

การประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้ดาวernetเวิร์ก



นายปิติ เล็กอุทัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1941-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ESTIMATING LOCATION OF MOBILE STATION USING NEURAL NETWORK



Mr.Piti Lek-uthai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1941-8

ปิติ เล็กอุทัย : การประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์ก.
(LOCATING MOBILE STATION USING NEURAL NETWORK)
อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. วาทีต เบญจพลกุล , 92 หน้า. ISBN 974-17-1941-8

เทคโนโลยีในการประมาณค่าตำแหน่ง (Position Location Technologies: PL) ได้มีการออกเป็นข้อกำหนดเพื่อสร้างเป็นมาตรฐานโดยหน่วยงาน U.S. Federal Communications Commission (FCC) เมื่อวันที่ 15 กันยายน ค.ศ. 1999 ซึ่งกำหนดว่า ในเดือนตุลาคม ค.ศ. 2001 สำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่ CDMA หรือ GSM ที่ให้บริการการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่จะต้องมีความสามารถในการรายงานค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่มีความถูกต้องถึง 67 % ของจำนวนครั้งของการประมาณค่า ในระยะความผิดพลาด 125 เมตร วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอวิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์ก ซึ่งอาศัยค่าความแรงของสัญญาณ และ ค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณที่สถานีฐานหลายสถานีรับได้มาเป็นข้อมูลในการคำนวณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ โดยมีจุดมุ่งหมายในการแก้ปัญหาที่มีความไม่แน่นอนในการคำนวณซึ่งวิธีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาคำนวณ โดยตรงที่มีผู้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ประสบปัญหาจากการประมาณค่าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และ เพิ่มค่าความถูกต้องของการประมาณค่าตำแหน่งให้ดีกว่าที่มาตรฐาน FCC กำหนดไว้

ผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าผลของการทดสอบการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กมาทำการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ทั้งในกรณีต้นแบบเพื่อทดสอบแนวคิด และ กรณีการจำลองระบบสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ในบริเวณเมืองขนาดเล็กและกลาง นิวรอลเน็ตเวิร์กสามารถให้ค่าการประมาณค่าที่มีความถูกต้องเกินกว่า 95 % ของจำนวนครั้งของการประมาณค่า ในระยะความผิดพลาด 125 เมตร และสามารถสรุปได้ว่าวิธีการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กมาทำการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่สามารถให้ค่าความถูกต้องในการประมาณค่าตำแหน่งได้สูงกว่าวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์แบบเดิมที่มีผู้นำเสนอไว้ และ ยังสามารถลดความยุ่งยาก และ เวลาตอบสนองในการคำนวณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ ขณะนำไปใช้งานเวลาจริง อีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2545 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4370653721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: LOCATION ESTIMATION / MOBILE STATION (MS) / SIGNAL STRENGTH (SS) / TIME OF ARRIVAL (TOA) / NEURAL NETWORK /

PITI LEK-UTHAI : ESTIMATING LOCATION OF MOBILE STATION

USING NEURAL NETWORK. THESIS ADVISOR :

ASSOC. PROF. DR. WATIT BENJAPOLKUL, 92 pp. ISBN 974-17-1941-8

Because the Federal Communications Commission (FCC) developed requirements for wireless position location service which states that by October 2001, for CDMA or GSM operators must be able to determine accurate location of mobile stations (MSs) which request emergency assistance with accuracy within the radius of 125 meters to achieve at least 67 % of all trial locations. This thesis proposed the technique of using neural network to approximate the location of MS with the measurement of the Signal Strength (SS) and the Time of Arrival (TOA) from several base stations (BSs). The proposed technique focuses on solving the non-linear problem which is not suitable for using mathematics model to approximate and acquire the accuracy of location approximation better than the one FCC recommended.

The simulation results of using neural network to approximate the locations of MSs in the case of proving the proposing ideas and in the case of small/medium-sized city, neural network can give the accuracy within the radius of 125 meters to achieve more than 95% of all trial locations. The results can prove that the method of using neural network in approximating the location of MSs keeps satisfactory accuracies better than the earlier proposed method and FCC recommendations. Moreover, using neural network in computing the location of MSs can decrease the complexity and response times in computing for the location for the real-time service.

Department Electrical Engineering .. Student's signature

Field of study ... Electrical Engineering .. Advisor's signature

Academic year 2545 Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของท่านอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบนญพลกกุล ซึ่งได้ให้ความกรุณาแนะนำ และเสนอแนะข้อคิดเห็นต่าง ๆ รวมถึงการให้ข้อมูลด้านวิชาการอาทิ เอกสารทางวิชาการ, หนังสือความรู้ เป็นต้น ในการทำวิจัยตลอดมา ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณ

กราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ซึ่งทำให้ผู้วิจัยได้รับแต่สิ่งดี ๆ เสมอมา ขอบพระคุณ สำหรับความรัก ความห่วงใยอาทรที่มีให้ตลอดเวลา และ คอยให้กำลังใจในการทำงานอย่างต่อเนื่อง

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และคนรอบตัวของผู้วิจัยทุก ๆ ท่านสำหรับความช่วยเหลือและ แรงบันดาลใจ และ ทำให้ความคิดและมุมมองต่าง ๆ ในการมองปัญหาใด ๆ อย่างหนึ่ง กว้างขวาง และ รอบคอบขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฉ
บัญชีคำศัพท์	ณ

บทที่

1	บทนำ	1
1.1	ภาพรวมของระบบการประมาณค่าตำแหน่ง	2
1.2	การประยุกต์ใช้งานของระบบการประมาณค่าตำแหน่ง	2
1.3	การวัดสัญญาณในระบบการประมาณค่าตำแหน่ง	2
1.4	อัลกอริทึมในการประมาณค่าพิกัดตำแหน่ง	4
1.5	วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	7
1.6	แนวทางของวิทยานิพนธ์นี้	7
1.7	เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์	7
1.8	ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	7
1.9	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
1.10	เค้าโครงวิทยานิพนธ์	8
2	ความรู้พื้นฐาน	9
2.1	ลักษณะของบริการ 911 ในยุคปัจจุบัน	9
2.1.1	การบริการ 911 ในระบบข่ายสาย	9
2.1.2	การบริการ E-911 ในระบบสื่อสารไร้สาย	10
2.1.3	ปัญหาของการบริการ 9-1-1 ในระบบสื่อสารไร้สาย	11
2.1.4	วิวัฒนาการของบริการ 9-1-1 ในระบบไร้สาย	12
2.1.5	ข้อกำหนดของ FCC ระยะที่ 1	12
2.1.6	ข้อกำหนดของ FCC ระยะที่ 2	15
2.1.6.1	GIS-Based Service Administration	16
2.1.6.2	ข้อจำกัดและปัญหาของระบบ Geolocation	16

สารบัญ (ต่อ)

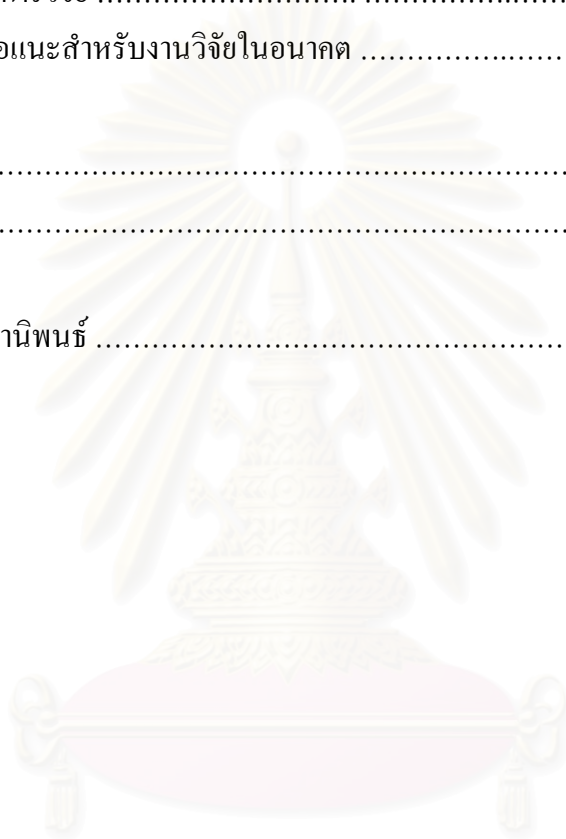
บทที่	หน้า
2.1.6.3	17
2.1.7	17
2.2	18
2.2.1	18
2.2.2	19
2.2.2.1	19
2.2.2.2	20
2.2.2.3	20
2.3	21
2.3.1	21
2.3.2	24
ค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ	24
2.3.3	27
2.4	28
2.4.1	28
2.4.2	29
2.4.3	29
2.4.4	29
2.4.5	29
2.4.6	29
2.4.7	29
2.4.8	30
3	31
3.1	31
3.1.1	31
3.1.2	32
3.1.3	33
3.1.4	35
3.1.5	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 รูปแบบของนิเวศวิทยาที่ใช้นิเวศวิทยา.....	38
3.2.1 สถาปัตยกรรมโครงข่ายชนิดป้อนไปหน้าและ การฝึกแบบแพร่กระจายย้อนกลับ	38
3.2.2 สถาปัตยกรรมโครงข่ายชนิดมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอน	41
3.3 ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนต่าง ๆ สำหรับการฝึกนิเวศวิทยา	
แบบแพร่กระจายย้อนกลับ	42
3.3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น	42
3.3.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ลอการิทึม	42
3.3.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ซิกมอยด์	42
3.4 กฎการฝึกนิเวศวิทยาของ Levenberg Marquardt	43
3.5 ฐานความรู้ของนิเวศวิทยา	47
3.6 การใช้นิเวศวิทยาในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่	48
3.7 แบบจำลองของระบบที่พิจารณาในนิเวศวิทยา	49
3.8 ข้อดีของการใช้นิเวศวิทยาประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่	49
4 ผลการทดสอบ.....	52
4.1 ระบบแบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบ	52
4.1.1 กรณีต้นแบบใช้ในการทดสอบสมมุติฐาน	52
4.1.2 กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 3 สถานีฐาน	53
4.1.3 กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 7 สถานีฐาน	54
4.1.4 กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 3 สถานีฐาน	55
4.1.5 กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 7 สถานีฐาน	56
4.2 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึก และ ทดสอบนิเวศวิทยา	57
4.2.1 การจำลองค่าความแรงของสัญญาณ	57
4.2.2 การจำลองค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ	59
4.3 แบบจำลองนิเวศวิทยาที่ออกแบบในนิเวศวิทยา	59
4.4 ผลการทดสอบ	60
4.4.1 กรณีต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบสมมุติฐาน	60
4.4.2 กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 3 สถานีฐาน	65
4.4.3 กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 7 สถานีฐาน	72

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.4.4 กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 3 สถานีฐาน	76
4.4.5 กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 7 สถานีฐาน	81
4.5 สรุปผลการทดสอบ	84
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	86
5.1 สรุปผลการวิจัย	86
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	86
รายการอ้างอิง	88
ภาคผนวก ก	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	92



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1	สรุปผลการทดสอบกรณีต่างๆ	85
--------------	-------------------------------	----



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 วิธีการหาค่าตำแหน่งพิกัดของสถานีเคลื่อนที่จากค่ามุมการมาถึงของสัญญาณ	5
รูปที่ 1.2 การประมาณค่าตำแหน่งโดยวิธีการหาจุดตัดกันของวงกลม	6
รูปที่ 1.3 การไม่ตัดกันเป็นจุดเดียวของวงกลมที่สร้างจากสถานีฐานทั้ง 3 เนื่องจากผลของเฟดดิ้ง พหุวิถี และ สัญญาณที่ไม่เป็นแนวสายตา	6
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบ E-911 สำหรับโครงข่ายสื่อสารมีสาย	10
รูปที่ 2.2 โครงข่ายของระบบ E-911 ของระบบสื่อสารไร้สาย	13
รูปที่ 2.3 การนำระบบ GIS มาเพิ่มความสามารถในการบริการ E-911 ระยะที่ 1	14
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของบริการระบบ E-911 สำหรับระบบสื่อสารไร้สายโดยเพิ่มส่วนของ GIS ..	15
รูปที่ 2.5 การวัดค่าความแรงของสัญญาณ	19
รูปที่ 2.6 การวัดค่ามุมการมาถึงของสัญญาณ	20
รูปที่ 2.7 การวัดค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ	21
รูปที่ 2.8 วิธีการ NL-LS แบบมีเงื่อนไขบังคับ	26
รูปที่ 3.1 รูปแบบต่าง ๆ ของนิวรอลเน็ตเวิร์ก	31
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของนิวรอลเน็ตเวิร์กโดยทั่วไป 1 ชั้น	32
รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น	34
รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์	35
รูปที่ 3.5 การต่อแบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์กหลายชั้น	36
รูปที่ 3.6 วิธีการฝึกแบบแพร่กระจายย้อนกลับ	39
รูปที่ 3.7 ลักษณะต่าง ๆ ของอาณาเขตตัดสินใจที่เกิดจากนิวรอลเน็ตเวิร์กชนิดเพอร์เซปตรอน	41
รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ลอการิทึม	42
รูปที่ 3.9 ฟังก์ชันถ่ายโอนไฮเพอร์โบลิคแทนเจนต์ซิกมอยด์	43
รูปที่ 3.10 นิวรอลเน็ตเวิร์กแบบ 3-layer Perceptron	44
รูปที่ 3.11 กระบวนการฐานความรู้ของนิวรอลเน็ตเวิร์ก	47
รูปที่ 3.12 แบบจำลองสถานีเคลื่อนที่และสถานีฐาน 3 สถานีที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้	49
รูปที่ 3.13 แบบจำลองสถานีเคลื่อนที่และสถานีฐาน 7 สถานีที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้	49
รูปที่ 3.14 นิวรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้	50
รูปที่ 4.1 ระบบสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ต้นแบบ	53
รูปที่ 4.2 แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 3 สถานีฐาน	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.3 แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 7 สถานีฐาน	54
รูปที่ 4.4 แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 3 สถานีฐาน	55
รูปที่ 4.5 แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 7 สถานีฐาน	56
รูปที่ 4.6 รูปแบบของนิรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้	59
รูปที่ 4.7 ผลของการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้น 7 นิรอน	61
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบนิรอลเน็ตเวิร์กที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 7 นิรอน	61
รูปที่ 4.9 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดของชุดข้อมูลฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กโดยใช้จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 7 นิรอน	62
รูปที่ 4.10 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดของชุดข้อมูลทดสอบนิรอลเน็ตเวิร์กโดยใช้จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 7 นิรอน	63
รูปที่ 4.11 การกระจายของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งจากชุดข้อมูลฝึกสำหรับระบบที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 10 นิรอน	63
รูปที่ 4.12 การกระจายของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งจากชุดข้อมูลทดสอบสำหรับระบบที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 10 นิรอน	64
รูปที่ 4.13 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งจากชุดข้อมูลฝึกสำหรับระบบที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 10 นิรอน	64
รูปที่ 4.14 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งจากชุดข้อมูลทดสอบสำหรับระบบที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 10 นิรอน	65
รูปที่ 4.15 การกระจายของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งจากชุดข้อมูลฝึกสำหรับระบบที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 9 นิรอน	66
รูปที่ 4.16 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งของชุดข้อมูลฝึกสำหรับระบบที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 9 นิรอน	66
รูปที่ 4.17 การกระจายของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งจากชุดข้อมูลทดสอบสำหรับระบบที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 9 นิรอน	67
รูปที่ 4.18 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งของชุดข้อมูลทดสอบสำหรับระบบที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 9 นิรอน	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.19 การกระจายของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าจากชุดข้อมูลฝึก สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 15 นิวรอน	68
รูปที่ 4.20 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งของชุดข้อมูลฝึก สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 15 นิวรอน	69
รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าจากชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 15 นิวรอน	69
รูปที่ 4.22 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งของชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 9 นิวรอน	70
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการประมาณค่าด้วยวิธีการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์ก กับวิธีการ Maximum Likelihood Method	71
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการประมาณค่าด้วยวิธีการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์ก กับวิธีการ Maximum Likelihood Method	71
รูปที่ 4.25 การกระจายของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าจากชุดข้อมูลฝึก สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 170 นิวรอน	72
รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าจากชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 170 นิวรอน	73
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบค่า cdf ของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งของชุดข้อมูล ฝึกกับชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอน 170 นิวรอน ในชั้นซ่อนเร้น	73
รูปที่ 4.28 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลฝึกของระบบที่มีจำนวน นิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 210 นิวรอน	74
รูปที่ 4.29 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลทดสอบของระบบที่มีจำนวน นิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 210 นิวรอน	75
รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบค่า cdf ของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งของชุดข้อมูล ฝึกกับชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอน 210 นิวรอน ในชั้นซ่อนเร้น	75
รูปที่ 4.31 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลฝึกของระบบที่มีจำนวน นิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 50 นิวรอน	77
รูปที่ 4.32 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลทดสอบของระบบที่มีจำนวน นิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 50 นิวรอน	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.33 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลฝึกของระบบที่มีจำนวน นิรอนในชั้นซ่อนเร้น 60 นิรอน	78
รูปที่ 4.34 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลทดสอบของระบบที่มีจำนวน นิรอนในชั้นซ่อนเร้น 60 นิรอน	78
รูปที่ 4.35 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลฝึกของระบบที่มีจำนวน นิรอนในชั้นซ่อนเร้น 100 นิรอน	79
รูปที่ 4.36 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลทดสอบของระบบที่มีจำนวน นิรอนในชั้นซ่อนเร้น 100 นิรอน	79
รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่า cdf ของนิรอลเนตเวิร์กที่ออกแบบให้มีจำนวนนิรอน ในชั้นซ่อนเร้นที่แตกต่างกับวิธีที่เสนอใน [14]	80
รูปที่ 4.38 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลฝึกเมื่อจำนวน นิรอนในชั้นซ่อนเร้นเป็น 250 นิรอน	81
รูปที่ 4.39 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลทดสอบเมื่อจำนวน นิรอนในชั้นซ่อนเร้นเป็น 250 นิรอน	82
รูปที่ 4.40 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลฝึกเมื่อจำนวน นิรอนในชั้นซ่อนเร้นเป็น 300 นิรอน	82
รูปที่ 4.41 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลทดสอบเมื่อจำนวน นิรอนในชั้นซ่อนเร้นเป็น 300 นิรอน	83
รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบค่า cdf ของนิรอลเนตเวิร์กที่ออกแบบให้มีจำนวนนิรอน ในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 250 และ 300 นิรอน	83

บัญชีคำศัพท์

Angle Of Arrival (AOA)	ค่ามุมการมาถึงของสัญญาณ
Decision region	อาณาเขตการตัดสินใจ
Error gradient	เกรเดียนต์ของค่าผิดพลาด
Feedforward Network	โครงข่ายชนิดป้อนไปหน้า
Intelligent Transportation System (ITS)	ระบบขนส่งอัจฉริยะ
Learning rate	อัตราการเรียนรู้
Multipath fading	เฟดดิ้งพหุวิถี
Near-far effect	ปรากฏการณ์ใกล้ไกล
Non-Line Of Sight (NLOS)	การอยู่นอกแนวสายตา
Response time	เวลาตอบสนอง
Shadowing	การถูกบัง
Signal Strength (SS)	ค่าความแรงของสัญญาณ
Time Of Arrival (TOA)	ค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ
Training	การฝึก
Target	ค่าเป้าหมาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

การประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ได้มีการพัฒนาและใช้งานกับระบบสื่อสารเคลื่อนที่มาเป็นระยะเวลาประมาณ 10-20 ปีแล้ว และได้มีการนำเสนอเทคนิคการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ออกมามากมายเพื่อให้มีการประมาณค่าตำแหน่งพิกัดของสถานีเคลื่อนที่ที่มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยมีจุดประสงค์ในเรื่องการให้ความช่วยเหลือในกรณีฉุกเฉิน (Emergency) เป็นหลักโดยแรกเริ่มได้นำไปใช้กับระบบขนส่งและการจราจร เช่น ระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transportation System: ITS) จากนั้นได้มีการพัฒนามาใช้กับระบบสื่อสารเคลื่อนที่เพื่ออำนวยความสะดวกต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น การประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่, การรายงานสถานที่เกิดอุบัติเหตุจากสถานีเคลื่อนที่ ฯลฯ จนถึงกับมีการกำหนดเป็นมาตรฐาน E-911 ของหน่วยงาน Federal Communications Commission (FCC) ในหัวข้อที่ 94-102 เมื่อวันที่ 15 กันยายน ค.ศ. 1999 กำหนดไว้เป็น 2 ระยะด้วยกัน กล่าวคือ ในระยะแรก กำหนดว่าระบบจะต้องมีความสามารถในการรายงานเลขหมายติดต่อกลับ และ ตำแหน่งอย่างคร่าว ๆ ของผู้เรียกใช้บริการ ส่วนระยะที่สองระบบจะต้องมีความสามารถในการรายงานพิกัดตำแหน่งของผู้เรียกใช้บริการให้มีความถูกต้องสูงขึ้น โดยกำหนดว่าภายในเดือน ตุลาคม ค.ศ. 2001 สำหรับระบบสื่อสารเคลื่อนที่ CDMA หรือ GSM ระบบการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่จะต้องมีความสามารถรายงานค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่มีความถูกต้องถึง 67% ของจำนวนครั้งของการประมาณค่า ในระยะความผิดพลาด 125 เมตร [1-2] อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมของการประมาณค่าตำแหน่งเดิมที่มีผู้เสนอไว้ยังมีปัญหาในเรื่องของความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (Non-linear Problem) ทำให้เกิดความยุ่งยากในการคำนวณและนำไปใช้ในทางปฏิบัติ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอวิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีฐาน ซึ่งตามคุณลักษณะการทำงานของนิวรอลเน็ตเวิร์กในการประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ ทำให้คาดได้ว่านิวรอลเน็ตเวิร์กสามารถให้ค่าความถูกต้องในการประมาณค่าตำแหน่งถูกต้องดีกว่าที่ E-911 กำหนดไว้ และลดความยุ่งยากในการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีต่าง ๆ ที่มีผู้เสนอไว้ก่อนหน้านี้ และสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้ดีกว่าวิธีอื่น

1.1 ภาพรวมของระบบการประมาณค่าตำแหน่ง

ระบบการประมาณค่าตำแหน่งได้มีการเริ่มใช้งานมาเป็นเวลากว่า 10 ปีมาแล้ว โดยเน้นไปในการใช้งานในกรณีฉุกเฉินเป็นหลัก และ เมื่อนำมาใช้กับระบบสื่อสารไร้สายจึงได้มีการออกข้อกำหนดโดย FCC ดังที่กล่าวมาแล้ว

การทำงานของระบบการประมาณค่าตำแหน่งจะเริ่มจากการที่สถานีเคลื่อนที่ทำการร้องขอใช้บริการ จากนั้นสถานีฐานจะทำการวัดสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่นั้น และ นำค่าสัญญาณที่วัดได้มาคำนวณโดยอัลกอริทึมสำหรับประมาณค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่นั้น จากนั้นจึงแจ้งกลับไปยังสถานีเคลื่อนที่ หรือ ศูนย์บรรเทาสาธารณภัยในแต่ละท้องที่ (PSAP : Public Safety Answering Point) ดังจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

1.2 การประยุกต์ใช้งานของระบบการประมาณค่าตำแหน่ง (Applications of Wireless Location)

[1,3]

- **E-911** เป็นบริการที่มีใช้ในอเมริกาสำหรับการร้องขอความช่วยเหลือในกรณีฉุกเฉิน เช่น การสอบถามตำแหน่งเมื่อเกิดหลงทาง, การแจ้งเหตุคว้น เหตุร้าย เป็นต้น

- **Location-sensitive billing** เป็นการเพิ่มความสามารถให้กับผู้ให้บริการสำหรับการเสนออัตราค่าบริการที่แตกต่างกันเมื่อผู้ใช้บริการทำการเรียกในที่ต่างกัน เช่น ที่บ้าน, ที่ทำงาน, บนถนน ฯลฯ

- **Fraud detection** เป็นการเพิ่มความสามารถให้กับผู้ให้บริการในการหาตัวผู้กระทำความผิดในกรณีที่มีการแอบนำเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปใช้อย่างทุจริต เช่น การสูญหาย, การปลอมแปลงใช้งาน ฯลฯ

- **Fleet management and intelligent transportation systems (ITS)** เป็นการอำนวยความสะดวกให้กับระบบการขนส่ง เช่น การตรวจสอบหาตำแหน่งของรถเมื่อมีการโจรกรรมเกิดขึ้น หรือ เมื่อเกิดอุบัติเหตุบนถนน ฯลฯ

1.3 การวัดสัญญาณในระบบการประมาณค่าตำแหน่ง [1-5]

ในปัจจุบันระบบการประมาณค่าตำแหน่งทำการวัดสัญญาณเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่หลายวิธี ได้แก่

- **การวัดค่าความแรงของสัญญาณ (Signal Strength Method: SS Method) [1,3,4,5]**

เป็นการวัดค่าความแรงของสัญญาณ ซึ่งสามารถทำการวัดได้ทั้งที่สถานีฐาน และสถานีเคลื่อนที่ซึ่งจะถูกนำมาคำนวณหาระยะทางระหว่างสถานีฐานกับสถานีเคลื่อนที่จากค่าการลดทอนเนื่องจากการสูญเสียในวิถี (path loss attenuation) โดยทำการวัดสัญญาณจากสถานีฐาน 3 สถานีขึ้นไปในการประมาณค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ใน 2 มิติ (x,y) ซึ่งการวัดค่าความแรงของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก ปรากฏการณ์เฟดดิ้งพหุวิถี (multipath fading) และ การถูกบัง

(shadowing) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าความแรงของสัญญาณ ทำให้การวัดมีความคลาดเคลื่อน และในปัจจุบันมีค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าอยู่ที่ 150 ถึง 200 เมตรขึ้นไป

- **การวัดมุมการมาถึงของสัญญาณ (Angle Of Arrival Method: AOA Method) [1-5]**

เป็นการใช้สถานีฐานหลายสถานีวัดมุมการมาถึงของสัญญาณที่ได้รับจากสถานีเคลื่อนที่โดยใช้สายอากาศแถวลำดับ (array antenna) จากนั้นใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อหาพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ ปัญหาของวิธีนี้คือการวัดค่ามุมการมาถึงของสัญญาณจะมีความผิดพลาดจากปรากฏการณ์การกระเจิง (scattering), ความไม่แม่นยำของการวัดเนื่องจากการวัดที่ระยะไกลจากสถานีฐานมากๆ และการลงทุนเนื่องมาจากชุดสายอากาศมีราคาแพง ซึ่งในปัจจุบันมีค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าอยู่ที่ 200 เมตรขึ้นไป

- **การวัดเวลาการมาถึงของสัญญาณ (Time Of Arrival Method: TOA Method) [1-5]**

เป็นการวัดเวลาการมาถึงของสัญญาณ โดยใช้สถานีฐานมากกว่า 3 สถานีขึ้นไปในการวัดเวลาที่สัญญาณถูกส่งมาจากสถานีเคลื่อนที่ (ต้นทาง) มาถึง สถานีฐาน (ปลายทาง) จากนั้นทำการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่จากจุดตัดของวงกลมที่มีรัศมีเป็นระยะทางที่ได้จากการคำนวณจากค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณที่สถานีฐานรับได้ ทั้งนี้ข้อจำกัดของการวัดเวลาในระบบนั้นก็คือจำเป็นต้องมีการซิงโครไนซ์ทางเวลา (synchronization) ระหว่างสถานีฐานกับสถานีเคลื่อนที่ และยังได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งพหุวิถี (multipath fading) และ ปัญหาจากการอยู่นอกแนวสายตา (Non Line Of Sight: NLOS) [1] ซึ่งจะมีผลกระทบทำให้เวลาที่วัดได้เพิ่มขึ้น

การใช้ข้อมูลเวลาการมาถึงของสัญญาณในการประมาณค่าตำแหน่งในปัจจุบันมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 80 เมตรขึ้นไป

- **การวัดความแตกต่างของเวลาการมาถึงของสัญญาณ (Time Difference Of Arrival Method: TDOA Method) [1-5]**

เป็นการวัดความแตกต่างของเวลาการมาถึงของสัญญาณจากสถานีฐานแต่ละคู่ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับวิธีการวัดเวลาการมาถึงของสัญญาณ แต่จะแตกต่างกันตรงการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ซึ่งแทนที่จะเป็นการคำนวณหาจุดตัดกันของวงกลม จะเป็นการหาจุดตัดกันของเส้นไฮเพอร์โบลาร์ ซึ่งจะทำให้อัลกอริทึมการคำนวณซับซ้อนและยุ่งยากกว่า แต่วิธีการนี้จะมีข้อดีตรงที่ไม่ต้องการการซิงโครไนซ์ทางเวลาของสถานีฐานแต่ละสถานี สำหรับการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้ข้อมูลค่าความแตกต่างของเวลาการมาถึงของสัญญาณจะมีค่าความผิดพลาดใกล้เคียงกับการใช้ข้อมูลของค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ

- การหาค่าพิกัดตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม (Global Positioning System: GPS) [1,5]

เป็นวิธีการหาค่าพิกัดตำแหน่งของเป้าหมาย (ในที่นี้คือสถานีเคลื่อนที่) โดยใช้ดาวเทียม 3 ดวงในการทำงาน เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมาก และมีความคลาดเคลื่อนต่ำ แต่จะมีข้อเสียคือระบบนี้จะทำงานได้ดีในสภาพภูมิประเทศที่เป็นที่โล่งกว้างเท่านั้น แต่จะทำงานให้ผลที่ไม่ดีในสภาพภูมิประเทศที่เป็นเมืองใหญ่ที่มีอาคารมากมาย หรือหุบเขา

1.4 อัลกอริทึมในการประมาณค่าพิกัดตำแหน่ง [1-5]

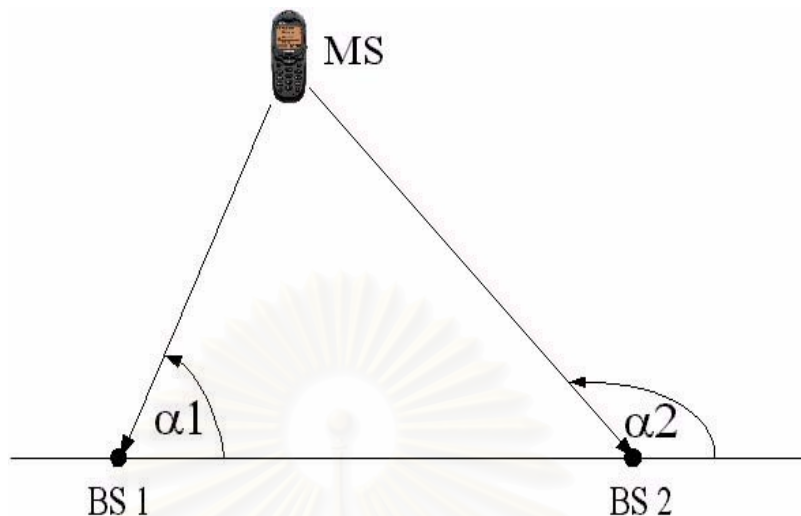
ในปัจจุบันได้มีการนำเสนออัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการประมาณค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ซึ่งจำแนกได้ดังนี้

- วิธีการประมาณค่าโดยอ้างอิงตำแหน่งของสถานีฐาน (Conventional Method)

เป็นอัลกอริทึมการประมาณค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ โดยอ้างอิงตำแหน่งของสถานีฐานที่สถานีเคลื่อนที่ลงทะเบียนอยู่ในขณะนั้นบอกเป็นพิกัดของสถานีเคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการนี้เป็นอัลกอริทึมเริ่มแรกที่ใช้ในการรายงานตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ เนื่องจากง่ายต่อการทำงาน แต่มีข้อเสียคือ มีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริงของสถานีเคลื่อนที่ได้สูงสุดเท่ากับรัศมีที่ครอบคลุมของสถานีฐานนั้น

- วิธีการประมาณค่าตำแหน่งจากค่ามุมการมาถึงของสัญญาณ (AOA Estimation Method) [1-5]

เป็นวิธีการหาพิกัดตำแหน่งของสถานีฐานจากข้อมูลของมุมการมาถึงของสัญญาณวิธีการนี้ต้องการข้อมูลมุมการมาถึงของสัญญาณจากสถานีฐานเพียง 2 จุดเท่านั้นในการคำนวณเพื่อระบุค่าพิกัดตำแหน่ง รูปที่ 1.1 แสดงวิธีการหาค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้ข้อมูลมุมการมาถึงของสัญญาณจากสถานีฐาน 2 สถานี ซึ่งค่าพิกัดตำแหน่งคำนวณได้จากจุดตัดของเส้นแสดงทิศทางที่ได้จากข้อมูล และใช้วิธีการทางเรขาคณิตคำนวณระยะทาง และบอกค่าพิกัด ทั้งนี้การประมาณค่าตำแหน่งโดยวิธีการนี้จะมีข้อผิดพลาดเนื่องจากผลของการกระเจิง (Scattering) ของสัญญาณเมื่อกระทบกับอาคารหรือสิ่งก่อสร้างทำให้การวัดมุมการมาถึงของสัญญาณมีความคลาดเคลื่อน ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้วิธีนี้ประกอบกับวิธีการอื่นๆ เพื่อทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 1.1 วิธีการหาค่าตำแหน่งพิกัดของสถานีเคลื่อนที่จากค่ามุมการมาถึงของสัญญาณ

• **วิธีการประมาณค่าตำแหน่งจากค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ (TOA Estimation Method)**

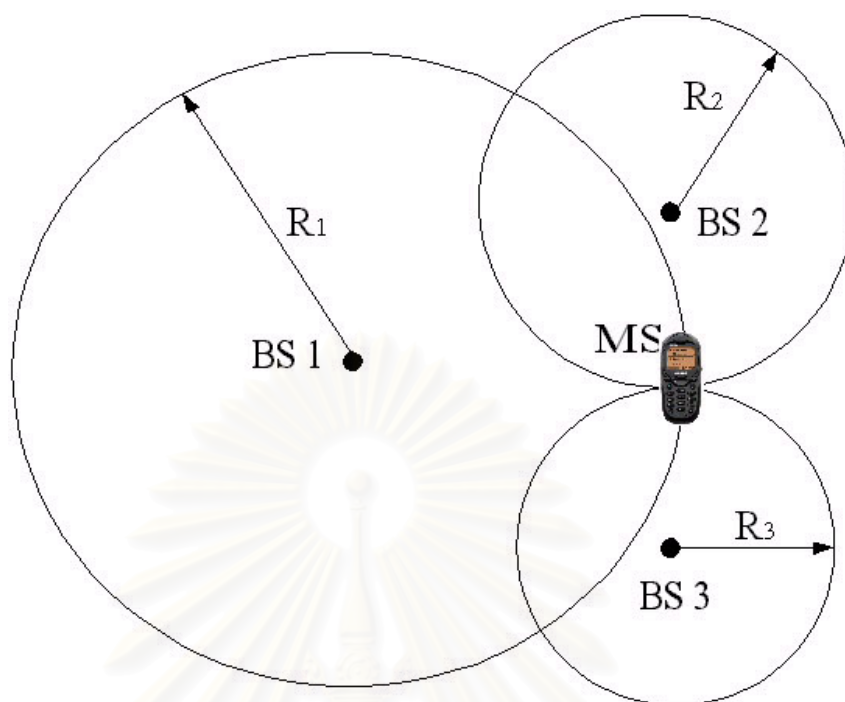
เป็นอัลกอริทึมในการคำนวณหาค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่จากค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณซึ่งแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ

1. การประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยวิธีการหาจุดตัดกันของวงกลม หรือ ไฮเพอร์โบลาร์ (Calculate the intersection of circles or hyperbolas) [1-4]

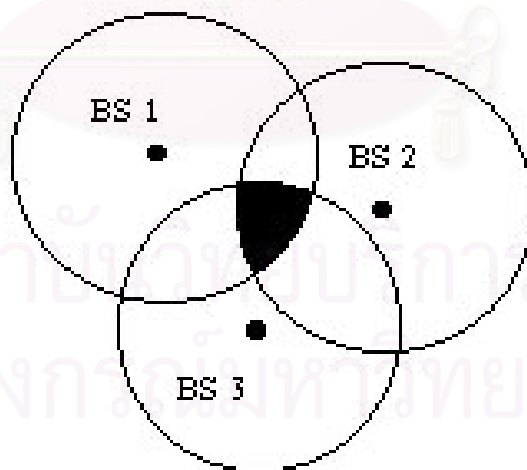
วิธีนี้ใช้ข้อมูลของเวลาที่ทำการวัดได้ซึ่งแสดงถึงรัศมีวงกลม หรือ ส่วนโค้งของไฮเพอร์โบลาร์ (ในกรณีของ TDOA) รอบๆ สถานีฐานที่อยู่รอบข้างของสถานีเคลื่อนที่ขณะนั้น การคำนวณโดยวิธีนี้ต้องการข้อมูลจากสถานีฐาน 3 สถานีขึ้นไปจึงจะเพียงพอในการคำนวณหาค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ได้โดยไม่มีความกำกวมดังแสดงในรูปที่ 1.2 ทั้งนี้ผลของเฟดดิ้งพหุวิถี (multipath fading) จะก่อให้เกิดค่าของเวลาที่ผิดพลาดในการวัดขึ้น และอาจทำให้จุดตัดกันของวงกลมหรือไฮเพอร์โบลาร์ ไม่ได้มีจุดเดียวก่อให้เกิดความไม่แน่นอนในการระบุค่าพิกัดตำแหน่งได้

2. การประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยวิธีกำลังสองต่ำที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Least-Squares: NL-LS) [6]

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ในกรณีของการเกิดการไม่ตัดกันเป็นจุดเดียวของวงกลมที่สร้างจากสถานีฐานทั้ง 3 เนื่องจากผลของเฟดดิ้งพหุวิถี และสัญญาณที่ไม่เป็นแนวสายตา (NLOS) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยวิธีนี้จะเป็นการคำนวณโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ และ ความรู้เชิงสถิติมาช่วยในการประมาณค่า



รูปที่ 1.2 การประมาณค่าตำแหน่งโดยวิธีการหาจุดตัดกันของวงกลม



รูปที่ 1.3 การไม่ตัดกันเป็นจุดเดียวของวงกลมที่สร้างจากสถานีฐานทั้ง 3 เนื่องจากผลของเฟดดิ้งพหุวิถี และ สัญญาณที่ไม่เป็นแนวสายตา (NLOS)

1.5 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อพัฒนาวิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กให้มีความถูกต้องสูงกว่าที่มาตรฐาน E-911 กำหนดไว้
2. ศึกษาสมรรถนะของระบบที่ได้จากการประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอเทียบกับที่มาตรฐาน E-911 กำหนดไว้ และวิธีที่ได้มีการนำเสนอไว้ก่อนหน้านี้

1.6 แนวทางของวิทยานิพนธ์นี้

เนื่องจากอัลกอริทึมการประมาณค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่มีผู้เสนอไว้มีความยุ่งยากในการคำนวณปัญหาของสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น และการพยายามทำการประมาณค่าฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น ประกอบกับทั้งข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณและเวลาที่ทำการวัดมีความผิดพลาดเนื่องจากผลของสภาพภูมิประเทศ จึงทำให้ผลลัพธ์ของการประมาณค่ามีค่าผิดพลาดพอสมควรดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

เพื่อให้ความถูกต้องของการทำนายค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่มีค่าดีกว่าที่มาตรฐานของ FCC กำหนด และไม่ก่อให้เกิดความยุ่งยากในอัลกอริทึมการคำนวณ อีกทั้งนิวรอลเน็ตเวิร์กสามารถนำไปใช้กับปัญหาในการประมาณค่าต่างๆ มีความสามารถในการแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น และสามารถทำการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ได้พร้อมกันหลายๆ สถานีโดยใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ ที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาคำนวณ วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอให้ใช้วิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่จากข้อมูลความแรงของสัญญาณที่วัดได้ และ ค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ ซึ่งเป็นค่าการวัดคุณลักษณะของสัญญาณที่ทำได้ง่าย และ ไม่ต้องปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ของระบบสื่อสารเคลื่อนที่แต่อย่างใด

1.7 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีเป้าหมายในการออกแบบวิธีการประมาณค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กมาประยุกต์ใช้ โดยอาศัยข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณ และ เวลาประวิงในการเดินทางของสัญญาณ มาทำการฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์ก เพื่อให้นิวรอลเน็ตเวิร์กทำการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ให้มีความถูกต้องดีกว่าที่มาตรฐาน E-911 กำหนดไว้ อีกทั้งเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวิธีการที่นำเสนอ กับวิธีต่างๆ ที่มีผู้เสนอไว้แล้ว

1.8 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

- 1) ศึกษาค้นคว้างานวิจัย วิธีการ และอัลกอริทึมต่างๆ ที่ได้มีผู้เสนอไว้แล้ว ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้
 - ศึกษาระบบและมาตรฐานของ E-911

- ศึกษาวิธีการ และอัลกอริทึมการประมาณค่าตำแหน่งแบบต่างๆ ที่มีผู้นำเสนอไว้แล้ว
 - ศึกษาทฤษฎีนิเวศวิทยา
- 2) วิเคราะห์กรรมวิธีการประมาณค่าตำแหน่งวิธีต่างๆ โดยวิเคราะห์ ข้อดี-ข้อเสีย ของวิธี และ อัลกอริทึมการประมาณค่าตำแหน่งของวิธีแต่ละวิธี
 - 3) ออกแบบเขียน โปรแกรมจำลองการทำงานของระบบโดยวิธีที่นำเสนอ จากนั้นทำการทดสอบ วิธีการที่นำเสนอ รวมถึงทำการประเมินผล
 - 4) สรุป วิเคราะห์ และเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้อัลกอริทึมสำหรับการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่มีความยุ่งยากในการคำนวณฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นต่ำ และ มีความถูกต้องสูง และคาดว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงและมีประโยชน์อย่างมากในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ยุคที่ 3

1.10เค้าโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งรายละเอียดออกเป็น 5 บท ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงภาพรวมของระบบการประมาณค่าตำแหน่ง ความเป็นมา การประยุกต์ใช้งานของระบบการประมาณค่าตำแหน่ง การวัดสัญญาณ อัลกอริทึมสำหรับประมาณค่าตำแหน่ง เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน และ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน กล่าวถึงมาตรฐาน E-911 ความรู้พื้นฐานของระบบการประมาณค่าตำแหน่ง งานวิจัยที่มีอยู่แล้ว

บทที่ 3 นิเวศวิทยา กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของนิเวศวิทยา และการนำนิเวศวิทยา มาประยุกต์ใช้งานกับระบบการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่

บทที่ 4 ผลการวิจัย กล่าวถึง ผลการทดลองเพื่อทดสอบแนวคิด ผลของวิธีที่นำเสนอ รวมทั้ง ผลของการทดสอบเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

บทที่ 5 บทสรุป กล่าวถึงสรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของระบบ E-911 หลักการวัดสัญญาณที่จะนำมาเป็นข้อมูลในการประมาณค่าพิกัดตำแหน่ง อัลกอริทึมของการประมาณค่าตำแหน่งที่มีผู้ทำกรนำเสนอมาก่อนหน้านี้

2.1 ลักษณะของบริการ 911 ในยุคปัจจุบัน [5]

2.1.1 การบริการ 911 ในระบบข่ายสาย (Wireline 911 Service Operation)

B-911 (Basic 911) เป็นบริการ 911 ในยุคแรกที่เริ่มมีการใช้งานใน Alabama ในปี ค.ศ. 1968 ซึ่งมีหน้าที่ในการจัดเส้นทางของการเรียก 911 ไปที่สถานีตำรวจประจำท้องถิ่น จากนั้นได้มีการปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1980s จนมาเป็น E-911 ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

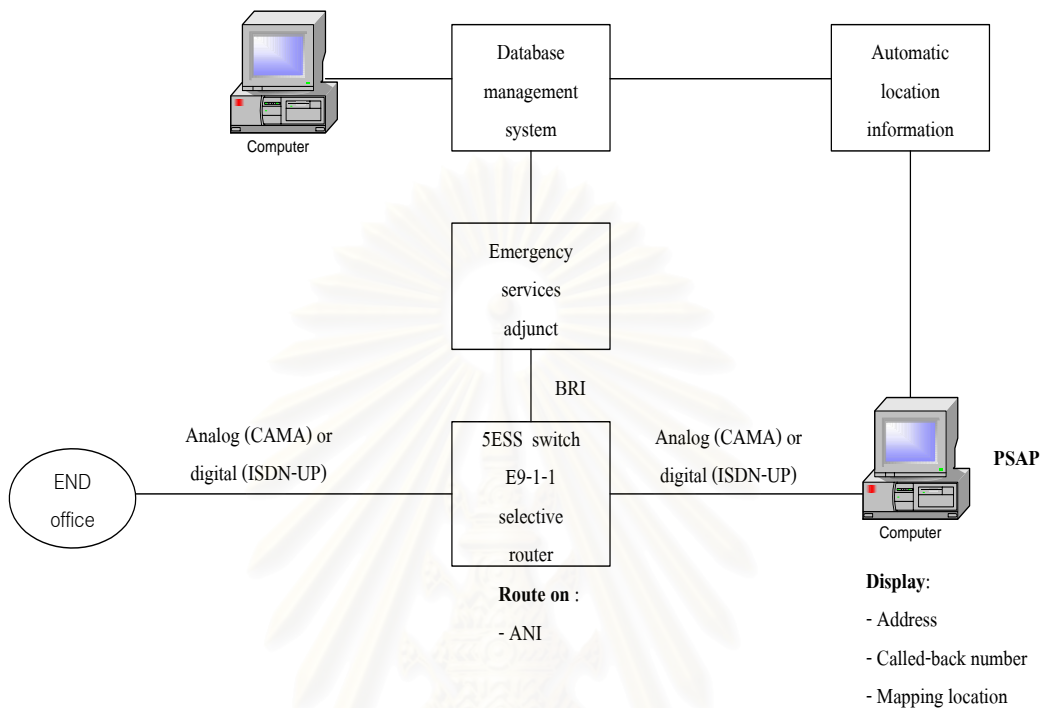
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของระบบ E-911 ของการบริการระบบข่ายสาย ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เมื่อผู้ใช้บริการทำการเรียกหมายเลข 9-1-1 central office switch จะทำการจัดเส้นทางของการเรียกนี้ไปยัง router ที่จะเลือกทำการต่อการเรียกนี้ไปยังศูนย์บริการบรรเทาสาธารณภัยประจำท้องถิ่นที่เหมาะสม (local PSAP) โดยอาศัยพื้นฐานของเลขหมายที่ทำการเรียก จากนั้นข้อมูลของเลขหมายที่ทำการเรียกใช้บริการจะถูกส่งต่อไปยัง CPE (customer premises equipment) เพื่อทำการระบุข้อมูลจาก ALI (automatic location information) database ซึ่งจะบอกข้อมูลของชื่อ และ ที่อยู่ของผู้ใช้บริการ และเลขหมายที่เจ้าหน้าที่ของ PSAP สามารถทำการติดต่อกลับได้

2.1.2 การบริการ E-911 ในระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless E-911 Service Operation)

สำหรับระบบการสื่อสารไร้สายได้มีการใช้ระบบ AUTOPLEX 1000 มาสนับสนุนการบริการของ B-911 โดยที่สถานีเคลื่อนที่สามารถทำการเรียก 9-1-1 ในกรณีฉุกเฉินและจะถูกแยกออกจากการเรียกแบบปกติทั่วไป (เช่นเดียวกับการร้องขอ PIN : Personal Identification Number และ การทำ user authentication) โดยปราศจากการ delay หรือ block การเรียกนั้น ๆ

แต่ละการเรียก 9-1-1 จากสถานีเคลื่อนที่จะถูกทำการต่อเข้ากับจุด PSAP ที่เหมาะสมโดยอาศัยพื้นฐานของการลงทะเบียนของสถานีเคลื่อนที่กับสถานีฐาน และการเชื่อมต่อเข้ากับระบบ B-911 จะใช้ลักษณะของ digit-by-digit feature ในการจัดเส้นทาง (routing) ซึ่งจะมี automatic number

identification (ANI) field ที่ทำให้ centralized automatic message accounting (CAMA) รับรู้และจัดเส้นทางไปยัง PSAP ที่เหมาะสมได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบ E-911 สำหรับโครงข่ายสื่อสารมีสาย

2.1.3 ปัญหาของการบริการ 9-1-1 ในระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless 9-1-1 Service Issues)

ในปัจจุบันการบริการ E-911 ในระบบข่ายสาย (wireline) ไม่สามารถรองรับกับระบบสื่อสารไร้สาย E-911 ได้เนื่องจาก

1. CAMA จะมีข้อมูลของ ชื่อ ที่อยู่ และ หมายเลขโทรศัพท์ (8 digit number) ของผู้ใช้สำหรับแต่ละห้องที่ ซึ่งจะใช้เป็นฐานข้อมูลในการจัดเส้นทางของการเรียกใช้บริการไปยัง PSAP ที่เหมาะสมได้ อย่างไรก็ตาม CAMA นี้จะไม่มีข้อมูลของ เลขหมาย หรือ การลงทะเบียน สำหรับสถานีเคลื่อนที่
2. หมายเลขโทรศัพท์ของระบบสื่อสารเคลื่อนที่จะมีความแตกต่างจากระบบข่ายสายทั่วไป
3. หมายเลขโทรศัพท์ของระบบข่ายสายจะมีความเกี่ยวข้องกับที่อยู่ และ ถนน ซึ่งจะมีประโยชน์ในการให้ความช่วยเหลือ หรือ ระบุตำแหน่ง ซึ่งแตกต่างเลขหมายในระบบสื่อสารเคลื่อนที่

ในระยะที่ 1 ของ FCC ที่กำหนดจึงได้มีการเสนอทางเลือกในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยการนำ in-band analog multifrequency (MF) signaling มาใช้ดังนี้

- Expanded CAMA signaling solution

วิธีนี้เสนอการทำการขยาย CAMA 9-1-1 interswitch ให้รองรับเลขหมาย 10-digit ANI และ 10-digit location number โดยจะต้องมีการแก้ไขอุปกรณ์ analog PSAP ที่ใช้อยู่เดิม และที่ router ใดๆก็ตามวิธี MF signaling นี้จะทำให้ความสามารถของการบริการลดลง และการปรับปรุงแก้ไขก็ทำได้ยาก จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ

- Feature group D (FG-D) signaling solution

วิธีเสนอการใช้ Interswitch signaling ซึ่งโดยปกติจะใช้กับบริการการเรียกระยะทางไกล (long-distance calls) มารองรับการส่ง 10 digit-ANI และ 10-digit dialed-digits field ทำการส่งข้อมูลข่าวสารของตำแหน่งพิกัดของผู้ใช้บริการ ใดๆก็ตามวิธีนี้ยังไม่สามารถเชื่อมต่อกับ mobile switching center (MSC) กับ selective router ได้เหมือนกับ signaling system 7 (SS7) จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติเช่นกัน

- FG-D to CAMA conversion solution

วิธีนี้เสนอขึ้นเพื่อรองรับกรณีที่ MSC ไม่สามารถใช้ SS7 ทำการเชื่อมต่อกับระบบ public switched telephone network (PSTN) หรือ กรณีที่ selective router ไม่สามารถรองรับ SS7 หรือ FG-D signaling สำหรับบริการ 9-1-1 ได้ โดยการใส่ตัวแปลงสัญญาณ signaling ที่เรียกว่า FG-D to CAMA translator ต่อเข้าระหว่าง MSC กับ selective router เพื่อทำการแปลงสัญญาณ signaling ซึ่งตัวแปลงสัญญาณนี้จะส่งข้อมูลของ 10-digit call-back number และ ข้อมูลของตำแหน่ง (location information) ไปให้ ALI database ในช่วงการเริ่มต้นการเรียก (call setup) ตัวแปลงสัญญาณจะส่ง 7-digit key value ใน ANI field ไปที่ selective router

สำหรับค่า 7-digit key value นี้จะบอกถึงข้อมูลของ cell/sector ที่เกิดการเรียกขึ้น และค่านี้จะใช้ในการจัดเส้นทาง และจะถูกส่งต่อไปยัง PSAP ในช่วง call setup นั่นเอง

อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะทำให้ ความสามารถ และความเชื่อถือได้โดยรวมลดลง เนื่องจากความซับซ้อนของระบบในโครงข่าย และต้องการการเชื่อมต่อเพิ่มเติมเข้ากับ ALI database จึงทำให้วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติเช่นกัน

- SS7 solution

ถึงแม้ว่า 3 วิธีที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นวิธีการที่เป็นที่นิยมในยุคแรกนั้น เมื่อมีการเกิดขึ้นของระบบ SS7 และได้มีการนำ SS7/ISDN-UP มาใช้ในการส่งข้อมูล 10-digit นั้นพบว่าเป็นวิธีที่ให้ผลที่ดีกว่า 3 วิธีข้างต้น และได้มีการใช้งานต่อเนื่องมาใน ระยะที่ 2 ของมาตรฐาน FCC อีกด้วย ซึ่งการใช้ SS7/ISDN-UP มารองรับการเปลี่ยนแปลงจากระยะที่ 1 เข้าสู่ระยะที่ 2 นั้นมีเหตุผลดังนี้

- วิธีนี้สามารถรองรับบริการในระยะที่ 1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ต้องการการปรับปรุงแก้ไขอุปกรณ์ใด ๆ เพิ่มเติม
- วิธีนี้ไม่ต้องการการปรับปรุงอุปกรณ์ในส่วนของ MF signaling
- วิธีนี้ไม่ต้องการอุปกรณ์เชื่อมต่อในส่วนของ การเชื่อมต่อระหว่าง 9-1-1 selective router กับ ALI และในส่วนของ PSAP กับ ALI

2.1.4 วิวัฒนาการของบริการ 9-1-1 ในระบบไร้สาย (Wireless E-911 Evolution Plan)

Lucent Technologies ได้เสนอแผนงานที่จะปรับปรุงบริการ 9-1-1 สำหรับระบบไร้สายให้สอดคล้องกับข้อกำหนดในระยะ 18 เดือนของ FCC ให้มีความง่ายต่อการนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม หรือ ทำการเปลี่ยนแปลงระบบเดิมในระยะที่ 1 และ ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้นอีกในการเชื่อมต่อกับระยะที่ 2 โดยได้พิจารณาถึงหลักต่าง ๆ ดังนี้

- การบริการต้องรองรับมาตรฐาน และสามารถเชื่อมต่อกันได้โดยไม่มีปัญหา
- การใช้ทรัพยากรของโครงข่ายเดิมในการทำงานของบริการนี้ เช่น Common Channel Signaling Network (CCSN)
- ไม่เพิ่มเติมในส่วนของอุปกรณ์โครงข่ายสำหรับบริการเดียว
- รวมเทคโนโลยีทางภูมิศาสตร์ (Geolocation technology) เข้ากับระบบโครงข่ายไร้สาย
- การนำระบบการหาพิกัดตำแหน่ง (Geolocation system) ไปใช้กับบริการอื่น ๆ สำหรับระบบโครงข่ายไร้สาย ให้มากขึ้น

2.1.5 ข้อกำหนดของ FCC ระยะที่ 1 (ระยะเวลาครอบคลุม 18 เดือน)

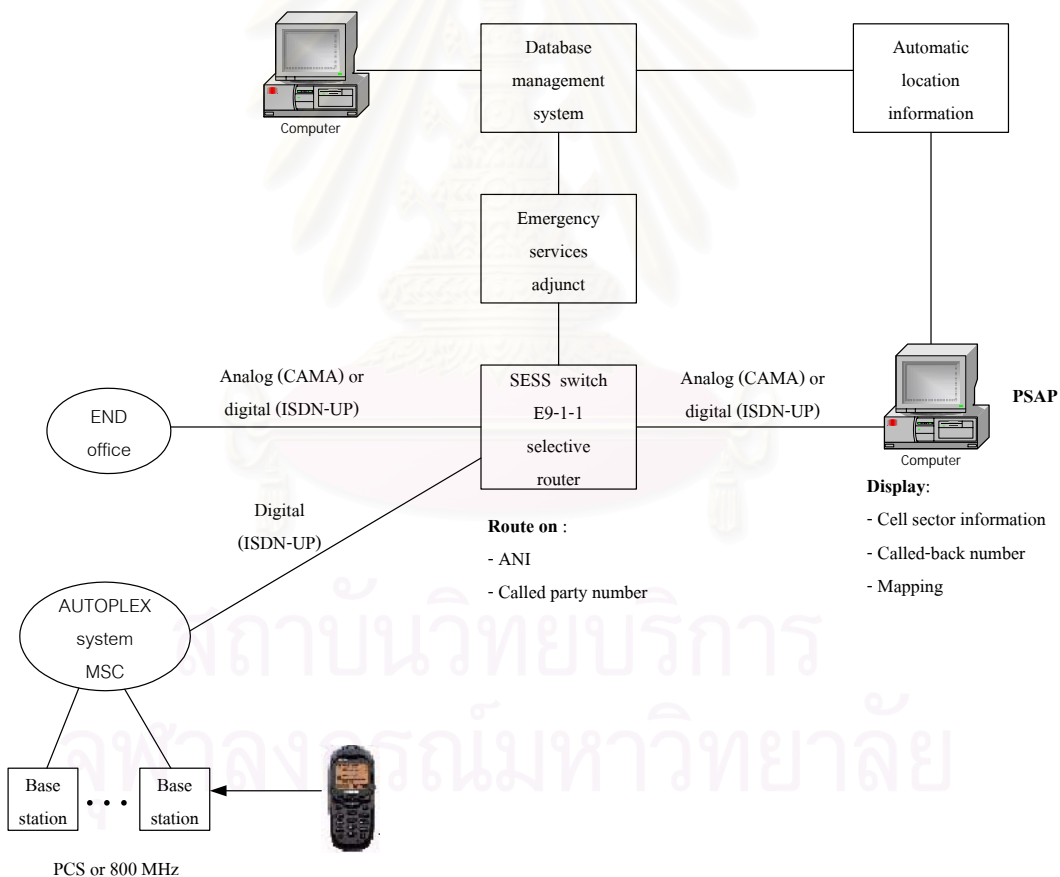
รูปที่ 2.2 แสดงสถาปัตยกรรมของโครงข่ายที่ออกแบบมาให้ตรงตามความต้องการของ FCC โดยที่บริการ E-911 ของระบบไร้สายจะทำงานผ่าน ระบบ AUTOPLEX 1000 MS, 5ESS-2000 switch, Emergency Services Adjunct (ESA), ALI database, ระบบดูแล (management) ที่เกี่ยวข้องกับ PSAP CPE

MSC ใช้ ISDN-UP signaling ในการส่งข้อมูล 10-digit call-back number และ พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของผู้เรียกใช้บริการไปยัง router ที่เลือกไว้ (selective router) จากนั้น router จะทำการจัดเส้นทางของการเรียกนั้นไปยัง PSAP ที่เหมาะสมโดยอาศัยข้อมูลที่ได้รับมา ซึ่ง ISDN PSAP นี้ได้ถูกกำหนดให้มีความต้องการทั้ง หมายเลขเรียกกลับ (call-back number) และ ข้อมูลของตำแหน่ง (location information) และด้วยเหตุนี้ ระบบ AUTOPLEX 1000 สำหรับระยะที่ 1 ซึ่งมีการใช้ ISDN-UP signaling จึงถูกนำมาใช้แทน CAMA signaling ในบริการ 9-1-1 แทนเนื่องจาก CAMA signaling มีความสามารถในการส่งข้อมูลเพียง 8-digit number (7-digit calling-party number กับ 1

ใน 4 digit area code) เท่านั้น ในขณะที่ ISDN-UP สามารถส่งข้อมูลในส่วนของตำแหน่ง (location information) ได้ด้วย

จากนั้น MSC จะใช้ ISDN-UP ส่งข้อมูล 10-digit call-back number จากส่วนของ charge number field, 10-digit routable directory number (DN) ซึ่งแสดงถึงที่ตั้งของเซลล์หรือเซกเตอร์ (cell/sector) และ ผู้ให้บริการ (service provider) จากส่วนของ called-party number field ข้อมูล 10-digit call-back number นี้จะต้องถูกส่งกลับสู่ลูกค้า หรือ ผู้ร้องขอบริการ 9-1-1 (สถานีเคลื่อนที่) และในส่วนของ DN นั้นระบบจะใช้เป็นส่วนของการจัดเส้นทางติดต่อกับ PSAP ที่เหมาะสมผ่านทาง PSTN ไปยัง E-911 selective router

E-911 selective router จะทำการเลือกหา PSAP ที่เหมาะสมโดยอาศัยพื้นฐานของ เซลล์/เซกเตอร์, overload condition, ลักษณะของการเรียก (call type) และ ข้อกำหนดอื่น ๆ ซึ่งหน้าที่ทั้งหลายนี้รวมอยู่ในอุปกรณ์ 5ESS-2000 switch E-911 และอุปกรณ์นี้จะทำการส่งข้อมูล ได้แก่

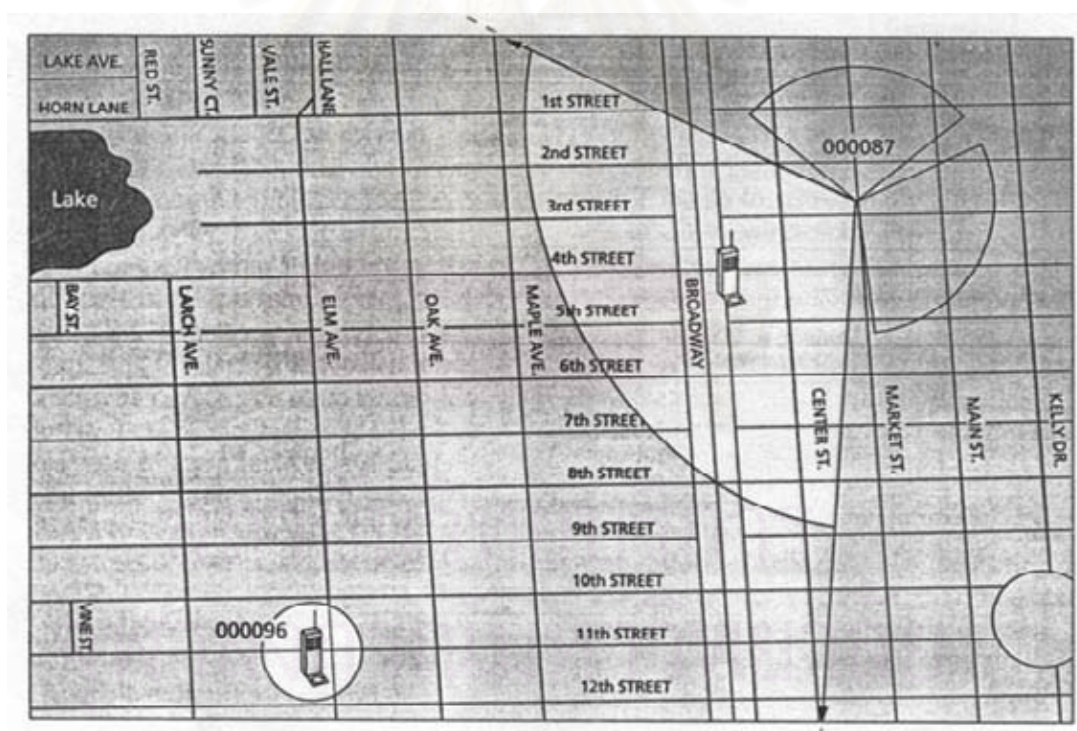


รูปที่ 2.2 โครงข่ายของระบบ E-911 ของระบบสื่อสารไร้สาย

location information, service provider identification และ เลขหมายสำหรับเรียกกลับ (call-back number) ไปยัง PSAP ในช่วงเวลาของการเซตอัฟการเรียก

ในกรณีที่ PSAPs ไม่สามารถรองรับบริการ ISDN ได้จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Adjunct Processor Interface (API) ทำการเชื่อมต่อกับ PSAP CPE ข้อมูลซึ่งได้แก่ location information, service provider ID และ 10-digit call-back number จะถูกส่งจาก MSC ผ่านทาง enhanced SS7 ISDN-UP ไปยัง 5ESS-2000 switch ด้วยอุปกรณ์ API ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่าง ESA กับ ALI

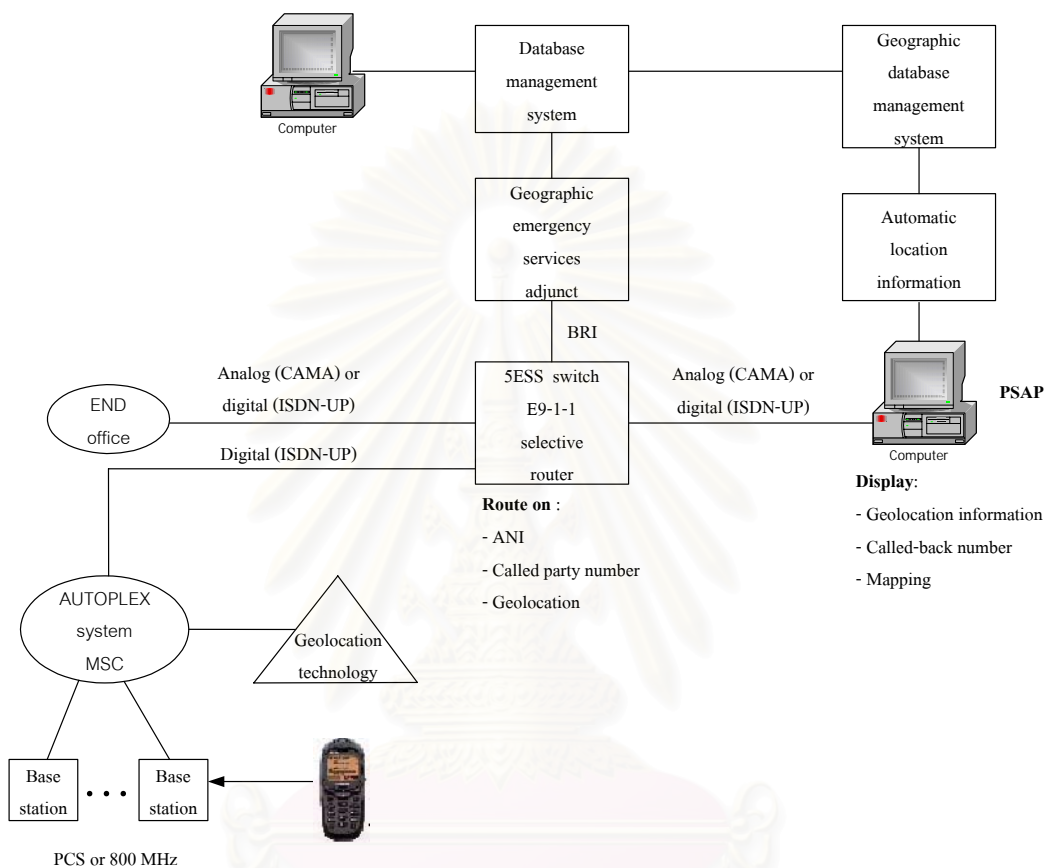
ในส่วนของอุปกรณ์ที่ PSAP ก็ได้มีการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วยโดยอาจมีการนำระบบ Geographic Information Systems (GIS) มาช่วยในการประมาณตำแหน่งของผู้เรียกใช้บริการอย่างคร่าว ๆ โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองลงบนแผนที่ (visual identification) ซึ่งเป็นการจำลองจุดที่ผู้เรียกใช้บริการ 9-1-1 เทียบกับสถานที่สำคัญ ๆ และสังเกตได้ง่าย (landmark) ในพื้นที่บริเวณนั้น ได้แก่ ตำแหน่งของถนน, ตึก, บ้าน, จุดต่อน้ำดับเพลิง หรือเสาอากาศของสถานีฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การนำระบบ GIS มาเพิ่มความสามารถในการบริการ E-911 ระยะที่ 1

2.1.6 ข้อกำหนดของ FCC ระยะที่ 2 (ระยะเวลาครอบคลุม 5 ปี)

โครงสร้างในระยะที่ 2 นี้จะเป็นงานที่ทำต่อจากระยะที่ 1 โดยมีการเพิ่มเติมในส่วนของการ geolocation capabilities เข้ากับโครงข่ายไร้สาย (wireless network) และ เพิ่มส่วนของ GIS เพื่อรองรับ E-911 network's service administration ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของบริการระบบ E-911 สำหรับระบบสื่อสารไร้สายโดยเพิ่มส่วนของ GIS

รูปที่ 2.4 แสดงระบบ wireless intelligent network ที่เชื่อมต่อกับระบบ geolocation โดยได้มีการ upgrade ในส่วนของ database management systems (DBMS) และ ส่วนของ ESA เพื่อให้การรายงานตำแหน่งมีประสิทธิภาพมากขึ้น และ FCC ได้กำหนดให้การเชื่อมต่อระบบ E-911 เข้าที่สถานีฐานแต่ละแห่งจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขอุปกรณ์ใด ๆ ทั้งสิ้น ซึ่งได้มีการเสนอให้ใช้วิธีการของเวลาการมาถึงของสัญญาณ และ มุมการมาถึงของสัญญาณซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียต่าง ๆ กัน ดังจะได้อธิบายต่อไป

เทคโนโลยี GPS ขั้นสูงก็ได้ถูกนำมารวมกับระบบโทรศัพท์ไร้สาย (wireless telephone) อีกด้วย โดยระบบที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันได้แก่ ระบบ General Motors OnStar และ ระบบ Ford Motor Company Rescue ซึ่งความพยายามที่จะทำให้การเชื่อมต่อในแต่ละส่วน และ GPS นี้เป็น

มาตรฐานเดียวกันก็เพื่อให้ location information สามารถส่งกับ standard network signaling protocols เช่น SS7/ISDN-UP พร้อมกับ call delivery information ไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับบริการ 9-1-1 ข้อมูลข่าวสารของตำแหน่งพิกัด (geolocation information) อันได้แก่ latitude, longitude, ความสูง (altitude) และ ความแม่นยำ (accuracy) จะถูกส่งรวมกันไปใน call set-up message ของ SS7/ISDN-UP การพัฒนาในจุดนี้ได้มีการปรับเปลี่ยน Transaction Capabilities Application Part (TCAP) signaling protocols เพื่อให้ใช้กับระบบไร้สาย โดย ISDN-UP มีหน้าที่ในการส่งข้อมูลของ location information coincident ส่วน TCAP นั้นจะมีหน้าที่ในการติดตามตำแหน่งของผู้เรียกอยู่ตลอดเวลา (location tracking) นอกเหนือจากนี้ยังได้เพิ่มความสามารถของ geolocation routing โดยจะทำการติดตั้ง ESA และ DBMS เข้าที่ส่วนของ 5ESS-2000 switch เพื่อใช้ระบบ computer-aided dispatch เข้ากับ GIS map ทำให้การค้นหาตำแหน่งของผู้เรียกใช้บริการมีความสะดวกมากขึ้น

2.1.6.1 GIS-based service administration

GIS-based service administration จะมีความสามารถในการให้ข้อมูล และ ระบุขอบเขตของพื้นที่ในการควบคุมการร้องขอบริการฉุกเฉินในแต่ละท้องถิ่นด้วยคอมพิวเตอร์ หน้าที่ของ administration จะทำการควบคุมและเก็บข้อมูลในการจัดเส้นทางของการเรียกฉุกเฉินครั้งหนึ่ง ๆ ไว้เพื่อจัดการที่สถานีเคลื่อนที่ติดต่อกับสถานีฐานมากกว่า 1 สถานีทำให้เป็นการประหยัดทรัพยากรของระบบได้

2.1.6.2 ข้อจำกัดและปัญหาของระบบ Geolocation (Geolocation Challenges and Limitations)

วิธีการ Network-based triangulation เพื่อหาพิกัดตำแหน่ง (การใช้ TOA และ DOA) จะต้องการข้อมูลอย่างน้อย 2 ค่าของ DOA และ 3 ค่าสำหรับ TOA เพื่อที่จะระบุตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ได้อย่างไม่กำกวม แต่เนื่องจากผลกระทบของสภาพแวดล้อมทำให้ข้อมูลที่วัดได้รับผลกระทบจาก multipath propagation ทำให้ผลของการประมาณค่าตำแหน่งมีความถูกต้องลดลง

ในกรณีของสภาพแวดล้อมที่เป็นชนบทเซลล์แต่ละเซลล์ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ส่งผลให้อาจมีการขาดหาย หรือ จางลงของสัญญาณที่บริเวณขอบเขตของเซลล์ จึงส่งผลให้เซลล์ (สถานีฐาน) ไม่สามารถรับสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ที่พิจารณาได้มากกว่า 1 สถานี (multiple cell detect) ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการติดตั้งเซลล์เพิ่มเติมเข้าไปในระบบสำหรับการวัดสัญญาณให้ได้หลายสถานีฐานมากขึ้น แต่วิธีนี้ก็จะทำให้การลงทุนมีมากขึ้นเช่นกัน

สำหรับกรณีของสภาพแวดล้อมที่เป็นเมืองหนาแน่น ปัญหาของการมาถึงซ้ำซ้อนของสัญญาณ (multipath propagation) ซึ่งเกิดจากการสะท้อนมาจากวัตถุหลายชนิด เช่น ตึกสูง ๆ, ยานพาหนะ เป็นต้น เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าตำแหน่งลดลง และ

ค่าของการมาถึงช้าของสัญญาณนี้อาจกินเวลาตั้งแต่ 100 ns ไปจนถึง 10 μ s และอาจเกิดการซ้อนทับกันของสัญญาณที่ช้าซ้อนกับสัญญาณชุดแรกที่รับได้ (สัญญาณแนวตรง : direct path) ทำให้การประมาณค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่มีความผิดพลาดมากขึ้น และเป็นปัญหาที่ยากต่อการแก้ไข

2.1.6.3 ข้อกำหนดระยะยาว (Longer Term)

ถึงแม้ว่าข้อกำหนดของ FCC ในปัจจุบันนี้กำหนดไว้ที่ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าตำแหน่งเป็นระยะ 125 เมตร ใน 67 % ของจำนวนครั้งของการประมาณค่า แต่ในทางปฏิบัติจริง การช่วยเหลือจาก public safety community ต้องการความถูกต้องแม่นยำของตำแหน่งของผู้ร้องขอ บริการ ยกตัวอย่างเช่น การระบุตำแหน่ง, ห้อง, ชั้น ของตึกสูง (การคิดพารามิเตอร์ของค่าความสูง) เป็นต้น มากกว่าที่ FCC กำหนดไว้ในระยะที่ 2 ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขปรับปรุง อุปกรณ์บางส่วนของสถานีเคลื่อนที่เพื่อแลกกับความสามารถในการประมาณค่าที่มีความถูกต้องสูงขึ้น และ จะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการลงทุนระบบอีกด้วย

อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวยังไม่มีการนำมาใช้จริงในปัจจุบัน แต่ก็ได้มีการนำเสนอเป็น แนวคิดออกมามากมาย ยกตัวอย่างเช่น signpost location beacons และ specialized signaling schemes optimized for location purposes เป็นต้น และเมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีต่อไปในอนาคต ก็จะทำให้มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ และ ลดการลงทุนไปได้อย่างมาก

2.1.7 ข้อกำหนดของ FCC สำหรับบริการ E-911 ในระบบสื่อสารไร้สาย (The FCC Ruling on Wireless E-911)

การออกข้อกำหนดสำหรับบริการ E-911 ของ FCC อยู่บนบรรทัดฐานต่อไปนี้

- ระบบสื่อสาร ไร้สายจะต้องมีการทำงานที่สามารถทำการประสานงานกับระบบข่ายสายได้อย่างไม่มีปัญหา ในเรื่องของการจัดเส้นทางในการส่งข้อมูลจากสถานีฐานไปยัง PSAP ได้อย่างลงตัว และ ต้องสามารถในการส่งข้อมูลที่เพียงพอที่ PSAP ทำการติดต่อกลับไปยังผู้เรียกใช้บริการนี้ได้ ซึ่ง FCC ได้กำหนดระยะเวลาจากวันที่เริ่มใช้ข้อกำหนดนี้ไปเป็นเวลา 18 เดือน และ เรียกเป็น ข้อกำหนดระยะที่ 1
- ความถูกต้องของการประมาณค่าพิกัดตำแหน่งของผู้เรียกใช้บริการต้องมีค่าอยู่ในระยะ 125 เมตร ใน 67 % ของจำนวนครั้งของการประมาณค่าในระยะเวลา 5 ปีแรกของการเริ่มใช้ข้อกำหนด และ ค่าความถูกต้องนี้จะต้องมีรายละเอียดเพียงพอที่จะทำให้ PSAPs สามารถระบุพิกัดตำแหน่งของ สถานีเคลื่อนที่ได้อย่างเจาะจงมากกว่าการระบุเป็นตำแหน่งของถนน หรือ สถานที่กว้าง ๆ
- บริการ E-911 สำหรับระบบสื่อสาร ไร้สายจะต้องครอบคลุมถึงสถานีเคลื่อนที่ที่ได้ถูกยกเลิกการ ใช้บริการไปแล้ว เช่น กรณีของการแจ้งการสูญหาย หรือ ถูกจารกรรม เป็นต้น

- บริการ E-911 สำหรับระบบสื่อสารไร้สายจะต้องรองรับระบบการทำงานที่หลากหลาย เช่น ระบบเซลลูลาร์, broadband PCS, GSM, CDMA เป็นต้น แต่จะไม่รวมถึงระบบ mobile satellite เช่น Iridium
- ข้อกำหนดของ FCC ทั้งในระยะที่ 1 และ ระยะที่ 2 จะเริ่มใช้งานในวันที่ 1 ตุลาคม ค.ศ. 1996
- FCC ได้ออกข้อกำหนดในระยะยาวโดยได้คาดหมายจากความสำเร็จของระยะที่ 1 และ ระยะที่ 2 ไว้ดังนี้
 - กำหนดขอบเขตของค่าความถูกต้องให้อยู่ในระยะ 40 ฟุต ใน 90 % ของจำนวนครั้งของการประมาณค่า
 - สามารถรายงานผลของค่าพารามิเตอร์ความสูง (altitude) เพิ่มเติมได้

2.2 การวัดสัญญาณในระบบการประมาณค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่

การวัดสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ทำได้ 2 วิธี ได้แก่ การวัดที่กระทำโดยโครงข่าย และ การวัดกระทำที่สถานีเคลื่อนที่

2.2.1 การวัดสัญญาณกระทำโดยสถานีเคลื่อนที่ (Terminal-Centric Approach)

ระบบที่ใช้การวัดโดยกระทำที่สถานีเคลื่อนที่ที่แพร่หลายที่สุดได้แก่ ระบบ GPS (Global Positioning System) ซึ่งมีใช้งานอยู่ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ระบบนี้อาศัยดาวเทียม 24 ดวง (24 GPS Satellites) มีความสามารถในการรายงานตำแหน่งพิกัดและความเร็วของวัตถุในลักษณะของ 3 มิติ และสามารถรายงานข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องและครอบคลุมทั่วโลก การทำงานของระบบ GPS ใช้ความถี่ 2 ช่วงความถี่ ได้แก่ 1.2 และ 1.5 GHz ประสานกับระบบ CDMA โดยข้อมูลของสัญญาณ (ranging code) จะบอกถึงเวลาในการเดินทางของคลื่นจากสถานีเคลื่อนที่ถึงดาวเทียม ค่าตำแหน่ง 3 มิติ (x,y,z : latitude, longitude, and altitude) จะถูกคำนวณและรายงานผลได้อย่างถูกต้องโดยใช้ดาวเทียม 4 ดวงในการทำงานโดยมีการรับประกันค่าความถูกต้องอยู่ในระยะ 100 เมตร (โดยทั่วไปค่าความถูกต้องจะอยู่ที่ 20-30 เมตร) ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาทางรัฐบาลของสหรัฐอเมริกาได้มีการปรับปรุงระบบ GPS นี้ให้สามารถรับประกันค่าความถูกต้องนี้ให้มีค่าลดลงได้ถึง 75 เมตร

ระบบสื่อสารเคลื่อนที่ที่จะเชื่อมต่อกับระบบ E-911 เข้ากับระบบ GPS นี้จะต้องถูกดัดแปลงให้มีเครื่องรับ GPS (GPS receiver) อยู่ในสถานีเคลื่อนที่ และด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีข้อเสียเกิดขึ้นดังนี้

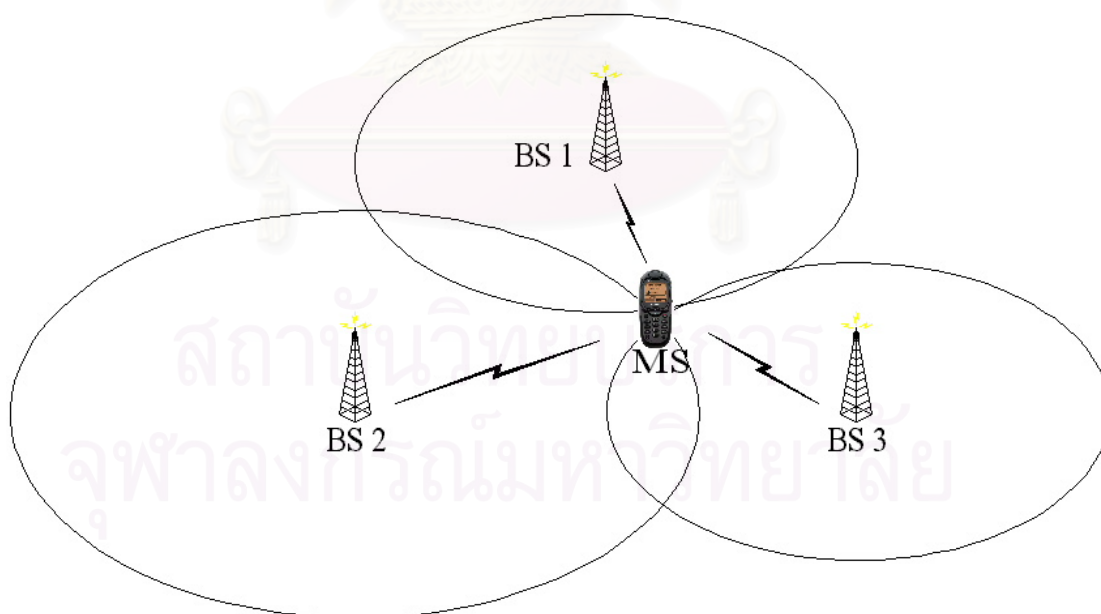
- ระบบไม่สามารถให้บริการกับสถานีเคลื่อนที่ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงเปลี่ยนแปลง
- ระบบไม่สามารถให้บริการได้เมื่อสถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ในอาคารสิ่งก่อสร้าง หรือ บริเวณที่มีการกีดขวาง

2.2.2 การวัดสัญญาณกระทำโดยโครงข่าย (Network-Centric Approach)

การใช้โครงข่ายทำการวัดสัญญาณ และ คำนวณพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่มีข้อได้เปรียบคือ ไม่ต้องการการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงที่สถานีเคลื่อนที่ ดังนั้นระบบจึงสามารถให้บริการกับสถานีเคลื่อนที่ทุกระบบที่ต้องการใช้บริการ E-911 ได้ การวัดสัญญาณที่กระทำโดยโครงข่ายแบ่งได้เป็น 4 วิธี ดังนี้

2.2.2.1 การวัดค่าความแรงของสัญญาณ (Measuring Signal Strength : SS)

เมื่อสถานีฐานวัดกำลังของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ได้แล้วจะทำการคำนวณระยะทางจากสถานีฐานถึงสถานีเคลื่อนที่ได้จาก propagation model การใช้ค่าความแรงของสัญญาณมาคำนวณหาตำแหน่งพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่นี้ต้องการอย่างน้อย 2 สถานีฐานในการทำการวัดสัญญาณ และมีข้อเสียในการคำนวณทางคณิตศาสตร์เนื่องจาก propagation model เองไม่สามารถจำลองลักษณะสัญญาณในพื้นที่นั้น ๆ ได้อย่างถูกต้องเหมาะสมจริง จึงอาจทำให้ค่าพิกัดตำแหน่งที่คำนวณออกมาอาจผิดพลาดได้ง่าย อีกทั้งค่ากำลังของสัญญาณจะถูกลดทอนลงจากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านกำแพง, ต้นไม้, แก้ว (กระจก) หรือแม้กระทั่งโลหะ อีกทั้งเครื่องรับไม่สามารถแยกแยะได้ว่ากำลังของสัญญาณที่รับได้มาจากสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนมาหรือไม่อีกด้วย

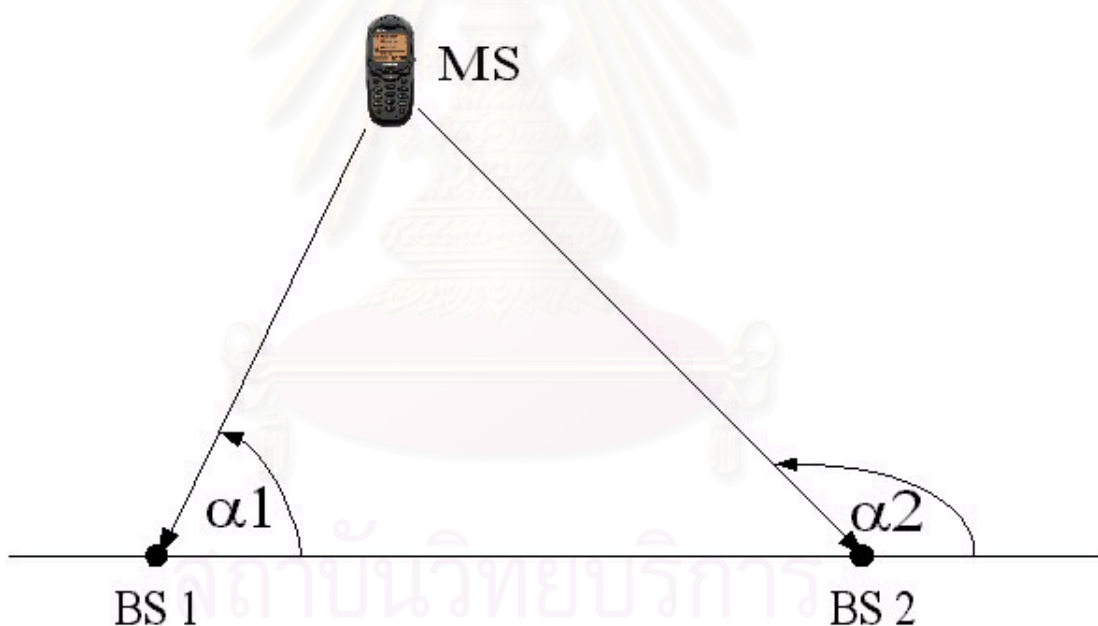


รูปที่ 2.5 การวัดค่าความแรงของสัญญาณ

2.2.2.2 การวัดค่ามุมการมาถึงของสัญญาณ (Direction of Arrival (DOA) / Angle of Arrival (AOA))

วิธีนี้จะใช้สายอากาศแถวลำดับ (array antenna) ซึ่งประกอบด้วย 4-12 สายอากาศย่อยจัดเรียงกันในแนวนอน (horizontal line) ทำการวัดค่ามุมของการมาถึงของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่เทียบกับสถานีฐานนั้น ๆ และต้องการข้อมูลอย่างน้อยจาก 2 สถานีฐาน (เซลล์) ในการวัดและคำนวณค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ออกมา ตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่สามารถคำนวณได้จากจุดตัดของเส้นตรงที่ลากจากสถานีฐานแต่ละสถานีไปถึงสถานีเคลื่อนที่ที่ต้องการดังที่ได้กล่าวมาข้างแล้วในบทที่ 1

ความถูกต้องของการวัดค่ามุมการมาถึงของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากการเดินทางพหุวิถี (Multipath propagation) และ สภาพแวดล้อมในพื้นที่นั้น ๆ อีกทั้งวิธีการนี้ยังมีข้อเสียในเรื่องของการลงทุนอย่างมากในการติดตั้งสายอากาศแถวลำดับเข้ากับสถานีฐานทุกสถานีด้วย

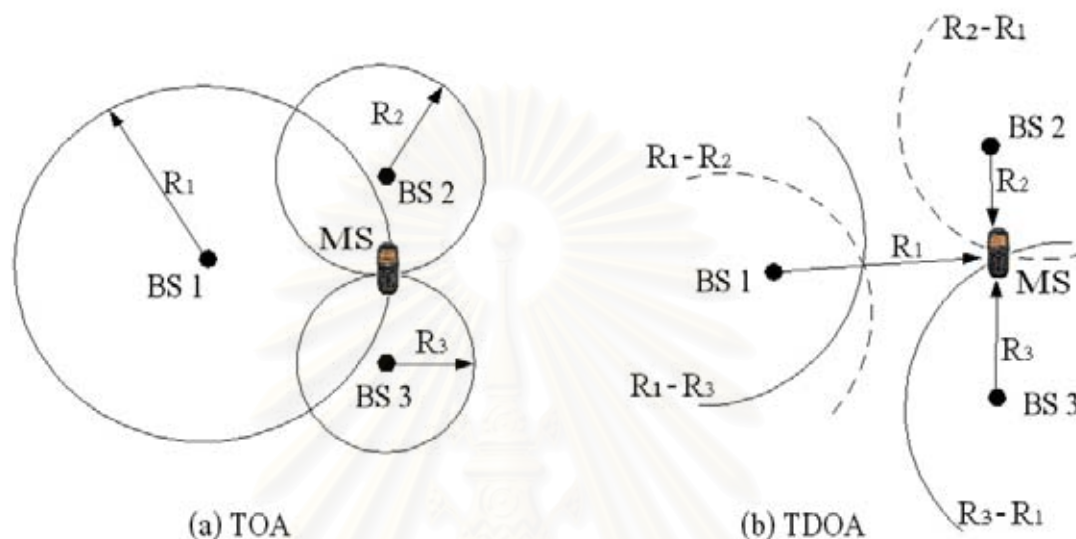


รูปที่ 2.6 การวัดค่ามุมการมาถึงของสัญญาณ

2.2.2.3 การวัดค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ (Time of Arrival (TOA) / Time Different of Arrival (TDOA))

วิธีการนี้จะใช้สถานีฐานอย่างน้อย 3 สถานีในการวัดค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ที่ต้องการ โดยมีข้อกำหนดว่าเครื่องรับที่สถานีฐานแต่ละสถานีจะต้องมีการวัดค่าเวลาที่แน่นอน และจะต้องมีการซิงโครไนซ์ทางเวลากัน (เพื่อที่จะทำงานให้ได้อย่างถูกต้องแต่ละสถานีฐานต้องมีการซิงโครไนซ์ทางเวลากันให้มีค่าดีกว่า 100 ns) สัญญาณที่ส่งมาจากสถานีเคลื่อนที่ที่จะ

เดินทางด้วยความเร็วประมาณ $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ เมื่อสถานีฐานได้รับสัญญาณที่มีการลงเวลา (Time Stamped) แล้ว จะทำการคำนวณค่าผลต่างของ time stamps นี้ (ในกรณีของ TDOA) ตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่สามารถคำนวณได้จากการหาจุดตัดกันของเส้นไฮเพอร์โบลิกของระยะทางที่สร้างจากผลต่างของค่าเวลาจากแต่ละสถานีฐานดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การวัดค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ

ค่าความถูกต้องของการวัดค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจาก multipath propagation เช่นเดียวกับวิธี DOA แต่จะมีผลกระทบที่รุนแรงกว่าในภูมิประเทศที่เป็นเมืองหนาแน่น วิธีการ TOA นี้มีข้อดีกว่าวิธี DOA ตรงที่ไม่ต้องการการลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเข้าไปในโครงข่าย

2.3 วิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่

2.3.1 วิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่จากค่าความแรงของสัญญาณ (SS method) [6]

วิธีการนี้ใช้แบบจำลองการเดินทางของคลื่น (propagation model) และ การคำนวณคณิตศาสตร์ในเรื่องของความน่าจะเป็น ในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ ดังที่จะกล่าวต่อไป

เมื่อสถานีฐาน (มากกว่า 1 สถานี) ได้รับกำลังสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ที่ทำการขอใช้บริการ จะทำการคำนวณค่าระยะการเดินทางของคลื่น (propagation distance) จากค่าการสูญเสียตามระยะทาง (path loss) และ แบบจำลองการเดินทางของคลื่น (propagation model) เช่น

แบบจำลองของ Okumura, แบบจำลองของ Hata เป็นต้น ค่า path loss นี้สามารถคำนวณได้จากผลต่างของกำลังของสัญญาณที่สถานีฐานรับได้กับกำลังที่ส่งออกจากสถานีเคลื่อนที่ และค่า propagation distance นี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากผลของเฟดดิ้งพหุวิถี (multipath fading) และ การถูกบัง (shadowing)

การคำนวณเพื่อประมาณค่าพิสัยตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่จะเริ่มจากการสร้างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function : pdf) ของค่าความแรงของสัญญาณ (วัดในหน่วยของ dB) ที่สถานีฐานหนึ่ง ๆ รับได้ตามสมการที่ (2.1)

$$p(r_i | x, y) = p(r_i | d_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(r_i - E_i)^2}{2\sigma^2}\right\}, i = 1, 2, \dots, N \quad (2.1)$$

เมื่อ r_i คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่สถานีฐานที่ i รับได้

d_i คือ ค่าระยะทางระหว่างสถานีฐานที่ i กับสถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ตำแหน่ง (x, y) ใด ๆ

σ^2 คือ ค่า standard deviation (dB) ของค่า r_i

E_i คือ ค่า long-term median (dB) ที่ระยะ d_i โดยที่ค่า long-term median นี้คำนวณมาจาก propagation model ที่กล่าวมาข้างต้น

N คือ จำนวนของสถานีฐานที่รับสัญญาณได้จากสถานีเคลื่อนที่นั้น

จากสมการที่ (2.1) จะใช้กฎของ Bayes (Bayes' rule) เพื่อหาค่า pdf ของสถานีเคลื่อนที่ (MS) ที่ประมาณค่าที่ตำแหน่ง (x, y) ตามสมการที่ (2.2)

$$p(x, y | r_i) = \frac{p(r_i | x, y)p(x, y)}{p(r_i)}, i = 1, 2, \dots, N \quad (2.2)$$

เมื่อ $p(x, y)$ คือ ค่า pdf ของ MS คาดว่าจะอยู่ที่ตำแหน่ง (x, y)

$p(r_i | x, y)$ คือ ค่า pdf ของ r_i เมื่อ MS อยู่ที่ตำแหน่ง (x, y)

$p(r_i)$ คือ pdf ของ r_i ที่ทุก ๆ ตำแหน่ง (x, y)

ถ้าสมมติให้ $p(x, y)$ มีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์ม (uniform distribution) และ $p(r_i)$ เป็นอิสระกับตำแหน่ง (x, y) จะสามารถเขียนสมการที่ (2.2) ใหม่ได้ดังนี้

$$p(x, y | r_i) = C_i \cdot p(r_i | x, y), i = 1, 2, \dots, N \quad (2.3)$$

เมื่อ C_i เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง

จากนั้นแทนค่าสมการที่ (2.1) ลงในสมการที่ (2.3) จะได้ค่า pdf ของ MS ตามสมการที่ (2.4)

$$p(x, y | r_i) = C_i \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(r_i - E_i)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2.4)$$

พิจารณาสมการ (2.1-2.4) ในรูปของสมการที่มีค่าตัวแปรเป็นเวกเตอร์ข้อมูลจะเป็นไปตามสมการที่ (2.5)

$$p(x, y | \bar{r}) = \frac{p(\bar{r} | x, y)p(x, y)}{p(\bar{r})} = C \cdot p(\bar{r} | x, y) \quad (2.5)$$

เมื่อ $p(x, y)$ คือ pdf ของ MS ที่ประมาณค่าว่าจะอยู่ที่ตำแหน่ง (x, y)

$p(\bar{r} | x, y)$ คือ pdf ของ \bar{r} เมื่อ MS อยู่ที่ตำแหน่ง (x, y)

$p(\bar{r})$ คือ pdf ของ \bar{r} ที่ทุกค่า (x, y)

C คือ ค่าคงที่

เนื่องจากว่าสมาชิกใน \bar{r} แต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันจึงเขียนสมการที่ (2.5) ได้เป็นดังสมการที่ (2.6)

$$p(x, y | \bar{r}) = C \prod_{i=1}^N p(r_i | x, y) = K \prod_{i=1}^N p(x, y | r_i) \quad (2.6)$$

จากนั้นจะใช้วิธีการหาค่ากำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุดของค่าความผิดพลาด (Minimum Mean Square Error : MMSE) ในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ออกมาตามสมการที่ (2.7)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \hat{x}} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial \hat{y}} = 0 \quad (2.7)$$

เมื่อ ε คือค่ากำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุดของค่าผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่ง (mean squared error of location estimation) และมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.8)

$$\varepsilon = E[(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2] \quad (2.8)$$

เมื่อ $E[\]$ คือการหาค่าคาดหวัง

ค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีการนี้จะเป็น (X, Y) และมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.9) และ (2.10) ตามลำดับ

$$X = E[x] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x | \bar{r})dx = \int_{-\infty}^{\infty} x \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y | \bar{r})dy \right\} dx \quad (2.9)$$

$$Y = E[y] = \int_{-\infty}^{\infty} yp(y | \bar{r})dy = \int_{-\infty}^{\infty} y \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y | \bar{r})dx \right\} dy \quad (2.10)$$

อย่างไรก็ตามการคำนวณด้วยวิธีการนี้มีข้อเสียในเรื่องของการเลือก propagation model ในการจำลองสภาพภูมิประเทศบริเวณนั้น ๆ และ การคำนวณตามสมการที่ (2.9) และ (2.10) ต้องใช้กระบวนการเชิงเลข (numerical method) ในการหาค่าอินทิเกรต ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องการประมาณค่าพิกัดตำแหน่งพอสมควร อีกทั้งยังใช้เวลาค่อนข้างมากในการคำนวณหาค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่ทำให้ประสิทธิภาพในการรองรับบริการผู้ใช้หลาย ๆ คนในเวลาเดียวกันมีค่าไม่ดีนัก

2.3.2 วิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่จากค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ (TOA/TDOA method)

วิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่จากค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ ได้แก่

- การประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยวิธีการหาจุดตัดกันของวงกลม หรือ ไฮเพอร์โบลาร์ (Calculate the intersection of circles or hyperbolas) [1-4]

การวัดเวลาการมาถึงของสัญญาณจะใช้สถานีฐานมากกว่า 3 สถานีขึ้นไปในการวัดเวลาที่สัญญาณถูกส่งมาจากสถานีเคลื่อนที่ (ต้นทาง) มาถึง สถานีฐาน (ปลายทาง) จากนั้นนำค่าเวลาดังกล่าวมาคำนวณระยะทางจากสถานีฐานถึงสถานีเคลื่อนที่ตามสมการที่ (2.11)

$$S_i = c \cdot t_i \quad (2.11)$$

เมื่อ S_i คือ ระยะทางจากสถานีเคลื่อนที่ (MS) ถึงสถานีฐานที่ i (Bs_i)

c คือ ความเร็วของคลื่นซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความเร็วของแสง (3×10^8 m/s)

t_i คือการประวิงเวลา (time delay) ในการเดินทางของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ถึงสถานีฐานที่ i

สมการที่ (2.11) แสดงถึงระยะทางที่เป็นรัศมีของวงกลม หรือ ส่วนโค้งของไฮเพอร์โบลาร์ (กรณีของ TDOA) ที่สถานีเคลื่อนที่ที่อยู่ห่างจากสถานีฐานที่อยู่รอบ ๆ สถานีเคลื่อนที่นั้น พิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่จะคำนวณจากจุดตัดของวงกลม หรือ ไฮเพอร์โบลาร์เหล่านั้น ทั้งนี้ข้อจำกัดของการวัดเวลาในระบบนั้นก็คือจำเป็นต้องมีการซิงโครไนซ์ทางเวลา (synchronization) ระหว่างสถานีฐานกับสถานีเคลื่อนที่ อีกทั้งวิธีการวัดค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณยังได้รับผลกระทบจากเฟดดิ้งพหุวิถี (multipath fading) และ ปัญหาจากการอยู่นอกแนวสายตา (Non Line Of Sight: NLOS) [1] ซึ่งจะมีผลกระทบทำให้เวลาที่วัดได้เพิ่มขึ้น

- การประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยวิธีกำลังสองต่ำที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Least-Squares: NL-LS) [7]

วิธีการนี้พยายามแก้ปัญหาของการไม่ตัดกันที่จุดเดียวของวงกลมโดยอาศัยกระบวนการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการคำนวณ ดังนี้

กำหนดให้ สถานีเคลื่อนที่อยู่ที่พิกัด (x_0, y_0) ส่งสัญญาณที่เวลา τ_0 และ สถานีฐาน N แห่งอยู่ที่พิกัด $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$ ได้รับสัญญาณที่เวลา $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$ และ กำหนดฟังก์ชันที่ใช้วัดสมรรถนะเป็นดังสมการที่ (2.12)

$$f_i(\bar{x}) = c \cdot (\tau_i - \tau) - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

$$\bar{x} = (x, y, t)^T$$

$i =$ ลำดับที่ของสถานีฐาน $i = 1, \dots, N$

เนื่องจากสมการที่ (2.12) แสดงถึงความแตกต่างของระยะทางที่ระบบทำการประมาณค่า กับ ระยะทางจริง ดังนั้นเพื่อให้การประมาณค่าพิกัดตำแหน่งมีความถูกต้อง ค่าของ $f_i(\bar{x})$ (ซึ่งแสดง ถึงค่าผิดพลาดในการประมาณค่าตำแหน่ง) ในสมการจึงควรมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับศูนย์ให้ มากที่สุด ซึ่งระยะทางที่ได้จากพารามิเตอร์เวลานี้จะได้รับผลของเฟดดิ้งพหุวิถี (multipath fading) และการอยู่นอกแนวสายตา (Non-Line Of Sight: NLOS) จึงทำให้ผลของการคำนวณมีค่า คลาดเคลื่อน โดยค่าเวลาที่ผิดพลาดเพียง $1 \mu\text{s}$ จะส่งผลให้ค่าตำแหน่งที่ได้จากการประมาณมีความ คลาดเคลื่อนถึง 300 เมตร

ทั้งนี้ระเบียบวิธีการที่ทำให้สมการที่ (2.12) มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงศูนย์นั้นแบ่งได้ 2 วิธีดังนี้

วิธี NL-LS แบบไม่มีเงื่อนไขบังคับ (Unconstrained NL-LS Approach) [7]

เป็นวิธีการประมาณค่าตำแหน่งจากค่าของเวลาการมาถึง (TOA) ที่ทำการวัดได้ ส่วนฟังก์ชัน สำหรับการคำนวณค่ากำลังสองค่าที่ต่ำสุด $F(x)$ เป็นไปตามสมการที่ (2.13) [4]

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 f_i^2(x) \quad (2.13)$$

เมื่อ α_i เป็นค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งแสดงถึงความเชื่อถือได้ของข้อมูลที่ได้รับโดยสถานีฐานที่ i การประมาณค่าตำแหน่งที่ถูกต้องทำได้โดยการทำให้ค่า $F(x)$ ในสมการที่ (2.13) มีค่าต่ำ ที่สุด ซึ่งเป็นการทำให้ค่าผิดพลาดมีค่าต่ำที่สุดนั่นเอง สมการที่ (2.13) นี้มีความยุ่งยากในการแก้ สมการเนื่องจากเป็นสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น ปัจจุบันจึงได้มีการเสนอวิธีการหลายวิธีในการแก้ สมการที่ (2.13) อย่างมีประสิทธิภาพและมีความคลาดเคลื่อนระหว่างผลที่ได้กับค่าจริงต่ำ เช่น ใช้ ระเบียบวิธีเชิงเลข (numerical method) ทำการประมาณค่าของพจน์ที่มีกำลัง 2 ในการแก้สมการที่ (2.13) เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีการที่นำเสนอขึ้นมาหลายวิธีมีความยุ่งยากมากขึ้นเพื่อให้ผลลัพธ์ ที่ได้จากการประมาณค่ามีความถูกต้องสูงขึ้น แต่ก็ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นด้วยเช่นกัน

วิธี NL-LS แบบมีเงื่อนไขบังคับ (Constrained NL-LS Approach) [7]

เป็นวิธีการประมาณค่าตำแหน่งที่พยายามกำจัดผลกระทบของการอยู่นอกแนวสายตา (NLOS) ออกไป โดยอาศัยหลักการที่ว่าระยะทางที่ทำการประมาณค่าได้ หรือค่าความคลาดเคลื่อน จากการประมาณค่าต้องมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ ดังนั้นค่าเวลาที่ทำการวัดได้จะต้องมีค่ามากกว่าค่า เวลาที่หาได้จากระยะจริงเสมอ ดังนั้นตำแหน่งเป้าหมายที่ถูกต้องจึงต้องอยู่ภายในวงกลมรัศมี

$r_i = c \cdot (\tau_i - \tau)$, $i = 1, \dots, N$ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสามารถเขียนเป็นอสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (2.14) [7]

$$r_i = c \cdot (\tau_i - \tau) \geq \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (2.14)$$

จากข้อกำหนดตามสมการที่ (2.14) จะได้ว่า

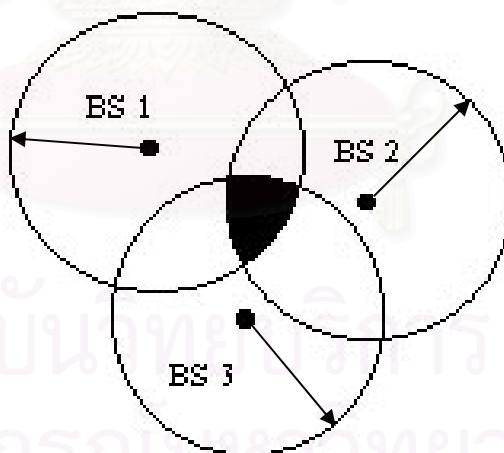
$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - c \cdot (\tau_i - \tau) \leq 0 \quad (2.15)$$

กำหนดให้พจน์ทางซ้ายของสมการที่ (2.15) มีค่าเป็น $g_i(x) = -f_i(x)$ โดยจะนำไปใช้ในการสร้างฟังก์ชันลงโทษ (penalty function) เพื่อนำไปปรับค่า $F(x)$ ตามสมการที่ (2.16) ให้มีค่าลู่เข้าและมีค่าต่ำที่สุดโดยใช้วิธีการวนซ้ำ (iteration) ทั้งนี้จะต้องใช้ระเบียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) มาช่วยในการคำนวณเพื่อแก้สมการที่ (2.16) ด้วย

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 f_i^2(x) - P \sum_{i=1}^N [g_i(x)]^{-1} \quad (2.16)$$

เมื่อ P เป็นค่าสเกลาร์และมีค่าเป็นบวกเพื่อใช้ในการปรับหาค่าต่ำที่สุดของ $F(x)$

การคำนวณค่า $F(x)$ ตามสมการที่ (2.16) จะมีข้อดีกว่าการคำนวณตามสมการที่ (2.13) ตรงที่สมการที่ (2.16) มีความยืดหยุ่นในการคำนวณเพื่อให้คำตอบลู่เข้า (converge) และสามารถที่จะทำการคำนวณแบบเชิงเลข (numerical) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.8 วิธีการ NL-LS แบบมีเงื่อนไขบังคับ

อย่างไรก็ตามวิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่จากค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณในปัจจุบันมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 80 เมตรขึ้นไป และเนื่องจากการคำนวณยังใช้วิธีการ

ทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ จึงมีปัญหาในเรื่องของระยะเวลาในการคำนวณเมื่อรองรับผู้ใช้บริการหลายคน

2.3.3 วิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นจริง (Maximum Likelihood Method) [8]

วิธีนี้เป็นแนวคิดใหม่ที่มีการนำเสนอขึ้นในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา และเป็นวิธีการที่ยืดหยุ่นสามารถใช้กับข้อมูลของการวัดสัญญาณได้ทุกชนิดรวมกัน ได้แก่ ข้อมูลเวลาการมาถึงของสัญญาณ, ค่าความแรงของสัญญาณ, ค่ามุมการมาถึงของสัญญาณ โดยวิธีการนี้จะเกี่ยวกับวิธีการทางสถิติ และการหาค่าสูงที่สุดจากฟังก์ชันความน่าจะเป็นจริง (likelihood function) ดังต่อไปนี้

กำหนดให้พิกัดของสถานีเคลื่อนที่อยู่ที่ $X_{MS} = (x_{MS}, y_{MS})$, การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสัญญาณที่สถานีฐานที่ i เป็น Γ_i ซึ่งมีชุดเวกเตอร์ข้อมูลเป็น $\bar{\Gamma} = (\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_N)$ และ สถานีฐานตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง $X_{BS} = \{(x_{BS1}, y_{BS1}), (x_{BS2}, y_{BS2}), \dots, (x_{BSN}, y_{BSN})\}$ จากนั้นทำการหาคาดหมายของการวัด Γ ตามสมการที่ (2.17)

$$\hat{\Gamma} = \Phi(\rho, X_{MS}, X_{BS}) = (\hat{\Gamma}_1, \hat{\Gamma}_2, \dots, \hat{\Gamma}_N) \quad (2.17)$$

เมื่อ $\Phi(\rho, X_{MS}, X_{BS})$ เป็นฟังก์ชันใดๆ แสดงค่าคาดหมายของการวัด Γ ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ $\rho = (\alpha, \beta, \gamma, \dots)$ เป็นค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณ ซึ่งค่า Γ นี้จะเป็นค่ามัธยฐานในการหาค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการวัดสัญญาณ

โดยกำหนดให้

$p(\Gamma) = p(\Gamma, \Sigma | X_{MS})$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการวัดสัญญาณ
 Σ เป็น Covariance matrix ของ Γ

X_{MS} เป็นพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่จะทำการประมาณค่า

เมื่อกำหนดให้แต่ละสมาชิกของค่า Γ เป็นอิสระต่อกันเชิงสถิติ (Statistically independent) จะสามารถเขียนฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการวัดสัญญาณได้ดังสมการที่ (2.18)

$$p(\Gamma, \Sigma | X_{MS}) = \prod_{i=1}^N p_i(\Gamma_i, \sigma_i | X_{MS}) \quad (2.18)$$

เมื่อ σ_i^2 เป็นค่าความแปรปรวนของ Γ ซึ่งสถานีฐานที่ i ทำการวัดได้

จากนั้นทำการหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นจริง (likelihood function) ตามสมการที่ (2.19)

$$\ell(\Gamma | X_{MS}) = \prod_{i=1}^N \int_{\Gamma=\Gamma_i}^{\Gamma_i+\Delta} p_i(\Gamma, \sigma_i) d\Gamma \quad (2.19)$$

โดยมีเงื่อนไขบังคับดังสมการที่ (2.20) และ (2.21) คือ

$$0 \leq \int_{\Gamma=\Gamma_i}^{\Gamma_i+\Delta} p_i(\Gamma, \sigma_i) d\Gamma \leq 1 \quad (2.20)$$

$$\text{และ } 0 \leq \ell(\Gamma, X_{MS}) \leq 1 \quad (2.21)$$

การคำนวณโดยตรงตามสมการที่ (2.19) นั้นอาจพบการไม่เป็นเชิงเส้นของพจน์บางพจน์ ทั้งนี้เพื่อให้สมการที่ (2.19) เป็นเชิงเส้นจึงนิยามค่า log-likelihood function เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณมากขึ้น โดยค่า log-likelihood function จะเป็นไปตามสมการที่ (2.22)

$$J(\Gamma | X_{MS}) = \ln(\ell(\Gamma | X_{MS})) \quad (2.22)$$

จากนั้นจึงทำการประมาณค่าพิกัดตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยการหาค่าสูงที่สุดของสมการที่ (2.22) ซึ่งเป็นการหาค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (maximum likelihood function) ตามสมการที่ (2.23) [8]

$$\tilde{X}_{MS} = \arg \{ \max_{X_{MS}} [J(\Gamma | X_{MS})] \} \quad (2.23)$$

ถึงแม้ว่าวิธีการประมาณค่าตำแหน่งวิธีนี้มีข้อดีตรงที่สามารถใช้ข้อมูลหลายชนิดรวมกันในการป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อเพิ่มความสามารถในการคำนวณหาค่าพิกัดตำแหน่งให้ไม่มีความกำกวมของข้อมูลเดียว และ ให้มีความถูกต้องสูงกว่าวิธีอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ก็มีข้อเสียตรงที่มีความซับซ้อนในการคำนวณค่อนข้างมากและยากต่อการนำไปใช้งาน อีกทั้งใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก จึงไม่เหมาะกับการใช้งานเมื่อมีผู้ใช้บริการหลายคนในเวลาเดียวกัน และ ในเวลาใกล้เคียงกัน

2.4 บรรทัดฐานของการออกแบบวิธีการคำนวณในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ (Criteria to Evaluate MS Location Methods) [9]

ในการออกแบบระบบการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่มีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

2.4.1 ความถูกต้อง (Accuracy)

ในแต่ละชนิดของการให้บริการของระบบการประมาณค่าตำแหน่งจะต้องการค่าความถูกต้องที่แตกต่างกันออกไป เช่น ในการใช้งานของระบบ fleet management จะต้องการความถูกต้องอย่างต่ำที่สุดในระยะ 500 เมตร การวัดค่าความถูกต้องของการประมาณค่าตำแหน่งโดยวิธีทางสถิตินั้นมีหลายวิธีแต่โดยทั่วไปแล้วจะใช้วิธีการค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด (root-mean-square error) และ วิธีการหาค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาด (average error)

โดยทั่วไปค่าความถูกต้องโดยรวมของระบบการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่สำหรับระบบสื่อสารไร้สายทั่วไป เช่น ระบบ เซลลูลาร์ จะยากที่จะกำหนดค่าความถูกต้องให้

แน่นอนและตายตัวได้ ทั้งนี้ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าตำแหน่งจะขึ้นกับสภาวะแวดล้อมขณะนั้น ๆ ที่พื้นที่นั้น ๆ (Environment) เป็นหลัก

2.4.2 ความครอบคลุมของการให้บริการ (Positioning Coverage)

ในทางอุดมคติการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่จะต้องสามารถให้บริการได้ครอบคลุมทุกตำแหน่งของการบริการสื่อสารไร้สาย แต่ในความเป็นจริงแล้วผลกระทบของระยะใกล้ไกลจากสถานีฐาน (near-far effects) จะส่งผลกระทบทำให้การบริการไม่ครอบคลุมได้ทั่วถึงทุกพื้นที่ เช่น เมื่อสถานีเคลื่อนที่อยู่บริเวณริมขอบของพื้นที่บริการของแต่ละเซลล์

2.4.3 การลดความสามารถของบริการอื่น ๆ (Capacity reduction of other services)

ในระบบเซลล์ลู่การเมื่อมีการให้บริการประมาณค่าตำแหน่งเกิดขึ้นก็จะมีการใช้ช่องสัญญาณส่วนหนึ่งในการส่ง และ รับเพื่อการวัดค่าคุณลักษณะของสัญญาณเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้จำนวนช่องสัญญาณสำหรับการให้บริการชนิดอื่นเหลือน้อยลง และ จะเป็นการลดความสามารถในการบริการอื่นมากขึ้นเมื่อมีการร้องขอการระบุตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่พร้อมกันเป็นจำนวนมาก

2.4.4 เวลาตอบสนอง (Response time)

ในการประยุกต์ใช้งานบางชนิดของระบบการประมาณค่าตำแหน่งต้องการเวลาในการคำนวณและรายงานตำแหน่งอย่างรวดเร็ว เช่น กรณีของการเรียกฉุกเฉิน เป็นต้น ดังนั้นวิธีการคำนวณประมาณค่าตำแหน่งบางวิธีจึงไม่เหมาะสมในการใช้งานกับบริการบางชนิด

2.4.5 ความสามารถในการให้บริการพร้อมกัน (Capacity of the location service)

ปัจจัยที่จะต้องคำนึงถึงอีกปัจจัยหนึ่งคือ การให้บริการประมาณค่าตำแหน่งจากสถานีเคลื่อนที่หลายๆ เครื่องพร้อมกันในเวลาเดียวกัน และเป็นปัจจัยที่ทำให้วิธีการคำนวณบางวิธีไม่สามารถรองรับการบริการที่พร้อมกัน (multi-user) ในเวลาเดียวกันได้

2.4.6 การลงทุน (Cost)

ปัจจัยทางการเงิน ได้แก่ การลงทุนสำหรับผู้ควบคุมระบบ (operators), การผลิตอุปกรณ์ (manufacturers) และ การลงทุนในตัวสถานีเคลื่อนที่ (กรณีที่ต้องมีการแก้ไขในตัวสถานีเคลื่อนที่เอง เช่น GPS chip หรือ array antenna) ล้วนเป็นปัจจัยที่สำคัญในทางปฏิบัติจริง

2.4.7 การสิ้นเปลืองกำลัง (Power consumption)

เนื่องจากตัวสถานีเคลื่อนที่เองมีกำลังจำกัดในการส่งสัญญาณ และมีแบตเตอรี่ที่จ่ายกำลังจำกัด เมื่อใช้งานในระบบการประมาณค่าตำแหน่งนี้จะต้องมีการเพิ่มกำลังส่งเป็นพิเศษ รวมถึงต้องการใช้กำลังไฟมากขึ้นให้กับอุปกรณ์เพิ่มเติม (กรณีของการแก้ไขที่ตัวสถานีเคลื่อนที่) ดังนั้นในการออกแบบระบบจะต้องคำนึงถึงปัจจัยนี้ในทางปฏิบัติด้วย

2.4.8 ความเป็นส่วนตัวของผู้ร้องขอบริการ (User privacy)

เมื่อผู้ขอใช้บริการไม่ต้องการให้มีการรายงานค่าพิกัดตำแหน่งของตัวเองในขณะนั้นระบบจะต้องป้องกันไม่ให้มีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่นั้นจนกว่าผู้ใช้ยินยอมอีกครั้งได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีนิเวรอลเน็ตเวิร์ก

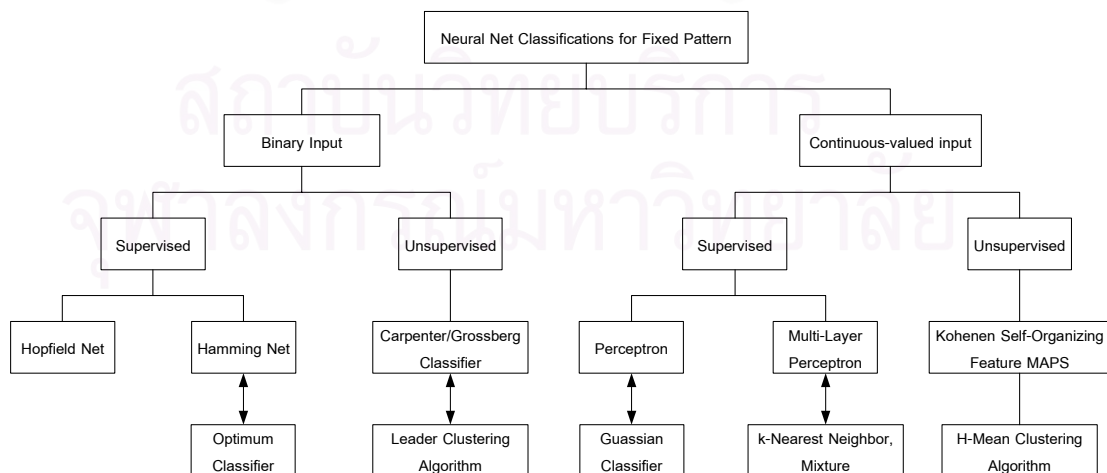
นิเวรอลเน็ตเวิร์ก หรือ โครงข่ายประสาทเทียม เป็นวิธีการจำลองระบบเหมือนเซลล์ประสาทของมนุษย์มาใช้ในการคำนวณทางคอมพิวเตอร์โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะสร้างวิธีการคำนวณให้ระบบคอมพิวเตอร์รู้จักทำการประมาณค่า หรือ จัดจำคุณลักษณะของสิ่งใดสิ่งหนึ่ง เนื่องจากไม่สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดๆ มาใช้อธิบาย หรือ แก้ไขปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยลดความยุ่งยากซับซ้อนในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำการคำนวณได้อีกด้วย

นิเวรอลเน็ตเวิร์กเป็นอัลกอริทึมชนิดหนึ่งที่มีความสามารถและเป็นที่ยอมรับในการแก้ปัญหาของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยทั่วไปแล้วนิเวรอลเน็ตเวิร์กจะถูกนำมาประยุกต์ใช้งาน (application) ในการแก้ปัญหาหลายชนิด ได้แก่ การแยกแยะ (Classification), การประมาณ (Approximation) รวมถึงการรู้จำ (Recognition)

3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของนิเวรอลเน็ตเวิร์ก

3.1.1 ชนิดของการออกแบบนิเวรอลเน็ตเวิร์ก

การออกแบบนิเวรอลเน็ตเวิร์กให้เหมาะสมกับปัญหาแต่ละชนิดจะทำให้ได้นิเวรอลเน็ตเวิร์กที่มีลักษณะโครงสร้างและการคำนวณที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลในแต่ละปัญหา ซึ่งการออกแบบนิเวรอลเน็ตเวิร์กให้เหมาะสมตามลักษณะของข้อมูลจะเป็นไปตามรูปที่ 3.1 [10]

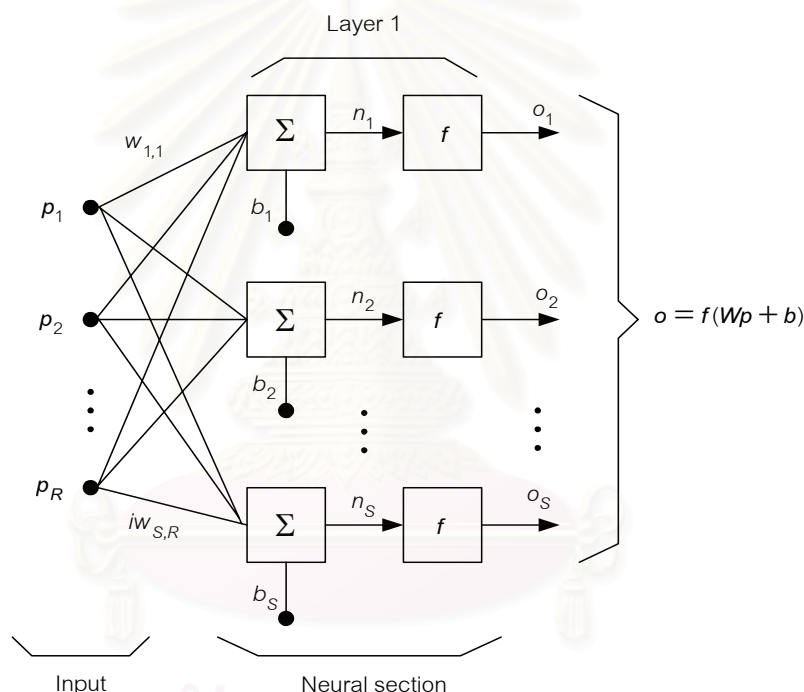


รูปที่ 3.1 รูปแบบต่างๆ ของนิเวรอลเน็ตเวิร์ก

เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการฝึกนิรอลเนตเวิร์กสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีลักษณะเป็นค่าต่อเนื่อง (continuous-value input) และเป็นกรฝึกแบบซึ่งนำคือมีการป้อนข้อมูลเข้า (input) และกลุ่มเป้าหมาย (target) ให้กับนิรอลเนตเวิร์กอย่างชัดเจน ดังนั้นการออกแบบนิรอลเนตเวิร์กที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นลักษณะของ perceptron ตามรูปที่ 3.1

3.1.2 ส่วนประกอบของแบบจำลองนิรอลเนตเวิร์ก (Component of Neural Network Model) [11,12]

แบบจำลองนิรอลเนตเวิร์กประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของนิรอลเนตเวิร์กโดยทั่วไป 1 ชั้น (simple neural network – 1 layer)

- 1.) ส่วนป้อนข้อมูล (Input: \bar{p}) : เป็นค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่ระบบซึ่งในระบบที่ใช้งานกับการรู้จำชนิด, คุณภาพ และ ความเชื่อถือได้ของข้อมูล จะส่งผลถึงการทำงานของนิรอลเนตเวิร์กด้วย
 - 2.) น้ำหนัก (Weight: \bar{w}) : เป็นค่าถ่วงน้ำหนักที่จะทำการคูณเข้ากับค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าเพื่อเป็นการกำหนดค่าความสำคัญให้กับข้อมูลแต่ละตัว จากนั้นจะทำการส่งผ่านเข้าสู่ส่วนนิรอลเนตต่อไป
- ในรูปที่ 3.2 นิยามให้ $iw_{s,r}$ เป็นค่าถ่วงน้ำหนักตัวคูณในส่วนป้อนเข้า (input-layer weight) จากข้อมูลเข้าตำแหน่งที่ r ไปยังการคำนวณ (operation) ตำแหน่งที่ s และเรียกเมทริกซ์ของค่าถ่วงน้ำหนักในส่วนป้อนเข้าว่า input-layer weight matrix

3.) ส่วนของนิวรอน (Neuron) : เป็นหน่วยที่เปรียบเสมือนเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์ของมนุษย์ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อทำการประมาณค่า, แยกแยะ หรือ รู้จำ โดยในนิวรอนแต่ละนิวรอนประกอบไปด้วยส่วนประกอบย่อย ได้แก่

- ค่าไบแอส (Bias: b) : เป็นค่าคงที่ที่บวกเพิ่มเข้าไปในนิวรอนแต่ละตัวเพื่อเป็นค่า offset ในการคำนวณ

- ฟังก์ชันการรวม (Summation) : เป็นการรวมค่าข้อมูลเข้าที่ถูกคูณเข้ากับค่าถ่วงน้ำหนักกับค่าไบแอสเข้าด้วยกัน ซึ่งจะได้อผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าข้อมูลเข้ารวม

- ข้อมูลเข้ารวม (Net Input: n) : เป็นข้อมูลที่ได้จากฟังก์ชันการรวมก่อนที่จะผ่านค่าฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งจากรูปที่ 3.2 จะได้อค่าข้อมูลเข้ารวมเป็นไปตามสมการที่ (3.1)

$$n = wp + b \quad (3.1)$$

- ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function: f) : เป็นฟังก์ชันการคำนวณที่นิวรอนใช้แบ่งข้อมูลเข้าออกเป็นกลุ่มๆ เพื่อทำการส่งค่า (mapping) ข้อมูลเข้าไปสู่ค่าเป้าหมายที่ป้อนให้ (ในกรณีที่เป็นการฝึกนิวรอนแบบวิธีแบบชี้หน้า) โดยฟังก์ชันถ่ายโอนที่นิยมใช้กันมากได้แก่ ฟังก์ชันขั้นบันได (Step function), ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function), ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function) ฯลฯ

- ข้อมูลขาออก (Output: \bar{o}) : เป็นข้อมูลขาออกที่ได้จากการประมาณผ่านแบบจำลอง 1 ชั้น ซึ่งมีลักษณะดังสมการที่ (3.2)

$$\bar{o} = f(\bar{w}\bar{p} + \bar{b}) \quad (3.2)$$

สำหรับนิวรอนแบบวิธีที่ทำการประมาณค่าได้อย่างถูกต้อง ค่าของข้อมูลขาออกจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าของค่าเป้าหมาย

- ค่าเป้าหมาย (Target: \bar{t}) : เป็นค่าเป้าหมายที่ต้องการให้นิวรอนแบบวิธีทำการประมาณค่าให้ใกล้เคียงกับค่านี้มากที่สุด ยกตัวอย่างเช่น ในการใช้งานในการรู้จำตัวอักษร ค่าของเป้าหมายจะเป็น ตัวอักษรที่ต้องการให้คอมพิวเตอร์ทำการรู้จำ

ในรูปที่ 3.2 แสดงถึงชุดข้อมูลป้อนเข้า R จุดถูกป้อนเข้าสู่นิวรอน S ตัว โดยผ่านค่าถ่วงน้ำหนัก W ซึ่งจะเป็นการคูณแบบสเกลาร์ระหว่างข้อมูลเข้ากับค่าถ่วงน้ำหนัก จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปรวมกับค่าไบแอสของนิวรอนแต่ละตัว และผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนออกมาเป็นค่าข้อมูลขาออก เป็นลักษณะของแบบจำลองนิวรอนแบบวิธี 1 ชั้น

3.1.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนรูปแบบต่าง ๆ ที่ใช้กับแบบจำลองนิวรอนแบบวิธี (Transfer Functions) [11,12]

ฟังก์ชันถ่ายโอนในแบบจำลองนิวรอนแบบวิธีเป็นสิ่งสำคัญที่จะบอกความสามารถในการประมาณ (Approximation) หรือ แยกแยะ (Classification) หรือ รู้จำ (Recognition) โดยการออกแบบนิวรอนแบบวิธีและสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมกับปัญหาจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการ

คำนวณด้วยนิเวศน์เน็ตเวิร์กถูกจัดกลุ่มอยู่ด้วยกันอย่างเหมาะสม ทำให้มีความถูกต้องในการทำงานได้ดี เนื่องจากค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยนิเวศน์เน็ตเวิร์กจะมีค่าอยู่ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ ทั้งนี้ การเลือกฟังก์ชันถ่ายโอนมาใช้กับแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้มีความเหมาะสมกับปัญหาจึงเป็นปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณาในการออกแบบนิเวศน์เน็ตเวิร์กให้ถูกต้องเหมาะสม ก่อนที่จะทำการฝึกนิเวศน์เน็ตเวิร์กต่อไป โดยทั่วไปได้มีการกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนหลักๆ ที่ใช้กับงานต่างๆ ดังนี้

1. ฟังก์ชันถ่ายโอนขั้นบันได (Hard Limit Transfer Function)

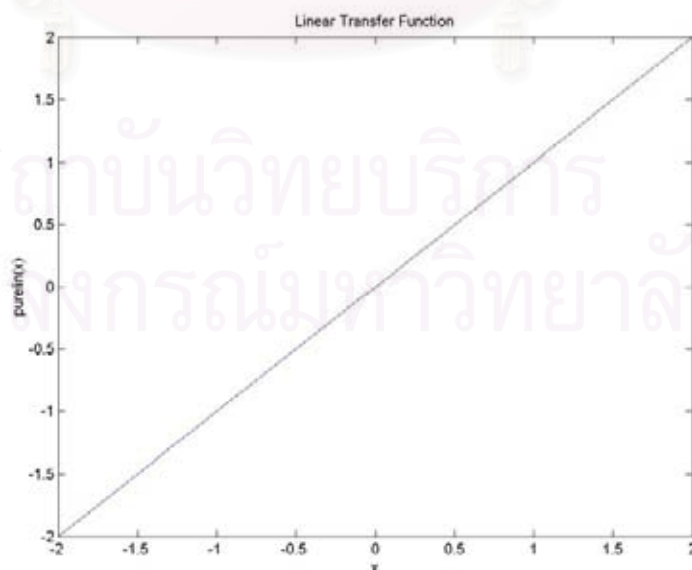
เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้กับแบบจำลองอย่างง่าย (Simple Neural Network) เช่น ปัญหาที่ต้องการเพียงแบบจำลองขั้นเดียวในการทำงาน การแบ่งข้อมูลของฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดนี้จะแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ซีก คือ มากกว่าค่า 0 และน้อยกว่าค่า 0 ดังแสดงในสมการที่ (3.3)

$$hard \ lim(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

เนื่องจากการแบ่งข้อมูลของฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดนี้เป็นดังสมการที่ (3.3) ดังนั้นข้อมูลที่ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดนี้สามารถแบ่งแยกได้จึงต้องเป็นข้อมูลที่สามารถแบ่งแยกได้เป็นเชิงเส้นชัดเจน (linearly separable)

2. ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น (Linear Transfer Function)

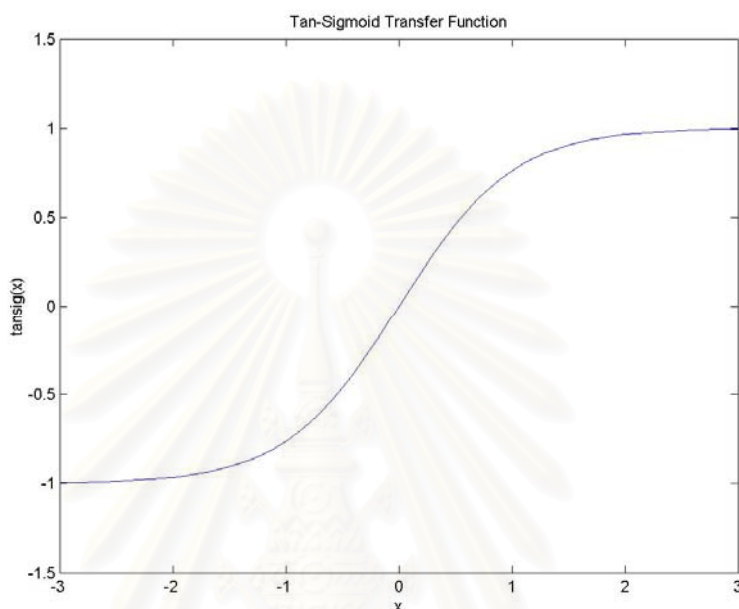
เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้กับการแก้ปัญหาที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งการใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้นนี้จะให้ผลลัพธ์ในการแยกแยะข้อมูลที่ตีเมื่อชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าสามารถแบ่งแยกหรือมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้นมีลักษณะเป็นไปตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น

3. ฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ (Sigmoid Transfer Function)

ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดนี้เหมาะกับการแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่นิยมใช้กับการฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กแบบแพร่กระจายย้อนกลับ (Back Propagation Training) เนื่องจากเป็นฟังก์ชันที่สามารถหาอนุพันธ์ได้ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์

3.1.4 การทำงานโดยใช้แบบจำลองหลายชั้น (Multiple Layers) [11,12]

ในการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กกับปัญหาที่มีความซับซ้อนและต้องการความถูกต้องสูงขึ้น การใช้แบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์กอย่างง่ายในรูปที่ 3.2 จะไม่สามารถคำนวณและให้ค่าผลลัพธ์ที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องออกแบบนิวรอลเน็ตเวิร์กให้มีจำนวนชั้นของแบบจำลองที่มากขึ้น และจำนวนนิวรอนที่มากขึ้นเพื่อให้ระบบมีความสามารถในการคำนวณให้ค่าผลลัพธ์เป็นไปตามที่ต้องการได้ แบบจำลองหลายชั้นจะเกิดจากการต่อแบบจำลองชั้นเดียวมากกว่าหนึ่งชุดเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.5 ผลลัพธ์ของแบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์กหลายชั้นจะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (3.4)

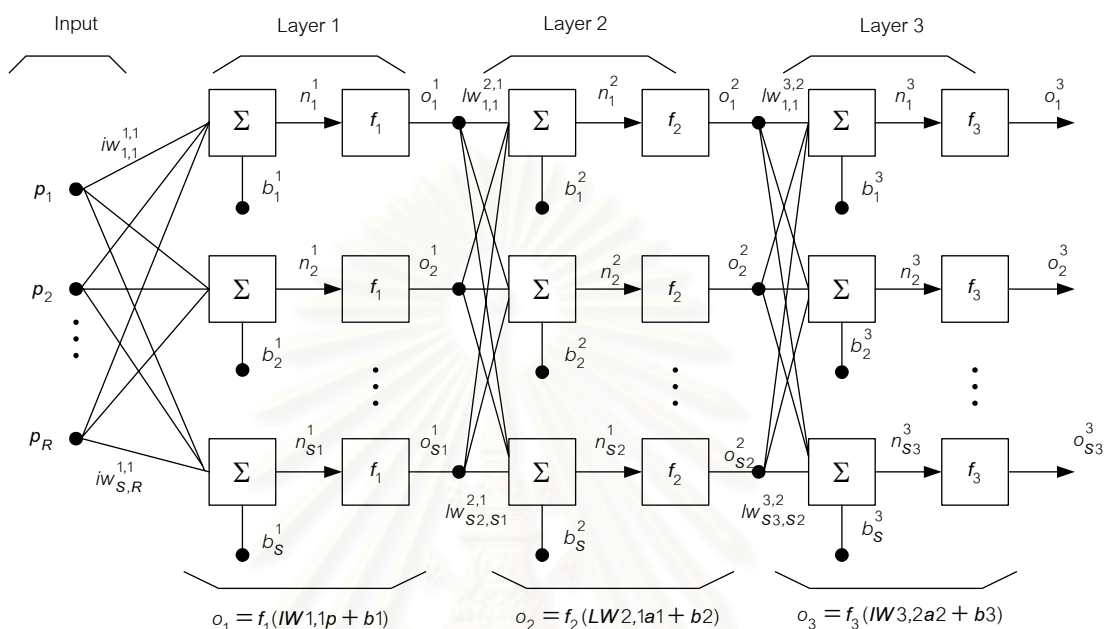
$$O_3 = f_3(LW_{3,2}f_2(LW_{2,1}(IW_{1,1}p + b_1) + b_2) + b_3) \quad (3.4)$$

เมื่อ IW คือเมตริกซ์ของค่าน้ำหนักที่เข้าเชื่อมโยงขาเข้าสู่ระบบ (Input Weight Matrix)

LW คือเมตริกซ์ของค่าน้ำหนักที่เข้าเชื่อมโยงระหว่างชั้นของแบบจำลอง (Layer Weight Matrix)

f_i เป็นค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองชั้นที่ i , $i = 1, 2$, และ 3

วิธีการต่อแบบจำลองหลายชั้นจะทำให้สามารถเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่แตกต่างกันในแต่ละชั้นเพื่อให้มีความสามารถในการแก้ปัญหาที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.5 การต่อแบบจำลองนิวรอนเน็ตเวิร์กหลายชั้น

3.1.5 การฝึกนิวรอนเน็ตเวิร์ก (Training Neural Network)

การฝึกนิวรอนเน็ตเวิร์กมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะทำให้นิวรอนเน็ตเวิร์กทำการรู้จำ หรือ แยกแยะข้อมูลเข้า และให้ผลลัพธ์จากการคำนวณที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ป้อนให้ การรู้จำของนิวรอนเน็ตเวิร์กจะเกิดจากการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และ ไบแอสในแต่ละกึ่งที่ส่งเข้าสู่นิวรอนแต่ละนิวรอน

การฝึกนิวรอนเน็ตเวิร์กสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอสดังนี้

1. การฝึกนิวรอนเน็ตเวิร์กแบบปรับตัวตลอดเวลา (Adaptive Training) [11,12]

เป็นการทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสให้กับนิวรอนเน็ตเวิร์กทุกๆ ครั้งที่มีการป้อนข้อมูลเข้าแต่ละตัวเข้าสู่ระบบ การฝึกนิวรอนเน็ตเวิร์กแบบนี้อาจมีข้อเสียคืออาจเกิดการไม่ลู่เข้าของผลลัพธ์ นั่นคือผลลัพธ์ที่นิวรอนเน็ตเวิร์กทำนายมีค่าไม่ตรงกับค่าเป้าหมายเมื่อทำการฝึกไปแล้ว

2. การฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กแบบปรับค่าครั้งเดียว (Batch Training) [11,12]

การฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กแบบปรับค่าครั้งเดียวจะปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสให้กับนิรอลเน็ตเวิร์กแต่ละครั้งหลังจากการป้อนชุดข้อมูลเข้าให้กับนิรอลเน็ตเวิร์กทั้งหมดทุกชุดแล้ว โดยการฝึกแบบนี้มีข้อดีตรงที่จะทำให้เกิดการลู่เข้าที่ค่อนข้างแน่นอนแต่จะทำให้การลู่เข้าของผลลัพธ์ช้ากว่าวิธีการแบบปรับตัวตลอดเวลา

การฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของข้อมูลเข้าได้ 2 ประเภทเช่นกันคือ

1. การฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กแบบชี้นำ (Supervised Learning) [11,12]

เป็นการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กในกรณีที่มีชุดข้อมูลขาเข้าและค่าเป้าหมายป้อนเข้าสู่นิรอลเน็ตเวิร์กซึ่งการฝึกฝนนิรอลเน็ตเวิร์กแบบนี้จะเป็นการใช้งานในลักษณะของการรู้จำ (Recognition) หรือ การประมาณ (Approximation) เป็นหลัก

2. การฝึกฝนนิรอลเน็ตเวิร์กแบบไม่มีการชี้นำ (Unsupervised Learning) [11,12]

เป็นการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กในกรณีที่มีชุดข้อมูลขาเข้าแต่ไม่ทราบค่าเป้าหมาย หรือ ไม่มีค่าเป้าหมายป้อนให้กับนิรอลเน็ตเวิร์ก ในกรณีนี้นิรอลเน็ตเวิร์กจะพยายามจัดกลุ่มของชุดข้อมูลที่ป้อนเข้าไปแทน ซึ่งวิธีนี้ใช้กับงานประเภท การจัดกลุ่มข้อมูล (Classification) เป็นหลัก

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กมีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนัก (W) และ ค่าไบแอส (b) ให้มีค่าที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณปัญหาแต่ละชนิด เมื่อนำข้อมูลเข้ามาผ่านการคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักและรวมกับค่าไบแอสที่ได้รับการปรับจากการฝึกแล้วจะทำให้ระบบให้ผลลัพธ์ในการคำนวณออกมาได้ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากยิ่งขึ้น

พิจารณารูปที่ 3.2 การปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และไบแอส จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าชุดข้อมูลขาเข้า (\bar{p}) และค่าเป้าหมาย (\bar{t}) จำนวน R ชุด ดังในสมการที่ (3.5) เพื่อใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับฝึกนิรอลเน็ตเวิร์ก (Training Set)

$$\bar{p}\bar{t} = p_1t_1, p_2t_2, \dots, p_Rt_R \quad (3.5)$$

2. เมื่อผ่านชุดข้อมูลสำหรับฝึกนี้เข้าสู่นิรอลเน็ตเวิร์กและนิรอลเน็ตเวิร์กให้ค่าผลลัพธ์ออกมาเป็น \bar{o} การปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสจะได้จากการนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย จะได้เป็นค่าความผิดพลาด (Error: \bar{e}) ซึ่งจะถูกนำไปใช้ปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอสตามสมการที่ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับดังนี้ [10]

$$\Delta W = (\bar{t} - \bar{o})(\bar{p})^T = \bar{e}(\bar{p})^T \quad (3.6)$$

$$\Delta \bar{b} = (\bar{t} - \bar{o}) = \bar{e} \quad (3.7)$$

เมื่อได้ส่วนปรับของค่าถ่วงน้ำหนัก (ΔW) และไบแอส ($\Delta \bar{b}$) แล้วจะทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอสดังสมการที่ (3.8) และ (3.9) ตามลำดับดังนี้

$$W^{new} = W^{old} + \Delta W \quad (3.8)$$

$$\bar{b}^{new} = \bar{b}^{old} + \Delta \bar{b} \quad (3.9)$$

ค่าของ W^{new} และ \bar{b}^{new} ตามสมการที่ (3.8) และ (3.9) นี้จะเป็นค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ถูกปรับค่าแล้วใน 1 รอบของการป้อนเข้าของชุดข้อมูลเข้า (1 epoch) ซึ่งการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กนี้จะเป็นกระบวนการวนซ้ำตามขั้นตอนข้างต้นจนกว่าจะได้ค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอสที่เหมาะสมจนได้ค่าผลลัพธ์ของนิรอลเน็ตเวิร์กที่มีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่สุด

3.2 รูปแบบของนิรอลเน็ตเวิร์กที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรูปแบบของนิรอลเน็ตเวิร์กที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาของการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ และ เป็นแบบจำลองที่เลือกมาใช้ในการวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย

3.2.1 สถาปัตยกรรมโครงข่ายชนิดป้อนไปหน้าและการฝึกแบบแพร่กระจายย้อนกลับ (Feedforward Network - Backpropagation Training Architecture) [11,12]

สถาปัตยกรรมโครงข่ายชนิดป้อนไปหน้ามีลักษณะดังรูปที่ 3.5 ซึ่งจะเป็นการต่อนิรอลเน็ตเวิร์กอย่างง่ายในรูปที่ 3.2 หลายๆ ชั้นเข้าด้วยกัน (Multiple Layer) เพื่อให้ให้นิรอลเน็ตเวิร์กที่มีความสามารถในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนมากขึ้น นิรอลเน็ตเวิร์กชนิดป้อนไปหน้าจะประกอบไปด้วยชั้นขาเข้า (input layer) 1 ชั้น, ชั้นซ่อนเร้น (hidden layer) อย่างน้อย 1 ชั้น และ ชั้นขาออก (output layer) 1 ชั้น การต่อกันของนิรอนในแต่ละชั้นจะเป็นการต่อแบบไปข้างหน้า ไม่มีการต่อย้อนกลับมา ดังนั้นการต่อนิรอลเน็ตเวิร์กแบบนี้จึงถูกเรียกว่า “โครงข่ายชนิดป้อนไปหน้า”

ในการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กชนิดนี้จะนิยมใช้วิธีการฝึกแบบแพร่กระจายย้อนกลับ กล่าวคือมีการป้อนกลับของค่าข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่าเพื่อทำการปรับค่าค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอสจากชั้นของนิรอนขาออกกลับไปสู่ชั้นของนิรอนขาเข้า ในลักษณะของการมองย้อนกลับจากแบบจำลองชั้นปลายมาสู่ชั้นต้น

พิจารณาที่แต่ละนิรอนในแต่ละชั้นของนิรอลเน็ตเวิร์กในรูปที่ 3.5 การปรับค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละกิ่งสำหรับการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กแบบแพร่กระจายย้อนกลับจะเป็นไปตามสมการที่ (3.10)

$$\Delta w_{ji} = \varepsilon (t_j - o_j) f'_j(n_j) o_i \quad (3.10)$$

เมื่อ Δw_{ji} เป็นส่วนปรับของค่าถ่วงน้ำหนักจากนิรอนที่ i ไปยังนิรอนที่ j

ε เป็นค่าอัตราการเรียนรู้ของนิรอลเน็ตเวิร์ก (learning rate) ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของค่าส่วนปรับของค่าถ่วงน้ำหนัก และ ควบคุมการลู่เข้าของผลลัพธ์ของนิรอลเน็ตเวิร์ก

t_j เป็นค่าเป้าหมายที่ส่งเข้านิวรอนที่ j เพื่อเปรียบเทียบกับค่าผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละนิวรอนออกมาเป็นค่าความผิดพลาดของการประมาณค่า

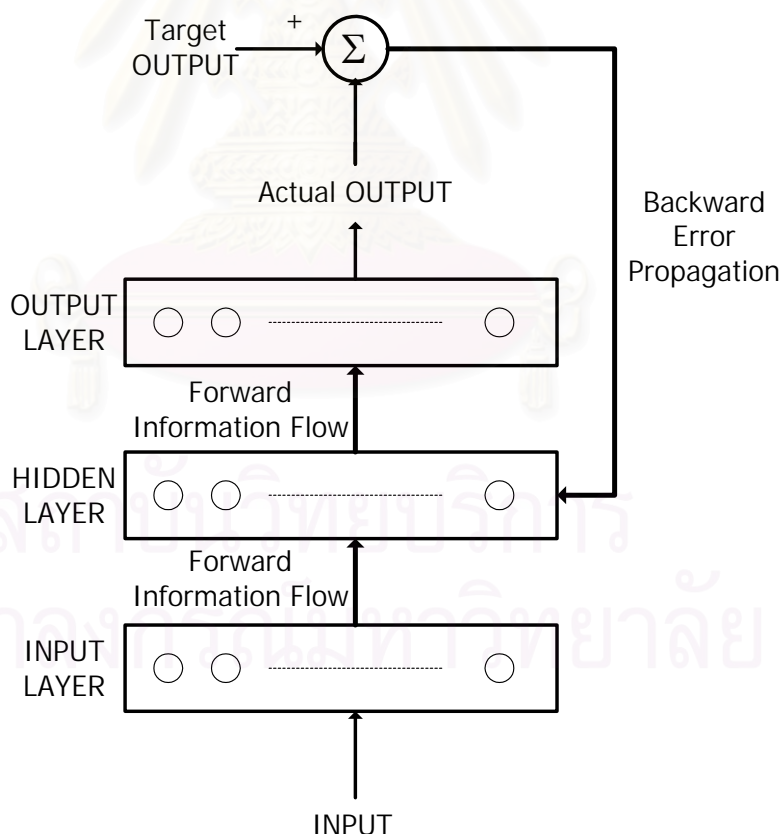
o_j เป็นค่าผลลัพธ์ที่นิวรอนเน็ตเวิร์กทำนายได้ที่นิวรอนที่ j

$f'_j(n_j)$ เป็นค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของข้อมูลเข้ารวมที่นิวรอนที่ j เทียบกับค่า n_j

o_i เป็นผลลัพธ์จากนิวรอนที่ i หรือกล่าวคือเป็นข้อมูลเข้า (input) ที่นิวรอนที่ j

จากสมการที่ (3.10) [11] ค่าของ $(t_j - o_j)f'_j(n_j)$ จะเป็นพจน์ของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าเมื่อเทียบกับสมการที่ (3.6) และ ค่าส่วนปรับของค่าถ่วงน้ำหนัก Δw_{ji} ในสมการที่ (3.10) จะถูกนำไปปรับค่าถ่วงน้ำหนักใหม่ตามสมการที่ (3.8) โดยในวิธีการฝึกนิวรอนเน็ตเวิร์กแบบแพร่กระจายย้อนกลับนี้มีข้อกำหนดว่าฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ (f) จะต้องหาค่าอนุพันธ์ได้ ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนที่นิยมใช้ส่วนมากจะเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ และ ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น

สาเหตุที่สมการที่ (3.10) เรียกว่าเป็น “วิธีการฝึกแบบแพร่กระจายย้อนกลับ” เพราะเหตุว่าค่าความผิดพลาดของแต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจะเป็นการคำนวณในลักษณะของการคำนวณย้อนกลับจากชั้นของนิวรอนขาออกกลับมาสู่ชั้นขาเข้า ดังแสดงในรูปที่ 3.6 [13]



รูปที่ 3.6 วิธีการฝึกแบบแพร่กระจายย้อนกลับ

จากรูปที่ 3.6 สามารถเขียนเป็นอัลกอริทึมของการฝึกนิเวรอลเน็ตเวิร์กได้ดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดในนิเวรอลเน็ตเวิร์ก
- 2) พิจารณาที่นิเวรอนที่ j ใด ๆ ค่าผลลัพธ์เริ่มต้นของนิเวรอนที่ j (o_j) จะเป็นดังสมการที่ (3.11)

$$o_j = f(\sum w_{ji} o_i + b_j) \quad (3.11)$$

เมื่อ w_{ji} เป็นค่าถ่วงน้ำหนักจากค่าข้อมูลเข้า o_i มาที่นิเวรอนที่ j

b_j เป็นค่าไบแอสของนิเวรอนที่ j

สมมติให้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้เป็นฟังก์ชันซิกมอยด์มีลักษณะดังสมการที่ (3.12)

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3.12)$$

- 3) ทำการฝึกนิเวรอลเน็ตเวิร์กโดยเริ่มพิจารณาจากนิเวรอนในชั้นขาออกมายังชั้นซ่อนเร้นและทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักตามสมการที่ (3.13)

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \Delta w_{ji} \quad (3.13)$$

เมื่อ $w_{ji}(t)$ เป็นค่าถ่วงน้ำหนักจากค่าข้อมูลเข้าที่ i ไปยังนิเวรอนที่ j ในรอบการวนซ้ำที่ t

สมการที่ (3.13) เป็นสมการวนซ้ำที่จะทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับทุก ๆ นิเวรอน ในการคำนวณจากชั้นขาออกกลับเข้าสู่ชั้นขาเข้า

ค่าส่วนปรับ Δw_{ji} จะคำนวณจากสมการที่ (3.14)

$$\Delta w_{ji} = \varepsilon \delta_j o_i \quad (3.14)$$

เมื่อ ε คือค่าอัตราการเรียนรู้ (learning rate) โดยปกติแล้วจะมีค่าอยู่ที่ $0 < \varepsilon < 1$

δ_j คือค่าเกรเดียนของค่าความผิดพลาด (error gradient) ที่นิเวรอนที่ j

การปรับค่าถ่วงน้ำหนักตามสมการที่ (3.13) สามารถทำให้เกิดการลู่เข้าของค่าผลลัพธ์ที่เร็วขึ้นได้โดยอาศัยการคิดโมเมนตัมเข้ามาช่วยตามสมการที่ (3.15)

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \varepsilon \delta_j o_i + \alpha [w_{ji}(t) - w_{ji}(t-1)] \quad 0 < \alpha < 1 \quad (3.15)$$

การคิดค่าเกรเดียนของค่าความผิดพลาด δ_j จะเป็นดังสมการที่ (3.16) และ (3.17) ตามลำดับ

- สำหรับนิเวรอนในชั้นขาออก

$$\delta_j = o_j(1 - o_j)(t_j - o_j) \quad (3.16)$$

- สำหรับนิเวรอนในชั้นซ่อนเร้น






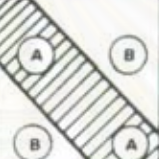



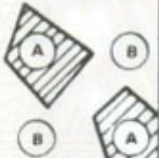


$$\delta_j = o_j(1 - o_j) \sum_k \delta_k w_{kj} \quad (3.17)$$

เมื่อ δ_k คือค่าเกรเดียนของค่าความผิดพลาดที่นิเวรอนที่ k ไปยังนิเวรอนที่ j

- 4) ทำการวนซ้ำขั้นใหม่โดยเริ่มที่ขั้นตอนที่ 2) จนกว่าจะได้ค่าผลลัพธ์ที่ทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการ

3.2.2 สถาปัตยกรรมโครงข่ายชนิดมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอน (Multi-Layer Perceptron: MLP)

มัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนเป็นลักษณะหนึ่งของนิวรอลเน็ตเวิร์กชนิดป้อนไปหน้า ประกอบด้วย ชั้นข้อมูลเข้า, ชั้นข้อมูลออก และ ชั้นซ่อนเร้นอย่างน้อย 1 ชั้นขึ้นไป มัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนมีความสามารถในการแบ่งกลุ่มชุดข้อมูลที่ไม่สามารถแบ่งแยกด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นได้ เนื่องจากการคำนวณของมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนมีความสามารถในการสร้างอาณาเขตการตัดสินใจข้อมูลที่ซับซ้อนมากขึ้นได้ (complex decision regions) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 [10]

STRUCTURE	TYPES OF DECISION REGIONS	EXCLUSIVE OR PROBLEM	CLASSES WITH MESHED REGIONS	MOST GENERAL REGION SHAPES
SINGLE-LAYER 	HALF PLANE BOUNDED BY HYPERPLANE			
TWO-LAYER 	CONVEX OPEN OR CLOSED REGIONS			
THREE LAYER 	ARBITRARY (Complexity Limited By Number of Nodes)			

รูปที่ 3.7 ลักษณะต่างๆ ของอาณาเขตการตัดสินใจ (decision regions) ที่เกิดจากนิวรอลเน็ตเวิร์กชนิดเพอร์เซปตรอน

โดยทั่วไปการออกแบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนจะประกอบด้วยชั้นข้อมูลเข้าซึ่งมีจำนวนนิวรอนเท่ากับมิติ (dimension) ของค่าคุณลักษณะของข้อมูล (features) ที่ป้อนเข้าสู่ นิวรอลเน็ตเวิร์ก และชั้นข้อมูลขาออกจะมีจำนวนนิวรอนที่เท่ากับมิติของข้อมูลออก หรือ เป้าหมายด้วยเช่นกัน ส่วนจำนวนของชั้นซ่อนเร้นจะมีไม่เกิน 3 ชั้น ซึ่งการออกแบบว่าจะใช้ชั้นซ่อนเร้นจำนวนเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของการแบ่งแยกข้อมูลเข้าว่าจะใช้อณาเขตการตัดสินใจ (decision regions) ว่ามีลักษณะใด ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยมากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในชั้นซ่อนเร้นของมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนจะเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนขั้นบันได (step function/hard-limit function) แต่ในบางครั้งอาจมีการใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์เป็นกรณีพิเศษได้เช่นกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ทำการฝึกเป็นหลัก ส่วนอัลกอริทึมในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอสของมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนนั้นโดยปกติแล้วจะใช้วิธีการแพร่กระจายย้อนกลับเช่นเดียวกับโครงข่ายแบบป้อนไปหน้า

3.3 ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนต่างๆ สำหรับการฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กแบบแพร่กระจายย้อนกลับ

ในการฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กโดยวิธีการแพร่กระจายย้อนกลับจะต้องมีการหาค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอน และมีข้อกำหนดว่าฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้จะต้องหาค่าอนุพันธ์ได้

ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.3.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น (Linear Transfer Function)

ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้นมีลักษณะเป็นไปตามสมการที่ (3.18)

$$f(x) = x \quad (3.18)$$

ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้นจะเป็นดังสมการที่ (3.19)

$$f'(x) = 1 \quad (3.19)$$

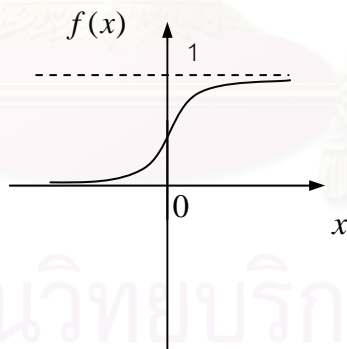
3.3.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ลอการิทึม (Log Sigmoid Transfer Function)

ฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ลอการิทึมมีลักษณะดังสมการที่ (3.20)

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3.20)$$

ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ลอการิทึมจะเป็นไปตามสมการที่ (3.21)

$$f'(x) = f(x)[1 - f(x)] \quad (3.21)$$



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันถ่ายโอนซิกมอยด์ลอการิทึม

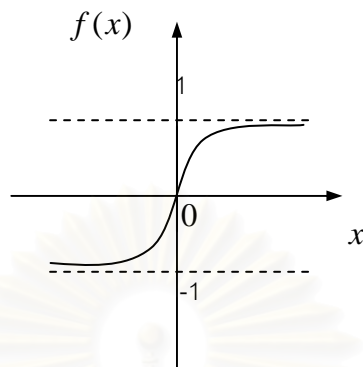
3.3.3 ฟังก์ชันถ่ายโอนไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ซิกมอยด์ (Hyperbolic Tangent Sigmoid Transfer Function)

ฟังก์ชันถ่ายโอนไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ซิกมอยด์เป็นไปตามสมการที่ (3.22)

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (3.22)$$

เมื่อหาค่าอนุพันธ์ของสมการที่ (3.22) จะได้ดังสมการที่ (3.23)

$$f'(x) = 1 - f^2(x) \quad (3.23)$$



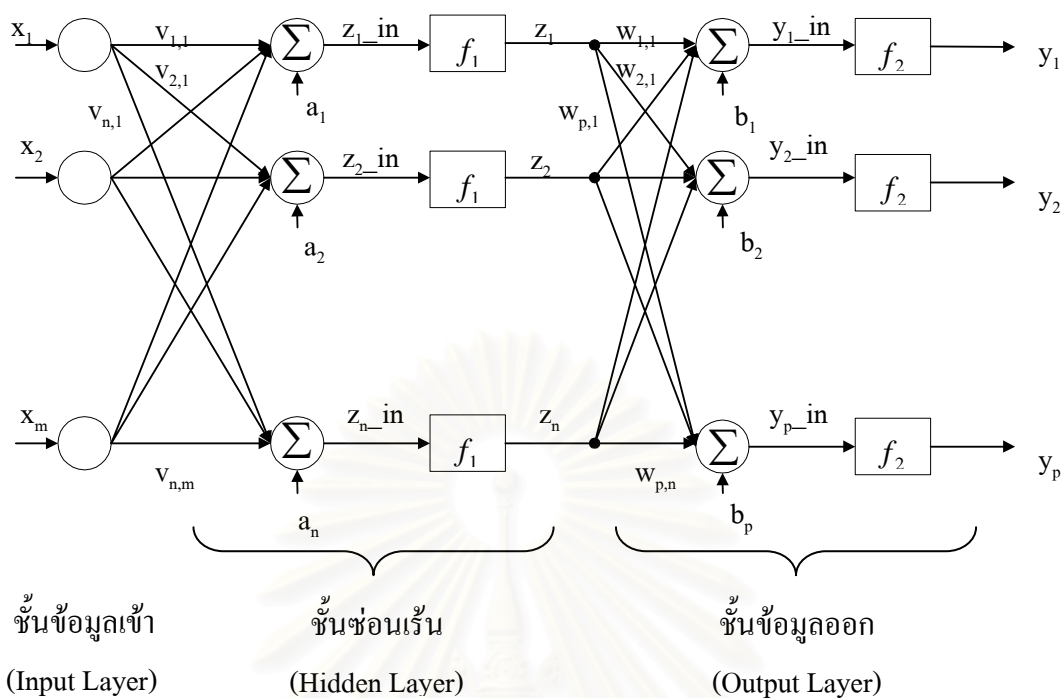
รูปที่ 3.9 ฟังก์ชันถ่ายโอนไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ซิกมอยด์

3.4 กฎการฝึกนิเวรอลเน็ตเวิร์กของ Levenberg Marquardt [12,14]

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การฝึกนิเวรอลเน็ตเวิร์กแบบ Supervised Learning และ ใช้กฎการฝึกนิเวรอลเน็ตเวิร์กของ Levenberg Marquardt ซึ่งเป็นกฎการเรียนรู้ที่สามารถปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสได้เร็วที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่นๆ เช่น Steepest Descent Algorithm, การปรับค่าการเรียนรู้ (Variable Learning Rate), Conjugate Gradient เป็นต้น ต่อไปนี้จะกล่าวถึง อัลกอริทึมของ Levenberg Marquardt (Levenberg Marquardt Algorithm)

พิจารณานิเวรอลเน็ตเวิร์กชนิดป้อนไปหน้าซึ่งประกอบไปด้วยชั้นข้อมูลขาเข้า, ชั้นข้อมูลขาออก และ ชั้นซ่อนเร้นจำนวน 1 ชั้น (3-Layers Perceptron / 3-Layers Feedforward Network) ดังแสดงในรูปที่ 3.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 นิวรอลเน็ตเวิร์กแบบ 3-layer Perceptron

โดยที่ f_1 คือ Transfer Function ของชั้นซ่อนเร้น

f_2 คือ Transfer Function ของชั้นข้อมูลออก

$v_{j,k}$ คือค่าถ่วงน้ำหนักที่ต่อนิวรอนที่ k ในชั้นข้อมูลเข้ากับนิวรอนที่ j ในชั้นซ่อนเร้น

$w_{i,j}$ คือค่าถ่วงน้ำหนักที่ต่อนิวรอนที่ j ในชั้นซ่อนเร้นกับนิวรอนที่ i ในชั้นข้อมูลออก

a_j คือค่าไบแอสของนิวรอนที่ j ในชั้นซ่อนเร้น

b_i คือค่าไบแอสของนิวรอนที่ i ในชั้นข้อมูลออก

x_k คือข้อมูลเข้าที่ป้อนให้นิวรอนที่ k ในชั้นข้อมูลเข้า

$z_{i,in}$ คือ net input ของนิวรอนที่ i ในชั้นซ่อนเร้น

$y_{i,in}$ คือ net input ของนิวรอนที่ i ในชั้นข้อมูลออก

m คือจำนวนนิวรอนในชั้นข้อมูลเข้า

n คือจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น

p คือจำนวนนิวรอนในชั้นข้อมูลออก

Levenberg Marquardt Algorithm จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ป้อนชุดฝึกทั้งหมดให้นิวรอลเน็ตเวิร์กคำนวณข้อมูลออก โดยนิวรอนในชั้นข้อมูลขาเข้าจะคำนวณข้อมูลออกของตัวเอง และแพร่ข้อมูลออกที่ได้นี้ต่อไปเป็นข้อมูลเข้าสำหรับนิวรอนอื่นในชั้นถัดไป และเป็นเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งข้อมูลแพร่มาถึงนิวรอนในชั้นข้อมูลขาออก นิวรอนในชั้นนี้จะคำนวณหาข้อมูลออกของตัวเองตามสมการที่ (3.24) เป็นผลลัพธ์จากนิวรอลเน็ตเวิร์ก

$$y_i = f_2 \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j} (f_1 (\sum_{k=1}^m v_{j,k} x_k + a_j) + b_i) \right) \quad (3.24)$$

จากนั้นป้อนข้อมูลชุดฝึกอื่นๆ ต่อไปจนครบทุกชุด แล้วคำนวณผลรวมของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Sum Square Error: SSE) ตามสมการที่ (3.25) เพื่อใช้พิจารณาว่านิวรอลเน็ตเวิร์กยังต้องการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและไบแอส เพื่อให้ผลลัพธ์ของนิวรอลเน็ตเวิร์กมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายอีกหรือไม่

$$SSE = E \left(\sum_{j=1}^Q \sum_{i=1}^p (t_{i,j} - y_{i,j})^2 \right) \quad (3.25)$$

โดยที่ SSE คือ ผลรวมของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Sum Square Error)

$t_{i,j}$ คือ ค่าเป้าหมาย (Target) ของนิวรอนขาออกที่ i เมื่อป้อนชุดฝึกชุดที่ j

$y_{i,j}$ คือ ข้อมูลออกของนิวรอนขาออกที่ i เมื่อป้อนชุดฝึกชุดที่ j

p คือจำนวนนิวรอนในชั้นข้อมูลออก

Q คือจำนวนชุดฝึกทั้งหมด

2. คำนวณหาเมตริกซ์แบบยาโคบี (Jacobi) ดังแสดงตามสมการที่ (3.26) เพื่อใช้คำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ต้องปรับเพิ่มตามสมการที่ (3.32)

$$J(v_{1,1}, \dots, v_{n,m}, a_1, \dots, a_n, w_{1,1}, \dots, w_{p,n}, b_1, \dots, b_p) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_{1,1}}{\partial v_{1,1}} & \dots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial v_{n,m}} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial a_n} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{1,1}} & \dots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial w_{p,n}} & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial b_1} & \dots & \frac{\partial e_{1,1}}{\partial b_p} \\ \frac{\partial e_{2,1}}{\partial v_{1,1}} & \dots & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial v_{n,m}} & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial a_n} & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial w_{1,1}} & \dots & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial w_{p,n}} & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial b_1} & \dots & \frac{\partial e_{2,1}}{\partial b_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial e_{p,1}}{\partial v_{1,1}} & \dots & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial v_{n,m}} & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial a_n} & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_{1,1}} & \dots & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial w_{p,n}} & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial b_1} & \dots & \frac{\partial e_{p,1}}{\partial b_p} \\ \frac{\partial e_{1,2}}{\partial v_{1,1}} & \dots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial v_{n,m}} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial a_n} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{1,1}} & \dots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial w_{p,n}} & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial b_1} & \dots & \frac{\partial e_{1,2}}{\partial b_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial e_{p,q}}{\partial v_{1,1}} & \dots & \frac{\partial e_{p,q}}{\partial v_{n,m}} & \frac{\partial e_{p,q}}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial e_{p,q}}{\partial a_n} & \frac{\partial e_{p,q}}{\partial w_{1,1}} & \dots & \frac{\partial e_{p,q}}{\partial w_{p,n}} & \frac{\partial e_{p,q}}{\partial b_1} & \dots & \frac{\partial e_{p,q}}{\partial b_p} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

โดยที่ J คือ เมตริกซ์แบบยาโคบี

$e_{i,j}$ คือ ค่าผิดพลาดของข้อมูลออกของนิวรอนขาออกที่ i ชุดที่ j กับค่าเป้าหมาย (Target) ที่นิวรอนขาออกที่ i ชุดที่ j

ค่าผิดพลาดของข้อมูลออกจากนิวรอนขาออกที่ i ชุดที่ j กับค่าเป้าหมาย (Target) ที่นิวรอนขาออกที่ i ชุดที่ j คำนวณได้ตามสมการที่ (3.27)

$$e_{i,j} = (t_{i,j} - y_{i,j}) \quad (3.27)$$

คำนวณหาสมาชิกแต่ละตัวภายในเมตริกซ์แบบยาโคบีตามสมการที่ (3.28), (3.29), (3.30)

และ (3.31) ตามลำดับ

$$\frac{\partial e_{i,j}}{\partial w_{i,k}} = -f_2'(y_{i,j} - in)(z_{k,j}) \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial e_{i,j}}{\partial b_i} = -f_2'(y_{i,j} - in) \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial e_{i,j}}{\partial v_{k,l}} = -f_2'(y_{i,j} - in)f_1'(z_{k,j} - in)(w_{i,k})(x_{lj}) \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial e_{i,j}}{\partial a_k} = -f_2'(y_{i,j} - in)f_1'(z_{k,j} - in)(w_{i,k}) \quad (3.31)$$

3. คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสที่ต้องการปรับเพิ่มตามสมการที่ (3.32)

$$\Delta \mathbf{c}_k = -[J^T(\mathbf{c}_k)J(\mathbf{c}_k) + \mu_k I]^{-1} J(\mathbf{c}_k) \delta(\mathbf{c}_k) \quad (3.32)$$

โดยที่

$\Delta \mathbf{c}_k$ คือ เวกเตอร์ของค่าถ่วงน้ำหนัก และ ค่าไบแอสที่ต้องปรับเพิ่มทั้งหมดภายในนิวรอลเน็ตเวิร์ก ในรอบการปรับค่ารอบที่ k

I คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์

μ_k คือ พารามิเตอร์ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอส

$\delta(\mathbf{c}_k)$ คือ เวกเตอร์ของค่าผิดพลาดของค่าเป้าหมายกับข้อมูลออกของนิวรอลเน็ตเวิร์ก

เวกเตอร์ $\Delta \mathbf{c}_k$ แสดงได้ตามสมการที่ (3.33)

$$\Delta \mathbf{c}_k^T = [\Delta v_{1,1} \ \Delta v_{1,2} \ \dots \ \Delta v_{n,m} \ \Delta a_1 \ \dots \ \Delta a_n \ \Delta w_{1,1} \ \dots \ \Delta w_{p,n} \ \Delta b_1 \ \dots \ \Delta b_p] \quad (3.33)$$

เวกเตอร์ $\delta(\mathbf{c}_k)$ แสดงได้ตามสมการที่ (3.34)

$$\delta(\mathbf{c}_k) = [e_{1,1} \ e_{2,1} \ \dots \ e_{p,1} \ e_{1,2} \ \dots \ e_{p,2}] \quad (3.34)$$

4. ปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสตามสมการที่ (3.35)

$$c_{k+1} = c_k + \Delta c_k \quad (3.35)$$

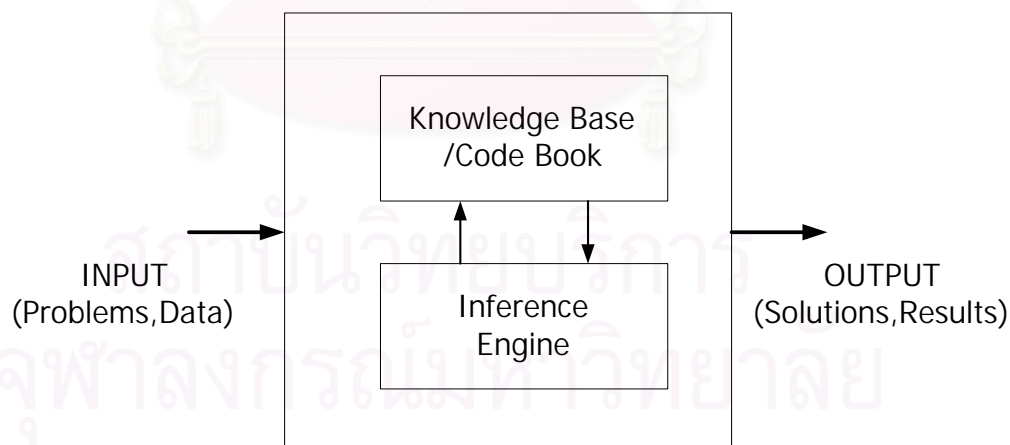
โดยที่ c_k คือ ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในรอบการปรับค่ารอบที่ k

c_{k+1} คือ ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสในรอบการปรับค่ารอบที่ $k+1$

คำนวณผลรวมของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (SSE) ของนิวรอลเน็ตเวิร์ก ถ้าค่า SSE ที่ได้มีค่ามากกว่าค่า SSE ก่อนปรับค่าถ่วงน้ำหนักแล้วให้คูณ μ_k ด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง (เช่น 10 เป็นต้น) แล้วปรับค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสตามสมการที่ (3.23) แล้วกลับไปทำงานตามข้อ 3 แต่ถ้าค่า SSE ที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่า SSE ก่อนปรับค่าถ่วงน้ำหนักแล้วให้หาร μ_k ด้วยค่าคงที่ที่กำหนดไว้แล้วกลับไปทำงานตามข้อที่ 1 ทำงานตามขั้นตอนเหล่านี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ค่า SSE ต่ำกว่าค่าที่ต้องการหรือครบตามจำนวนครั้งที่ต้องการปรับค่าถ่วงน้ำหนักแล้วแต่ว่าจะถึงจุดไหนก่อน จึงยุติการฝึก

3.5 ฐานความรู้ของนิวรอลเน็ตเวิร์ก (Knowledge Base)

การฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กตามวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเป็นเสมือนการสร้างฐานความรู้ให้กับนิวรอลเน็ตเวิร์กในการแก้ปัญหาสำหรับชุดข้อมูลนั้นๆ ฐานความรู้ (Knowledge Base) หรือ “Code Book” จะเป็นตัวที่ทำให้นิวรอลเน็ตเวิร์กทำการเชื่อมโยง (map) ค่าข้อมูลเข้าไปสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการได้ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กระบวนการฐานความรู้ของนิวรอลเน็ตเวิร์ก

ในการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กให้ทำการรู้จำ, แยกแยะ หรือ ประมาณค่า ของชุดเป้าหมายจะมี 2 วิธีในการสร้าง Code Book ให้กับนิรอลเน็ตเวิร์ก คือ

1) ชุดฐานความรู้เดี่ยว (Single Code Book)

การใช้ชุดฐานความรู้เดี่ยวเป็นการทำให้นิรอลเน็ตเวิร์กทำการสร้างชุดฐานความรู้ออกมาเพียงแค่ชุดเดียวในการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กเพื่อให้นิรอลเน็ตเวิร์กทำการรู้จำ, แยกแยะ หรือ ประมาณค่า เป้าหมายทั้งหมดที่ป้อนให้กับนิรอลเน็ตเวิร์ก ยกตัวอย่างเช่น ในการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กให้รู้จำพยัญชนะ (character recognition) นิรอลเน็ตเวิร์กจะสร้างฐานความรู้ออกมาชุดเดียวเพื่อรู้จำพยัญชนะทุกตัวที่มีการป้อนเข้าสู่นิรอลเน็ตเวิร์ก

2) ชุดฐานความรู้หลายชุด (Multiple Code Book)

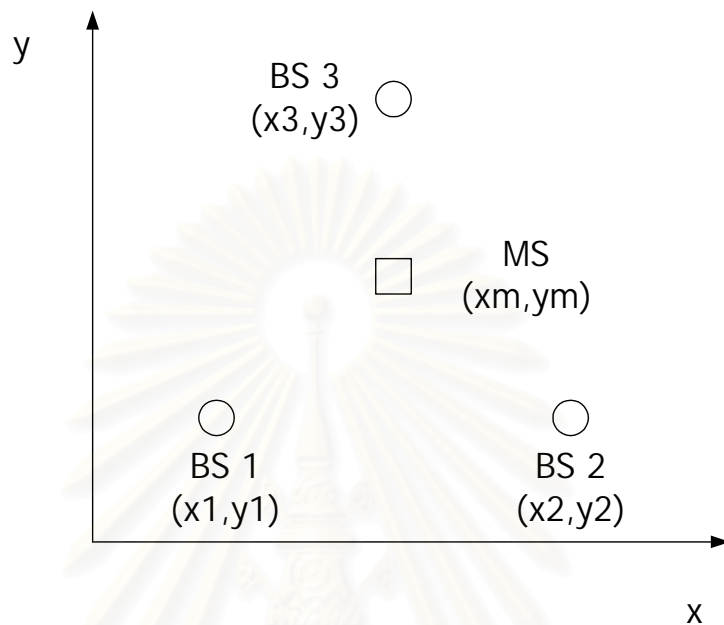
วิธีนี้นิรอลเน็ตเวิร์กจะสร้างชุดฐานข้อมูลออกมา 1 ชุด สำหรับค่าเป้าหมาย 1 ค่า ยกตัวอย่างเช่น ในการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กให้รู้จำพยัญชนะ นิรอลเน็ตเวิร์กจะสร้างฐานความรู้ออกมา 1 ชุด สำหรับค่าพยัญชนะแต่ละตัวที่ป้อนเข้าสู่นิรอลเน็ตเวิร์ก

3.6 การใช้นิรอลเน็ตเวิร์กในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่

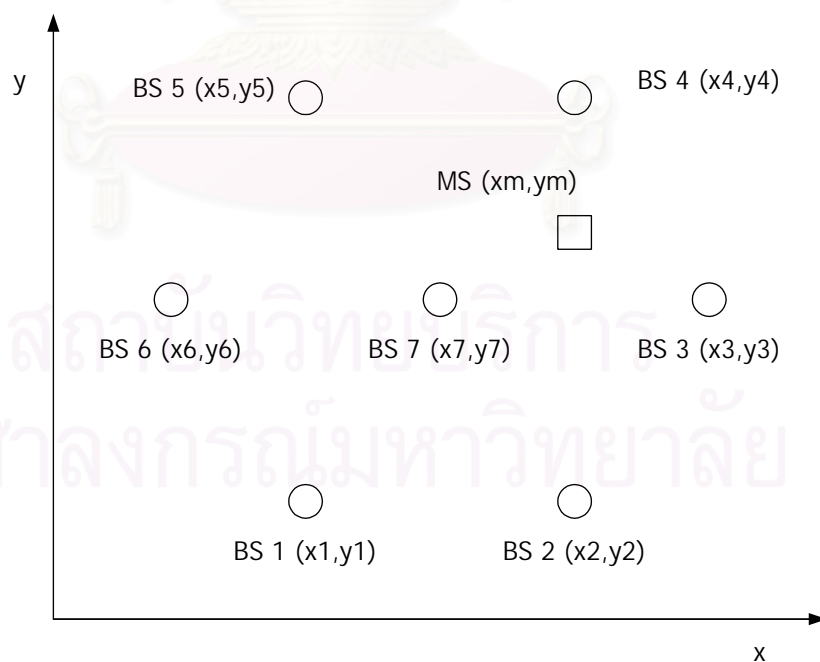
ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำนิรอลเน็ตเวิร์กมาประยุกต์ใช้กับการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ โดยนิรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบจะเป็นชนิดของมัลติเลเยอร์เพอร์เซพตรอนที่มีชั้นข้อมูลเข้าประกอบด้วย ค่าข้อมูลของค่าความแรงของสัญญาณที่สถานีฐาน 3 สถานี รับได้จากสถานีเคลื่อนที่ที่พิจารณา และ ค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ที่สถานีฐานทั้ง 3 สถานี คำนวณได้ เป็นข้อมูลเข้าที่จะทำการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์ก ชั้นซ่อนเร้นจำนวน 1 ชั้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบเพื่อหาจำนวนนิรอลเน็ตเวิร์กในชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสม และ ชั้นข้อมูลออก โดยนิรอลเน็ตเวิร์กจะให้ค่าผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าตำแหน่ง (x,y) ของสถานีเคลื่อนที่เทียบกับตำแหน่งของสถานีฐานหนึ่งที่ถูกกำหนดเป็นจุดอ้างอิง

3.7 แบบจำลองของระบบที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้

ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาแบบจำลองระบบที่ประกอบด้วยสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ตามรูปที่ 3.12 และ 3.13



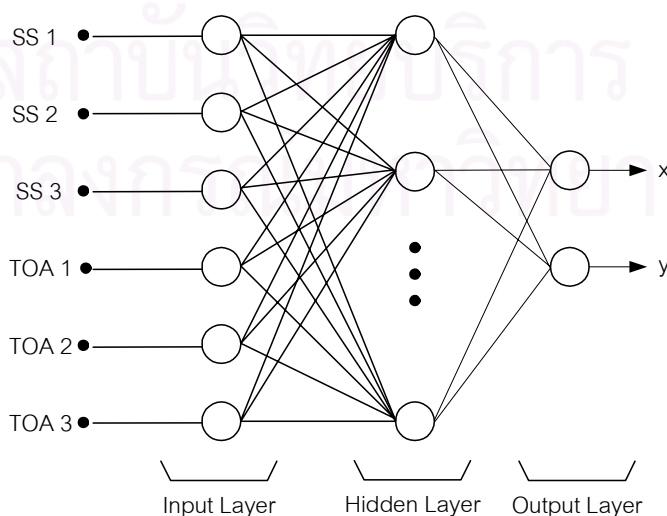
รูปที่ 3.12 แบบจำลองสถานีเคลื่อนที่และสถานีฐาน 3 สถานีที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 3.13 แบบจำลองสถานีเคลื่อนที่และสถานีฐาน 7 สถานีที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้

สมมุติฐานที่ใช้ในแบบจำลองของวิทยานิพนธ์นี้คือ [15]

1. ระบบที่พิจารณาเป็นระบบสื่อสารเคลื่อนที่ CDMA หรือ GSM
2. สถานีเคลื่อนที่อยู่ภายในบริเวณสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นจากสถานีฐานทั้ง 3 สถานี
3. สถานีเคลื่อนที่ที่ต้องอยู่ในตำแหน่งที่นิ่ง หรือเคลื่อนไหวช้ามากในขณะที่ทำการพิจารณาและไม่มี การแฮนด์ออฟ (Hand-Off) ในขณะนั้น
4. ไม่มีการควบคุมกำลัง (Power control) ในขณะที่ใช้งานระบบการประมาณค่าตำแหน่ง
5. ทำการจำลองระบบ และลองจำลองชุดข้อมูลของค่าข้อมูลที่จะนำมาทำการฝึกนิเวรอลเน็ตเวิร์ก และทำการทดสอบนิเวรอลเน็ตเวิร์ก โดยจำลองค่าข้อมูลของ ความแรงสัญญาณ, เวลาการมาถึงของ สัญญาณ และตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ ซึ่งการจำลองข้อมูลความแรงของสัญญาณจะใช้ แบบจำลองของ Hata [16] และข้อมูลของเวลาจะเริ่มจากการจำลองอย่างง่ายโดยไม่คำนึงถึงผลของ เฟดดิ้งพหุวิถี และ การอยู่นอกแนวสายตา
6. ทำการออกแบบนิเวรอลเน็ตเวิร์ก โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะออกแบบให้นิเวรอลเน็ตเวิร์กเป็น แบบป้อนไปข้างหน้าและมีการแพร่กระจายย้อนกลับ ซึ่งมีชั้นข้อมูลเข้า 1 ชั้น (1 layer input) มี จำนวนนิเวรอนในชั้นข้อมูลเข้าตามจำนวนลักษณะของข้อมูลจากสถานีฐานทั้ง 3 สถานีที่ออกแบบ ในรูปที่ 3.12 และ 3.13 กล่าวคือใช้ข้อมูลเข้าเป็นค่าความแรงของสัญญาณที่สถานีเคลื่อนที่นั้นรับได้ จากสถานีฐานที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ (SS1, SS2 และ SS3) และเวลาการมาถึงของสัญญาณที่มา จากสถานีฐานที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ (TOA1, TOA2 และ TOA3) และชั้นข้อมูลออก 1 ชั้น (1 layer output) มีจำนวนนิเวรอนในชั้นนี้ 2 นิเวรอนเพื่อให้ค่าผลลัพธ์เป็นค่าตำแหน่ง (x,y) และมีชั้น ซ่อนเร้น (Hidden layer) 1 ชั้น จำนวนนิเวรอนในชั้นนี้ปรับจำนวนได้ ซึ่งในการวิจัยนี้คาดว่า การใช้ จำนวนชั้นซ่อนเร้นเพียง 1 ชั้นมีความเพียงพอกับปัญหาที่จะทำการแก้ไข และในการวิจัยนี้จะ ทดสอบหาจำนวนนิเวรอนในชั้นซ่อนเร้นที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 นิเวรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้

7. ทำการป้อนข้อมูลเพื่อฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบขึ้น โดยการทดลองปรับจำนวนนิรอลในชั้นซ่อนเร้นให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้มีค่าความถูกต้องของการประมาณค่าโดยนิรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบมากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีต่างๆ ที่มีผู้นำเสนอไว้ และตามที่ E-911 ได้กำหนดไว้
8. ทำการทดสอบ (Test) โดยใช้ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบที่สร้างขึ้นอีกชุดหนึ่ง
9. ทำการขยายขอบเขตของระบบออกไป โดยการพิจารณาให้ครอบคลุมสถานียานจำนวนมากขึ้น
10. วิเคราะห์ผลลัพธ์โดยเขียนเป็นกราฟ หรือตารางของค่าความผิดพลาดของผลลัพธ์ที่นิรอลเน็ตเวิร์กประมาณค่ากับค่าเป้าหมายที่ป้อนเข้าสู่ระบบและเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ ในการประมาณค่าตำแหน่ง

3.8 ข้อดีของการใช้นิรอลเน็ตเวิร์กประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่

- 1) มีความสามารถในการประมาณค่าข้อมูลชนิดที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นได้ดีกว่าการใช้คณิตศาสตร์โดยตรง
- 2) สามารถรองรับการให้บริการสำหรับผู้ใช้หลายคนในเวลาเดียวกัน (multiple users)
- 3) หลังจากทำการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กแล้ว เมื่อนำไปใช้งานจะทำให้มีผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าการใช้วิธีอื่น ๆ ที่มีการนำเสนอขึ้นก่อนหน้านี้ จึงเหมาะสมกับการใช้งานประเภทเวลาจริง (real time)

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ในบทนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของวิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้นิวโรลเน็ตเวิร์กที่เสนอขึ้น โดยใช้ข้อมูลที่ป้อนเข้าทำการฝึกนิวโรลเน็ตเวิร์กเป็นค่าคุณลักษณะของสัญญาณอันได้แก่ ค่าความแรงของสัญญาณ และ ค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ ที่สถานีฐานรับได้จากสถานีเคลื่อนที่ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะทำการออกแบบนิวโรลเน็ตเวิร์กที่เหมาะสม สำหรับแบบจำลองของระบบสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่รูปแบบต่าง ๆ เพื่อหาค่าจำนวนนิวโรลในชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสมที่ให้ค่าความถูกต้องในการประมาณค่าตำแหน่งที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ ที่มีผู้นำเสนอขึ้นมาก่อนหน้านี้ และ ตรงตามข้อกำหนดของ FCC ที่ได้บัญญัติไว้

4.1 ระบบแบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบ

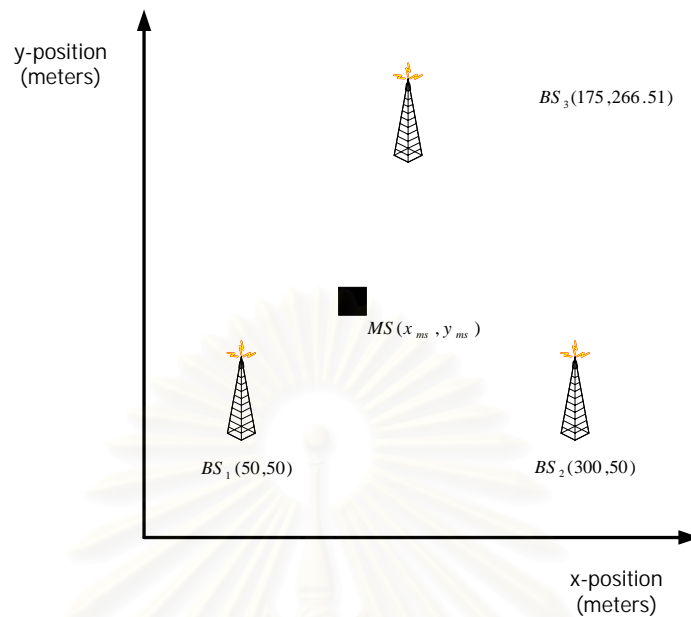
ระบบที่ใช้ในการทดสอบนิวโรลเน็ตเวิร์กจะมีลักษณะเป็นไปตามที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.7 และ แบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

4.1.1 กรณีต้นแบบใช้ในการทดสอบสมมุติฐาน

ระบบสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบสมมุติฐานที่ว่า “การนำนิวโรลเน็ตเวิร์กมาใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่นั้นทำได้จริง และ ให้ค่าความถูกต้องสูงกว่าที่ข้อกำหนดของ FCC มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 ระบบต้นแบบที่ทำการพิจารณาประกอบไปด้วย

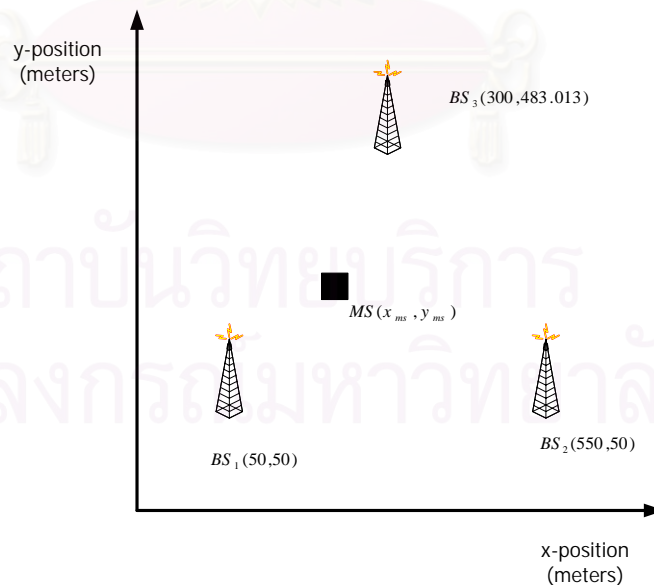
- 1) สถานีฐาน 3 สถานี ซึ่งตั้งเป็นรูป 3 เหลี่ยม ที่มีสถานีฐานแต่ละสถานีเป็นจุดมุม แต่ละสถานีห่างกัน 250 เมตร
- 2) สถานีเคลื่อนที่ที่ตั้งอยู่ภายในบริเวณ 3 เหลี่ยมดังกล่าวตามข้อที่ 1) และ มีการกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.1 ระบบสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ต้นแบบ

4.1.2 กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 3 สถานีฐาน

กรณีนี้จะพิจารณาลักษณะภูมิประเทศที่เป็นภูมิประเทศในเมืองที่หนาแน่น ซึ่ง แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ จะครอบคลุมพื้นที่ที่ไม่กว้างนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 3 สถานีฐาน

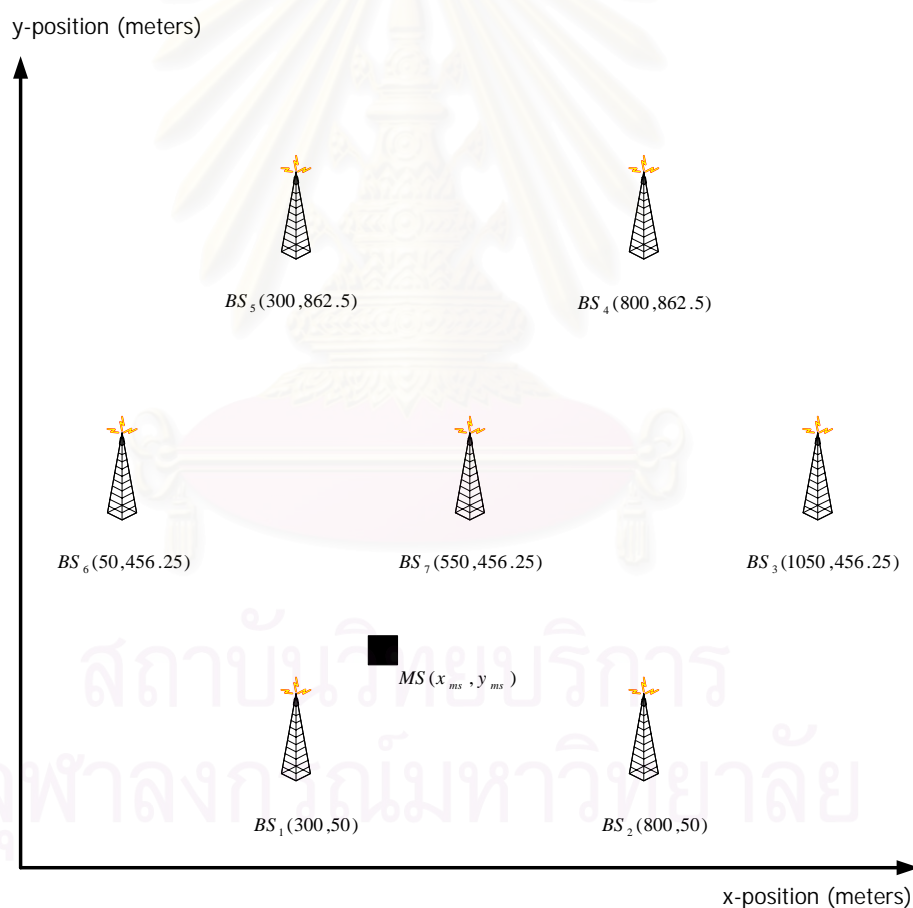
แบบจำลองในรูปที่ 4.2 มีลักษณะดังนี้

- 1) สถานีฐาน 3 สถานี ซึ่งตั้งเป็นรูป 3 เหลี่ยม ที่มีสถานีฐานแต่ละสถานีเป็นจุดมุม แต่ละสถานีห่างกัน 500 เมตร
- 2) สถานีเคลื่อนที่ตั้งอยู่ภายในบริเวณ 3 เหลี่ยมดังกล่าวตามข้อที่ 1) และ มีการกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ

4.1.3 กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 7 สถานีฐาน

ในกรณีนี้จะพิจารณาระบบที่มีสิ่งแวดล้อมที่เป็นบริเวณเมืองหนาแน่น เช่นเดียวกับกรณี

4.1.2 โดยจะทำการพิจารณาระบบที่ประกอบด้วยหลายสถานีฐานมากขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาระบบที่ประกอบไปด้วยสถานีฐานจำนวน 7 สถานี ดังรูปที่ 4.3



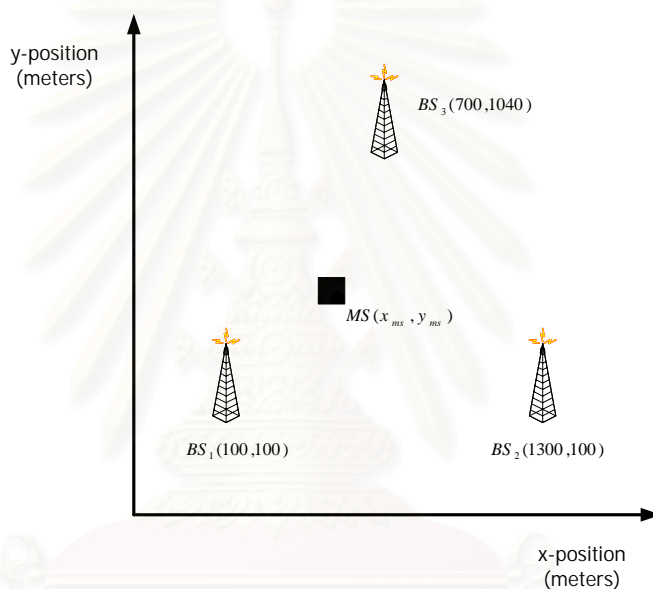
รูปที่ 4.3 แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 7 สถานีฐาน

จากรูปที่ 4.3 ระบบที่พิจารณาจะประกอบไปด้วย

- 1) สถานีฐานจำนวน 7 สถานี ตั้งเป็นลักษณะรูปหกเหลี่ยม โดยมีสถานีฐานตั้งอยู่ที่มุมของหกเหลี่ยม และ ที่จุดกึ่งกลางของหกเหลี่ยม โดยที่แต่ละสถานีฐานห่างกันเป็นระยะทาง 500 เมตร
- 2) สถานีเคลื่อนที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ภายในบริเวณหกเหลี่ยมดังกล่าวตามข้อ 1)

4.1.4 กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 3 สถานีฐาน

กรณีนี้จะพิจารณาระบบที่ครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างขึ้น ซึ่งจะเป็นลักษณะสิ่งแวดล้อมในบริเวณชานเมือง, ในเมืองที่ไม่หนาแน่น หรือ ในชนบท ดังรูปที่ 4.4



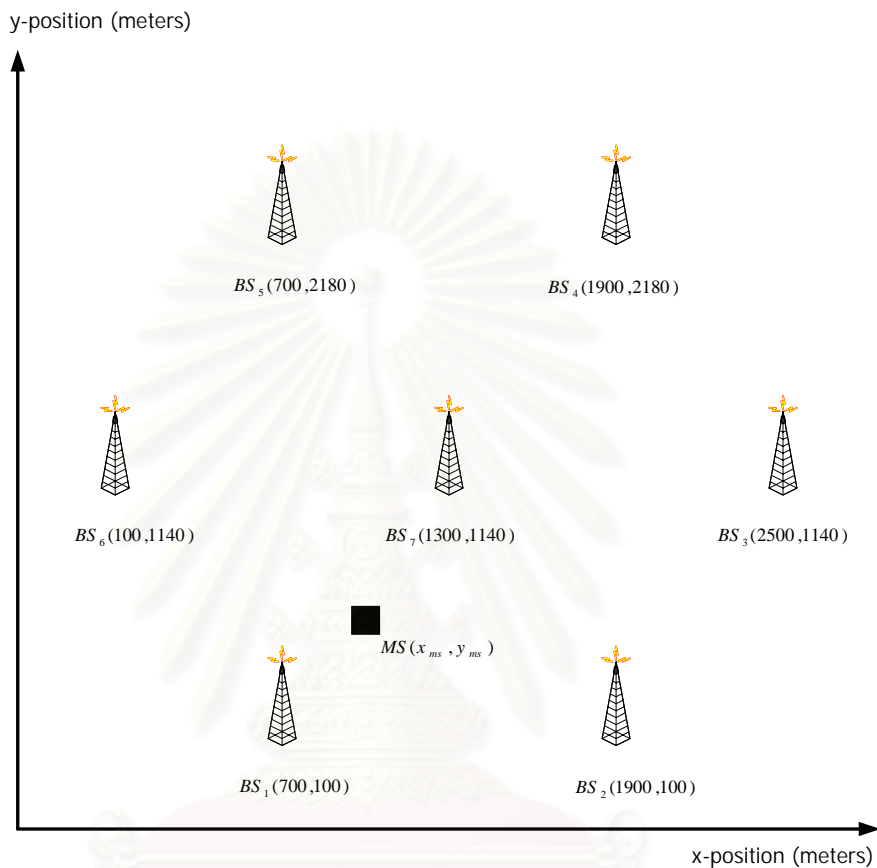
รูปที่ 4.4 แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 3 สถานีฐาน

แบบจำลองตามรูปที่ 4.4 ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะมีลักษณะสภาพแวดล้อมตรงตามที่ FCC กำหนดไว้ ซึ่งมีลักษณะดังต่อไปนี้

- 1) สถานีฐานจำนวน 3 สถานี วางตัวเป็นรูป 3 เหลี่ยม โดยมีสถานีฐานตั้งอยู่ที่จุดมุมของ 3 เหลี่ยม โดยในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้แต่ละสถานีฐานอยู่ห่างกัน 1.2 กิโลเมตร (ข้อกำหนดของ FCC อยู่ที่ 1 กิโลเมตรขึ้นไป [8,9,15]) และเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ ที่มีผู้นำเสนอมาก่อนหน้านี้ ในสิ่งแวดล้อมเดียวกัน
- 2) สถานีเคลื่อนที่กระจายตัวอยู่ในบริเวณพื้นที่ 3 เหลี่ยมที่กล่าวมาในข้อ 1) อย่างสม่ำเสมอ

4.1.5 กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 7 สถานีฐาน

ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาระบบที่ขยายพื้นที่การให้บริการออกไปให้กว้างขึ้นและครอบคลุมสถานีฐานหลายสถานีขึ้นตามรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 7 สถานีฐาน

4.2 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึก และ ทดสอบนิรอลเนตเวิร์ก

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะออกแบบให้ใช้ชุดข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณ และ ข้อมูลค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ ซึ่งเป็นค่าคุณลักษณะสำคัญ (features) ของสัญญาณที่จะใช้ป้อนเป็นชุดฝึกในการฝึกนิรอลเนตเวิร์ก โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกจำลอง (simulation) ขึ้นเป็นชุดฝึก 1 ชุด และ ชุดทดสอบ 1 ชุด ที่มีค่าต่าง ๆ กัน

การจำลองค่าความแรงของสัญญาณ และ ค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณเป็นดังนี้

4.2.1 การจำลองค่าความแรงของสัญญาณ

การจำลองค่าความแรงของสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ที่สถานีฐานรับได้นั้นจะเป็นไปตามสมการที่ (4.1)

$$P_s = P_r + L \text{ (dB)} \quad (4.1)$$

เมื่อ P_s เป็น ค่ากำลังของสัญญาณที่ส่งออกจากเครื่องส่ง (dB)

P_r เป็น ค่ากำลังของสัญญาณที่เครื่องรับรับได้ (dB)

L เป็นค่าการสูญเสียตามระยะทางของคลื่น (dB)

สมการที่ 4.1 เป็นกฎทรงพลังงาน ซึ่งแสดงถึง กำลังของสัญญาณที่ส่งจากเครื่องส่ง (สถานีเคลื่อนที่) จะสูญเสียไปส่วนหนึ่งตามระยะทางการเดินทางของคลื่น ก่อนที่จะถึงเครื่องรับ (สถานีฐาน) ซึ่ง Hata [16] ได้จำลองค่าการสูญเสียตามระยะทางการเดินทางของคลื่น (Path Loss/Propagation Loss) และผลของบริเวณเงา (shadowing) ไว้เป็นดังสมการที่ (4.2)

$$L = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_t - a(h_r) + (44.9 - 6.55 \log h_r) \log d \text{ (dB)} \quad (4.2)$$

โดยที่

L คือ ค่าการสูญเสียตามระยะทางของคลื่น (dB)

f_c คือค่าความถี่ของคลื่นพาห้ที่ส่ง

h_t คือค่าความสูงของเสาอากาศของเครื่องส่ง (m)

h_r คือค่าความสูงของเสาอากาศของเครื่องรับ (m)

$a(h_r)$ คือค่าแฟกเตอร์ความสัมพันธ์ (correlation factor) ระหว่างสถานีเคลื่อนที่กับสภาพ

ภูมิประเทศ

d คือค่าระยะทางจากเครื่องส่งถึงเครื่องรับ (m)

ค่า $a(h_r)$ จะมีค่าขึ้นกับขนาดของสภาพภูมิประเทศ ดังนี้
 สำหรับภูมิประเทศที่เป็นเมืองขนาดเล็ก จนถึง ขนาดกลาง ค่า $a(h_r)$ จะเป็นไปตามสมการที่ (4.3)

$$a(h_r) = (1.1 \log f_c - 0.7)h_r - (1.56 \log f_c - 0.8) \quad (4.3)$$

สำหรับภูมิประเทศที่เป็นเมืองขนาดใหญ่ ค่า $a(h_r)$ จะเป็นไปตามสมการที่ (4.4)

$$a(h_r) = \begin{cases} 8.29(\log 1.54 h_r)^2 - 1.1 : f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3.2(\log 11.75 h_r)^2 - 4.97 : f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases} \quad (4.4)$$

ซึ่งสำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาระบบที่เป็นเมืองขนาดเล็กจนถึงขนาดกลาง ดังนั้นค่า $a(h_r)$ จะเป็นไปตามสมการที่ (4.3)

จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) เมื่อทราบกำลังส่งของเครื่องส่งก็จะสามารถคำนวณหาค่ากำลังของสัญญาณที่มาถึงเครื่องรับได้ ซึ่งค่ากำลังที่มาถึงเครื่องรับก็คือค่าความแรงของสัญญาณนั่นเอง เมื่อพิจารณาสมการที่ (4.1) จะเห็นได้ว่าค่าความแรงของสัญญาณที่ป้อนเป็นข้อมูลเข้าของนิรอลเนตเวิร์กสามารถใช้ค่าการสูญเสียตามระยะทางป้อนเป็นข้อมูลเข้าแทนได้เช่นกันเนื่องจากค่าความแรงของสัญญาณที่เครื่องรับจะมีค่าเท่ากับค่ากำลังส่งลบด้วยค่าการสูญเสียตามระยะทาง ดังสมการที่ (4.3)

$$|P_r| = |P_s - L| = |L - P_s| \text{ dB} \quad (4.5)$$

จะเห็นได้จากสมการที่ (4.5) ว่าค่ากำลังส่งของสัญญาณจากเครื่องส่งจะเป็นค่าคงที่ เสมือนค่าออฟเซต หรือ ค่าไบแอสคงที่ที่บวกเข้ากับค่าการสูญเสียตามระยะทาง เมื่อไม่คิดผลของกำลังส่งซึ่งเป็นค่าคงที่ออกไป ค่าข้อมูลความแรงของสัญญาณที่เครื่องรับ รัับได้จะมีความสัมพันธ์อยู่กับค่าการสูญเสียตามระยะทาง ตามที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าของการสูญเสียตามระยะทางป้อนเป็นค่าข้อมูลเข้าของนิรอลเนตเวิร์กได้เช่นกัน

รายละเอียดของการจำลองค่าความแรงของสัญญาณตามวิธีการของ Hata ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีลักษณะดังนี้

- ค่าความถี่คลื่นพาห์ที่ส่ง = 900 MHz
- ค่าความสูงของเสาอากาศของสถานีฐาน = 200 m.
- ค่าความสูงของเสาอากาศของสถานีเคลื่อนที่ = 2 m. (รวมความสูงของผู้ใช้)
- พิจารณาระบบที่เป็นเมืองขนาดเล็กจนถึงขนาดกลาง

4.2.2 การจำลองค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณ

การจำลองค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณจะจำลองจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นกับระยะทางที่คลื่นเดินทางไปได้ ตามสมการที่ (4.6)

$$S_i = c \cdot TOA_i \quad (4.6)$$

เมื่อ S_i คือ ระยะทางจากสถานีเคลื่อนที่ถึงสถานีฐานที่ i

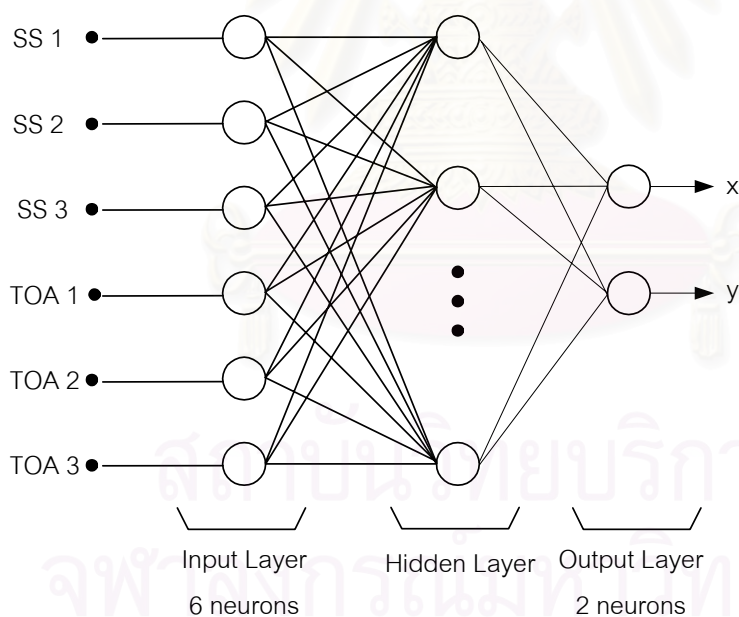
c คือ ค่าความเร็วของคลื่นซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความเร็วของแสง

TOA_i คือ ค่า เวลาการมาถึงของสัญญาณที่สถานีฐานที่ i รับได้

ทั้งนี้สำหรับระบบ CDMA หรือ GSM ค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณที่สถานีฐานทำการวัด จะได้จากการหาค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross Correlation) ของข้อมูลของสัญญาณนั่นเอง

4.3 แบบจำลองนิเวรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้

สำหรับกรณีของระบบที่เป็นไปตามหัวข้อ 4.1.1-4.1.5 ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ทดสอบสมมุติฐานในวิทยานิพนธ์นี้จะออกแบบให้นิเวรอลเน็ตเวิร์กมีลักษณะดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 รูปแบบของนิเวรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้

โดยการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กแบบ 3-layer perceptron ซึ่งเป็นนิวรอลเน็ตเวิร์กที่ง่ายต่อการออกแบบ และ มีความซับซ้อนน้อยที่สุด อีกทั้งยังใช้เวลาในการฝึกกรวดเร็วกว่า (จำนวน epoch น้อยกว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบนิวรอลเน็ตเวิร์กชนิด 4-layer perceptron และ 5-layer perceptron ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิจัยหาจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสมในการใช้งาน และ ให้ค่าผลลัพธ์ของการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ ที่มีค่าความถูกต้องสูงกว่าข้อกำหนดของ FCC

สำหรับนิวรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้จะมีลักษณะดังนี้

- นิวรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบเป็นชนิด 3-layer perceptron (3-layer feedforward network)
- จำนวนนิวรอนในชั้นข้อมูลเข้า 6 นิวรอน (12 นิวรอน สำหรับระบบหลายสถานีฐาน) ซึ่งมีค่าเท่ากับมิติของค่าข้อมูลเข้าที่ป้อนให้กับนิวรอลเน็ตเวิร์ก อันได้แก่ ค่าข้อมูลความแรงของสัญญาณที่สถานีฐานที่ 1, 2 และ 3 รับได้ และ ค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณที่สถานีฐานที่ 1, 2 และ 3 วัดค่าได้ (ในกรณีหลายสถานีฐานจะเพิ่มค่าข้อมูลเข้าของ พิกัดค่า (x,y) ของสถานีฐานที่ 1,2 และ 3 เข้าไปด้วย)
- จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นแปรค่าได้จากการทดลอง (Trial and Error)
- จำนวนนิวรอนในชั้นขาออก 2 นิวรอน ตามมิติของข้อมูลขาออก (x,y)
- ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นขาเข้าและขาออกในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเชิงเส้น ส่วนฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อนเร้นจะกำหนดเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนไฮเพอร์โบลิกแทนเจนท์ซิกมอยด์ ซึ่งเป็นการกำหนดโครงสร้างของนิวรอลเน็ตเวิร์กตามลักษณะของนิวรอลเน็ตเวิร์กชนิดมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอน

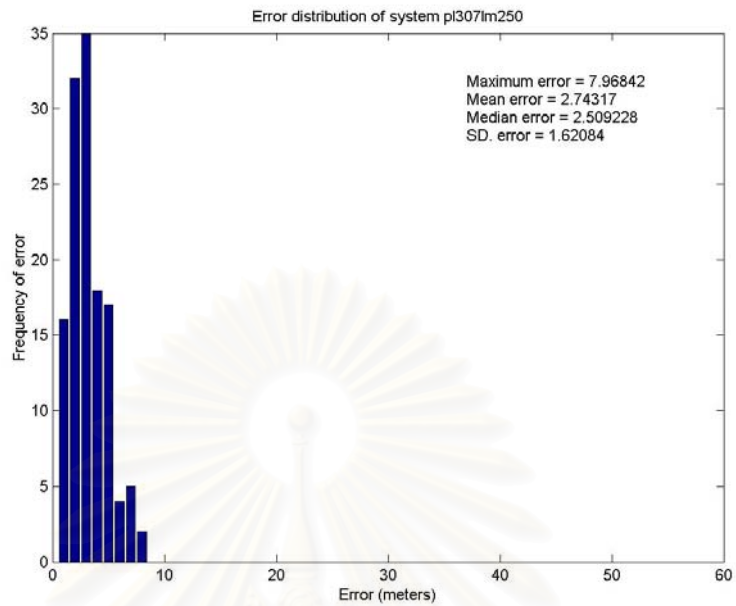
4.4 ผลการทดสอบ

สำหรับผลการทดสอบระบบจะแบ่งตามกรณีต่าง ๆ ตามหัวข้อที่ 4.1.1 ถึง 4.1.5 ดังนี้

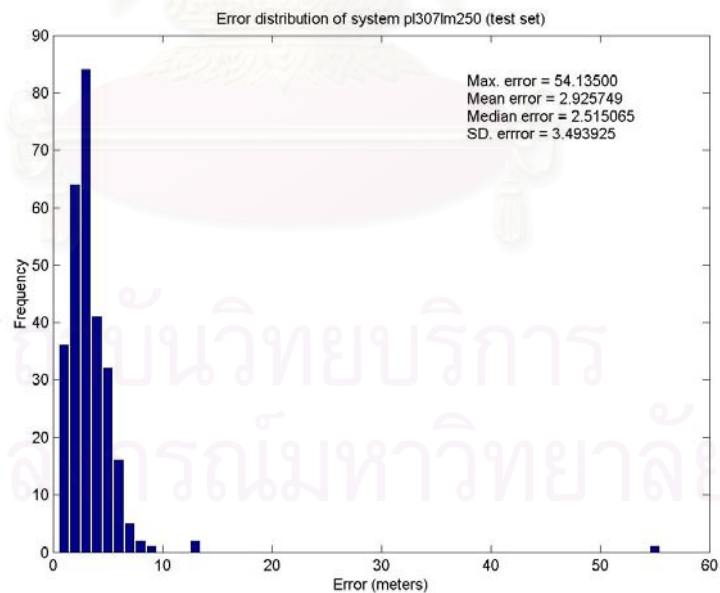
4.4.1 กรณีต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบสมมุติฐาน

สำหรับกรณีตามหัวข้อที่ 4.1.1 ในวิทยานิพนธ์นี้จะออกแบบนิวรอลเน็ตเวิร์กตามหัวข้อที่ 4.3 โดยทดลองออกแบบจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นเริ่มต้นจำนวน 7 นิวรอน จะได้ผลของการฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์ก และ การทดสอบนิวรอลเน็ตเวิร์กที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 7 นิวรอน ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

สำหรับข้อมูลที่ใช้เป็นชุดฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กกรณีนี้จะใช้ข้อมูลจำนวน 129 ค่าเป็นค่าข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่นิวรอลเน็ตเวิร์ก และในส่วนของ การทดสอบนิวรอลเน็ตเวิร์กจะใช้ข้อมูลที่สร้างขึ้นมาอีกชุดหนึ่ง ซึ่งมีจำนวน 284 ค่าสำหรับทำการทดสอบ

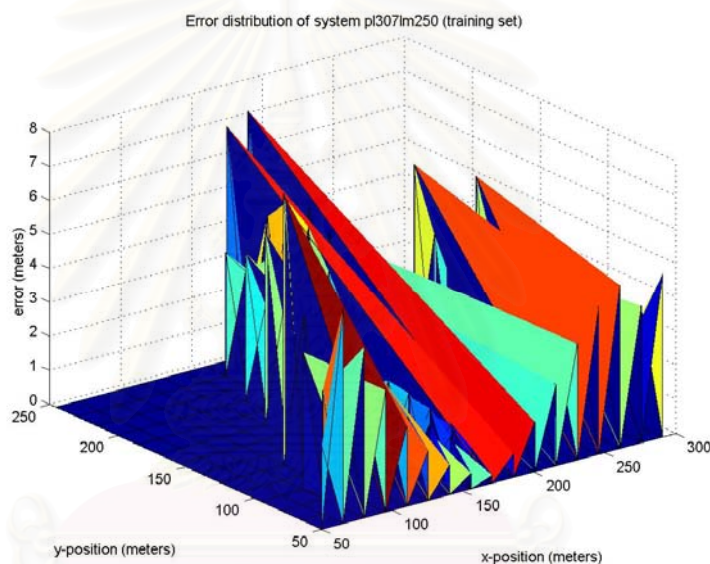


รูปที่ 4.7 ผลของการฝึกนิรอลเน็ตเวิร์กที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้น 7 นิรอน



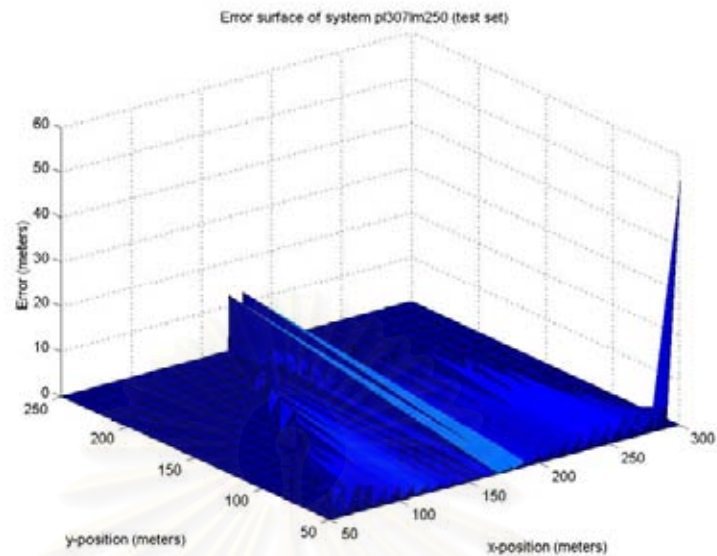
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบนิรอลเน็ตเวิร์กที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้น 7 นิรอน

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบสามารถให้ค่าความผิดพลาดที่ผู้เข้าเป็นที่น่าพอใจ โดยสำหรับข้อมูลชุดฝึกจะมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยจากการประมาณอยู่ที่ 2.74 เมตร เมื่อทำการทดสอบนิวรอลเน็ตเวิร์กโดยชุดข้อมูลที่ใช้ทำการทดสอบพบว่า จากรูปที่ 4.8 ค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าจะมีค่าอยู่ที่ 2.925 เมตร ซึ่งจะมีค่ามากกว่าชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกอยู่เล็กน้อย เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วจะสามารถทดสอบสมมุติฐานได้ว่าการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กมาทำการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่นั้นสามารถทำได้ และ ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าที่ FCC ได้กำหนดไว้ รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงพื้นผิวของค่าความผิดพลาด (Error Surface) ตามระยะทาง (x,y)



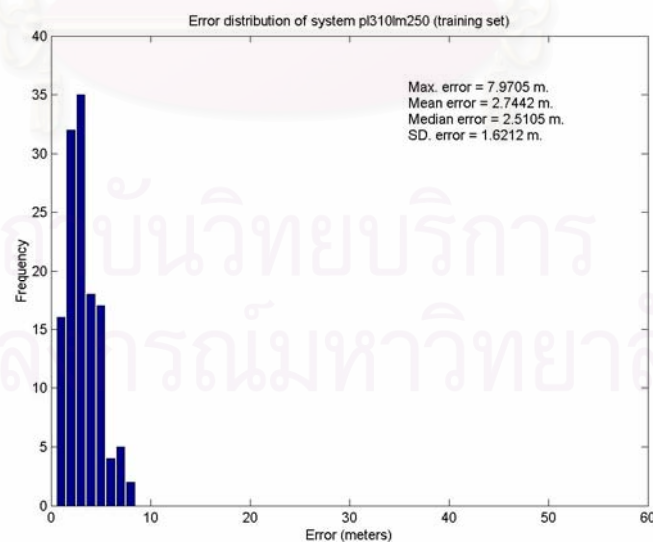
รูปที่ 4.9 พื้นผิวค่าความผิดพลาดของชุดฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กโดย
ใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 7 นิวรอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

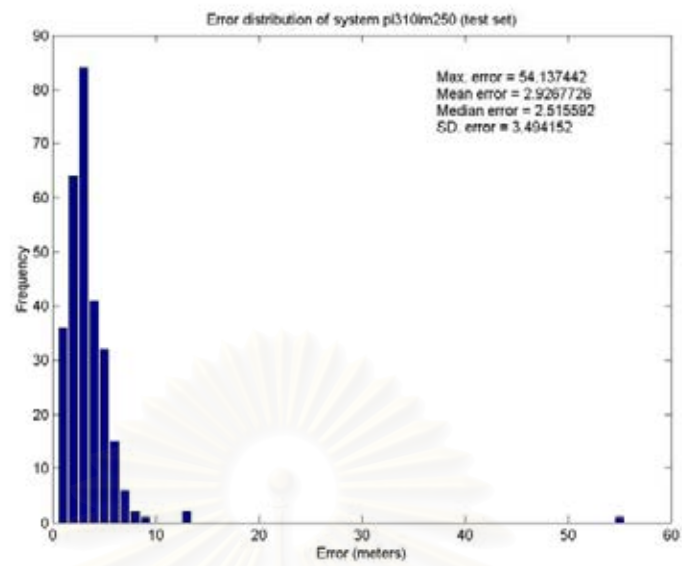


รูปที่ 4.10 พื้นผิวค่าความผิดพลาดของชุดข้อมูลทดสอบนิรอลเนตเวิร์ก
โดยใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 7 นิวรอน

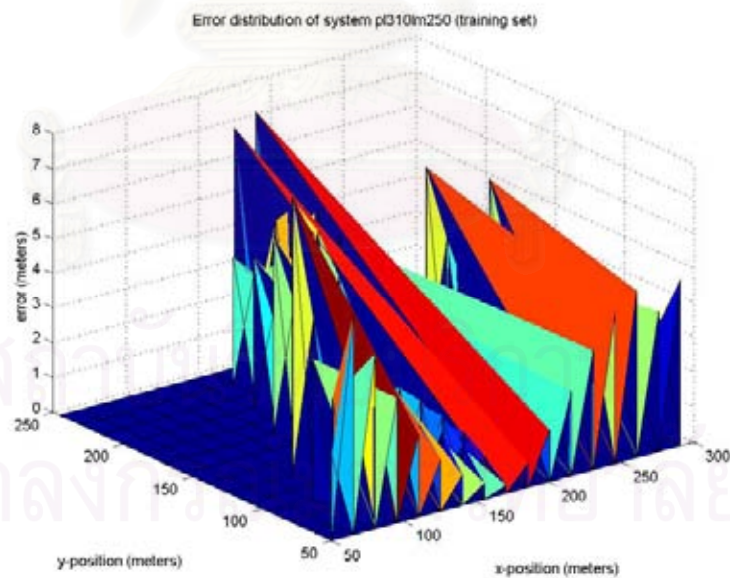
จากนั้นจะทดลองเพิ่มจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นให้มีค่ามากขึ้นเพื่อสังเกตว่าจะสามารถให้ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าตำแหน่งที่ดีขึ้นได้หรือไม่ โดยการเพิ่มจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นเป็น 10 นิวรอน ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



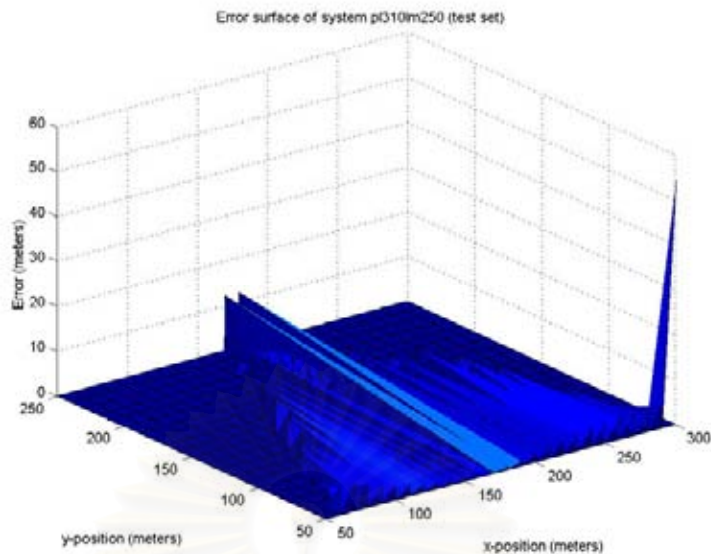
รูปที่ 4.11 การกระจายของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งจากชุดข้อมูลฝึก
สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 10 นิวรอน



รูปที่ 4.12 การกระจายของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งจากชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 10 นิวรอน



รูปที่ 4.13 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งจากชุดข้อมูลฝึก สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 10 นิวรอน



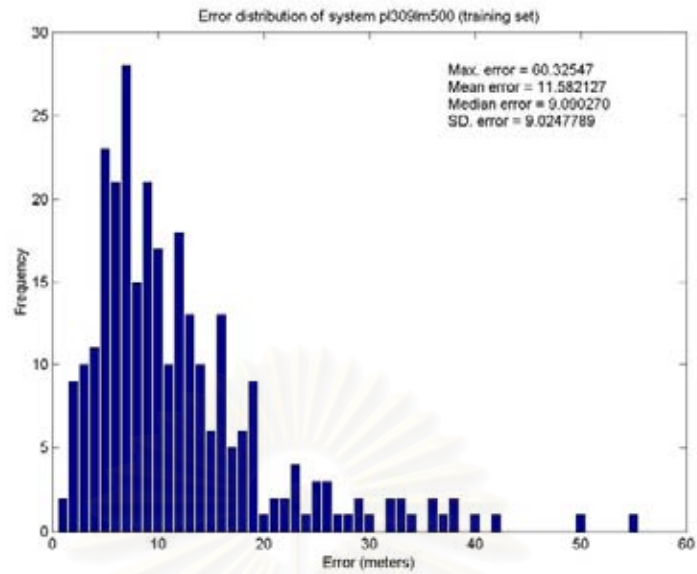
รูปที่ 4.14 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าตำแหน่งจากชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 10 นิวรอน

จากรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14 จะเห็นได้ว่าการใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 10 นิวรอนจะให้ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่ดีกว่าระบบที่ใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจำนวน 7 นิวรอนไม่มากนัก

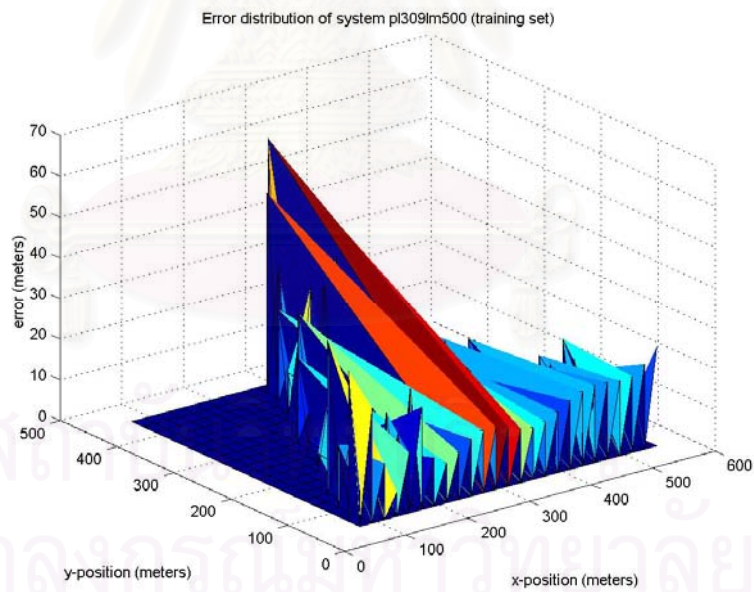
ดังนั้นสำหรับระบบที่พิจารณาตามข้อที่ 4.1.1 จะสรุปได้ว่าจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสมจึงควรมีค่าน้อยเท่ากับ 7 นิวรอน และ ค่าความถูกต้องจากการประมาณค่าของนิวรอลเน็ตเวิร์กที่ได้สามารถรองรับข้อกำหนดระยะเวลาของ FCC อีกด้วย

4.4.2 กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 3 สถานีฐาน

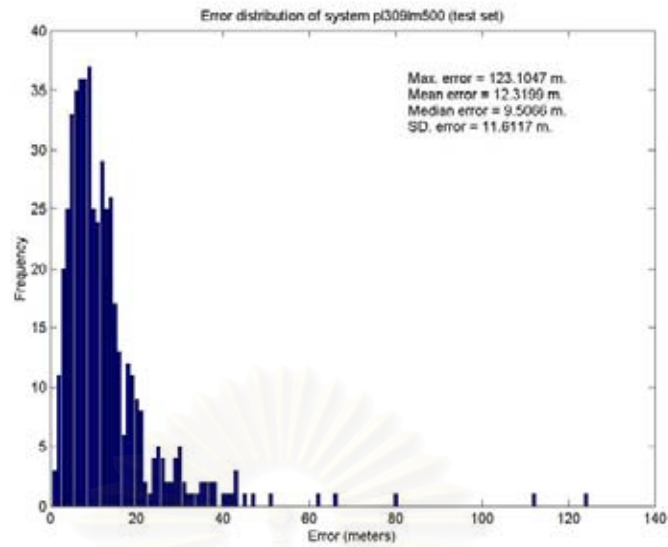
สำหรับกรณีนี้ (กรณีตามหัวข้อ 4.1.2) จากการทดลองออกแบบจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความผิดพลาดจากการประมาณมีค่าอยู่เข้าตามข้อกำหนดของ FCC จะใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นอย่างน้อยที่สุดจำนวน 9 นิวรอน สำหรับชุดข้อมูลฝึกในกรณีนี้จะมีจำนวน 283 ค่า และ ชุดทดสอบอีกหนึ่งชุดจำนวน 497 ค่า ซึ่งผลลัพธ์ของการออกแบบนิวรอลเน็ตเวิร์กตามหัวข้อที่ 4.3 และ ใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 9 นิวรอน จะเป็นดังรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



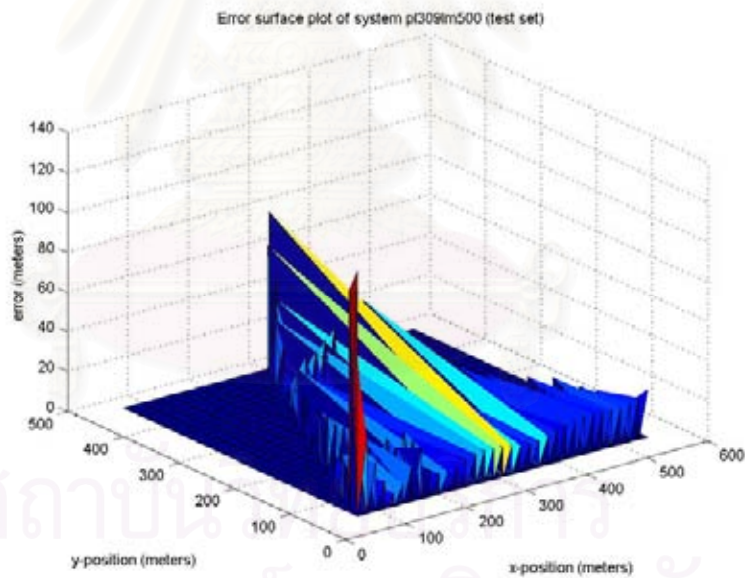
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าจากชุดข้อมูลฝึก สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 9 นิวรอน



รูปที่ 4.16 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งของชุดข้อมูลฝึก สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 9 นิวรอน



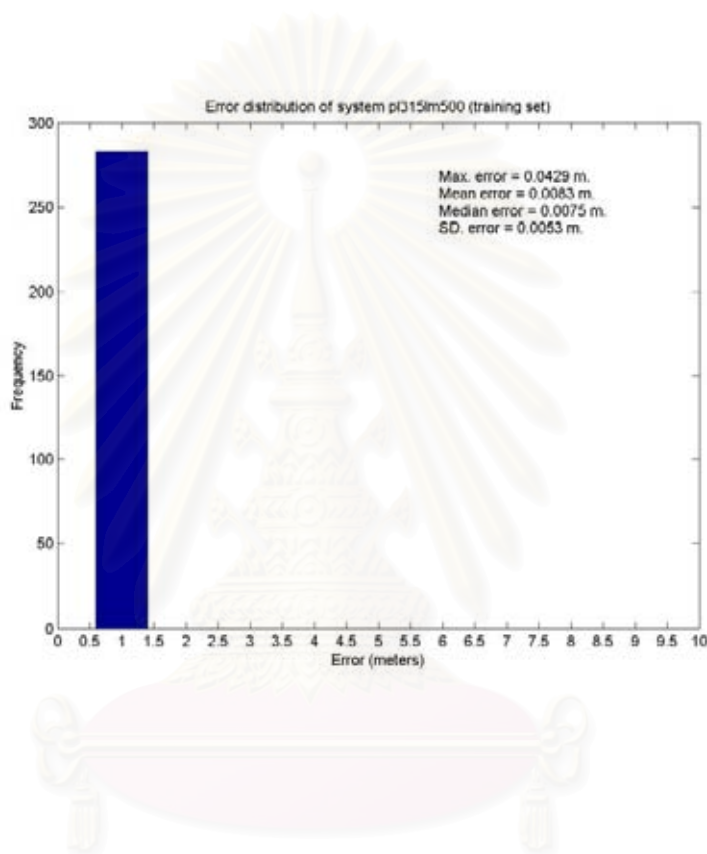
รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าจากชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 9 นิวรอน



รูปที่ 4.18 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งของชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 9 นิวรอน

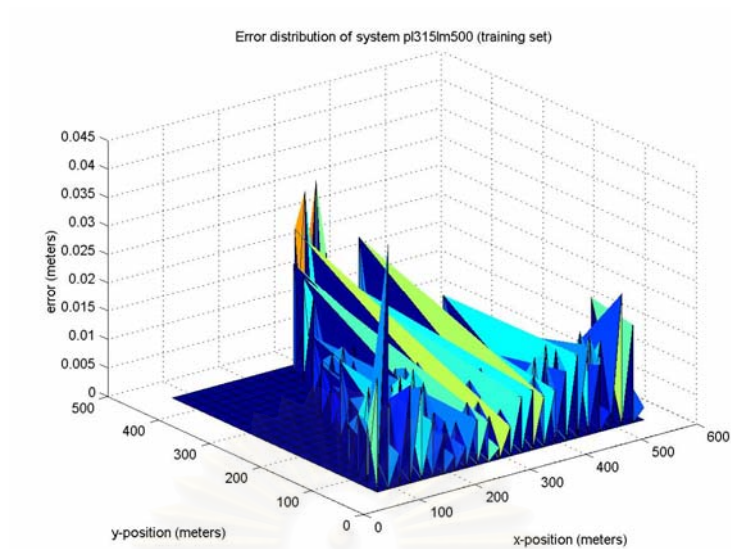
จากรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17 และ 4.18 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของการประมาณมีค่าตรงตามที่ FCC ได้กำหนดไว้ ส่วนค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดที่ได้จากชุดข้อมูลทดสอบจะมีค่าอยู่ที่ 12 เมตร ซึ่งจะสอดคล้องกับข้อกำหนดระยะยาวของ FCC

เมื่อทำการทดลองออกแบบนิวรอลเน็ตเวิร์กให้มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นเพิ่มขึ้นเป็น 15 นิวรอน จะพบว่า นิวรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบให้ผลเป็นดังรูปที่ 4.19, 4.20, 4.21 และ 4.22

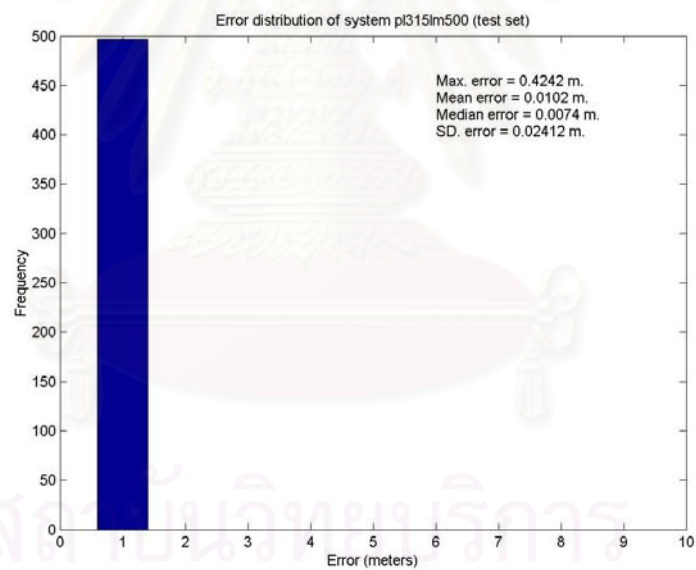


รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าจากชุดข้อมูลฝึกสำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 15 นิวรอน

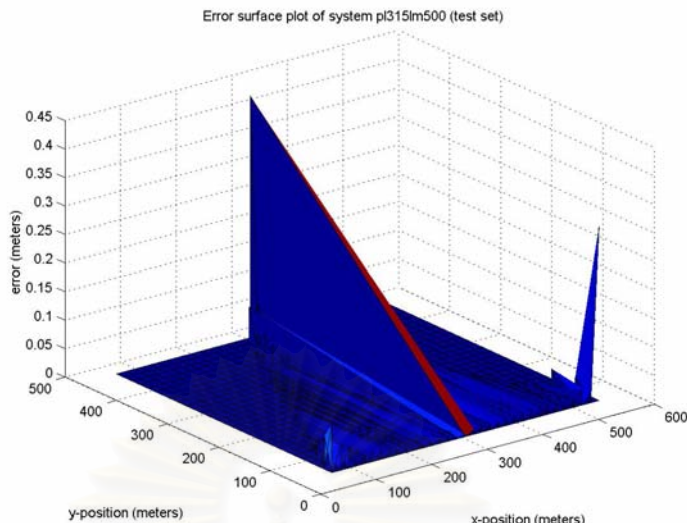
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งของชุดข้อมูลฝึก
สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเริ่ม 15 นิวรอน



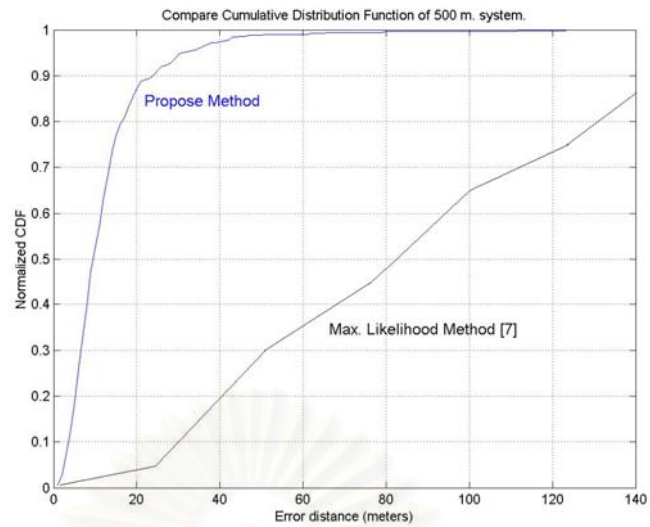
รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าจากชุดข้อมูลทดสอบ
สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเริ่ม 15 นิวรอน



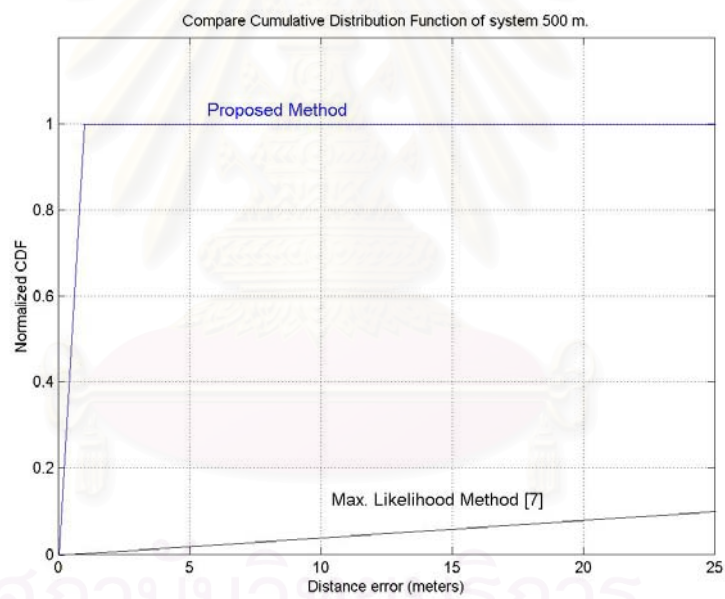
รูปที่ 4.22 พื้นผิวของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่งของชุดข้อมูลทดสอบ สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเริ่ม 15 นิวรอน

จากรูปที่ 4.19, 4.20, 4.21 และ 4.22 จะสังเกตเห็นว่าค่าผิดพลาดของการประมาณค่าของนิวรอนเน็ตเวิร์กมีค่าต่ำมาก โดยค่าทั้งหมดอยู่ในช่วงไม่เกิน 1 เมตร ทั้งนี้ค่าผลลัพธ์จากการฝึกนิวรอนเน็ตเวิร์กจะดีหรือไม่ดี ขึ้นกับการตั้งค่าเริ่มต้นของเมตริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักในกระบวนการฝึกนิวรอนเน็ตเวิร์กที่กล่าวมาในบทที่ 3 ทั้งนี้การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการฝึกของ Levenberg Marquardt ด้วย ซึ่งผลลัพธ์ของนิวรอนเน็ตเวิร์กที่ออกแบบโดยมีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเริ่ม 15 นิวรอน จะให้ผลการประมาณค่าที่ดีมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอให้ใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเริ่มที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมกรณี 4.1.2 จำนวน 15 นิวรอน

เมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้นิวรอนเน็ตเวิร์กในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ กับวิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่โดยใช้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นจริงสูงสุด [8] ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณ โดยใช้วิธีการทางสถิติและการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยตรงที่สภาพแวดล้อมเดียวกัน พบว่าผลของการประมาณค่าเป็นดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการประมาณค่าด้วยวิธีการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กกับวิธีการ Maximum Likelihood Method

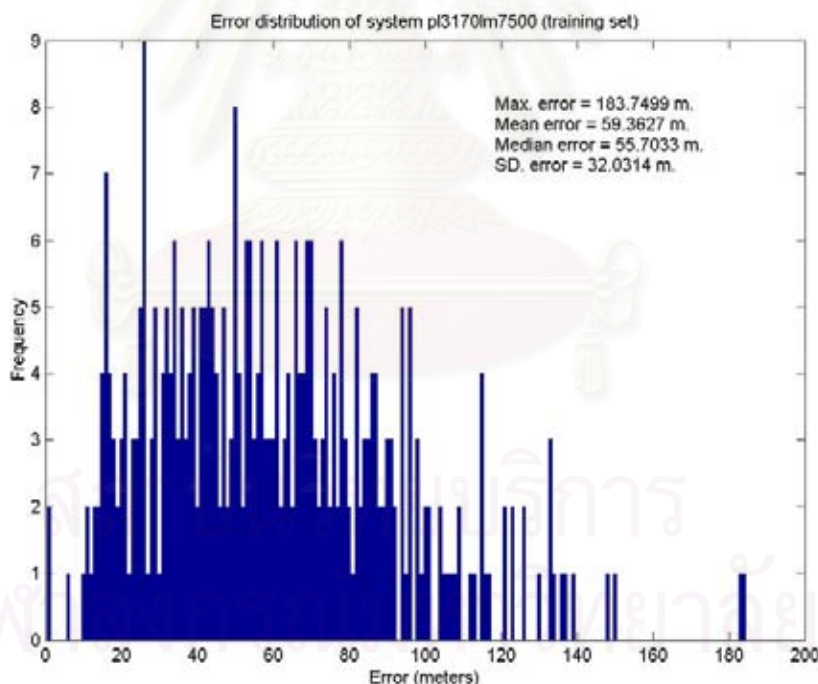


รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการประมาณค่าด้วยวิธีการใช้นิวรอลเน็ตเวิร์กกับวิธีการ Maximum Likelihood Method

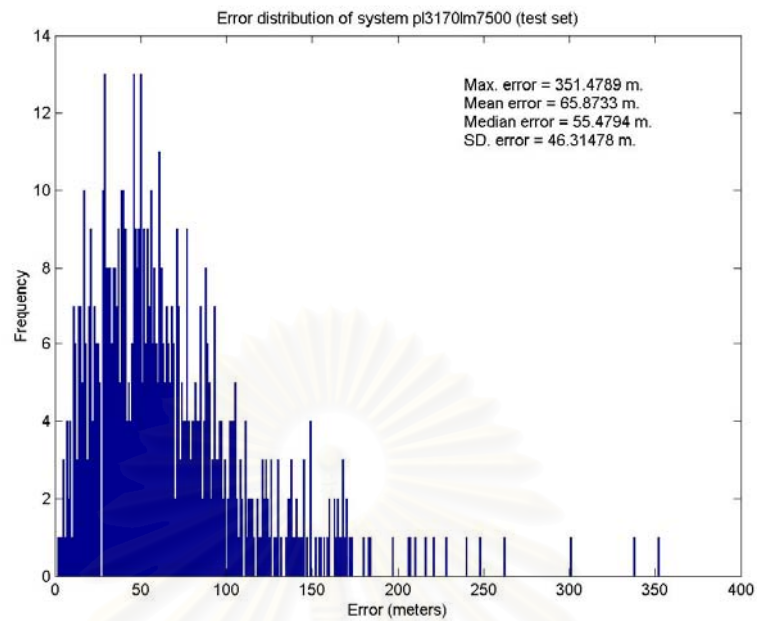
ในรูปที่ 4.23 และ 4.24 สังกเกตว่าด้วยการออกแบบนิรอลเนตเวิร์กโดยใช้จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้น 9 และ 15 นิรอน ตามลำดับ ต่างก็ให้ผลลัพธ์ของการประมาณค่าตำแหน่งที่ดีกว่าวิธีการคำนวณโดยตรงทางคณิตศาสตร์ ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.4.3 กรณีครอบคลุมพื้นที่แคบ 7 สถานีฐาน

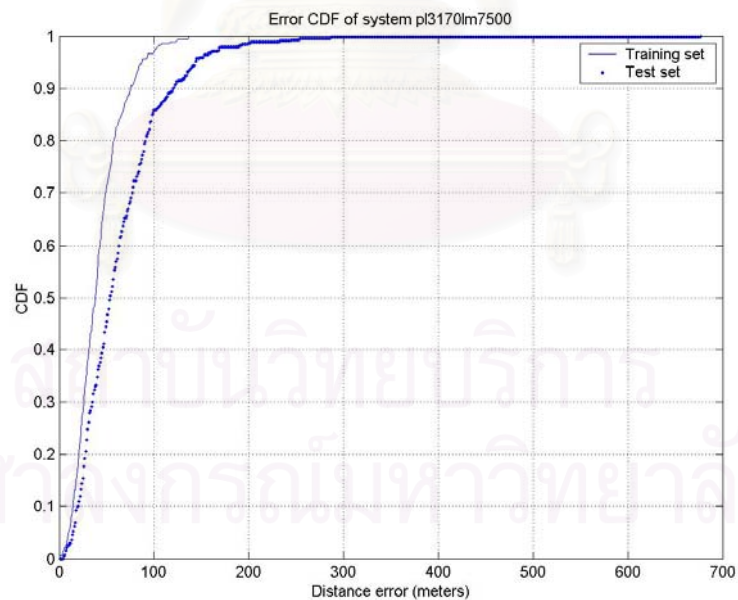
ต่อไปนี้จะพิจารณาระบบตามกรณีที่กำลังกล่าวมาในหัวข้อที่ 4.1.3 โดยจะใช้วิธีการออกแบบนิรอลเนตเวิร์กตามหัวข้อที่ 4.3 ชุดข้อมูลที่ใช้ทำการฝึกนิรอลเนตเวิร์กมีจำนวน 357 ค่า และชุดข้อมูลที่ทดสอบมีจำนวน 438 ค่า ตามลำดับ การออกแบบนิรอลเนตเวิร์กสำหรับกรณี 7 สถานีฐานจะปรับค่าข้อมูลเข้าโดยเพิ่มค่าของตำแหน่งที่ตั้ง (x,y) ของสถานีฐาน 3 สถานีที่รับสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ขณะนั้นเข้าไปด้วย จากการทดลองออกแบบจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสมพบว่า จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นที่เริ่มทำให้เกิดการลู่เข้าของผลลัพธ์สู่ค่าที่ต้องการตามที่ FCC กำหนดไว้มีค่าเท่ากับ 170 นิรอน ซึ่งผลลัพธ์ของนิรอลเนตเวิร์กที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้น 170 นิรอนเป็นดังรูปที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 การกระจายของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าของชุดข้อมูลฝึกสำหรับระบบที่มีจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้น 170 นิรอน



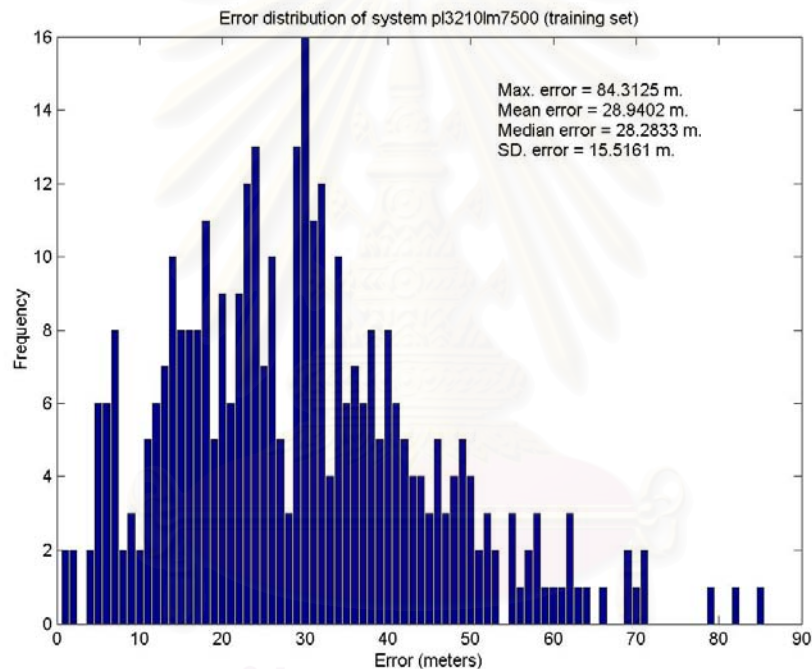
รูปที่ 4.26 การกระจายของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าของชุดข้อมูลทดสอบ
 สำหรับระบบที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 170 นิวรอน



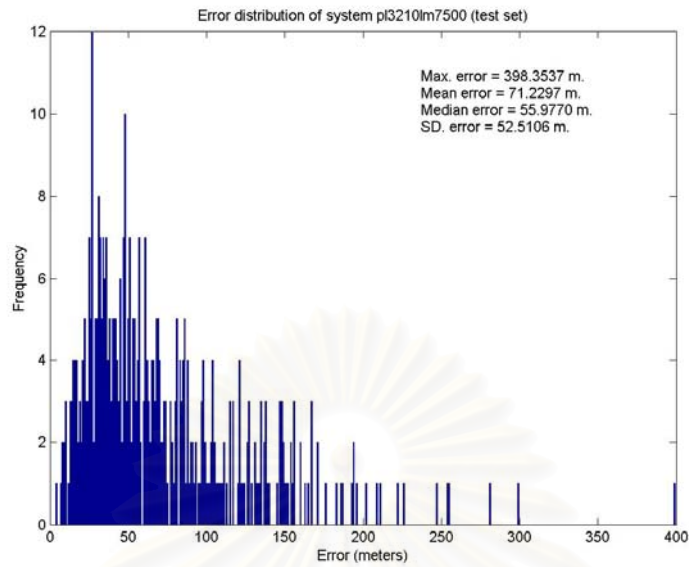
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบค่า cdf ของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่ง
 ของชุดข้อมูลฝึกกับชุดข้อมูลทดสอบสำหรับระบบที่มีจำนวน
 นิวรอน 170 นิวรอนในชั้นซ่อนเร้น

จากรูปที่ 4.25-4.27 พบว่าผลลัพธ์จากการประมาณมีค่าที่ดีกว่าที่ข้อกำหนดของ FCC ได้กำหนดไว้ โดยนิเวศน์เน็ตเวิร์กที่มีจำนวนนิเวศน์ในชั้นชอนเร็น 170 นิเวศน์ มีค่าความถูกต้องของการประมาณอยู่ที่ 91.3 % ของจำนวนครั้งของการประมาณค่าในระยะความผิดพลาด 125 เมตร ซึ่งดีกว่าที่ FCC ได้กำหนดไว้ และระบบนี้ให้ค่าความถูกต้อง 68.42 % ของจำนวนครั้งของการประมาณค่า ในระยะความผิดพลาดอยู่ที่ 75 เมตร ตามลำดับ

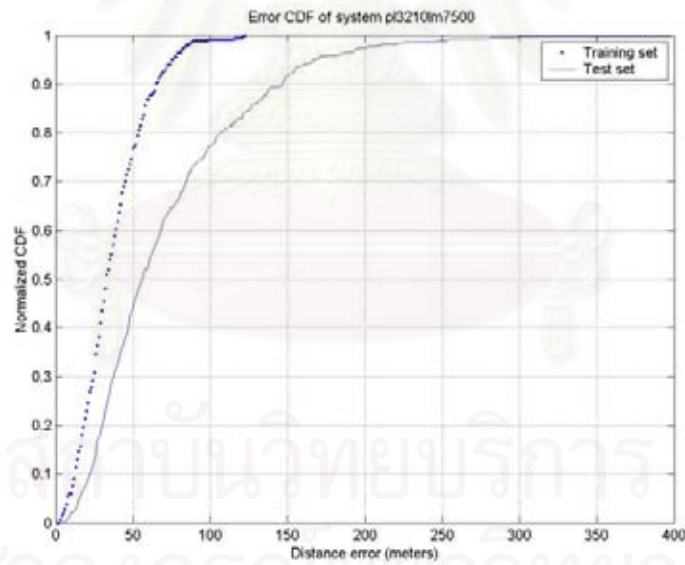
เมื่อทดลองเพิ่มจำนวนนิเวศน์ในชั้นชอนเร็นให้มากขึ้นเป็น 210 นิเวศน์ จะได้ผลดังรูปที่ 4.28-4.30



รูปที่ 4.28 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลฝึกของระบบที่มีจำนวนนิเวศน์ในชั้นชอนเร็น 210 นิเวศน์



รูปที่ 4.29 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลทดสอบของระบบ
 ที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 210 นิวรอน



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบค่า cdf ของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าตำแหน่ง
 ของชุดข้อมูลฝึกกับชุดข้อมูลทดสอบสำหรับระบบที่มีจำนวน
 นิวรอน 210 นิวรอนในชั้นซ่อนเร้น

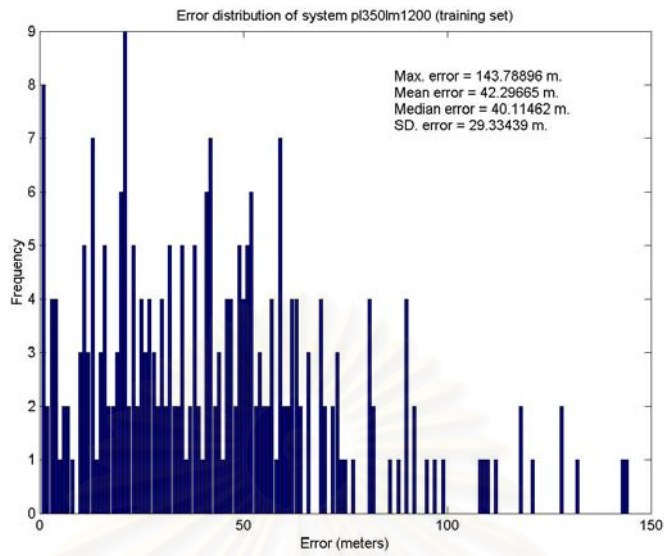
จากรูปที่ 4.28-4.30 พบว่า สำหรับชุดข้อมูลฝึก การใช้จำนวนนิรอนเพิ่มขึ้นเป็น 210 นิรอนจะให้ค่าการประมาณค่าตำแหน่งที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณาจากชุดข้อมูลทดสอบพบว่าค่าไม่แตกต่างกับระบบที่ออกแบบให้ใช้จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้น 170 นิรอน มากนัก ดังนั้นจึงพอจะสรุปได้ว่าจำนวนนิรอนที่เหมาะสมสำหรับระบบสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ที่พิจารณาในกรณีนี้ ควรจะใช้ค่าจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นอย่างน้อย 170 นิรอนขึ้นไป ส่วนการใช้จำนวนนิรอนที่น้อยกว่านี้ จากการทดสอบพบว่าไม่สามารถให้ค่าความถูกต้องที่ยอมรับได้

4.4.4 กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 3 สถานีฐาน

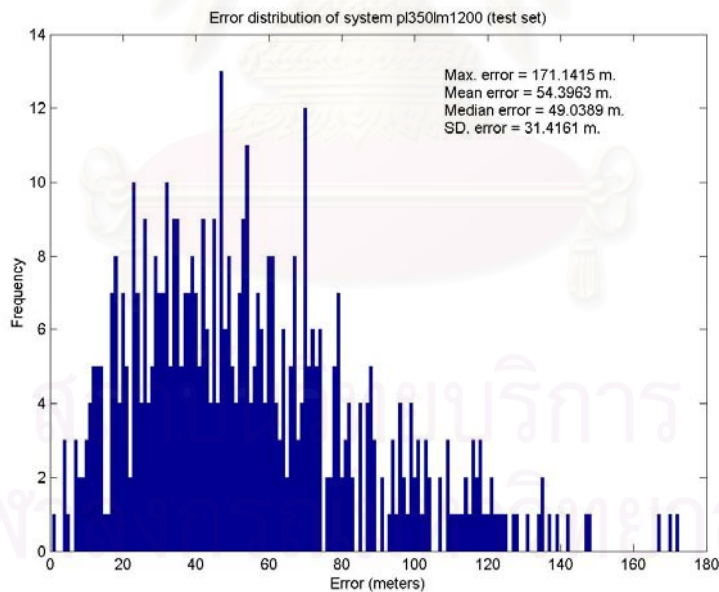
แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่สำหรับกรณีนี้จะเป็นไปตามหัวข้อที่ 4.1.4 ดังที่กล่าวมาแล้ว ในกรณีนี้จะใช้ข้อมูลชุดฝึกนิรอลเนตเวิร์กจำนวน 259 ค่า และ ข้อมูลชุดทดสอบระบบ จำนวน 522 ค่า ตามลำดับ

จากการทดลอง จำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสมที่ก่อให้เกิดการลู่เข้าของค่าความผิดพลาดที่ดีกว่าที่ FCC ได้กำหนดนั้น จะต้องใช้จำนวน นิรอนในชั้นซ่อนเร้นอย่างน้อย 50 นิรอน และสำหรับกรณีนี้ได้ออกแบบจำนวนนิรอนในชั้นซ่อนเร้นไว้ 50 นิรอน, 60นิรอน และ 100 นิรอน เพื่อทำการพิจารณาผลของค่าความผิดพลาดที่ได้จากนิรอลเนตเวิร์กที่ทำการออกแบบขึ้น และ เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลของการใช้นิรอลเนตเวิร์กในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ จากค่าของ มุมการมาถึงของสัญญาณ และ ค่าเวลาการมาถึงของสัญญาณที่มีผู้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ ที่สภาวะแวดล้อมเดียวกัน [15]

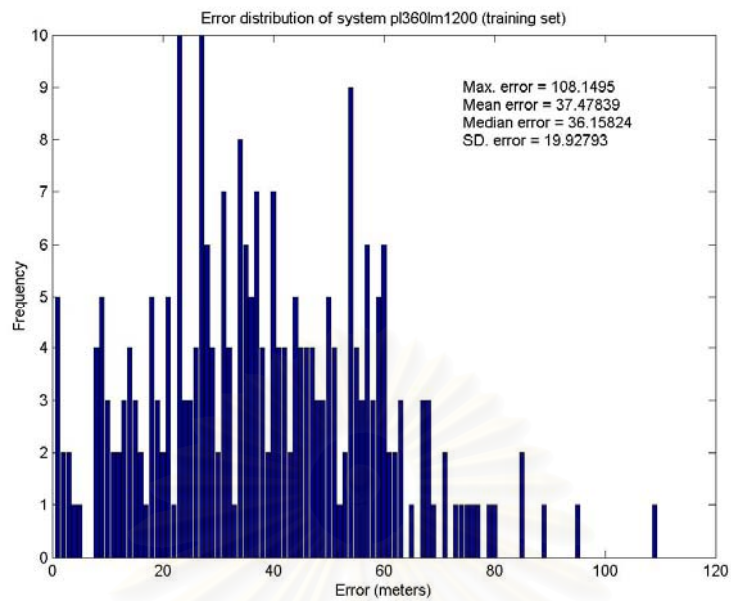
ผลการทดสอบนิวรอลเน็ตเวิร์ก จะเป็นไปตามรูปที่ 4.31-4.37 ตามลำดับ



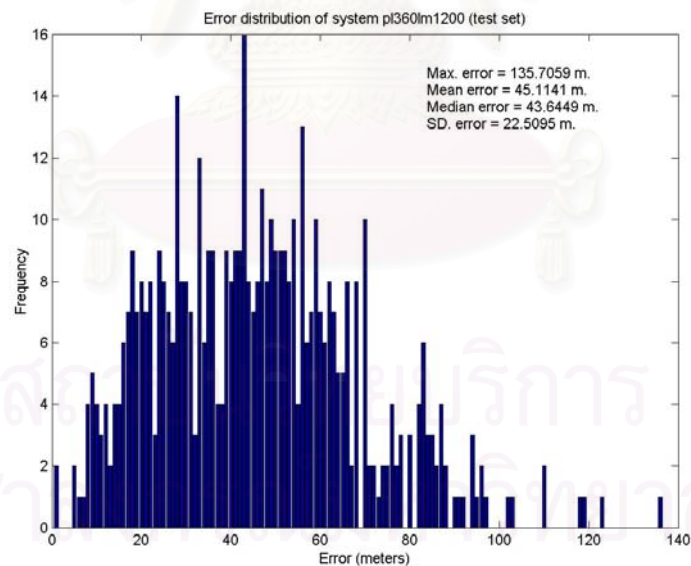
รูปที่ 4.31 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลฝึกของระบบ
ที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเริ่ม 50 นิวรอน



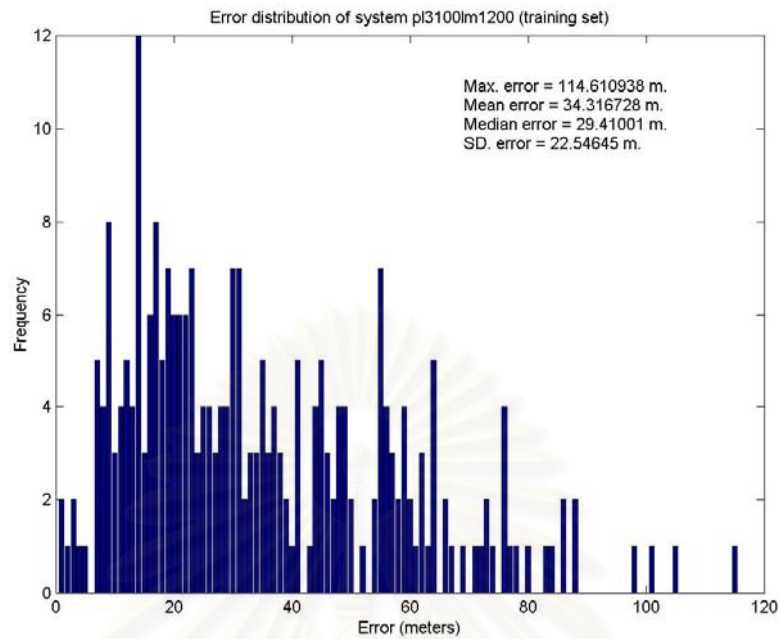
รูปที่ 4.32 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลทดสอบของระบบ
ที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเริ่ม 50 นิวรอน



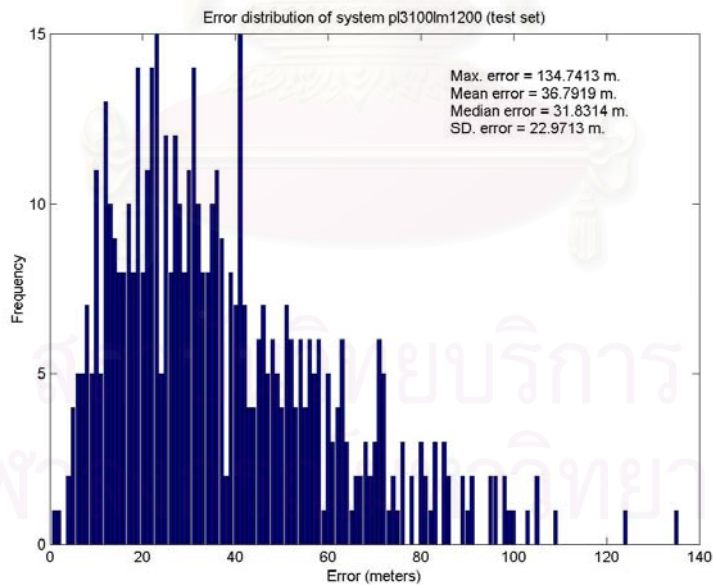
รูปที่ 4.33 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลฝึกของระบบ
 ที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 60 นิวรอน



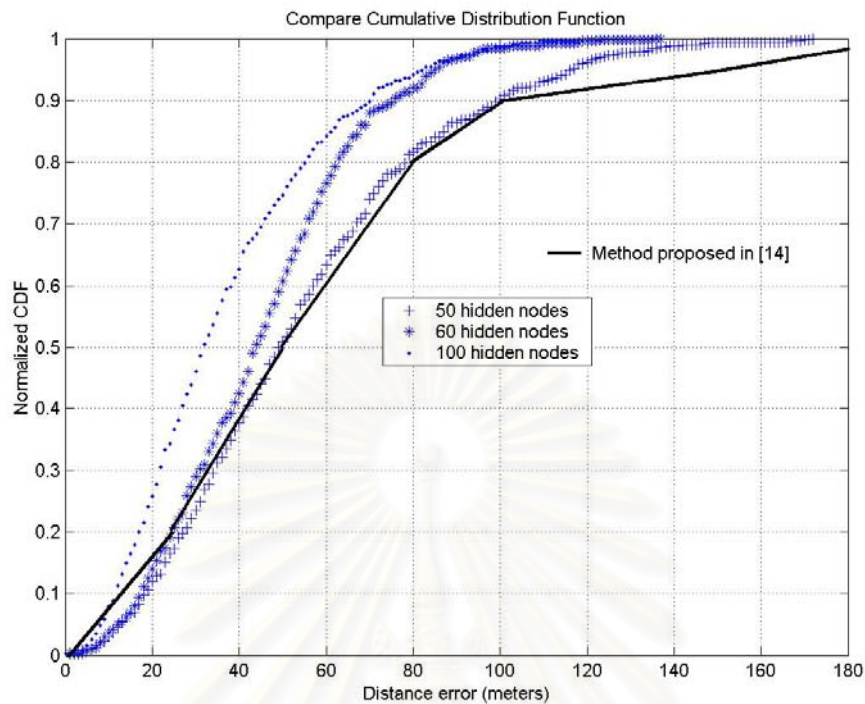
รูปที่ 4.34 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลทดสอบของระบบ
 ที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 60 นิวรอน



รูปที่ 4.35 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลฝึกของระบบ
 ที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 100 นิวรอน



รูปที่ 4.36 การกระจายของค่าความผิดพลาดสำหรับชุดข้อมูลทดสอบของระบบ
 ที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 100 นิวรอน



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่า cdf ของนิวโรนเน็ตเวิร์กที่ออกแบบให้มีจำนวนนิวโรน
ในชั้นซ่อนเร้นที่แตกต่างกับวิธีที่เสนอใน [15]

จากรูปที่ 4.31-4.37 เห็นได้ว่านิวโรนเน็ตเวิร์กที่ออกแบบให้ผลลัพธ์ในการประมาณค่าตำแหน่งที่มีความถูกต้องสูงขึ้น เมื่อ ใช้จำนวนนิวโรนในชั้นซ่อนเร้นเพิ่มมากขึ้น ในรูปที่ 4.37 แสดงค่า cdf ของค่าความผิดพลาดจากชุดข้อมูลทดสอบของแต่ละวิธีการ พบว่าวิธีการที่นำเสนอจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า หรือ เท่ากับ วิธีที่ได้มีการนำเสนอไปใน [15]

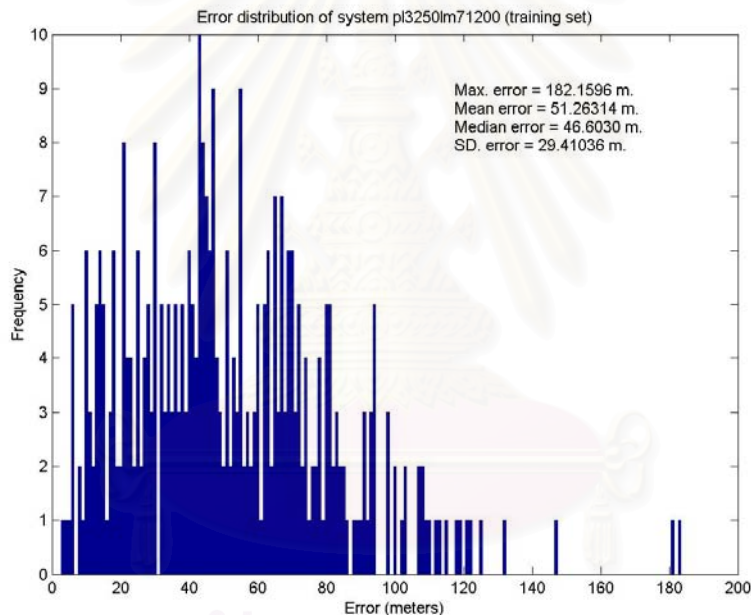
สำหรับจำนวนนิวโรนที่เหมาะสมในกรณีนี้นั้นควรมีค่าน้อยที่สุด 50 นิวโรนขึ้นไปตามเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

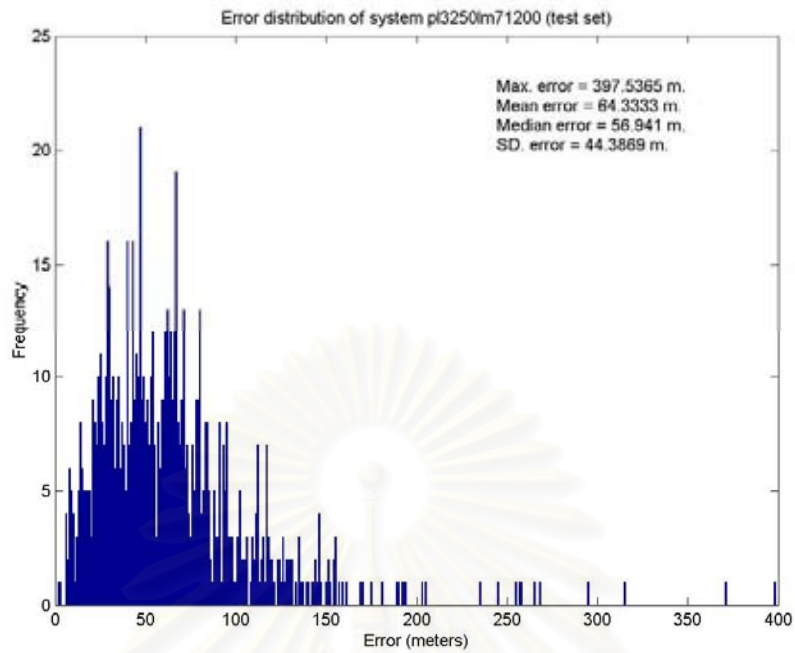
4.4.5 กรณีครอบคลุมพื้นที่กว้าง 7 สถานีฐาน

สำหรับกรณีนี้จะเป็นกรณีสุดท้ายที่จะพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ระบบที่พิจารณาจะเป็นระบบที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.5 สำหรับกรณีนี้จะใช้ชุดข้อมูลในการฝึกนิวโรลเน็ตเวิร์กจำนวน 364 ค่า และ ชุดข้อมูลในการทดสอบนิวโรลเน็ตเวิร์กจำนวน 841 ค่า

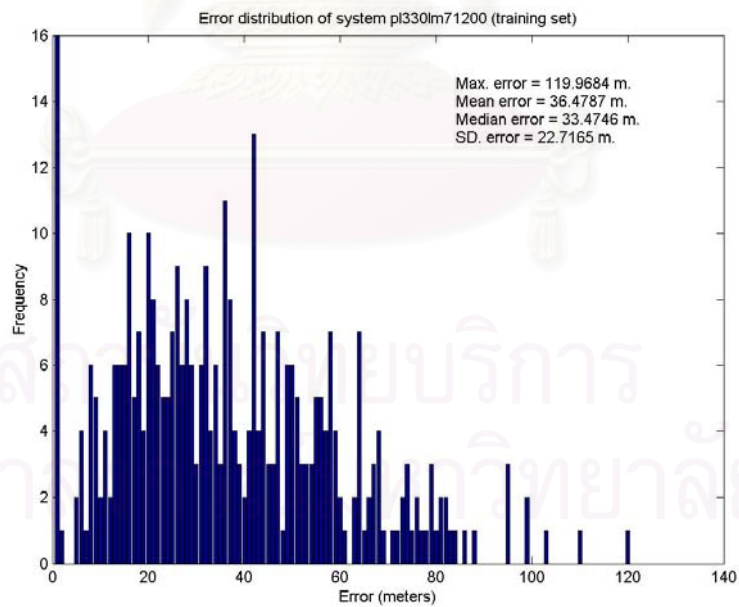
จากการทดลองออกแบบนิวโรลเน็ตเวิร์กพบว่าจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นน้อยที่สุดที่ก่อให้เกิดการลู่เข้าของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่า มีค่า 250 นิวรอน และ จะออกแบบนิวโรลเน็ตเวิร์กอีกชุดที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นที่มากขึ้น คือ 300 นิวรอนเพื่อทำการเปรียบเทียบ โดยผลการทดลองจะเป็นไปตามรูปที่ 4.38-4.42 ตามลำดับดังนี้



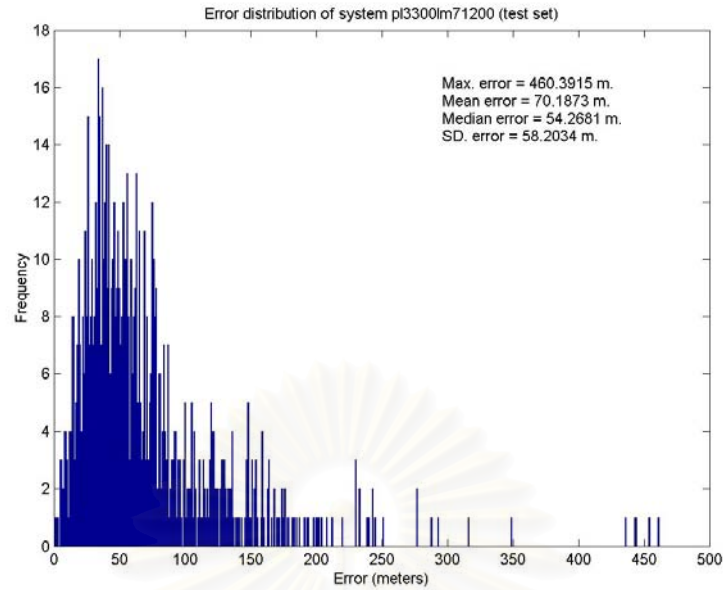
รูปที่ 4.38 การกระจายของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าสำหรับชุดข้อมูลฝึก
เมื่อจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นเป็น 250 นิวรอน



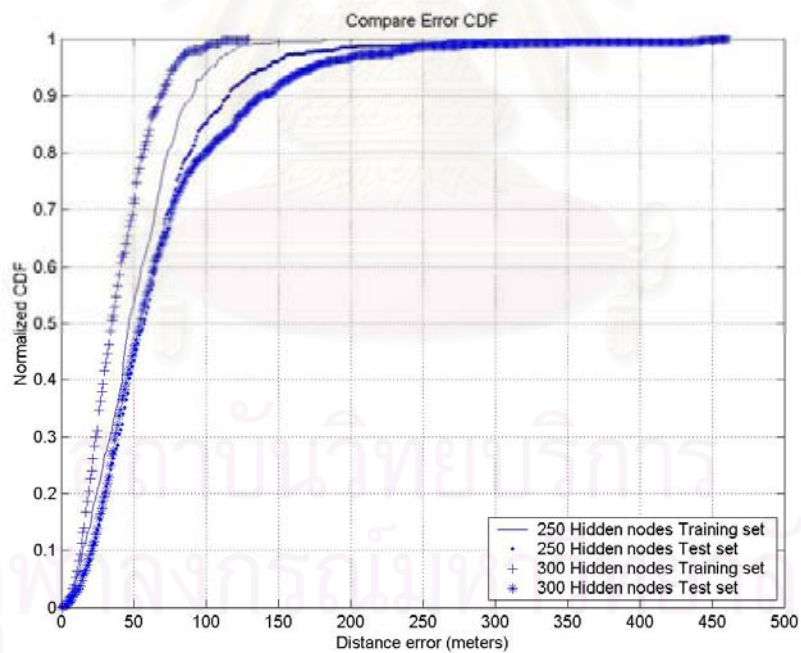
รูปที่ 4.39 การกระจายของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าสำหรับชุดข้อมูลทดสอบ
 เมื่อจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเริ่มเป็น 250 นิวรอน



รูปที่ 4.40 การกระจายของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าสำหรับชุดฝึก
 เมื่อจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเริ่มเป็น 300 นิวรอน



รูปที่ 4.41 การกระจายของค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าสำหรับชุดข้อมูลทดสอบ
เมื่อจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเริ่มเป็น 300 นิวรอน



รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบค่า cdf ของนิวรอลเน็ตเวิร์กที่ออกแบบให้มีจำนวนนิวรอน
ในชั้นซ่อนเริ่ม 250 และ 300 นิวรอน

จากรูปที่ 4.42 สังเกตว่าความสามารถในการประมาณค่าของนิวรอลเน็ตเวิร์กทั้ง 2 ชุดที่ตอบสนองต่อค่าชุดข้อมูลทดสอบจะมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อระยะความผิดพลาดมีค่าสูงขึ้น นั่นคือในระบบที่ใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นที่สูงกว่าจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของจำนวนครั้งของการประมาณค่า ในระยะความผิดพลาดเดียวกัน ได้สูงกว่า (ระบบมีการทำงานที่ดีกว่า) ซึ่งในกรณีนี้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นที่เหมาะสมควรมีค่าน้อย 250 นิวรอนขึ้นไป

เมื่อพิจารณานิวรอลเน็ตเวิร์กที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้น 250 นิวรอน ค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าจะอยู่ที่ 92.38 % ของจำนวนครั้งของการประมาณ ในระยะผิดพลาด 125 เมตร และ 70 % ของจำนวนครั้งของการประมาณ ที่ระยะผิดพลาด 75 เมตร ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าที่ข้อกำหนดของ FCC ระบุไว้

4.5 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบทุกกรณีที่ผ่านมาสามารถหาข้อสรุป (ดูตารางที่ 4.1 ประกอบ) ได้ดังนี้

- 1) นิวรอลเน็ตเวิร์กสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ ให้ผลดีกว่าวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยตรงแบบเดิมที่เสนอไว้
- 2) การออกแบบจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจะมากหรือน้อยขึ้นกับ
 - พื้นที่ในการทำการประมาณค่า : พื้นที่ที่มากขึ้นจะต้องการจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นที่มากขึ้น
 - รูปแบบการวางตัวของสถานีฐาน : ในระบบ 7 สถานีฐานจะพบการวางตัวของสถานีฐานใน 2 ลักษณะ คือ สามเหลี่ยมตั้ง และ สามเหลี่ยมกลับหัว ซึ่งการวางตัวที่ไม่เหมือนกันนี้ ทำให้ต้องใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นมากขึ้นด้วยเช่นกัน
 - ความสัมพันธ์กันของชุดข้อมูล (Correlation of information) : ในระบบ 7 สถานีฐานจะพบว่าจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเร้นจะมีค่าค่อนข้างมาก เนื่องจากข้อมูลที่ป้อนให้นิวรอลเน็ตเวิร์กในแต่ละพื้นที่สามเหลี่ยมของสถานีฐานจะมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความคล้ายกันกับข้อมูลข้างเคียงที่อยู่บริเวณเดียวกัน
- 3) การฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กในลักษณะของ Multiple Codebook จะมีข้อดีในการใช้จำนวนนิวรอนที่น้อย และ ใช้เวลาในการฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กที่น้อย อีกทั้งยังง่ายต่อการแก้ไข ปรับปรุงระบบเมื่อมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นอีกด้วย ในขณะที่การฝึกนิวรอลเน็ตเวิร์กในลักษณะของ Single Codebook จะใช้เวลาในการฝึกนานกว่าการฝึกในลักษณะของ Multiple Codebook เนื่องจากจำนวนข้อมูล และ พื้นที่ที่พิจารณามีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม และค่าความถูกต้องเมื่อทำการฝึกในระบบที่ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้นจะลดลงเมื่อพิจารณาที่จำนวนนิวรอนที่เท่ากัน ขณะเดียวกันก็จะมีผลลบในการปรับปรุงแก้ไขระบบอีกด้วย

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบกรณีต่าง ๆ

กรณีทดสอบ	จำนวน โนคในชั้น ซ่อนเร้น	รัศมีเซลล์ (เมตร)	จำนวนชุดฝึก (ค่า)	จำนวนชุดทดสอบ (ค่า)	ค่าความถูกต้อง (ในระยะ 125 เมตร)
1. กรณีค้นแบบ ใช้ ในการ ทดสอบ สมมุติฐาน	7	250	129	284	100 %
	10	250	129	284	100 %
2. กรณี ครอบคลุมพื้นที่ แคบ 3 สถานีฐาน	9	500	283	497	100 %
	15	500	283	497	100 %
3. กรณี ครอบคลุมพื้นที่ แคบ 7 สถานี ฐาน	170	500	357	438	91.3 %
	210	500	357	438	87 %
4. กรณี ครอบคลุมพื้นที่ กว้าง 3 สถานี ฐาน	50	1200	259	522	96 %
	60	1200	259	522	98 %
	100	1200	259	522	99 %
5. กรณี ครอบคลุมพื้นที่ กว้าง 7 สถานี ฐาน	250	1200	364	841	93 %
	300	1200	364	841	88 %
*หมายเหตุ : ระดับค่าความถูกต้องที่น่าพอใจขึ้นกับการนำไปใช้งาน					

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ด้วยนิรอลเนตเวิร์ก โดยยังคงให้ความสามารถในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่ตรงตามที่หน่วยงาน FCC ได้ออกเป็นมาตรฐานไว้ และ นิรอลเนตเวิร์กยังให้ค่าความถูกต้องของการประมาณค่าที่สูงกว่าอัลกอริทึมการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีผู้นำเสนอไว้แล้ว อีกทั้งไม่สิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณขณะใช้งานจริงอีกด้วย

ผลการจำลองระบบทั้งในส่วน of แบบจำลองสถานีฐานและสถานีเคลื่อนที่ และแบบจำลองของนิรอลเนตเวิร์กที่ออกแบบขึ้น ให้ผลการทดสอบที่ยืนยันแนวความคิดที่ว่า การใช้นิรอลเนตเวิร์กมาทำการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ที่สามารถให้ค่าความถูกต้อง และเมื่อนิรอลเนตเวิร์กได้รับการฝึกแล้วก็ไม่จำเป็นต้องใช้เวลาในการคำนวณเพื่อประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่อีกทุกครั้งเหมือนกับวิธีการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ที่มีผู้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ อีกทั้งนิรอลเนตเวิร์กสามารถทำงานได้ดีทั้งในพื้นที่ครอบคลุมต่าง ๆ กัน ทั้งพื้นที่ที่เป็นอาณาเขตเล็ก ๆ ไปจนถึง พื้นที่กว้าง ๆ ได้

ผลการจำลองระบบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกับอัลกอริทึมอื่น ๆ ที่มีผู้นำเสนอมาก่อนหน้านี้พบว่า การใช้นิรอลเนตเวิร์กสามารถให้ค่าความถูกต้องที่สูงกว่าจริง และสามารถรองรับมาตรฐานความถูกต้องระยะยาวที่หน่วยงาน FCC ได้กำหนดเอาไว้ได้

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้แก่

1. เอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวิธีการคำนวณ รวมถึงหน่วยงานที่ศึกษาวิจัยเรื่องการประมาณค่าตำแหน่ง (Position Location) มีอยู่น้อยมากในประเทศไทย จึงควรมีการจัดหาเอกสาร หรือการเข้าร่วมประชุมสัมมนาขององค์กรต่าง ๆ ที่วิจัยในเรื่องที่เกี่ยวข้องนี้
2. บุคลากรที่สนใจในการทำงานต่อเนื่องมีอยู่น้อยมากทำให้งานวิจัยเกิดการขาดช่วงและไม่ต่อเนื่อง

3. ในประเทศไทยยังขาดข้อมูลการทดสอบจริงภาคสนามอีกมาก และ ข้อมูลการทดสอบภาคสนามยังมีน้อย จึงทำให้ขาดข้อมูลจริงมาทำการวิจัยในเรื่องนี้ เนื่องจากข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณ และ ข้อมูลทางเวลา จะมีค่าแตกต่างกันเมื่ออยู่ในภูมิภาคที่แตกต่างกัน

งานที่ควรได้รับการศึกษาหรือพัฒนาต่อไปในอนาคต คือ

1. การนำเรื่องของนิเวศวิทยาในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ ไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ เช่น การนำไปประยุกต์ใช้กับการแฮนด์ออฟ (Hand-off) ของสถานีเคลื่อนที่, การตรวจจับความเร็วและทิศทางของสถานีเคลื่อนที่ ฯลฯ
2. ขยายวัตถุประสงค์ในการประมาณค่าตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เช่น การเพิ่มพิกัดในด้านความสูง เป็นลักษณะของ 3 มิติ (x,y,z), การนำไปใช้ในบริเวณตึกหรืออาคารต่าง ๆ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Caffery, J. J., Stuber, Jr. L. and Stuber, G. L. Overview of Radiolocation in CDMA Cellular Systems. IEEE Communications Magazine, Vol. 36 (Apr. 1998) : 38-45.
2. Wang, S. S., Green, M. and Malkawi, M. E-911 Location Standards and Location Commercial Services. Emerging Technologies Symposium: Broadband, Wireless Internet Access, 2000 IEEE (2000) : 1-5.
3. Rappaport, T. S., Reed, J. H. and Woerner, B. D. Position Location Using Wireless Communications on Highways of the Future. IEEE Communication Magazine Vol. 34 (Oct. 1996) : 33-41.
4. Krizman, K. J., Biedka, T. E. and Rappaport, T. S. Wireless Position Location: Fundamentals, Implementation Strategies, and Sources of Error. Vehicular Technology Conference, 1997 IEEE 45th Vol. 2 (May 1997) : 919-923.
5. Meyer, M. J., Jacobson, T., Palamara, M. E., Kidwell, E. A., Richton, R. E. and Vannucci, G. Wireless Enhanced 9-1-1 Service-Making It a Reality. BELL Labs Technical Journal Vol. 1 No. 2 (Autumn 1996): 188-202.
6. Yamamoto, R., Matsutani, H., Matsuki, H., Oono, T. and Ohtsuka, H. Position Location Technologies Using Signal Strength in Cellular Systems. Vehicular Technology Conference, 2001 IEEE Vol. 5 (2001): 25701-2574.
7. Caffery, J. J. and Stuber, G. L. Subscriber Location in CDMA Cellular Networks. IEEE Transaction Vehicular Technology Vol. 47, No. 2 (May 1998) : 406-416.
8. Masato, A., Manabu, K. and Takeshi, H. A New Location Estimation Method Based on Maximum Likelihood Function in Cellular Systems. Vehicular Technology Conference, 2001 : 106-110.
9. Prasad, R., Mohr, W. and Konhauser, W. Third Generation Mobile Communication Systems. London. : Artech House, 2000.
10. Lau, C. Neural Networks Theoretical Foundations and Analysis. New York. : IEEE PRESS, 1992.
11. Robert J. Schalkoff Pattern Recognition: Statistical, Structural and Neural Approaches. USA. : John Wiley & Sons, 1992.
12. Demuth, H. and Beale, M. Neural Network Toolbox For Use with MATLAB. The MATH Works, 1998.

13. Fu, L. Neural Networks In Computer Intelligence. USA. : McGraw-Hill, 1994.
14. พงศ์ภพ ฤดีชื่น. การทำนายสัญญาณกำลังในช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรย์ลีโดยใช้นิวรอลเน็ตเวิร์ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
15. Sandrine, M., Mickael, B. and Jean, N. P. Data Fusion Based on Neural Network for the Mobile Subscriber Location. Vehicular Technology Conference, 2000 : 536-541.
16. Parsons, J. D. The Mobile Radio Propagation Channel. London: Pentech Press, 1992.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

รายการอักษรย่อ (ABBREVIATION)

ALI	Automatic Location Identification
ANI	Automatic Number Identification
APCO	Association of Public Safety Communication Officials International
BRI	Basic Rate Interface
CAMA	Centralized Automated Message Accounting
CCSN	Common Channel Signaling Network
CDMA	Code Division Multiple Access
CPE	Customer Premises Equipment
DBMS	Database Management System
DCS	Digital Cellular Switch
DN	Directory Number
DOA	Direction Of Arrival
E-911	Enhanced 9-1-1
ECP	Executive Call Processor
ESA	Emergency Services Adjunct
FCC	Federal Communications Commission
FG-D	Feature Group D
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
ISDN-UP	Integrated Services Digital Network – User Part
LDT	Location Determination Technology
LNP	Local Number Portability
MF	Multifrequency
MIN	Mobile Identification Number
MSC	Mobile Switching Center

NASNA	National Association of State Nine-One-One Administrators
NENA	National Emergency Number Administration
NPA	Numbering Plan Area
NPRM	Notice of Proposed Rulemaking
OSS	Operator Services Signaling
PCS	Personal Communications System
PSAP	Public Safety Answering Point
PSS	Public Safety Systems
SMR	Specialized Mobile Radio
SS7	Signaling System 7
TCAP	Transaction Capabilities Application Part



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปิติ เล็กอุทัย เกิดวันที่ 5 กันยายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย