4865168 | 10.26 | 13.308968 |
| 1 | 3 | 1.6 | 53.34306963 | 50.1181154 | 11.95 | 14.927757 |
| 1 | 3.5 | 1.6 | 55.31293244 | 50.7189726 | 13.47 | 16.827225 |
| 1 | 4 | 1.6 | 55.54861775 | 51.2184696 | 15.11 | 18.286401 |
| 1.5 | 1 | 1.6 | 49.7785516 | 47.8818056 | 7.39 | 9.9294175 |
| 1.5 | 1.5 | 1.6 | 50.64959348 | 48.5307238 | 8.46 | 11.523332 |
| 1.5 | 2 | 1.6 | 51.71412486 | 48.8090372 | 9.75 | 12.816322 |
| 1.5 | 2.5 | 1.6 | 52.76198201 | 49.5185074 | 11.17 | 14.226811 |
| 1.5 | 3 | 1.6 | 53.39681441 | 49.4810887 | 12.6 | 15.682539 |
| 1.5 | 3.5 | 1.6 | 55.46959281 | 51.8192452 | 14.09 | 17.564746 |
| 1.5 | 4 | 1.6 | 56.07832562 | 51.3698368 | 15.59 | 19.242103 |
| 2 | 1 | 1.6 | 49.17129344 | 46.8831918 | 8.79 | 11.216109 |
| 2 | 1.5 | 1.6 | 50.25654795 | 47.9285095 | 9.6 | 12.22352 |
| 2 | 2 | 1.6 | 51.49803911 | 48.6901584 | 10.72 | 13.435114 |
| 2 | 2.5 | 1.6 | 53.23068424 | 49.3046248 | 11.94 | 14.722415 |
| 2 | 3 | 1.6 | 54.0991929 | 50.5394784 | 13.32 | 16.245412 |
| 2 | 3.5 | 1.6 | 55.53974609 | 51.1401998 | 14.72 | 18.057612 |
| 2 | 4 | 1.6 | 56.52372046 | 51.7022226 | 16.26 | 19.674394 |

หมายเหตุ: แกน x แกน y และ แกน z มีหน่วยเป็น เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 6

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|------------|-------------|---------|------------|
| 0 | 1 | 1.4 | 45.5923674 | 43.92540007 | 4.49 | 5.89051812 |
| 0 | 1.5 | 1.4 | 49.3110816 | 46.7062637 | 6.14 | 8.04773348 |
| 0 | 2 | 1.4 | 51.4643432 | 47.88592952 | 7.81 | 10.2467029 |
| 0 | 2.5 | 1.4 | 53.5173816 | 50.80965228 | 9.47 | 12.6668094 |
| 0 | 3 | 1.4 | 55.7478408 | 52.36319 | 11.11 | 14.8818055 |
| 0 | 3.5 | 1.4 | 56.9436313 | 52.37939063 | 12.79 | 15.7895858 |
| 0 | 4 | 1.4 | 58.5795625 | 53.52735624 | 14.48 | 18.2107048 |
| 0.5 | 1 | 1.4 | 45.9673028 | 44.71311763 | 4.84 | 6.39151739 |
| 0.5 | 1.5 | 1.4 | 48.9525678 | 46.95005919 | 6.36 | 8.69249861 |
| 0.5 | 2 | 1.4 | 51.2489926 | 48.38790568 | 8.02 | 10.9994206 |
| 0.5 | 2.5 | 1.4 | 53.4031986 | 49.62669299 | 9.65 | 12.751627 |
| 0.5 | 3 | 1.4 | 54.9585909 | 51.45783335 | 11.25 | 14.6199562 |
| 0.5 | 3.5 | 1.4 | 56.6765343 | 52.74342182 | 12.83 | 16.6326508 |
| 0.5 | 4 | 1.4 | 57.924497 | 53.89576244 | 14.56 | 18.7396114 |
| 1 | 1 | 1.4 | 48.5271039 | 47.30182679 | 5.87 | 7.78016839 |
| 1 | 1.5 | 1.4 | 50.8323448 | 48.34483408 | 7.22 | 9.98569721 |
| 1 | 2 | 1.4 | 52.8202646 | 50.08061171 | 8.54 | 11.6261124 |
| 1 | 2.5 | 1.4 | 54.6897827 | 51.42796563 | 10.06 | 13.8921549 |
| 1 | 3 | 1.4 | 56.0398139 | 52.09457004 | 11.63 | 15.1477096 |
| 1 | 3.5 | 1.4 | 57.5238664 | 52.82090657 | 13.3 | 17.2294764 |
| 1 | 4 | 1.4 | 59.2218965 | 54.23414171 | 14.92 | 18.8372191 |
| 1.5 | 1 | 1.4 | 51.3676302 | 49.50521414 | 7.32 | 10.2149836 |
| 1.5 | 1.5 | 1.4 | 52.7603749 | 50.51186568 | 8.39 | 11.9005205 |
| 1.5 | 2 | 1.4 | 54.2177817 | 50.76340836 | 9.58 | 13.1829862 |
| 1.5 | 2.5 | 1.4 | 55.1030346 | 51.80046381 | 10.85 | 14.5945834 |
| 1.5 | 3 | 1.4 | 56.5600548 | 52.70181909 | 12.34 | 16.1651713 |
| 1.5 | 3.5 | 1.4 | 58.0815201 | 53.49215561 | 13.93 | 17.7900144 |
| 1.5 | 4 | 1.4 | 58.7686059 | 53.74845645 | 15.46 | 19.4514861 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 6 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|------------|-------------|---------|------------|
| 2 | 1 | 1.4 | 52.6004787 | 50.44881449 | 8.61 | 11.6312524 |
| 2 | 1.5 | 1.4 | 53.5216905 | 50.46618064 | 9.45 | 13.259398 |
| 2 | 2 | 1.4 | 54.1212497 | 50.92281685 | 10.45 | 13.9340134 |
| 2 | 2.5 | 1.4 | 55.5572508 | 51.20699264 | 11.83 | 15.3916491 |
| 2 | 3 | 1.4 | 57.0964754 | 53.2328903 | 13.16 | 16.7153328 |
| 2 | 3.5 | 1.4 | 58.5103438 | 53.62751519 | 14.51 | 19.0314263 |
| 2 | 4 | 1.4 | 59.6334119 | 54.49973113 | 15.99 | 19.9977721 |
| 0 | 1 | 1.5 | 44.9245416 | 43.37030124 | 4.57 | 6.07263065 |
| 0 | 1.5 | 1.5 | 48.7714917 | 46.43030371 | 6.11 | 8.00654595 |
| 0 | 2 | 1.5 | 51.2010717 | 47.95381807 | 7.72 | 10.2311583 |
| 0 | 2.5 | 1.5 | 53.6313879 | 50.60415947 | 9.41 | 13.1112015 |
| 0 | 3 | 1.5 | 55.2322428 | 51.62566089 | 11.05 | 15.108765 |
| 0 | 3.5 | 1.5 | 56.3620657 | 52.07782627 | 12.75 | 15.9561458 |
| 0 | 4 | 1.5 | 57.3868888 | 52.64272131 | 14.42 | 18.0922022 |
| 0.5 | 1 | 1.5 | 46.6321988 | 45.30482682 | 5.06 | 6.80984885 |
| 0.5 | 1.5 | 1.5 | 49.7035437 | 47.57119748 | 6.59 | 8.94862701 |
| 0.5 | 2 | 1.5 | 52.1978869 | 48.94348887 | 8.17 | 11.6230333 |
| 0.5 | 2.5 | 1.5 | 53.7292864 | 49.80859641 | 9.81 | 13.3955352 |
| 0.5 | 3 | 1.5 | 55.4752143 | 51.18113783 | 11.43 | 15.605736 |
| 0.5 | 3.5 | 1.5 | 56.412846 | 52.20073712 | 12.93 | 17.1816047 |
| 0.5 | 4 | 1.5 | 57.7431941 | 53.6023354 | 14.48 | 18.7809993 |
| 1 | 1 | 1.5 | 48.8756395 | 47.47511209 | 6.05 | 8.18512194 |
| 1 | 1.5 | 1.5 | 50.9849598 | 48.49082355 | 7.4 | 10.1961928 |
| 1 | 2 | 1.5 | 52.6351341 | 49.96083958 | 8.81 | 11.8957661 |
| 1 | 2.5 | 1.5 | 54.3419487 | 51.07789674 | 10.28 | 14.267714 |
| 1 | 3 | 1.5 | 55.4059636 | 51.8254647 | 11.84 | 15.0154169 |
| 1 | 3.5 | 1.5 | 56.644982 | 52.29823907 | 13.22 | 16.8825724 |
| 1 | 4 | 1.5 | 58.5007251 | 53.77027121 | 14.81 | 19.0145761 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 6 (ต่อ)


| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|------------|-------------|---------|------------|
| 1.5 | 1 | 1.5 | 50.4334458 | 48.81295072 | 7.37 | 9.94200026 |
| 1.5 | 1.5 | 1.5 | 52.5031672 | 50.26367913 | 8.41 | 11.6665522 |
| 1.5 | 2 | 1.5 | 53.371295 | 50.20393886 | 9.49 | 12.7929598 |
| 1.5 | 2.5 | 1.5 | 55.23068 | 51.68501335 | 10.97 | 14.5994009 |
| 1.5 | 3 | 1.5 | 56.4941464 | 52.22478839 | 12.41 | 16.3018179 |
| 1.5 | 3.5 | 1.5 | 57.6056242 | 53.50638675 | 13.85 | 17.3355777 |
| 1.5 | 4 | 1.5 | 58.4186574 | 53.30867511 | 15.26 | 19.3370426 |
| 2 | 1 | 1.5 | 52.2530552 | 50.0854376 | 8.85 | 11.7847282 |
| 2 | 1.5 | 1.5 | 53.087085 | 50.49289397 | 9.63 | 12.8289243 |
| 2 | 2 | 1.5 | 54.2901562 | 51.20211218 | 10.75 | 13.910349 |
| 2 | 2.5 | 1.5 | 54.9924861 | 51.18993522 | 11.97 | 15.4304786 |
| 2 | 3 | 1.5 | 56.5752057 | 53.02941496 | 13.35 | 17.057934 |
| 2 | 3.5 | 1.5 | 57.6364388 | 52.95678432 | 14.76 | 18.0662878 |
| 2 | 4 | 1.5 | 58.6215709 | 53.6510685 | 16.1 | 19.7931196 |
| 0 | 1 | 1.6 | 44.8834698 | 43.38602866 | 4.51 | 6.04954625 |
| 0 | 1.5 | 1.6 | 48.554753 | 46.11492703 | 6.11 | 8.07716889 |
| 0 | 2 | 1.6 | 51.3265649 | 47.68505878 | 7.83 | 10.4514814 |
| 0 | 2.5 | 1.6 | 53.4125061 | 50.69997108 | 9.5 | 13.029205 |
| 0 | 3 | 1.6 | 55.2254261 | 51.36784828 | 11.17 | 14.8520397 |
| 0 | 3.5 | 1.6 | 56.6523245 | 51.36495378 | 12.85 | 16.452095 |
| 0 | 4 | 1.6 | 57.5404061 | 52.55494563 | 14.48 | 18.1231548 |
| 0.5 | 1 | 1.6 | 45.7760677 | 44.59716321 | 4.93 | 6.65406024 |
| 0.5 | 1.5 | 1.6 | 48.8042736 | 46.61558418 | 6.38 | 8.72857763 |
| 0.5 | 2 | 1.6 | 50.9448087 | 48.01490696 | 7.98 | 11.1704611 |
| 0.5 | 2.5 | 1.6 | 52.5116362 | 48.92391432 | 9.56 | 12.8285016 |
| 0.5 | 3 | 1.6 | 54.2207736 | 50.65691997 | 11.24 | 14.2076711 |
| 0.5 | 3.5 | 1.6 | 56.5960954 | 52.30582357 | 12.84 | 17.4028269 |
| 0.5 | 4 | 1.6 | 57.765655 | 53.23951897 | 14.55 | 18.7188288 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำหรับการทดสอบครั้งที่ 6 (ต่อ)

| แกน x | แกน y | แกน z | PLm (dB) | Plavg (dB) | Tm (ns) | Tavg (ns) |
|-------|-------|-------|------------|-------------|---------|------------|
| 1 | 1 | 1.6 | 48.0218369 | 46.70803108 | 5.9 | 7.98137252 |
| 1 | 1.5 | 1.6 | 50.0714064 | 47.7226449 | 7.17 | 9.83319677 |
| 1 | 2 | 1.6 | 52.4416301 | 49.44468205 | 8.6 | 12.1682484 |
| 1 | 2.5 | 1.6 | 53.8060857 | 50.77226157 | 10.05 | 13.7084293 |
| 1 | 3 | 1.6 | 55.5180171 | 51.52364697 | 11.6 | 15.2517738 |
| 1 | 3.5 | 1.6 | 56.7169693 | 51.94864625 | 13.28 | 17.4806923 |
| 1 | 4 | 1.6 | 58.2987709 | 53.54670505 | 14.83 | 19.1465782 |
| 1.5 | 1 | 1.6 | 51.4439913 | 49.01583581 | 7.25 | 10.7568737 |
| 1.5 | 1.5 | 1.6 | 52.5559507 | 50.36789338 | 8.33 | 11.7010983 |
| 1.5 | 2 | 1.6 | 54.6092289 | 50.6897384 | 9.65 | 13.334838 |
| 1.5 | 2.5 | 1.6 | 55.3732962 | 51.79865032 | 10.95 | 14.6586509 |
| 1.5 | 3 | 1.6 | 57.0988465 | 52.74168935 | 12.53 | 16.9810711 |
| 1.5 | 3.5 | 1.6 | 57.9735921 | 53.27868482 | 14.02 | 18.0263721 |
| 1.5 | 4 | 1.6 | 58.7723966 | 53.23974924 | 15.52 | 20.1179666 |
| 2 | 1 | 1.6 | 52.9431594 | 50.18933857 | 8.84 | 12.1299429 |
| 2 | 1.5 | 1.6 | 53.6964071 | 50.67899008 | 9.71 | 13.0692471 |
| 2 | 2 | 1.6 | 55.0286268 | 51.76203774 | 10.74 | 14.7305242 |
| 2 | 2.5 | 1.6 | 55.9655975 | 51.85314645 | 11.87 | 15.7027662 |
| 2 | 3 | 1.6 | 57.4617089 | 53.31331617 | 13.26 | 17.375971 |
| 2 | 3.5 | 1.6 | 58.5645508 | 53.31278261 | 14.62 | 18.7197792 |
| 2 | 4 | 1.6 | 58.8282945 | 52.8447708 | 16.14 | 19.8440311 |

หมายเหตุ: แกน x แกน y และ แกน z มีหน่วยเป็น เมตร



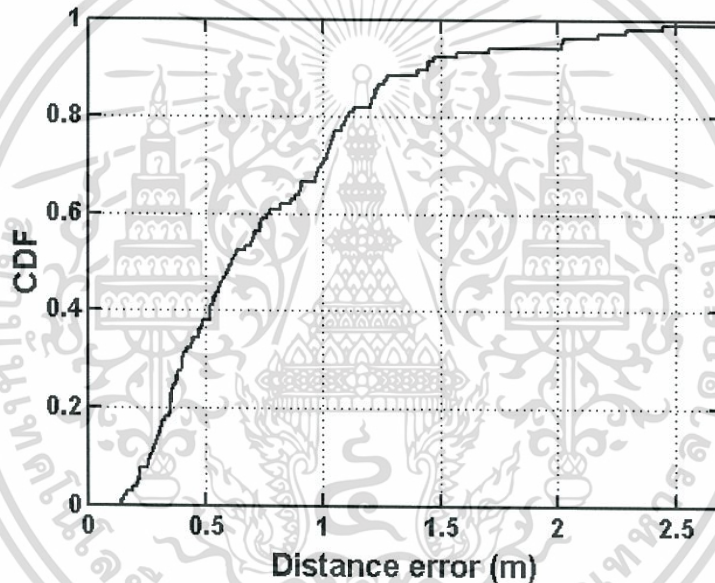
ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์เมื่อนำสัญญาณแถบแคบมาใช้ในการหาตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

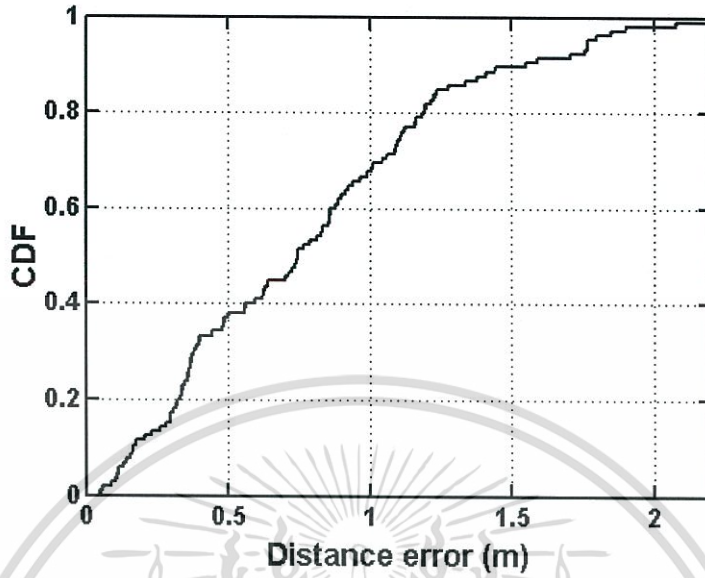
การวิเคราะห์เมื่อนำสัญญาณแถบแคบมาใช้ในการหาตำแหน่ง

การวิเคราะห์เมื่อนำสัญญาณแถบแคบมาใช้ในการหาตำแหน่ง .ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการวิเคราะห์เทียบกับสัญญาณ WLAN ตามมาตรฐาน IEEE802.11a ซึ่งแบ่งเป็น 3 ช่วงแถบ ได้แก่ ช่วงแถบความถี่ต่ำ 5.15 GHz ถึง 5.25 GHz ช่วงแถบความถี่กลาง 5.25 GHz ถึง 5.35 GHz และช่วงแถบความถี่สูง 5.725 GHz ถึง 5.825 GHz ตามข้อมูลจาก IEEE Std 802.11a-1999 Digital Object Identifier: 10.1109/IEEESTD.1999.90606

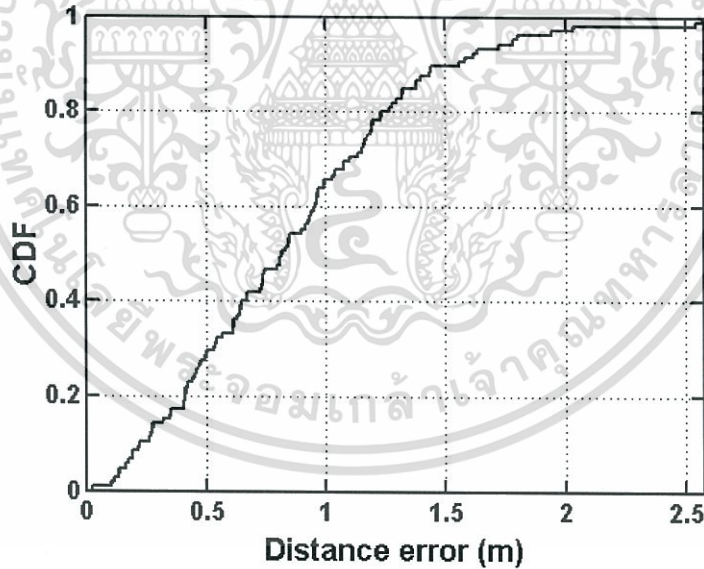
ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลจากการวัดช่องสัญญาณสำหรับการทดสอบครั้งที่ 1 ส่วนกระบวนการหาตำแหน่งตลอดจนการทำฐานข้อมูลกำหนดให้เป็นเช่นเดิมกับวิทยานิพนธ์เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบ โดยผลการทดสอบเป็นดังรูปที่ 1 ถึงรูปที่ 3



รูปที่ 1 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางช่วงแถบความถี่ต่ำ 5.15 GHz ถึง 5.25 GHz



รูปที่ 2 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางช่วงแถบความถี่ต่ำ 5.25 GHz ถึง 5.35 GHz



รูปที่ 3 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางช่วงแถบความถี่ต่ำ 5.725 GHz ถึง 5.825 GHz

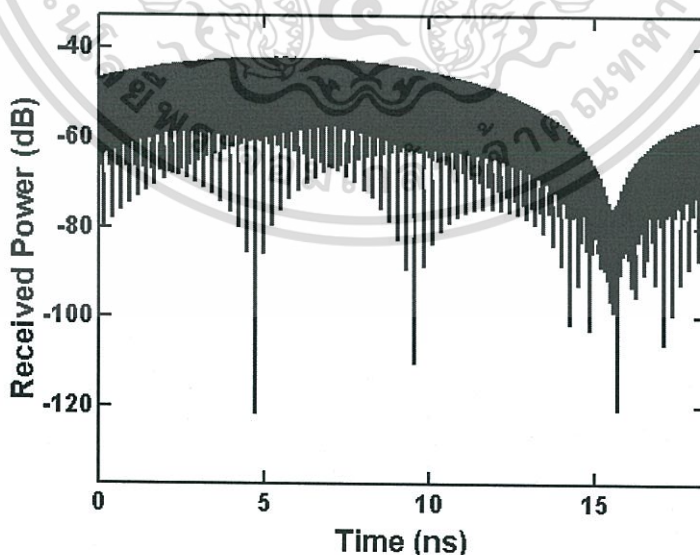
จากนั้น ผลการทดสอบสัญญาณแถบแคบ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณแถบกว้างยิ่งในรูปที่ 5.1 เนื่องจากใช้ข้อมูลเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ถูกแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 บันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางการใช้สัญญาณแถบแคบและสัญญาณแถบกว้างยิ่งในการหาตำแหน่ง

| สัญญาณ | ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของค่าผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | มัธยฐานของค่าผิดพลาดระยะทาง (เมตร) | ค่าผิดพลาดระยะทางสูงสุด (เมตร) | เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ (%) |
|------------------|---|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| UWB | 0.66 | 0.46 | 2.39 | 79.05 |
| WLAN Low Band | 0.77 | 0.61 | 2.70 | 71.43 |
| WLAN Middle Band | 0.79 | 0.75 | 2.2 | 67.62 |
| WLAN Upper Band | 0.86 | 0.82 | 2.58 | 65.71 |

จากตารางบันทึกผลค่าความผิดพลาดระยะทางการใช้สัญญาณแถบแคบและสัญญาณแถบกว้างยิ่งในการหาตำแหน่ง จะเห็นได้ว่า ผลลัพธ์จากการหาตำแหน่งด้วยสัญญาณ UWB นั้นให้ผลที่ดีที่สุด ส่วนค่าผิดพลาดระยะทางสูงสุด เป็นโค้งเบ้ขวาอยู่แล้ว ดังรูปที่ 5.25 ซึ่งเกิดเพียงแค่ว่าตำแหน่งเดียวจึงไม่ค่อยมีผลต่อความแม่นยำในการหาตำแหน่ง ดังนั้น จากผลการทดสอบแสดงว่า ความแม่นยำของการหาตำแหน่งแบบแถบกว้างยิ่งมีความเที่ยงตรงมากกว่าแบบแถบแคบ

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ พบว่าสัญญาณแบบแถบแคบเกิดการซ้อนทับกันของสัญญาณทางเวลา จึงเป็นผลให้แยกแยะสัญญาณจริงกับสัญญาณหลายวิถีได้ยาก ดังรูปที่ 4 จึงทำให้พารามิเตอร์ซึ่งใช้เป็นอินพุตของการหาตำแหน่งเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้เกิดค่าผิดพลาดระยะทางซึ่งมากกว่าสัญญาณแบบแถบกว้างยิ่ง สามารถดูเทียบกับรูปที่ 3.3 ของสัญญาณ UWB ได้



รูปที่ 4 สัญญาณแถบแคบที่รับได้ในโดเมนเวลา เมื่อใช้สัญญาณส่งแบบสี่เหลี่ยมที่ความถี่ 5.725 GHz ถึง 5.825 GHz

การที่ผู้จัดทำเลือกใช้ที่ความถี่ตั้งแต่ 5.725 GHz ถึง 5.825 GHz มาทำการเปรียบเทียบกับ สัญญาณแถบกว้างยิ่ง เนื่องจากงานวิจัยส่วนมากเลือกใช้ที่ความถี่ดังกล่าว อีกทั้งช่วงความถี่นี้ยังสามารถนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศกลุ่มยุโรป และเอเชีย เนื่องจากข้อดีของช่วงแถบความถี่นี้เป็นแถบความถี่ช่วงสูงจึงมีความสามารถในการทะลุผ่านสิ่งของได้ดี แต่ผลการทดสอบพบว่าที่ช่วงความถี่นี้ให้ผลการทดสอบที่ไม่ค่อยดีเมื่อเทียบกับช่วงความถี่ต่ำและกลางในมาตรฐานเดียวกัน เนื่องจากเพราะมีแบนด์วิทด์เท่ากัน ความถี่สูงจะเสียเปรียบในเรื่องของระยะทาง ซึ่งถ้าระยะทางยิ่งมากค่าการสูญเสียก็จะมากตามด้วย ซึ่งได้ถูกพิสูจน์แล้วด้วยทฤษฎีของฟรีส นั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาววิภัสสร วินิจฉัยกุล
วัน เดือน ปีเกิด 3 ตุลาคม 2533
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 2/79 ถนนมณฑา ตำบลตากลี อำเภอตากลี จังหวัดนครสวรรค์
60140

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551-2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2555-2556 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้