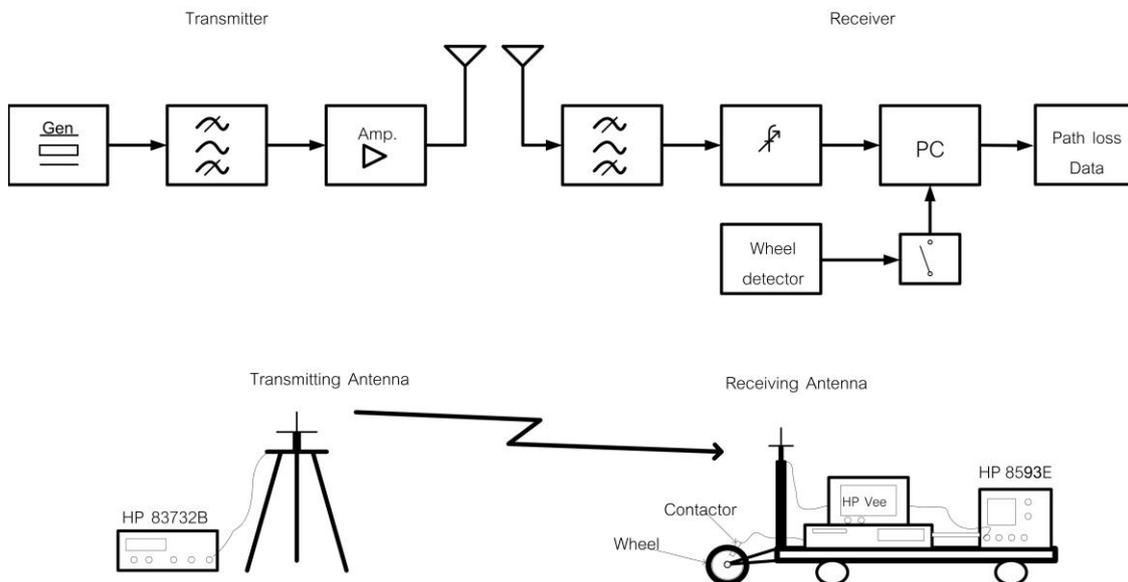


บทที่ 4

เทคนิคการวัดสัญญาณ และการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

ในบทที่แล้วได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นแบบพีชชีไปแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการวัดสัญญาณคลื่นที่แพร่กระจายภายในอาคาร ตลอดจนรายละเอียดของอาคารที่นำมาศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยแผนผังของอาคารตำแหน่งสถานที่ติดตั้งเครื่องรับและเครื่องส่ง ข้อมูลของสัญญาณที่เก็บได้นี้จะนำมาวาดกราฟเพื่อให้เห็นถึงคุณลักษณะเบื้องต้นของการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้น

Measurement of Field Strength Path Loss



รูปที่ 4.1 ระบบการวัดสัญญาณ

4.1 ขั้นตอนการวัดสัญญาณ

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคารประกอบด้วย เครื่องส่งที่ถูกติดตั้งอยู่กับที่ และ เครื่องสเปกตรัมแบบเคลื่อนย้ายได้ เครื่องสเปกตรัมที่ใช้จะถูกปรับค่า ความกว้างแถบการแยกซัด (Resolution bandwidth) ที่ 300 kHz และ ค่า span 10 MHz ที่ความถี่ 1.8 GHz เพื่อให้สามารถรับสัญญาณของช่องสัญญาณ GSM ที่มีความกว้างแถบ (bandwidth) 200 kHz เครื่องส่งที่ถูกติดตั้งอยู่กับที่นั้นประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณ HP 83732b ที่มีกำลังส่ง 18 dBm และ สายอากาศแบบ $\lambda/4$ omni-directional มีแผ่นกราวด์ขนาด $10 \times 10 \text{ cm}^2$ อัตราขยาย 2.2 dBi ส่วนที่เครื่องรับเป็นเครื่องสเปกตรัม HP 8593E ต่อกับสายอากาศชนิดเดียวกัน โดยบรรจุอยู่บนรถเข็น ดังรูปที่ 4.1. สัญญาณข้อมูลที่เครื่องรับจะถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ วิธีการวัดสัญญาณนั้น ทำได้โดยการเคลื่อนที่รถเข็นตามแนวทางเดินตรงภายในอาคาร เพื่อให้สามารถตรวจวัดผลของการจางหายอย่างรวดเร็ว (Fast fading) ข้อมูลจะต้องถูกเก็บบันทึกทุก ๆ ระยะทาง $\lambda/4$ เนื่องจากคลื่นนิ่งเกิดขึ้นทุกๆ $\lambda/2$ โดยใช้หลักการแบบ Nyquist rate ดังนั้นเราสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\text{ช่วงการสุ่ม} = \lambda/4 \quad (4.1)$$

ถ้ารถเข็นเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V แล้ว อัตราการสุ่มสามารถถูกแสดงเป็นฟังก์ชันของ V คือ

$$\text{อัตราการสุ่มยังผล} = 4 V / \lambda \quad (4.2)$$

เมื่อ	V	=	ความเร็วของรถเข็น (m/s)
	λ	=	c/f = ความยาวคลื่น (m)
	c	=	ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)
	f	=	ความถี่ (Hz)

ตัวอย่างเช่น ความยาวคลื่นสำหรับความถี่ 1800 MHz คือ $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / 1800 \text{ MHz} = 0.167 \text{ m}$ และ $\lambda/4$ คือระยะทาง 4.167 cm ดังนั้นเมื่อรถเข็นเคลื่อนไป 4.167 cm สวิทช์ที่ล้อจะทำงานและมีการบันทึกข้อมูลเกิดขึ้น ถ้ารถเข็นเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 km/hr (0.28 m/s) ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{อัตราการสุ่มยังผล} &= 4V / \lambda \\ &= 4 \times 0.28 / 0.167 = 6.7 \text{ ตัวอย่าง/วินาที} \end{aligned}$$

ดังนั้น ที่ความถี่ค่าหนึ่ง ๆ อัตราการสุ่ม จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของเครื่องรับ

4.2 สถานที่วัดสัญญาณ

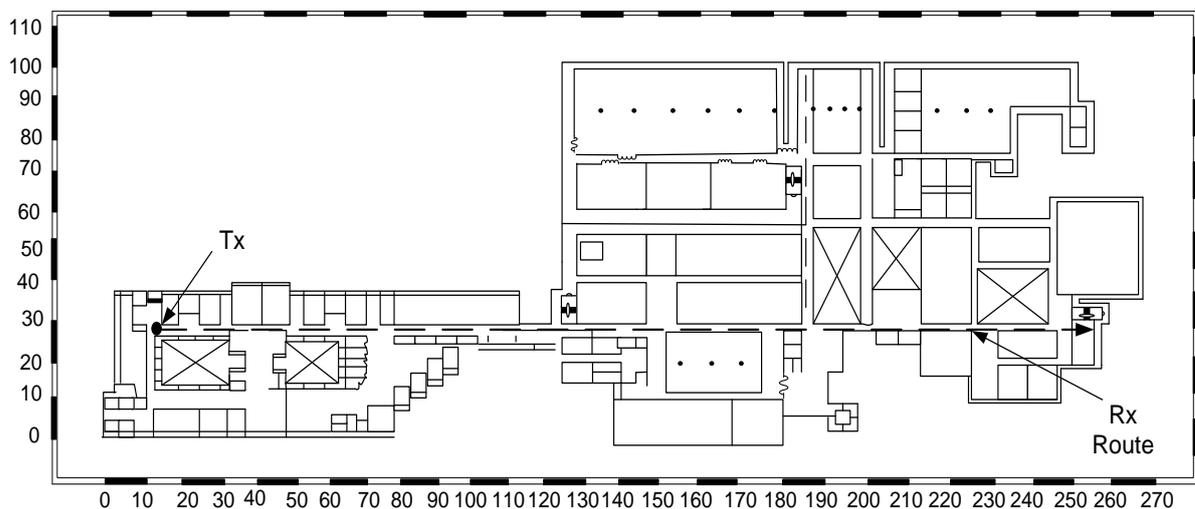
เครื่องส่งถูกติดตั้งที่ปลายทางของทางเดินยาวในอาคารเพื่อส่งสัญญาณคลื่นวิทยุผ่านสายอากาศตัวส่งในขณะที่เครื่องรับสัญญาณเคลื่อนที่ไปตามทางเดินในแนวสายตาในอาคารนั้น อาคารที่ทำการวิจัยนี้เพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในครั้งมี 2 อาคารที่มีโครงสร้างและการใช้งานต่างกันคือ

4.2.1 อาคารเรียนคอนกรีต

เป็นอาคารเรียนคอนกรีตของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ซึ่งถูกสร้างขึ้นในปี พ.ศ. 2536 เป็นอาคาร 5 ชั้น มีขนาดความกว้าง x ยาว ($100 \times 270 \text{ m}^2$) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 โครงสร้างของอาคารส่วนใหญ่เป็นคอนกรีต แผ่นยิปซัมและผนังกระจก ความสูงจากพื้นถึงชั้นบน 3.5 m และความสูงจากพื้นถึงเพดานแผ่นยิปซัม 2.6 m ในฝ้าเพดานมีท่อแอร์และท่อลมต่าง ๆ วัสดุที่ใช้ทำผนังในทางเดินยาวในอาคาร 60% เป็นกระจกและ 40% เป็นผนังคอนกรีต ความจุของอาคารนี้ประมาณ 490 คน ต่อชั้น

4.2.2 อาคารจอดรถในศูนย์การค้า

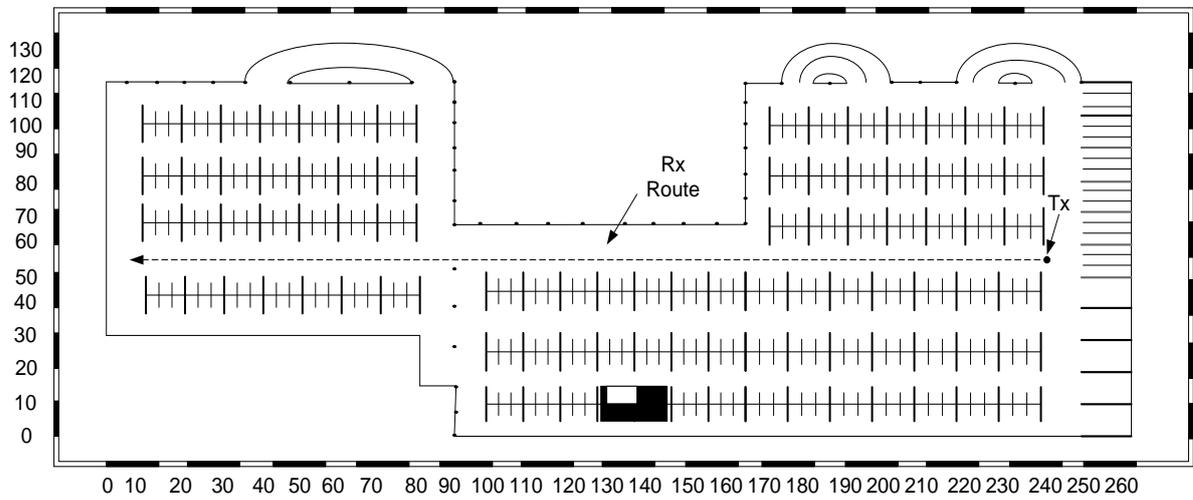
เป็นอาคารจอดรถในศูนย์การค้าแห่งหนึ่งในย่านบางแคถูกสร้างขึ้นในปี 2533 มีจำนวนชั้นทั้งหมด 8 ชั้น มีขนาดความกว้าง x ยาว ($130 \times 260 \text{ m}^2$) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 โครงสร้างของอาคารส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยเสาคอนกรีตและเพดานคอนกรีตเรียบ ความสูงจากพื้นถึงเพดาน 2.25 m ความจุของอาคารประมาณ 300 คัน ต่อชั้น



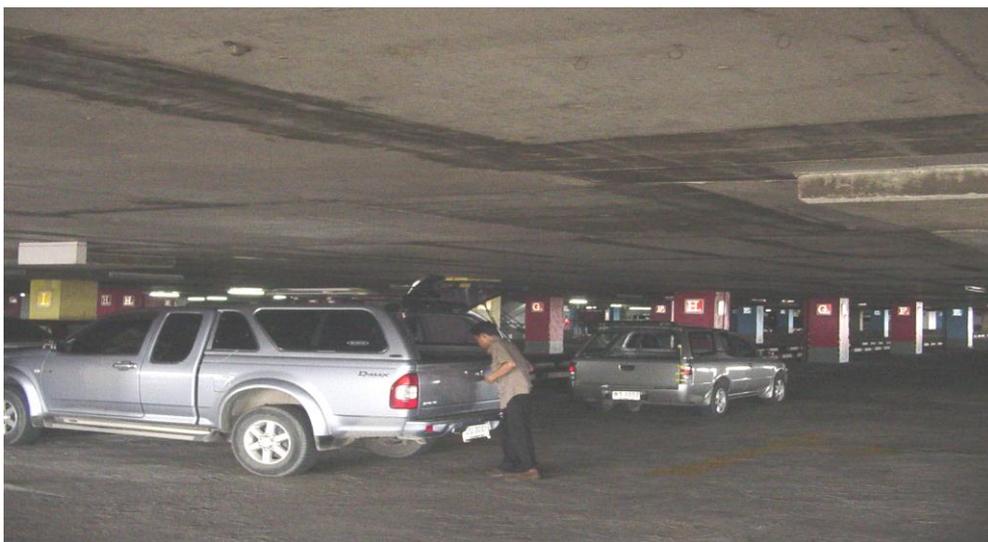
รูปที่ 4.2 แผนผังสถานที่วัดสัญญาณภายในอาคารเรียนคอนกรีต



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายภายในอาคารเรียนคอนกรีต



รูปที่ 4.4 แผนผังสถานที่วัดสัญญาณ ภายในอาคารจอดรถในศูนย์การค้า



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายภายในอาคารจอดรถในศูนย์การค้า

4.3 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณคลื่นด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น

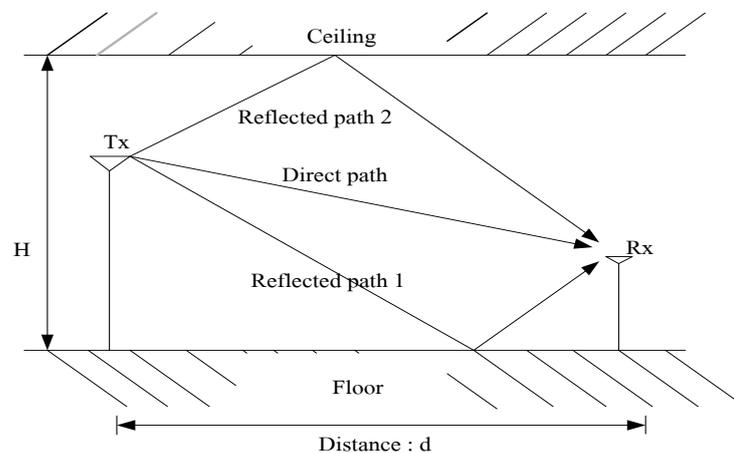
ค่าเฉลี่ยการสูญเสียตามวิถีคลื่นในแนวสายตาเป็นฟังก์ชันของระยะทางและเลขยกกำลัง n ดังนี้

$$L_{LOS} = L(d_0) + 10 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (4.3)$$

เมื่อ L_{LOS} ค่าการสูญเสียตามวิถีคลื่นที่ระยะทาง d จากเครื่องส่งและ $L(d_0)$ คือ ค่าการสูญเสียที่ระยะทางอ้างอิงจากเครื่องส่ง เนื่องจากอิทธิพลของย่านเขต Fresnel แรกทำให้การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นตามระยะทางถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

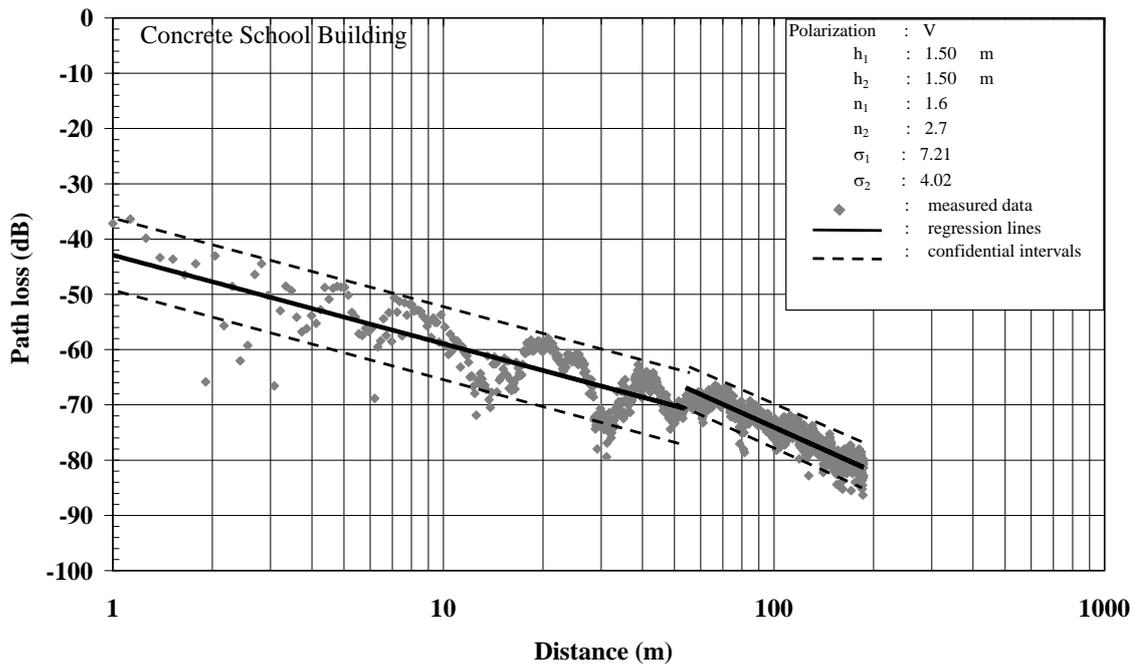
$$PL_{bp}(d) = \begin{cases} L_{bp,1} + 10 \log_{10} \left(\frac{d}{d_{bp}} \right)^{n_1}, & \text{for } d \leq d_{bp} \\ L_{bp,2} + 10 \log_{10} \left(\frac{d}{d_{bp}} \right)^{n_2}, & \text{for } d > d_{bp} \end{cases} \quad (4.4)$$

เมื่อ d_{bp} คือระยะทางที่จุดสิ้นสุดของส่วนแรกจากเครื่องส่ง เรียกจุดนี้ว่า ระยะทางจุดเปลี่ยน (Breakpoint distance) $L_{bp,1}$ และ $L_{bp,2}$ คือ การสูญเสียที่ระยะทางจุดเปลี่ยนของแต่ละส่วน ค่า n_1 และ n_2 คือ เลขยกกำลังการสูญเสียของย่านแรกและย่านที่สองตามลำดับ

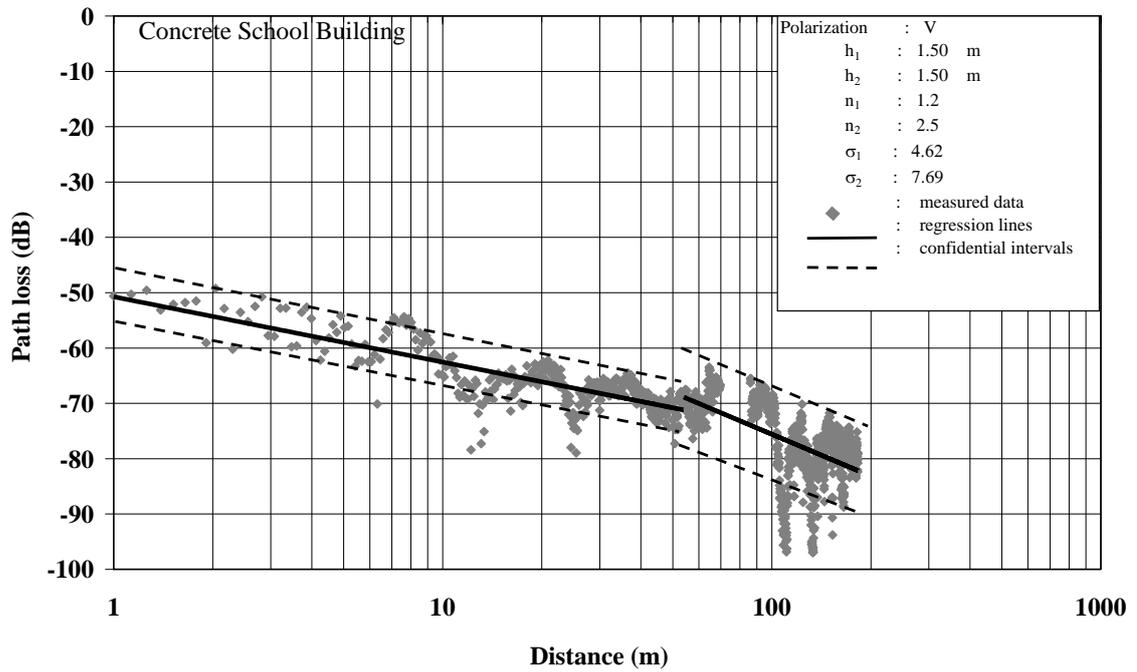


รูปที่ 4.6 แบบจำลองสามวิถีคลื่น

ระยะทางจุดเปลี่ยน d_{bp} สำหรับความยาวคลื่น λ คำนวณได้โดย $Z_f \approx \sqrt{\lambda d_{bp}}$ เมื่อ Z_f คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของเขต Fresnel แรก อย่างไรก็ตามสำหรับแนวทางเดินตรงในอาคารที่มีความกว้างมาก โดยที่ความกว้างมีมากกว่าความสูงของเพดานแล้วเราพบว่าเขต Fresnel แรกเกิดจากผลของการสะท้อนจากเพดานเท่านั้น ส่วนการสะท้อนจากผนังด้านข้างสามารถที่จะไม่นำมาคิดได้เนื่องจากคลื่นส่วนใหญ่

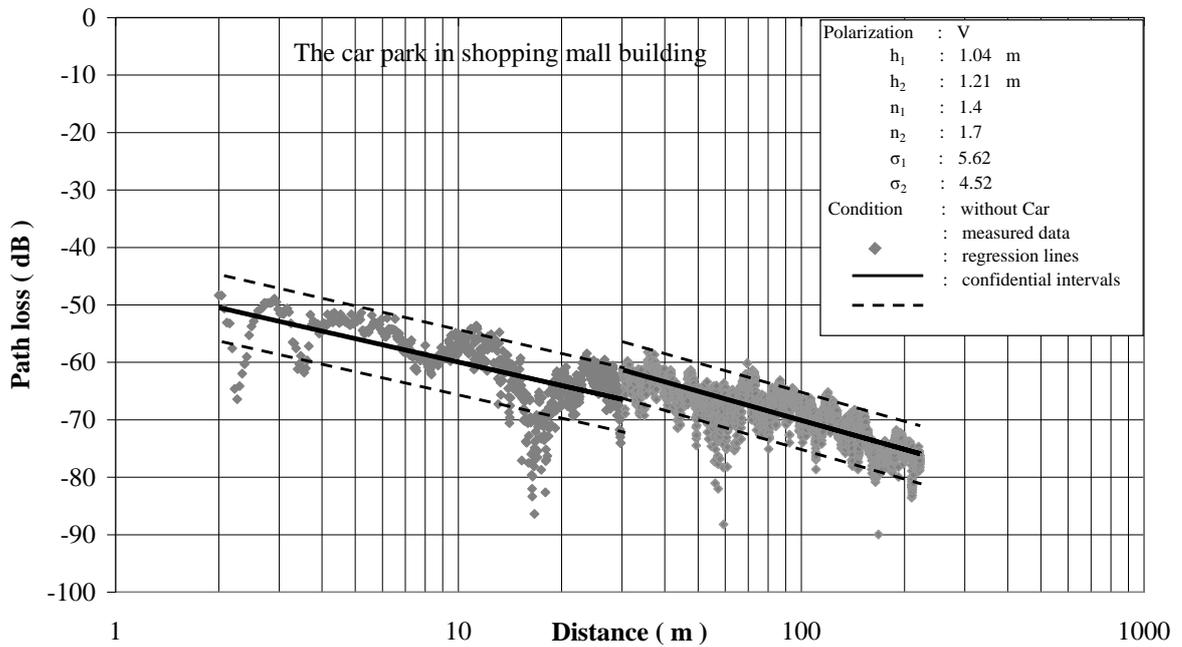


ก) ชั้นสอง (ไม่มีคนเดิน)

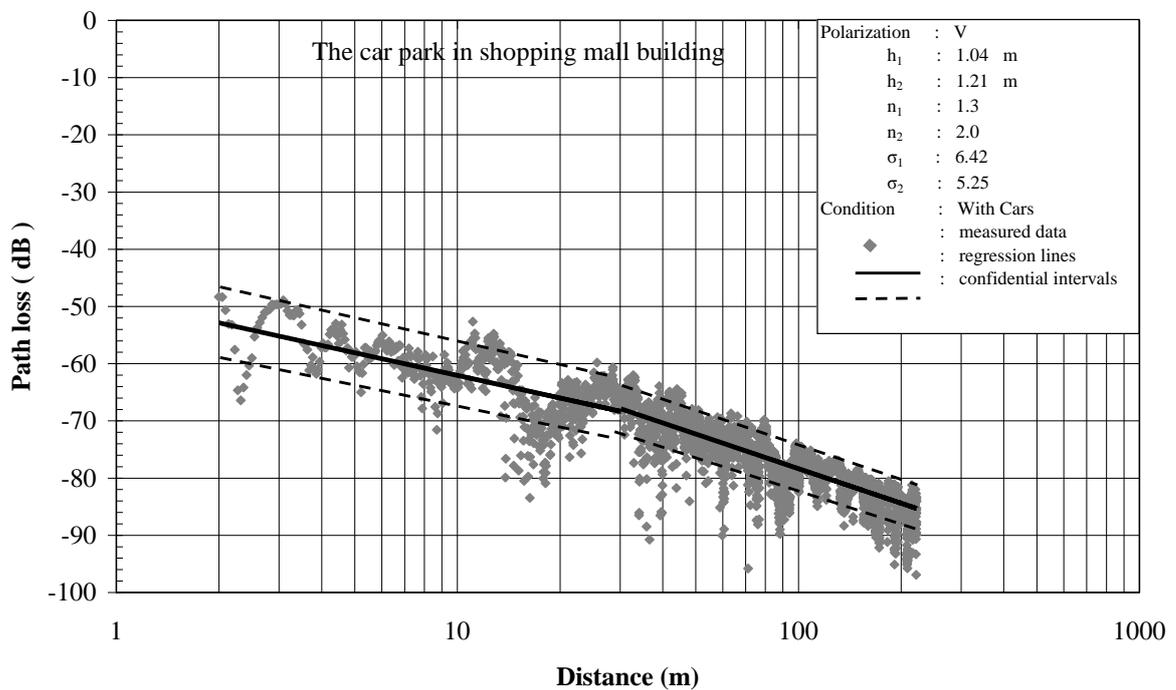


ข) ชั้นหนึ่ง (มีคนเดิน)

รูปที่ 4.7 กราฟการสูญเสียตามวิถีคลื่นที่ได้ตรวจวัดและเส้นถดถอยสำหรับอาคารเรียนคอนกรีต

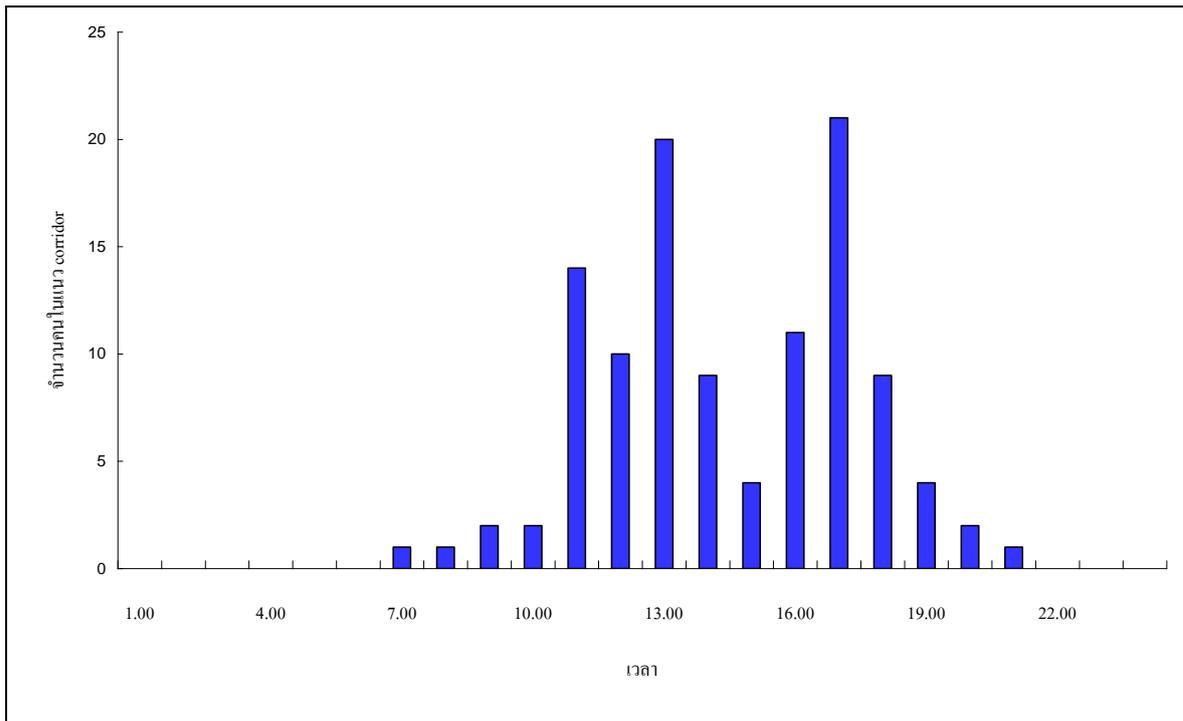


ก) ไม่มีรถเล่นในอาคาร

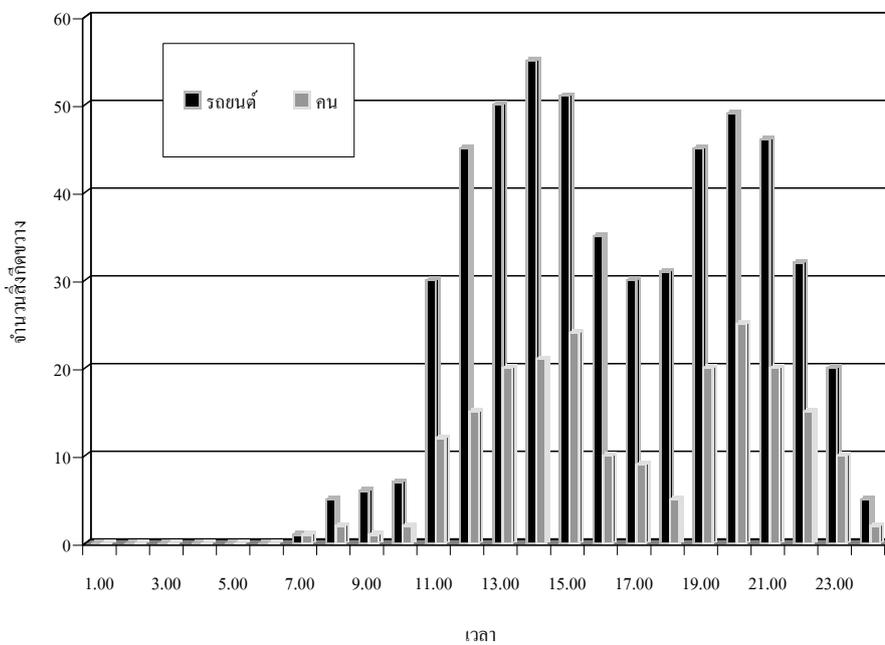


ข) มีรถเล่นในอาคาร

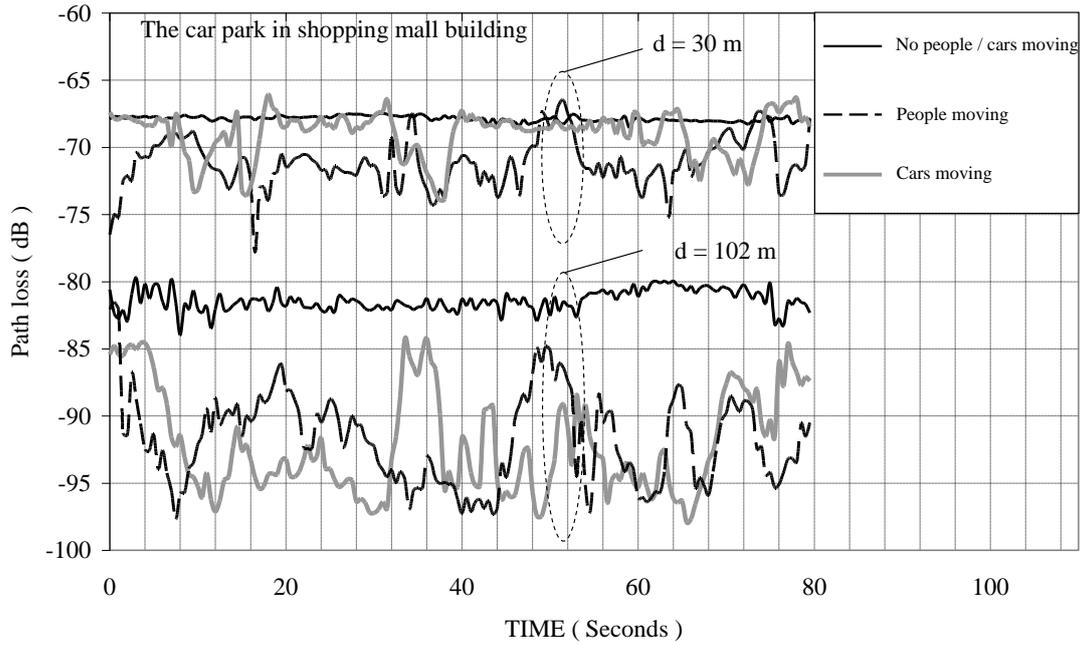
รูปที่ 4.8 กราฟการสูญเสียตามวิถีคลื่นที่ได้ตรวจวัดและเส้นถดถอยสำหรับอาคารจอดรถในศูนย์การค้า



รูปที่ 4.9 จำนวนคนเดินในแนวทางเดินตรงภายในอาคารเรียนคอนกรีต



รูปที่ 4.10 จำนวนรถยนต์แล่นผ่านและคนเดินระหว่างเครื่องรับ-ส่งภายในอาคารจอดรถในศูนย์การค้า



รูปที่ 4.11 ผลการวัดการจางหายภายในอาคาร

เดินทางทะลุขอบกระจกและหน้าต่าง ดังนั้นระยะทางจุดเปลี่ยนสามารถคำนวณโดยใช้แบบจำลองสามวิถีคลื่นได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยที่

$$d_{bp} = 4(H - h_2)h_2/\lambda \quad (4.5)$$

เมื่อ H และ h_2 คือความสูงของเพดานและความสูงของสายอากาศรับตามลำดับ สำหรับความสูงเพดาน 3 เมตรและความสูงสายอากาศรับ 1.5 เมตร ระยะทางจุดเปลี่ยนเท่ากับ 54 เมตร จากเครื่องส่งสำหรับอาคารเรียนคอนกรีต กราฟการลดทอนของสัญญาณแสดงใน รูปที่ 4.7 สำหรับอาคารเรียนคอนกรีต ชั้นสอง (ไม่มีคนเดิน) และชั้นหนึ่ง(มีคนเดิน) แสดงดังรูปที่ 4.7 ก) และ 4.7 ข) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าระยะทางจุดเปลี่ยนในรูปที่ 4.7 ก) และ 4.7 ข) เป็นจุดเดียวกันแม้ว่าจำนวนผนังด้านข้างของแต่ละชั้นมีจำนวนไม่กัน ซึ่งแสดงว่ามีเพียงคลื่นหลักจำนวน 3 คลื่นที่เดินทางจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับ รูปที่ 4.7 ข) แสดงการเกิดการจางหายอย่างรวดเร็วจำนวนมาก อย่างไรก็ตามเส้นความชันเปลี่ยนเล็กน้อยเมื่อมีคนเดินระหว่าง เครื่องส่งและเครื่องรับ สังเกตว่ากราฟรูปที่ 4.7 ข) เกิดช่องว่างของข้อมูลการตรวจวัดเนื่องมาจากการไม่ต่อเนื่องของแนวทางเดินตรงในอาคารชั้นเรียนชั้นที่ 1 รูปที่ 4.8 แสดงกราฟคุณลักษณะการลดทอนสัญญาณในอาคารจอดรถในศูนย์การค้า ซึ่งพบได้เช่นกันว่าเกิดการจางหายอย่างรวดเร็วเมื่อมีรถแล่นอยู่ภายในอาคาร เส้นทึบในกราฟแสดงเส้นการลดทอน ส่วนเส้นประแสดงช่วงความมั่นใจ ก่อนและหลังระยะทางจุดเปลี่ยน

รูปที่ 4.11 แสดงการจางหายตามเวลาแปรเปลี่ยนที่ระยะทาง 30 เมตร และ 102 เมตร จากเครื่องส่งเราพบว่าเกิดการจางหายขนาดเล็กเมื่อมีคนเดินและรถแล่นภายในอาคารที่จุดใกล้ๆ กับระยะทาง

จุดเปลี่ยน (30m) และเกิดการจางหายขนาดใหญ่ที่ระยะทางห่างจากระยะทางจุดเปลี่ยน (102 m) ค่ากำลังการสูญเสียตามวิถี n และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 สรุปในตารางที่ 4.1 เมื่อตัวเลขห้อย 1 และ 2 หมายถึงกรณีก่อนและหลังระยะทางจุดเปลี่ยนตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังการสูญเสียตามวิถีและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

Building Type	no time-variant effect				with time-variant effect			
	n_1	n_2	R^2_1	R^2_2	n_1	n_2	R^2_1	R^2_2
Concrete school								
- First floor	1.3	2.1	0.71	0.78	1.2	2.5	0.66	0.28
- Second floor	1.6	2.7	0.68	0.86	-	-	-	-
Future Park	1.4	1.7	0.43	0.68	1.3	2.0	0.40	0.65

โดยปกติกำลังการสูญเสียตามวิถีคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นภายนอกอาคารนั้น ค่า n_1 คือ 2.0 และ n_2 คือ 4.0 อย่างไรก็ตามเราพบว่ากำลังการสูญเสียตามวิถีคลื่น n_1 และ n_2 ของการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคารมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของผลกระทบจากท่อนำคลื่นภายในอาคารในย่านเขต Fresnel แรก เราใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 เป็นดัชนีที่ชี้ระดับการถดถอย จะสังเกตว่าค่า R^2 เมื่อมีคนเดินหรือมีรถแล่นภายในอาคารจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อปราศจากคนเดินหรือมีรถแล่นภายในอาคาร ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการจางหายอย่างรวดเร็วทำให้ข้อมูลกระจายไปจากเส้นถดถอยนั่นเอง

เมื่อพิจารณาช่วงความมั่นใจในรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความมั่นใจนี้ซึ่งแปรเปลี่ยนตามค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการจางหายอย่างรวดเร็วยังคงอยู่นอกช่วงความมั่นใจนี้เป็นจำนวนไม่น้อย

4.4 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณคลื่นด้วย ANFIS

ตัวแปรสัญญาณเข้าสำหรับ ANFIS ประกอบด้วย

- 1) การลดทอนช่องว่างอากาศ (Free space attenuation along the path)

$$L_{FS} = -27.56 + 20 \log\left(\frac{f}{MHz}\right) + 20 \log\left(\frac{d}{m}\right) \quad (4.6)$$

เมื่อ d คือ ระยะทางของแนวทางเดินคลื่นหลัก (dominant path)

2) กำลังสูญเสียจากกำแพง (Wall loss)

$$L_w = \sum_{p=1}^P WAF(p) / \cos \theta_p \quad (4.7)$$

เมื่อ WAF (P) คือ ค่าการลดทอนกำแพง เมื่อคลื่นเดินทางตั้งฉากกับผิวกำแพงที่ p และ θ_p คือ มุมระหว่างแนวกำแพงที่ p กับ แนวทางเดินคลื่นหลัก

3) กำลังสูญเสียจากการเลี้ยวหักมุมจากเครื่องส่ง (Angle loss at the corner to the transmitter)

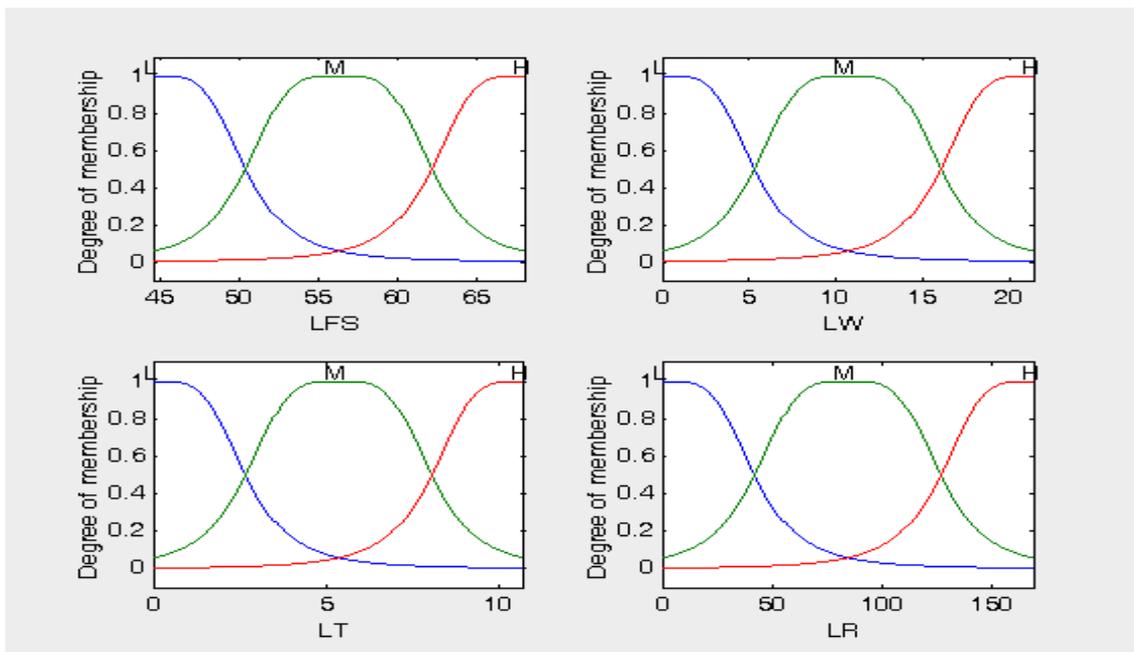
$$L_T = \frac{1}{A_k} \sum_{m=1}^M AT(m) \quad (4.8)$$

เมื่อ A_k และ $AT(m)$ คือ ตัวประกอบปกติ (normalized factor) และ มุมที่เปลี่ยนไปของแนวทางเดินคลื่นหลักจากเครื่องส่งตามลำดับ M คือ จำนวนมุมที่คลื่นหลักเลี้ยวเบน

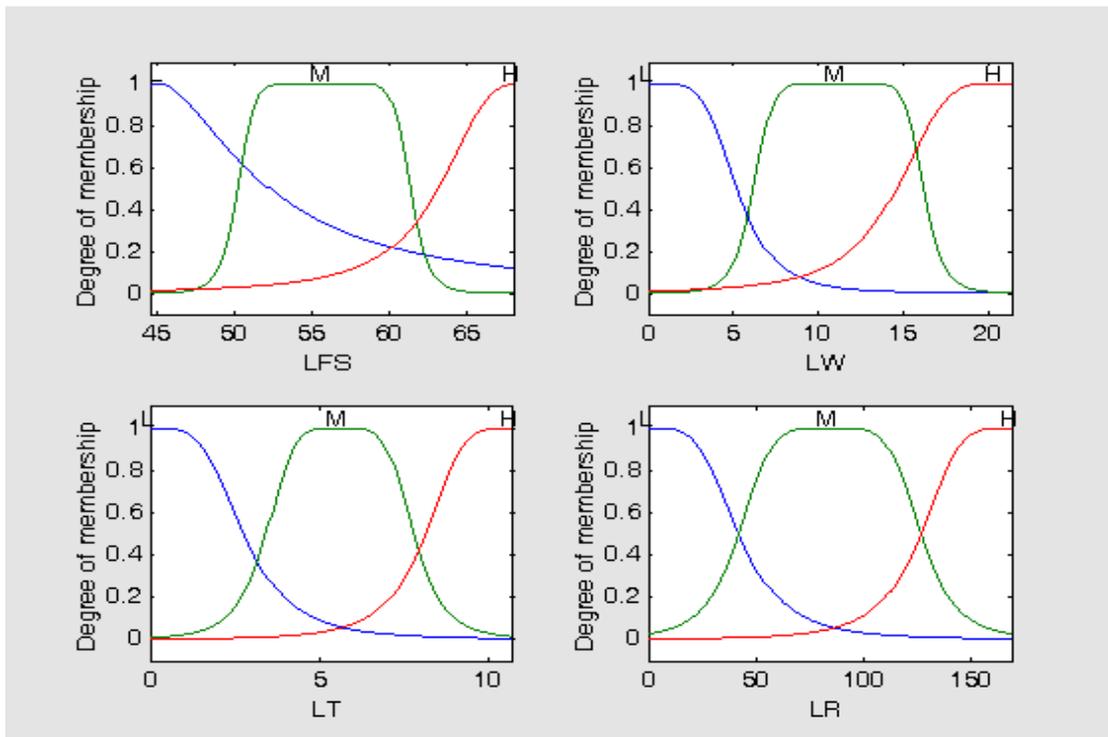
4) กำลังสูญเสียจากการเลี้ยวหักมุมไปยังเครื่องรับ (Angle loss at corner to receiver)

$$L_R = \frac{1}{A_k} \sum_{m=1}^M AR(m) \quad (4.9)$$

เมื่อ A_k และ $AR(m)$ คือ ตัวประกอบปกติ และมุมที่เปลี่ยนไปของแนวทางเดินคลื่นหลักไปเครื่องรับตามลำดับ M คือ จำนวนมุมที่คลื่นหลักเลี้ยวเบน

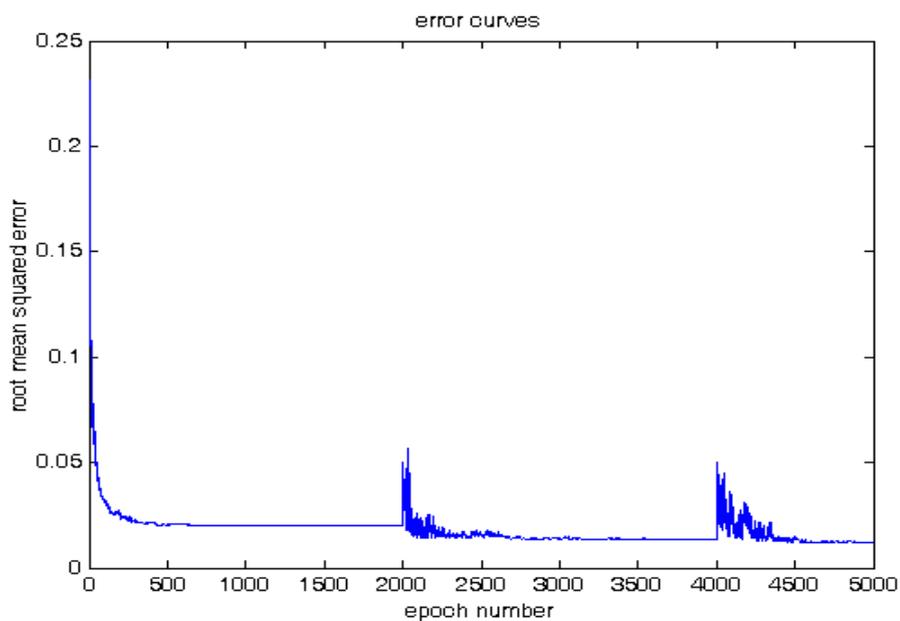


รูปที่ 4.12 ฟังก์ชันสัญญาณเข้าก่อนทำกระบวนการเรียนรู้

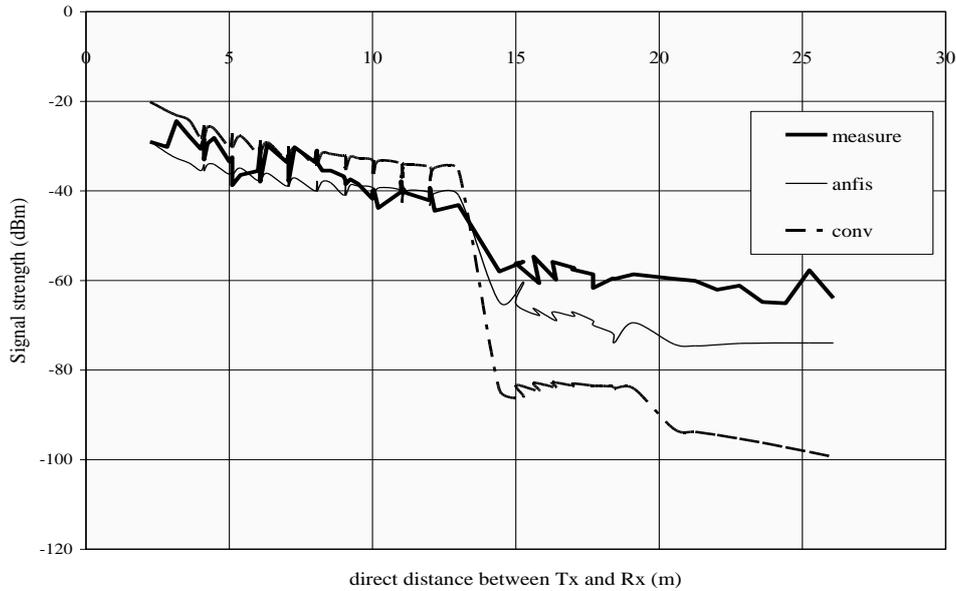


รูปที่ 4.13 ฟังก์ชันสัญญาณเข้าหลังทำกระบวนการเรียนรู้

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรสัญญาณเข้าก่อนและหลังกระบวนการเรียนรู้ของ ANFIS ตามลำดับ โดยที่จำนวนรอบของการเรียนรู้เท่ากับ 5000 รอบที่ค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าประมาณ 0.02 ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟ RMSE สำหรับ ANFIS



รูปที่ 4.15 ผลการทำนายการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีนิวโรฟิชซี

เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่นำเสนอ ในที่นี้จะทำการเปรียบเทียบแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองเดิมที่ดั่งสมการที่ (4.10)

$$PL(d) [dB] = 10 \log \left(\frac{d}{d_0} \right)^n + \sum_{p=1}^P WAF(p) / \cos \theta_p \quad (4.10)$$

$$+ \sum_{q=1}^Q FAF(q)$$

เมื่อ P และ Q คือ จำนวนผนังและพื้นระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับตามลำดับ พารามิเตอร์ n คือ เลขกำลังสูญเสีย, $WAF(p)$ คือตัวประกอบการลดทอนสัญญาณของกำแพง, θ_p คือมุมระหว่างกำแพงที่ P กับแนวเส้นตรงระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งที่ผ่านกำแพงและ $FAF(q)$ คือ ตัวประกอบการลดทอนสัญญาณของพื้น

ผลการทำนายค่าสัญญาณที่รับได้ของแบบจำลองที่นำเสนอเปรียบเทียบกับแบบข้อมูลการวัดสัญญาณ (checking data) และแบบจำลองเดิมสมการที่ (4.10) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่า การทำนายโดยใช้ ANFIS ให้ผลเกาะกลุ่มกับข้อมูลที่ได้จากการวัดมากกว่าแบบจำลองเดิมในช่วงระยะทาง 30 เมตรจากเครื่องส่ง ในขณะที่สัญญาณที่รับได้ที่ระยะทางห่างจากเครื่องส่งมาก ๆ ชุดข้อมูลที่ให้ในการเรียนรู้ไม่มีความสัมพันธ์กันเนื่องจากเกิดการกระจายอย่างรวดเร็ว จึงไม่สามารถนำไปสู่กระบวนการเรียนรู้ได้ นอกจากนี้เส้นกราฟที่ทำนายโดย ANFIS ในช่วงระยะทาง 30 เมตรแรก ยังไม่สามารถครอบคลุมข้อมูลจากการตรวจวัดทั้งหมดได้เนื่องจากการกระจายอย่างรวดเร็วของสัญญาณได้ถูกตัดออกไป

และไม่ได้นำมาสู่กระบวนการเรียนรู้ของนิวโรฟิซซี ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาแบบจำลองแบบมีขอบเขต (Boundary model) ที่ใช้ได้กับการจางหายอย่างรวดเร็วของสัญญาณ ถึงแม้เคยมีผู้ที่ทำการวิจัยแบบจำลองแบบมีขอบเขต ชนิดนี้มาก่อน [8-9] แต่เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับการสื่อสารที่เครื่องรับและเครื่องส่งอยู่ภายนอกอาคาร ไม่สามารถนำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้สำหรับการสื่อสารภายในอาคารได้ เนื่องจากสภาพแวดล้อมของการแพร่กระจายคลื่นมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวได้กำหนดขอบเขตบนและขอบเขตล่างด้วยการประมาณด้วยสายตาซึ่งอาจทำให้เส้นขอบเขตดังกล่าวมีความผิดพลาดได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีใหม่ที่ใช้กำหนดขอบเขตของแบบจำลองการลดทอนสัญญาณคลื่นที่สามารถใช้สำหรับการสื่อสารภายในอาคารได้