

แบบจำลองการสูญเสียสัญญาณและลักษณะช่องสัญญาณของระบบ  
โครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

RATE LOSS MODEL AND CHANNEL CHARACTERISTICS OF WIRELESS  
NETWORK SYSTEM IN DURIAN ORCHARD AT 2.4 GHz

กานาวัต ภู่งวงษา

KANAWAT NUANGWONGSA

วิทยานิพนธ์นี้พิมพ์เผยแพร่ของกองเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการพัฒนาภาค  
ตะวันออกเฉียงเหนือ

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KUMUL-2009-EN-M 010-070

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและคุณลักษณะช่องสัญญาณของระบบ  
โครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

PATH LOSS MODEL AND CHANNEL CHARACTERISTICS OF WIRELESS  
NETWORK SYSTEM IN DURIAN ORCHARD AT 2.4 GHz



คณะวิชา วิศวกรรมฯ

KANAWAT NUANGWONGSA

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....105121  
วันเดือนปี.....16 พ.ย. 2552

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL 2009-EN-M-010-070

**PATH LOSS MODEL AND CHANNEL CHARACTERISTICS OF WIRELESS  
NETWORK SYSTEM IN DURIAN ORCHARD AT 2.4 GHz**

**KANAWAT NUANGWONGSA**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2009**

**KMITL 2009-EN-M-010-070**

**COPYRIGHT 2009**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

หัวข้อวิทยานิพนธ์   แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและคุณลักษณะช่องสัญญาณของระบบโครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์

Thesis Title        Path Loss Model and Channel Characteristics of Wireless Network System in Durian Orchard at 2.4 GHz

นักศึกษา             นายคณะวัติ เนื่องวงษา

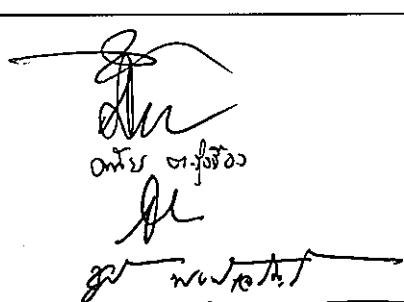
รหัสประจำตัว       50060924

ปริญญา             วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา          วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์    ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

หมายเลขวิทยานิพนธ์             KMITL-2009-BN-M-010-070

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาถิพงษ์	
ศ.ดร. โมไนย	ไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.คณัย	ตรุ่งเรือง	
รศ.ดร.สมผล	โกศลวิตร	
ผศ.ดร.ชวรงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 15.00-17.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและคุณลักษณะช่องสัญญาณของระบบโครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์
นักศึกษา	นายคณะวุฒิ เนื่องวงษา
รหัสนักศึกษา	50060924
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอ แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและคุณลักษณะช่องสัญญาณของระบบโครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ (Dual Slope Regression Model) จากผลการทดสอบระดับสัญญาณ หลังจากนั้นทำการทดสอบระดับสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดยในการทดสอบนั้นจะติดตั้งตัวส่งสัญญาณไว้บริเวณโคนต้นทุเรียนและรับสัญญาณด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณที่ติดตั้งไว้ที่ลูกทุเรียน แล้วนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (Bit Error Rate; BER) โดยการทำนายคุณลักษณะช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นด้วยวิธีการจำลองช่องสัญญาณ และกำหนดอินพุตของช่องสัญญาณแบบสุ่ม (Monte Carlo Method) ซึ่งมีการมอดูเลตแบบ Frequency Shift Keying (FSK) ส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีการกระจายตัวแบบไรซ์ (Rician Distribution) ค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลสามารถใช้ประเมินสมรรถนะของระบบ และจากผลการศึกษาทั้งหมดจะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการติดตั้งระบบตรวจจับแบบไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

<b>Thesis Title</b>	Path Loss Model and Channel Characteristics of Wireless Network System in Durian Orchard at 2.4 GHz
<b>Student</b>	Mr. Kanawat Nuangwongsa
<b>Student ID</b>	50060924
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

### ABSTRACT

The path loss model and channel characteristics of wireless network system in durian orchard at 2.4 GHz are presented. The path loss model is carried out from the received power measurement. The path loss characteristics are modelled by using dual slope regression techniques. The measurement of received power as the function of time is performed. In the measurement setup, the transmitter is setup at the trunk of a durian tree for one communication node, and the received power by spectrum analyzer is measured for the other communication node. These results can be used to approximate the Bit Error Rate (BER). Subsequently, the channel modeling of wireless network system is obtained from the input signal of Monte Carlo Method. In addition, the used modulation scheme is Frequency Shift Keying (FSK) with the Rician propagation channel. Ultimately, the statistical characteristic measurements are used to compute the Bit Error Rate. The Bit Error Rate is very useful to evaluate the performance of wireless sensor network system. Finally, the results of the study can be used for prediction and setup the wireless sensor network in durian orchard at 2.4 GHz.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เป็นอย่างดี เนื่องจากความกรุณาในการให้คำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ. ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ โดยเป็นผู้ให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางในการศึกษาเสมอมา ตลอดจนอบรมสั่งสอน ตลอดระยะเวลาในการศึกษา ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. สมพล โกศลวิตร และ ดร. จูติพงษ์ เลิศวิริยะประภา ที่ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาที่ชัดเจน และขอขอบพระคุณ ศ. ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ สำหรับการให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ในการวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้ง ในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะวิชา  
เนื่องวงษา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 การสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น.....	6
2.2.1 กลไกพื้นฐานในการแพร่กระจายคลื่น.....	7
2.2.1.1 การสะท้อน.....	7
2.2.1.2 การเลี้ยวเบน.....	8
2.2.1.3 การกระจัดกระจาย.....	9
2.2.2 ช่องสัญญาณการจางหาย (Fading Channel).....	10
2.2.2.1 แบบจำลองช่องว่างอิสระ (Free Space Model).....	11
2.2.2.2 แบบจำลองสองรังสี (Two Ray Model).....	11
2.2.3 หลักการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น.....	12
2.2.3.1 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว.....	13
2.2.3.2 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	14
2.3.1 ขอบเขตบนและล่างของแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางของสัญญา หลักที่ไม่มีการสูญเสียสำหรับการแพร่กระจายคลื่นของโทรศัพท์มือถือ ภายในอาคาร.....	15
2.3.2 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางสถิติของการแพร่กระจายคลื่นในสวน ทุเรียนสำหรับโครงข่ายการตรวจจับที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์.....	17
2.3.3 แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและผลการทดสอบที่ ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ของโครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียน.....	18
2.4 บทสรุป.....	20
บทที่ 3 แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางของการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์.....	21
3.1 บทนำ.....	21
3.2 การแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียน.....	21
3.3 ค่าการสูญเสียของสัญญาตามระยะทางที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความสูงของ สายอากาศโดยเปรียบเทียบกับ การส่งในแบบต่างๆ.....	22
3.3.1 ค่าการสูญเสียของสัญญาตามระยะทางที่ความสูงของสายอากาศส่งและ สายอากาศรับมีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตร.....	24
3.3.2 ค่าการสูญเสียของสัญญาตามระยะทางที่ความสูงของสายอากาศส่ง 150 เซนติเมตร และสายอากาศรับมีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตร.....	25
3.3.3 ค่าการสูญเสียของสัญญาตามระยะทางที่ความสูงของสายอากาศส่งและ สายอากาศรับมีค่าเท่ากับ 150 เซนติเมตร.....	26
3.4 แบบจำลองการลดทอนสัญญาด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว.....	27
3.4.1 ค่าการสูญเสียของสัญญาตามระยะทางเมื่อความสูงของสายอากาศส่งและ สายอากาศรับสูง 50 เซนติเมตร.....	27
3.4.1.1 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	27
3.4.1.2 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	28

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1.3	กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	28
3.4.2	ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางเมื่อความสูงของสายอากาศส่งสูง 150 เซนติเมตรและสายอากาศรับสูง 50 เซนติเมตร.....	29
3.4.2.1	กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	29
3.4.2.2	กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	30
3.4.2.3	กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	30
3.4.3	ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางเมื่อความสูงของสายอากาศส่งสูง 150 เซนติเมตรและสายอากาศรับสูง 150 เซนติเมตร.....	31
3.4.3.1	กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	31
3.4.3.2	กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	32
3.4.3.3	กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	32
3.5	แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่.....	33
3.5.1	ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศส่ง และสายอากาศรับสูง 50 เซนติเมตร.....	35
3.5.1.1	กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	35
3.5.1.2	กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	36
3.5.1.3	กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	36

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางเมื่อความสูงของสายอากาศส่งสูง 150 เซนติเมตรและสายอากาศรับสูง 50 เซนติเมตร.....	37
3.5.2.1 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	37
3.5.2.2 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	38
3.5.2.3 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	38
3.5.3 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางเมื่อความสูงของสายอากาศส่งสูง 150 เซนติเมตรและสายอากาศรับสูง 150 เซนติเมตร.....	39
3.5.3.1 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	39
3.5.3.2 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	40
3.5.3.3 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	40
3.6 บทสรุป.....	41
บทที่ 4 คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น.....	43
4.1 บทนำ.....	43
4.2 คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทางสถิติ.....	43
4.3 ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate; BER).....	45
4.3.1 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตในช่องสัญญาณแบบ Rayleigh.....	46
4.3.2 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตในช่องสัญญาณแบบ Rician.....	46
4.4 การทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตทางทฤษฎี.....	47
4.5 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตทางทฤษฎี.....	48
4.6 การทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูลผ่านทางการจำลอง ระบบการสื่อสาร.....	49
4.7 บทสรุป.....	50

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น ในสวนทุเรียน.....	51
5.1 บทนำ.....	51
5.2 การทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด.....	51
5.2.1 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด.....	53
5.3 การทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนด.....	58
5.3.1 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์ มายังโหนด.....	59
5.4 ผลการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (Bit Error Rate; BER).....	64
5.4.1 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด.....	64
5.4.2 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์มายัง โหนด.....	66
5.5 บทสรุป.....	69
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	72
6.1 บทนำ.....	72
6.2 สรุปผลการวิจัย.....	72
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	75
บรรณานุกรม.....	76
ภาคผนวก.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	85

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณ กำลังงานที่รับ และรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม โดยที่กำลังส่งมีค่าเท่ากับ $-10$ dBm ส่งและรับสัญญาณด้วยสายอากาศโมโนโพล....	57
5.2 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณ กำลังงานที่รับ และรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม โดยที่กำลังส่งมีค่าเท่ากับ $-10$ dBm ส่งและรับสัญญาณด้วยสายอากาศโมโนโพล....	63

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ภาพลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของระบบการสื่อสารไร้สาย .....	1
2.1 การสะท้อน.....	7
2.2 การเลี้ยวเบน.....	8
2.3 หลักการของฮอยเกนส์.....	9
2.4 การกระจัดกระจาย.....	9
2.5 ช่องสัญญาณการจางหาย (Fading channel).....	10
2.6 แบบจำลองสองรังสี.....	11
2.7 แบบจำลองสามรังสี [17].....	15
2.8 การทดสอบการสูญเสียตามเส้นทางและแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอย เชิงเส้นบริเวณลานจอดรถภายในห้างสรรพสินค้า [17].....	16
2.9 ค่าสัญญาณที่รับได้จากการทดสอบ [18].....	18
2.10 ค่ากำลังงานในแบบจำลองสองรังสี [19].....	19
2.11 ค่ากำลังงานที่รับได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองสองรังสี [19].....	19
3.1 ลักษณะของต้นทุเรียนที่ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณ.....	21
3.2 การติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ.....	22
3.3 การติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณภายในสวนทุเรียน.....	23
3.4 กำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศด้านส่งและ ด้านรับมีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตร.....	24
3.5 กำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศด้านส่ง 150 เซนติเมตร และด้านรับมีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตร.....	25
3.6 กำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศด้านส่งและด้านรับ มีค่าเท่ากับ 150 เซนติเมตร.....	26
3.7 แบบจำลองความชันเดี่ยวเมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	27
3.8 แบบจำลองความชันเดี่ยวเมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	28
3.9 แบบจำลองความชันเดี่ยวเมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	28
3.10 แบบจำลองความชันเดี่ยวเมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	29
3.11 แบบจำลองความชันเดี่ยวเมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	30
3.12 แบบจำลองความชันเดี่ยวเมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 แบบจำลองความชันเคียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	31
3.14 แบบจำลองความชันเคียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	32
3.15 แบบจำลองความชันเคียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	32
3.16 ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์.....	34
3.17 แบบจำลองความชันคุ่มเมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	35
3.18 แบบจำลองความชันคุ่มเมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	36
3.19 แบบจำลองความชันคุ่มเมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	36
3.20 แบบจำลองความชันคุ่มเมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	37
3.21 แบบจำลองความชันคุ่มเมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	38
3.22 แบบจำลองความชันคุ่มเมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	38
3.23 แบบจำลองความชันคุ่มเมื่ออยู่ในแถวที่ 1.....	39
3.24 แบบจำลองความชันคุ่มเมื่ออยู่ในแถวที่ 2.....	40
3.25 แบบจำลองความชันคุ่มเมื่ออยู่ในแถวที่ 3.....	40
4.1 การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในทางสถิติ.....	45
4.2 ค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูล (Bite Error Rate; BER).....	48
4.3 ลำดับชั้นการจำลองระบบสื่อสาร (การสื่อสารแบบ 2-FSK บนช่องสัญญาณแบบไร้ช้).....	49
5.1 แผนผังการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด.....	52
5.2 ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ระยะทางต่างๆเป็นฟังก์ชัน ของจำนวนการสุ่มสัญญาณ.....	53
5.2 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่อง วิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 16 เมตร.....	54
5.3 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่อง วิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 32 เมตร.....	54
5.4 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่อง วิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 48 เมตร.....	55
5.5 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่อง วิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 64 เมตร.....	55
5.6 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูดของสัญญาณ.....	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.7 ความน่าจะเป็นสะสมที่เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูดของสัญญาณ.....	56
5.8 ตำแหน่งของเซ็นเซอร์บนผลทุเรียน.....	58
5.9 ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆเป็นฟังก์ชัน ของจำนวนการสุ่มสัญญาณ.....	59
5.10 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1.....	60
5.11 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2.....	60
5.12 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 3.....	61
5.13 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 4.....	61
5.14 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูดของสัญญาณ.....	62
5.15 ความน่าจะเป็นสะสมที่เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูดของสัญญาณ.....	62
5.17 ค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับ สัญญาณรบกวน(โหนดต่อ โหนด).....	65
5.18 ค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับ สัญญาณรบกวน(เซ็นเซอร์มายัง โหนด).....	68
5.19 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูล เปรียบเทียบระหว่างการมอดูเลตแบบ 2-FSK และ BPSK ที่มีค่า $K = 5$ 10 และ 20 dB ของทั้งสองกรณี.....	70

การสร้างแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและคุณลักษณะช่องสัญญาณของระบบโครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์นั้น เพื่อศึกษาความน่าจะเป็นในการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบตรวจจับ ไร้สาย (Wireless sensor network in fruits inspection) ซึ่งเป็นโครงการที่ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ โดยมุ่งศึกษาและวิจัยในทุเรียนก่อน เนื่องจากทุเรียนเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของไทย

การลดทอนตามระยะทางและความแปรปรวนของสัญญาณที่แพร่กระจายคลื่นจะถูกเรียกว่า การจางหาย (Fading) การจางหายของสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การจางหายเนื่องจากระยะทางด้วยสเกลขนาดใหญ่ (Large scale fading) และการจางหายของสัญญาณจากระยะทางด้วยสเกลขนาดเล็ก (Small scale fading) ดังนั้นจึงมีผู้ศึกษาการแพร่กระจายคลื่นในสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น ในกลุ่มการจางหายเนื่องจากระยะทางด้วยสเกลขนาดใหญ่ ได้มีการสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายการลดทอนของคลื่นขึ้นมาหลายแบบจำลองด้วยกัน ตัวอย่างเช่น แบบจำลองช่องว่างอิสระ (Free space model) แบบจำลองสองรังสี (Two ray model) และแบบจำลองฮาดะ (Hata model) เป็นต้น เพื่อใช้ทำนายระยะการบริการสูงสุดของการสื่อสาร ในการศึกษาการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์นั้นแบบจำลองของฮาดะไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนได้ เนื่องจากแบบจำลองนี้จะมีค่าความแม่นยำก็ต่อเมื่อความถี่ที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่า 150 เมกะเฮิรตซ์ แต่ไม่เกิน 1500 เมกะเฮิรตซ์ ความสูงของสายอากาศด้านส่งที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่า 30 เมตร แต่ไม่เกิน 200 เมตร ความสูงของสายอากาศรับที่ใช้มีค่ามากกว่า 1 เมตร แต่ไม่เกิน 10 เมตร สำหรับแบบจำลองช่องว่างอิสระไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้เช่นเดียวกันเนื่องจากแบบจำลองนี้ไม่คิดผลของการสะท้อนจากพื้นโลกทำให้ระดับของการลดทอนมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ ส่วนในกลุ่มของการจางหายของสัญญาณจากระยะทางด้วยสเกลขนาดเล็กจะเป็นการทำนายด้วยการคำนวณทางสถิติและทำการทดสอบระดับสัญญาณทางสถิติเพื่อใช้ทำนายความแปรปรวนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการจางหายของสัญญาณได้มีการนำมาวิเคราะห์ทางสถิติอย่างมากมาย ตัวอย่างเช่น การกระจายตัวแบบไรซ์ (Rician) และการกระจายตัวแบบเรย์ลีห์ (Rayleigh) สำหรับในกรณีของการกระจายตัวแบบไรซ์ ได้ถูกนำมาวิเคราะห์สัญญาณที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบของสัญญาณหลัก เช่น การแพร่กระจายในแนวเส้นสายตา และองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อน หักเหของคลื่นจากสภาพแวดล้อม รวมถึงการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปทำนายอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูล ในทางการสื่อสารแบบดิจิทัลได้อีกด้วย

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อนำเสนอแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและคุณลักษณะช่องสัญญาณของระบบ โครงข่ายไร้สายที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ (Dual slope model) โดยการศึกษาแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและทำนายคุณลักษณะช่องสัญญาณของระบบ โครงข่ายไร้สายที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยวิธีการจำลองแบบช่องสัญญาณเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาอัตราความผิดพลาดบิต โดยการจำลองช่องสัญญาณการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย เนื่องจากมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

แบบจำลองการลดทอนคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คลื่นแพร่กระจายผ่าน ข้อค้อยของแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นที่มีการอธิบายด้วยกราฟค่าความชันเดี่ยว (Single slope regression) คือเมื่อเกิดการจางหายของสัญญาณอย่างรวดเร็ว (Fast fading) ซึ่งสังเกตได้จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นความชันเดี่ยวเมื่อค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางมีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วเส้นกราฟการถดถอยเชิงเส้นความชันเดี่ยวมีค่าไม่สอดคล้องกับค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง ดังนั้นการที่จะอธิบายการลดทอนของสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวจะไม่เหมาะสม สังเกตได้จากเมื่อ นำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองการลดทอนสัญญาณสำหรับการแพร่กระจายคลื่น ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ เนื่องจากวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่นั้นมีความถูกต้องสูง สังเกตได้จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นความชันคู่มีค่าสอดคล้องกับค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งของจุดรับสัญญาณที่อยู่ห่างออกไปจากเครื่องส่งมากๆ

ดังนั้นการแก้ปัญหาดังกล่าว เราจะใช้แบบจำลองการลดทอนสัญญาณสำหรับการแพร่กระจายคลื่น ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ ที่สามารถจะอธิบายการเกิดการจางหายของสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลการสูญเสียตามวิธีการถดถอยเชิงเส้นที่ใช้สำหรับการสื่อสารตามแนวสายตาในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองการลดทอนสัญญาณสำหรับการแพร่กระจายคลื่น ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ ในการสร้างแบบจำลองการลดทอนสัญญาณสำหรับการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการสื่อสารตามแนวสายตาในสวนทุเรียน

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การออกแบบแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางของระบบโครงข่ายไร้สายที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นในสวนทุเรียนนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ เนื่องจากว่าเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องสูง โดยเฉพาะในตำแหน่งที่จู่ได้รับสัญญาณอยู่ห่างจากเครื่องส่งมากๆ และการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (Bit Error Rate; BER) โดยใช้ช่องสัญญาณแบบไรซ์ ที่มีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุดนั้น เพื่อที่จะให้แบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ได้กับการสื่อสารที่มีลักษณะเดียวกันได้

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นและทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในสวนทุเรียน เพื่อที่จะนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และออกแบบระบบการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายภายในสวนทุเรียน สำหรับการออกแบบช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะกล่าวถึงแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว แล้วจึงออกแบบช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นด้วยแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ และมีการวิเคราะห์หาค่าอัตราความผิดพลาดบิต โดยการจำลองช่องสัญญาณสื่อสารข้อมูลขึ้น เพื่อนำมาหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 บทนำ ประกอบด้วย ความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 ทฤษฎีการสูญเสียตามเส้นทาง การแพร่กระจายคลื่น ซึ่งประกอบด้วยหลักการของการสูญเสียตามเส้นทาง การแพร่กระจายคลื่น กลไกพื้นฐานในการแพร่กระจายคลื่น ช่องสัญญาณการจางหาย (Fading Channel) แบบจำลองช่องว่างอิสระ แบบจำลองสองรังสี และแบบจำลองฮาดะ รวมทั้งทฤษฎีของแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว และแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่

บทที่ 3 แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทาง การแพร่กระจายคลื่น ประกอบด้วยผลการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น ทั้งแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิง

เส้นแบบความชันเดี่ยว และแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบค่าการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น

บทที่ 4 คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น กล่าวถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทางสถิติ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต และการทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูลผ่านทาง การจำลองช่องสัญญาณของระบบการสื่อสาร

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียน ประกอบด้วย การทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด และการทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนด การทำนายอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูล โดยการจำลองช่องสัญญาณของระบบการสื่อสาร และผลการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น

### 2.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะเป็นกลไกพื้นฐานในการแพร่กระจายคลื่น แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบต่างๆ การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นจะให้แบบจำลองอย่างง่าย และแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดทอนเชิงเส้นแบบความชันเดียว พร้อมทั้งแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดทอนเชิงเส้นแบบความชันคู่ ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาระบบการแพร่กระจายคลื่น

### 2.2 การสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น

ในระบบการสื่อสารแบบไร้สายนั้น คลื่นจะอาศัยการเดินทางจากจุดหนึ่งผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น (Propagation channel) [1], [3-5] ไปยังอีกจุดหนึ่งซึ่งพลังงานของคลื่นที่ส่งไปจะถูกลดทอนและเปลี่ยนแปลงตามระยะทางและคุณลักษณะของช่องสัญญาณ การแพร่กระจายคลื่นที่คลื่นเดินทางผ่าน ซึ่งคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คลื่นแพร่กระจายผ่าน เช่น โครงสร้างของอาคาร ต้นไม้ สิ่งกีดขวาง และลักษณะการติดตั้งสายอากาศ เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาระบบการแพร่กระจายคลื่นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการทำนายความต้องการของระบบที่ใช้ในการออกแบบระบบการสื่อสารให้มีประสิทธิภาพสูงสุด การลดทอนตามระยะทางและความแปรปรวนของสัญญาณที่แพร่กระจายคลื่นจะถูกเรียกว่า การจางหาย การจางหายของสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การจางหายเนื่องจากระยะทางด้วยสเกลขนาดใหญ่ และการจางหายของสัญญาณจากระยะทางด้วยสเกลขนาดเล็ก [7-8], [10] ดังนั้นจึงมีผู้ศึกษาการแพร่กระจายคลื่นในสถานะแวดล้อมต่างๆ เช่น ในกลุ่มการจางหายเนื่องจากระยะทางด้วยสเกลขนาดใหญ่ ได้มีการสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายการลดทอนของคลื่นขึ้นมาหลายแบบจำลองด้วยกัน ตัวอย่างเช่น แบบจำลองช่องว่างอิสระ แบบจำลองสองรังสี และแบบจำลองฮาตะ เป็นต้น เพื่อใช้ทำนายระยะบริการสูงสุดของการสื่อสารในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ในการศึกษาระบบการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ นั้นแบบจำลองของฮาตะไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนได้ เนื่องจากแบบจำลองนี้จะมี ความแม่นยำก็ต่อเมื่อความถี่ที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่า 150 เมกกะเฮิรตซ์ แต่ไม่เกิน 1500 เมกกะเฮิรตซ์ ความสูงของสายอากาศด้านส่งที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่า 30 เมตร แต่ไม่เกิน 200 เมตร ความสูงของ

สายอากาศรับที่ใช้มีค่ามากกว่า 1 เมตร แต่ไม่เกิน 10 เมตร สำหรับแบบจำลองช่องว่างอิสระไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากแบบจำลองนี้ไม่คิดผลของการสะท้อนจากพื้นโลกทำให้ระดับของการลดทอนมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ ส่วนในกลุ่มของการจางหายของสัญญาณจากระยะทางด้วยสเกลขนาดเล็กจะเป็นการทำนายด้วยการคำนวณทางสถิติและทำการทดสอบระดับสัญญาณทางสถิติเพื่อใช้ทำนายความแปรปรวนของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น รวมถึงการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปทำนายอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูลในทางการสื่อสารแบบดิจิทัลได้อีกด้วย

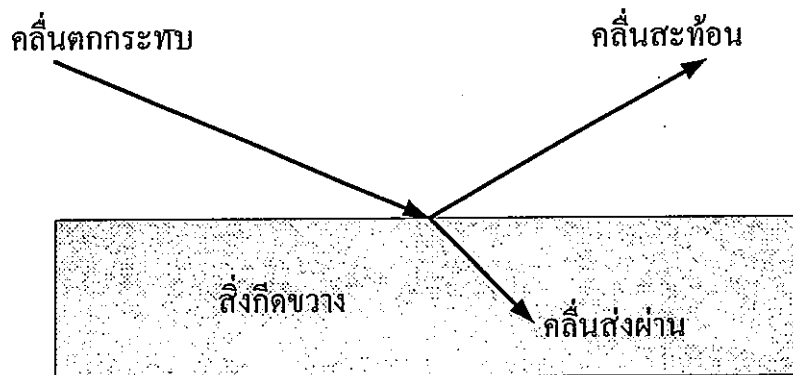
## 2.2.1 กลไกพื้นฐานในการแพร่กระจายคลื่น

กลไกพื้นฐานในการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วย 3 องค์ประกอบคือ

1. การสะท้อน (Reflection)
2. การเลี้ยวเบน (Diffraction)
3. การกระจัดกระจาย (Scattering)

กลไกพื้นฐานทั้ง 3 ในการแพร่กระจายคลื่นนั้นมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น [17] ในระบบสื่อสารดังแสดงในรูปที่ 2.1 ถึงรูปที่ 2.4

### 2.2.1.1 การสะท้อน

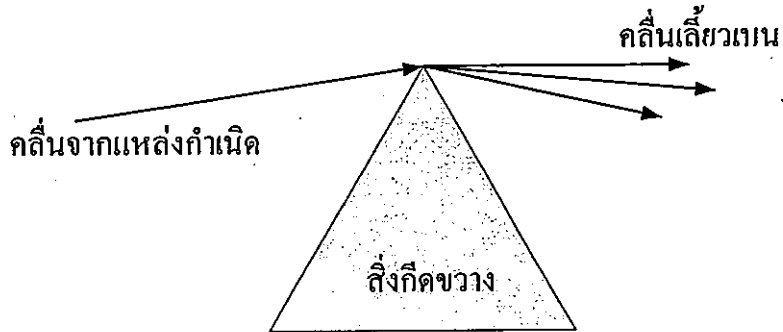


รูปที่ 2.1 การสะท้อน

การสะท้อนเกิดเมื่อคลื่นวิทยุแพร่กระจายไปกระทบวัตถุที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ นั้น โดยทั่วไปแล้วการสะท้อนคลื่นเกิดจากผิวดิน ดึก และผนังต่างๆ เป็นต้น โดยที่เมื่อคลื่นวิทยุแพร่กระจายไปในตัวกลางหนึ่ง แล้วไปกระทบกับอีกตัวกลางหนึ่ง ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แล้วคลื่นวิทยุบางส่วนจะสะท้อน และมีบางส่วนจะแพร่ผ่านตัวกลางที่สองไป ถ้าคลื่นตกกระทบบนวัตถุที่มีค่าไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ (Perfect dielectric) แล้วและไม่มีการสูญเสียพลังงานซึ่งเกิดจากการดูดกลืน แต่ถ้าตัวกลางที่สองเป็นตัวนำสมบูรณ์

(Perfect conductor) แล้วพลังงานที่ตกกระทบทั้งหมดจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางแรก โดยปราศจากการสูญเสียพลังงาน ความเข้มสนามไฟฟ้าของคลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่านสัมพันธ์กับคลื่นตกกระทบในตัวกลางแรกด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเฟรสเนล (Fresnel reflection coefficient;  $\Gamma$ ) ซึ่งค่า  $\Gamma$  นี้จะเป็นฟังก์ชันของคุณสมบัติของตัวกลาง และโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับโพลาไรซ์ มุมของคลื่นตกกระทบ และความถี่ของคลื่น

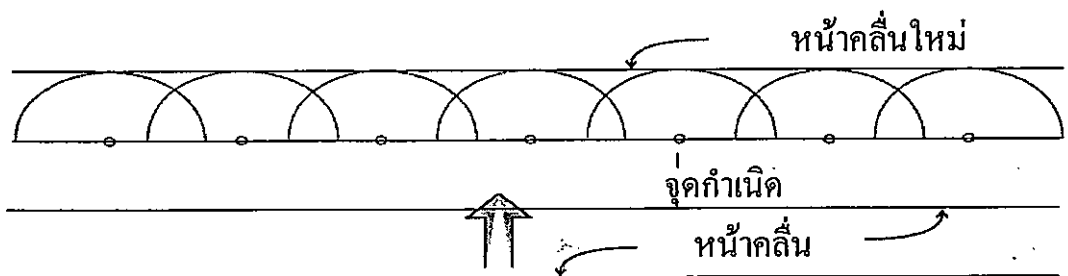
### 2.2.1.2 การเลี้ยวเบน

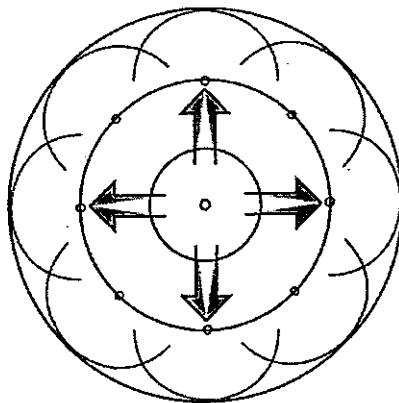


รูปที่ 2.2 การเลี้ยวเบน

การเลี้ยวเบนเกิดเมื่อวิถีคลื่นวิทยุระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับถูกสิ่งกีดขวางโดยขอบของวัตถุเช่น ขอบตึก ขอบหลังคา เป็นต้น โดยการเลี้ยวเบนของคลื่นทำให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้แม้จะถูกสิ่งกีดขวางทางเดินของคลื่นวิทยุ และการเลี้ยวเบนของคลื่นนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุที่มากีดขวาง และยังมีขนาดเฟส และ โพลาไรซ์ของคลื่นที่มาตกกระทบก็จะมีผลต่อการเลี้ยวเบนของคลื่นด้วยเช่นกัน

โดยที่การเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุ นั้น ทำให้เครื่องรับสามารถที่จะรับสัญญาณได้ ถึงแม้ว่าวิถีของคลื่นจะถูกสิ่งกีดขวางด้วยสิ่งกีดขวางก็ตาม ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของคลื่นสามารถที่จะอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของฮอยเกนส์ ที่กล่าวไว้ว่า “ทุกจุดบนหน้าคลื่นจะเป็นจุดกำเนิดคลื่นสำหรับผลิตคลื่นใหม่ และคลื่นใหม่เหล่านี้จะรวมกันเพื่อผลิตหน้าคลื่นใหม่ ในทิศทางการแพร่กระจายคลื่นนั้น”

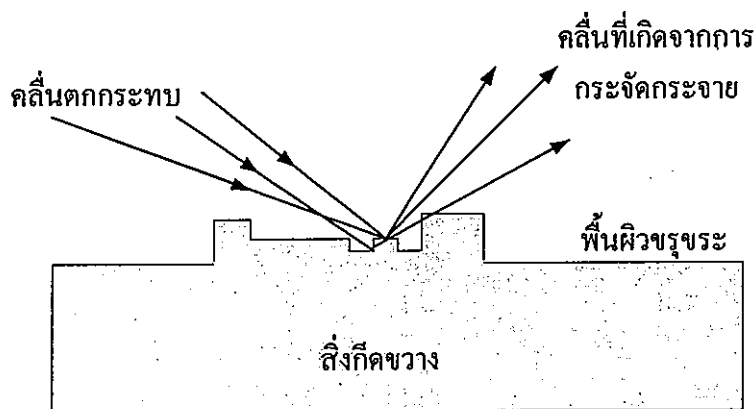




(ข)

รูปที่ 2.3 หลักการของฮอยเกนส์

### 2.2.1.3 การกระจัดกระจาย

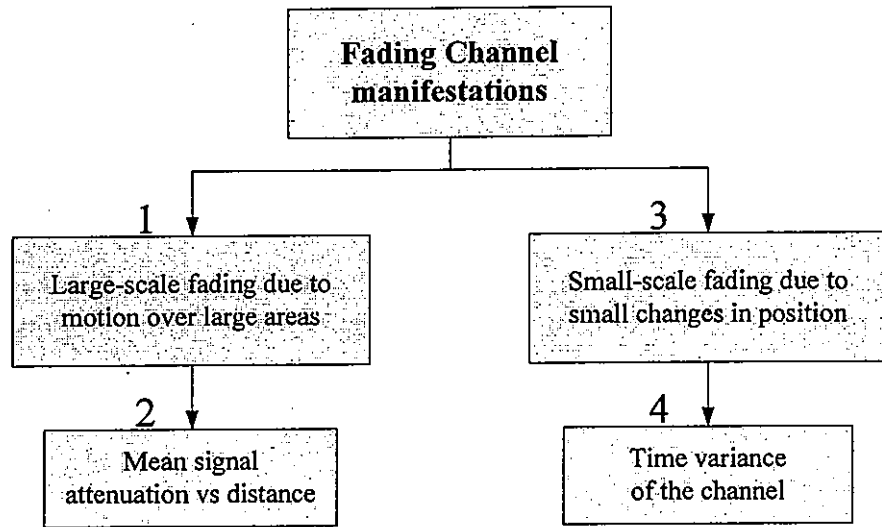


รูปที่ 2.4 การกระจัดกระจาย

การกระจัดกระจายเมื่อเกิดตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านมีวัตถุที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น และจำนวนของสิ่งกีดขวางต่อหน่วยปริมาตรมีค่ามาก การกระจัดกระจายในทางปฏิบัติเกิดจาก ใบไม้ ท้องถนน เสาไฟฟ้า โคมไฟ และอื่นๆอีกมากมาย

โดยการรับส่งสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยทั่วไปจะมีความแรงของสัญญาณมากกว่าค่าสัญญาณที่ทำนายจากแบบจำลองการสะท้อนและเลี้ยวเบนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากคลื่นตกกระทบผิววัตถุที่มีความขรุขระ แล้วพลังงานจะถูกแผ่ออกไปในทุกทิศทาง เนื่องจากการกระจัดกระจายนี้เองวัตถุต่างๆ เช่น โคมไฟบนท้องถนน และต้นไม้ก็เป็นสิ่งที่สามารถกระจัดกระจายพลังงานของคลื่นได้ทุกทิศทางเช่นเดียวกัน

### 2.2.2 ช่องสัญญาณการจางหาย (Fading Channel)



รูปที่ 2.5 ช่องสัญญาณการจางหาย

จากรูปที่ 2.5 เป็นการแสดงช่องสัญญาณการจางหาย [9] โดยจะแบ่งการจางหายของสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การจางหายเนื่องจากระยะทางด้วยสเกลขนาดใหญ่ และการจางหายของสัญญาณจากระยะทางด้วยสเกลขนาดเล็ก โดยการจางหายเนื่องจากระยะทางด้วยสเกลขนาดใหญ่ในบล็อกที่ 1 ก็จะมีค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้หรือค่าการสูญเสียเปลี่ยนไปตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นซึ่งแสดงในบล็อกที่ 2 โดยอาจเกิดขึ้นจากภูเขา ป่าไม้ ป่าชายโชนา หรือ อาคาร ที่ตั้งกีดขวางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ ส่วนในบล็อกที่ 3 เป็นการจางหายของสัญญาณจากระยะทางด้วยสเกลขนาดเล็กหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การจางหายที่เปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งแสดงในบล็อกที่ 4 จะเป็นการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณทางเวลา เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในช่องสัญญาณนั้นตามเวลาที่เปลี่ยนไป เช่นเกิดการเคลื่อนที่ของรถยนต์ ต้นไม้เมื่อถูกลมพัด เครื่องบิน เป็นต้น ดังนั้นสัญญาณทางด้านเครื่องรับที่จะสามารถอธิบายได้โดยการใช้ข้อมูลทางสถิติเช่น การจางหายแบบเรย์ลีห์ เมื่อสัญญาณนั้นไม่มีองค์ประกอบของสัญญาณหลักที่มีมายังจุดสังเกต โดยมีเฉพาะสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทางเช่น จากการสะท้อน หักเห เป็นต้น และ ช่องสัญญาณทางสถิติแบบไรซ์ เมื่อสัญญาณเหล่านั้นมีองค์ประกอบหลักและมีสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทางร่วมด้วย

### 2.2.2.1 แบบจำลองช่องว่างอิสระ (Free Space Model)

เป็นแบบจำลองที่ใช้ทำนายการลดทอนของสัญญาณในกรณีที่ช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นไม่มีสิ่งกีดขวางเมื่อคลื่นแพร่กระจายผ่าน เมื่อพิจารณาตัวแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic radiator) ซึ่งไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจริงของการจำลอง เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ จะออกแบบใช้กับสวนทุเรียนที่มีสิ่งกีดขวาง เช่น ลำต้น กิ่ง ก้าน และใบของต้นทุเรียน การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในกรณีช่องว่างอิสระสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

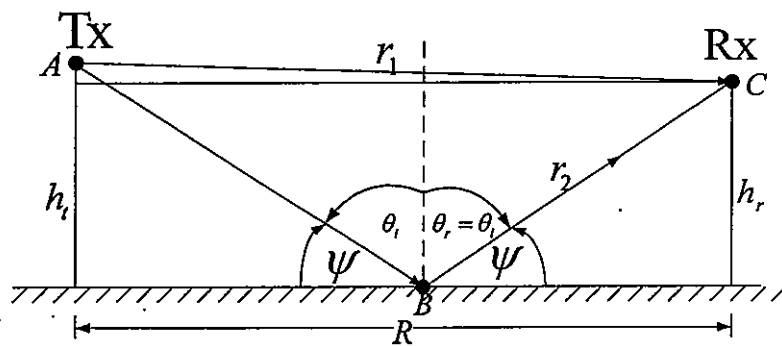
$$L_{fs} = 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) = 20 \log \left( \frac{4\pi \times 1,000 \times R_{km}}{299.8 / f_{MHz}} \right) \quad (2.1)$$

### 2.2.2.2 แบบจำลองสองรังสี (Two Ray Model)

การสื่อสารแบบจุดต่อจุดในสถานะแวดล้อมมีเส้นทางการมองเห็นในแนวเส้นสายตา (Line of Sight: LOS) ดังในรูปที่ 2.6 การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในภาวะเส้นทางเดินในแนวเส้นสายตา สามารถเขียนในหน่วย dB ได้ดังนี้

$$L_{LOS} = 10 \log_{10} \left[ \frac{(h_t h_r)^2}{R^4} \right] = 120 + 40 \log_{10} R_{km} - 20 \log_{10} (h_{tm} h_{rm}) \quad (2.2)$$

โดยที่  $R_{km}$  คือ ระยะทางมีหน่วยเป็นกิโลเมตร  $h_{tm}$  และ  $h_{rm}$  คือความสูงสายอากาศด้านส่งและด้านรับมีหน่วยเป็นเมตร



รูปที่ 2.6 แบบจำลองสองรังสี

ส่วนในกรณีของแบบจำลองหาคะ เป็นแบบจำลองอย่างง่าย โดยที่แบบจำลองนี้จะมีความแม่นยำ เมื่อความถี่ที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่า 150 เมกะเฮิรตซ์ แต่ไม่เกิน 1500 เมกะเฮิรตซ์ ความสูงของสายอากาศด้านส่งที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่า 30 เมตร แต่ไม่เกิน 200 เมตร ความสูงของสายอากาศรับที่ใช้มีค่ามากกว่า 1 เมตร แต่ไม่เกิน 10 เมตร ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เงื่อนไขในการออกแบบ

คิดค้น และทดสอบไม่เป็นไปตามแบบจำลองของฮาดะ ดังนั้นแบบจำลองของฮาดะจึงไม่เหมาะที่จะใช้งานในกรณีนี้

ในการศึกษาและสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ จะทำโดยการทดสอบระดับสัญญาณในสถานที่จริงและนำมาสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งผลการศึกษามีความสำคัญอย่างมากเพื่อนำไปใช้ทำนายระดับสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในการติดตั้งตัวตรวจจับแบบไร้สายในระบบของตรวจจับแบบไร้สายในสวนทุเรียน

### 2.2.3 หลักการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น

ในการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นจะใช้แบบจำลองอย่างง่าย ซึ่งเป็นวิธีที่ได้มาจากข้อมูลที่ทำกรทดสอบในสถานการณ์จริง จากนั้นนำมาสร้างกราฟเส้นตรงโดยวิธีถดถอยเชิงเส้น เพื่อหาค่าความชันของเส้นกราฟหรือที่เรียกว่าเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน (Path loss exponent;  $n$ )

การลากเส้นกราฟเส้นตรงผ่านกลุ่มจุดข้อมูลที่กำหนดทำ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of least squares) วิธีนี้ให้หาค่า  $\sum x_i$ ,  $\sum y_i$ ,  $\sum x_i y_i$  และ  $\sum x_i^2$  แล้วนำไปแทนค่าหาความชัน  $n$  และระยะตัดแกน คือ  $c$  จากสมการต่อไปนี้ แล้วนำไปแทนในสมการเส้นตรง  $y = nx + c$  แทนค่า  $x$  ลงในสมการเพื่อหาค่า  $y$  ที่ดีที่สุด

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (2.3)$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\sum x_i$  คือ ค่าผลรวมของระยะทางในการทดสอบ

$\sum y_i$  คือ ค่าผลรวมของสัญญาณในการทดสอบ

$N$  คือจำนวนของข้อมูลในการทดสอบสัญญาณ

เมื่อทราบสมการเส้นตรงที่ดีที่สุด ดังนั้นเราสามารถลากเส้นกราฟที่ดีที่สุดได้ เส้นกราฟนี้เรียกว่า เส้นการถดถอย หรือเส้นการทำนาย (Prediction line) โดยการทำนายค่า  $y$  เมื่อทราบค่า  $x$  หลักการของวิธีนี้ทำให้ได้ผลบวกของ  $y^2$  ของทุกจุดข้อมูลมีค่าน้อยที่สุด หลักการนี้ทำให้ได้สูตรของความชัน  $n$  และ ค่าเริ่มต้น  $c$  เพื่อที่จะตรวจสอบระดับของความถูกต้องของกราฟเส้นตรงที่

ลากผ่านกลุ่มจุดข้อมูลที่กำหนด จะทำการตรวจสอบโดยการพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างกราฟ ซึ่งค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์นี้ คือ ค่าที่แสดงความสัมพันธ์กันของชุดข้อมูล ถ้าชุดของข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบสมบูรณ์ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์จะมีค่าเท่ากับ 1

### 2.2.3.1 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว

ค่าการลดทอนของระดับสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากการทดสอบระดับสัญญาณสามารถเขียนกราฟการลดถอยเชิงเส้นที่มีเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  ได้ตามสมการด้านล่างต่อไปนี้

$$L_{LOS}(d) = L(d_0) + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)^n \quad (\text{dB}) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $L_{LOS}$  คือค่าการลดทอนที่ระยะทางใด ๆ  $L(d_0)$  คือค่าการลดทอนเริ่มต้นที่ระยะทาง  $d_0$

ซึ่ง  $L(d_0)$  คำนวณอย่างง่ายจากสมการค่าการสูญเสียในช่องว่างอิสระ ที่ระยะทางใกล้กับเครื่องส่ง แสดงในสมการที่ (2.1) ดังนั้นสามารถใช้กราฟลดถอยเชิงเส้นของระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบซึ่งอยู่ในรูปของเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  เพื่อที่จะทำการทำนายค่าระดับสัญญาณที่ระยะทางใด ๆ ของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้น หรือช่องสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันได้

### 2.2.3.2 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่

แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวนั้นเหมาะสมสำหรับการทำนายระดับสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นที่มีระยะทางไกล เนื่องจากระดับสัญญาณที่สุ่มในระยะทางต่างๆที่มีระยะที่ห่างกัน จะมีแนวโน้มการลดทอนเป็นเส้นตรง เมื่อทำการทดสอบการลดทอนการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะทางสั้นๆ พบว่าแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่จะมีความเหมาะสมมากกว่า และเมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างระหว่างกราฟการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ายังมีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ที่ค่าดังนั้นจึงต้องมาพิจารณาการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่

ค่าการลดทอนของระดับสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากการทดสอบระดับสัญญาณสามารถเขียนกราฟการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่มีค่าความชันเป็น  $n_1$  และ  $n_2$  ได้ตามสมการด้านล่างต่อไปนี้

$$L_{LOS}(d) = \begin{cases} L_{Rb,1} + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{R_b} \right)^{n_1} & \text{for } d < R_b \\ L_{Rb,2} + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{R_b} \right)^{n_2} & \text{for } d > R_b \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (2.6)$$

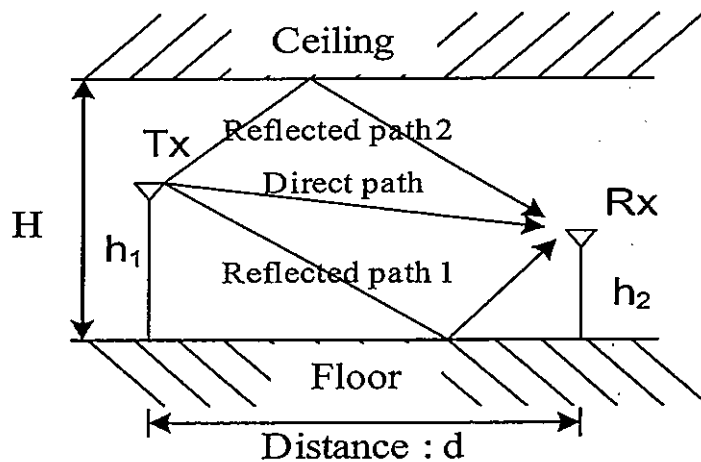
เมื่อ  $L_{LOS}$  คือค่าการลดทอนตลอดระยะทางใด ๆ  $R_b$  คือระยะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ  $L_{Rb,1}$  คือค่าการลดทอนเริ่มต้นที่จุดเปลี่ยนแปลงความชันและ  $n_1$  คือเลขชี้กำลังของค่าการลดทอนที่ระยะทาง  $d$  มีค่าน้อยกว่า  $R_b$  และ  $L_{Rb,2}$  คือค่าการลดทอนเริ่มต้นและ  $n_2$  คือเลขชี้กำลังของค่าการลดทอนที่ระยะทาง  $d$  มีค่ามากกว่า  $R_b$  ดังนั้นสามารถใช้กราฟลดทอนเชิงเส้นของระดับสัญญาณแบบความชันคู่ที่ได้จากการทดสอบซึ่งอยู่ในรูปของเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n_1$  และ  $n_2$  เพื่อที่จะทำการทำนายค่าระดับสัญญาณที่ระยะทางใด ๆ ของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้น หรือช่องสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันได้ดีกว่าการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดทอนเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว การระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ  $R_b$  ในการเขียนเส้นกราฟจากการทดลองนั้น จะทำโดยการเปลี่ยนแปลงระยะทาง  $R_b$  และคำนวณหาค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างระหว่างกราฟการลดทอนเชิงเส้นและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบ โดยแบ่งการคำนวณออกเป็นสองช่วงคือช่วงระยะทางที่น้อยกว่าระยะ  $R_b$  และช่วงระยะทางที่มากกว่าระยะ  $R_b$  โดยจะทำการหาค่า ระยะทาง  $R_b$  ที่ดีที่สุดในแต่ละการทดสอบระดับสัญญาณ

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่ได้รับความนิยมและถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบการสื่อสารไร้สายนั้น ได้แก่ แบบจำลองช่องว่างอิสระ แบบจำลองสองรังสี และแบบจำลองฮาดะ เป็นต้น เพื่อให้ทำนายระยะบริการสูงสุดของการสื่อสาร แบบจำลองของฮาดะไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนได้ เนื่องจากแบบจำลองนี้จะมีความแม่นยำก็ต่อเมื่อความถี่ที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่า 150 เมกะเฮิร์ตซ์ แต่ไม่เกิน 1500 เมกะเฮิร์ตซ์ ความสูงของสายอากาศด้านส่งที่ใช้ต้องมีค่ามากกว่า 30 เมตร แต่ไม่เกิน 200 เมตร ความสูงของสายอากาศรับที่ใช้มีค่ามากกว่า 1 เมตร แต่ไม่เกิน 10 เมตร สำหรับแบบจำลองช่องว่างอิสระไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้เช่นเดียวกันเนื่องจากแบบจำลองนี้ไม่คิดผลของการสะท้อนจากพื้นโลกทำให้ระดับของการลดทอนมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ และเมื่อพิจารณาแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดทอนเชิงเส้นแบบความชันคู่แล้ว เนื่องจากว่าเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องสูง โดยเฉพาะในตำแหน่งที่จุดรับสัญญาณอยู่ห่างจากเครื่องส่งมากๆ สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ที่มีมาก่อนดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

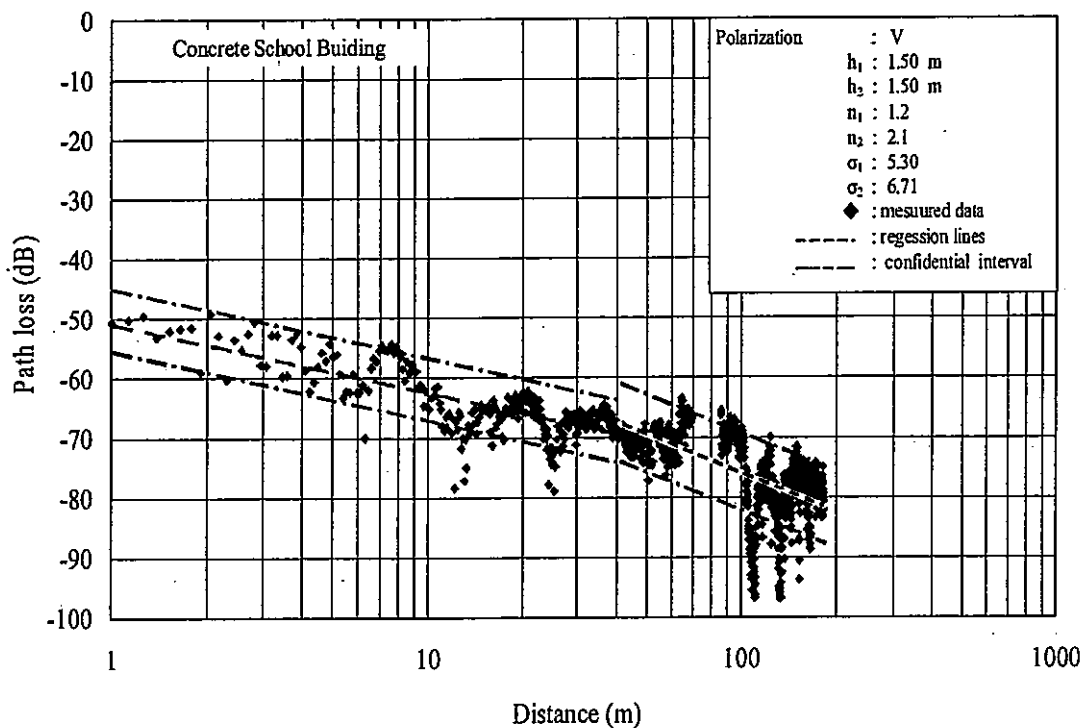
**2.3.1 ขอบเขตบนและล่างของแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางของสัญญาณหลักที่ไม่มีการสูญเสียสำหรับการแพร่กระจายคลื่นของโทรศัพท์มือถือภายในอาคาร (New upper and lower bounds line of sight path loss model for mobile propagation in buildings)**

งานวิจัยนี้ถูกนำเสนอโดย Supachai Phaiboon และคณะ ซึ่งเป็นวิธีการทำนายองค์ประกอบของสัญญาณหลักที่ไม่มีการจางหายเนื่องจากการสูญเสียตามเส้นทาง โดยจะทำการทดสอบสัญญาณเป็น 2 กรณีภายในอาคารที่มีความถี่ 1.8 กิกะเฮิรตซ์ [17] และเสนอแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางใหม่โดยอาศัยขอบเขตด้านบนและล่าง ซึ่งเป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของข้อมูลการสูญเสียตามเส้นทาง โดยในงานวิจัยได้มีการเก็บผลในหลายกรณีเช่น เมื่อมีผู้คนและไม่มีผู้คนเดินไปมาภายในลานจอดรถ และเมื่อมีรถยนต์วิ่งผ่านและไม่มีรถยนต์วิ่งผ่านภายในลานจอดรถ โดยผลจากงานวิจัยและผลวัด แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นผลการทดสอบภายในอาคาร

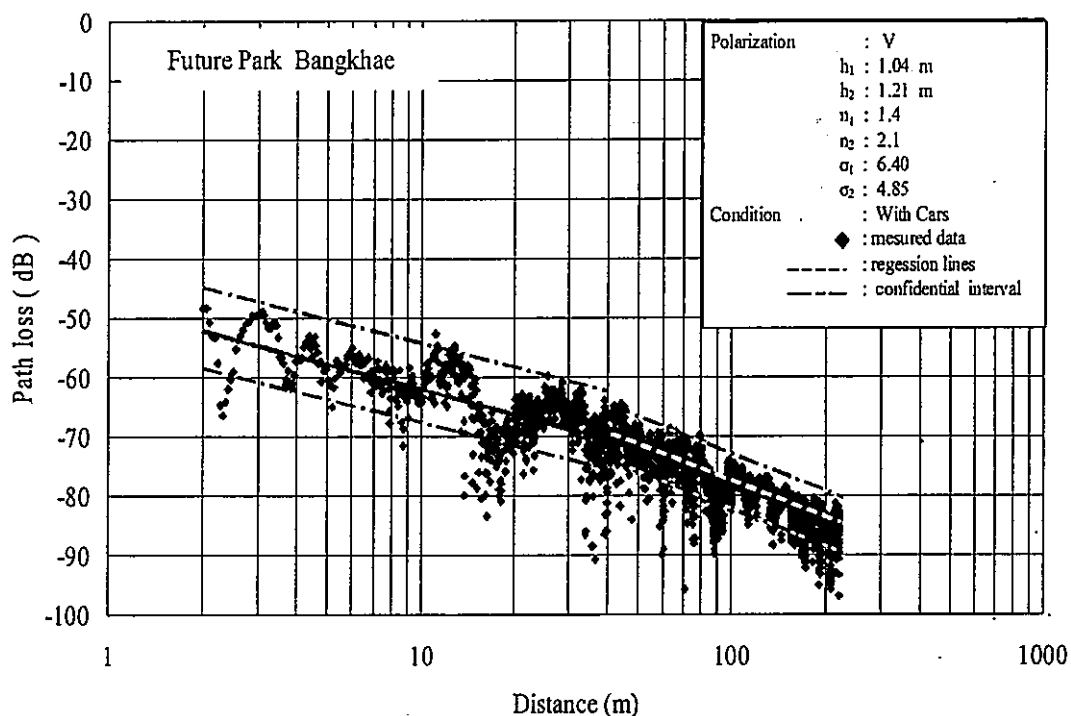


รูปที่ 2.7 แบบจำลองสามรังสี [17]

รูปที่ 2.7 เป็นแบบจำลองสามรังสี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นแบบจำลองในการหาค่าระยะจุดเปลี่ยน (Break point distance) เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการกำหนดขอบเขตของการลดทอนของสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้น



(ก) กรณีไม่มีคนเดินผ่าน



(ข) กรณีที่มีคนเดินผ่าน

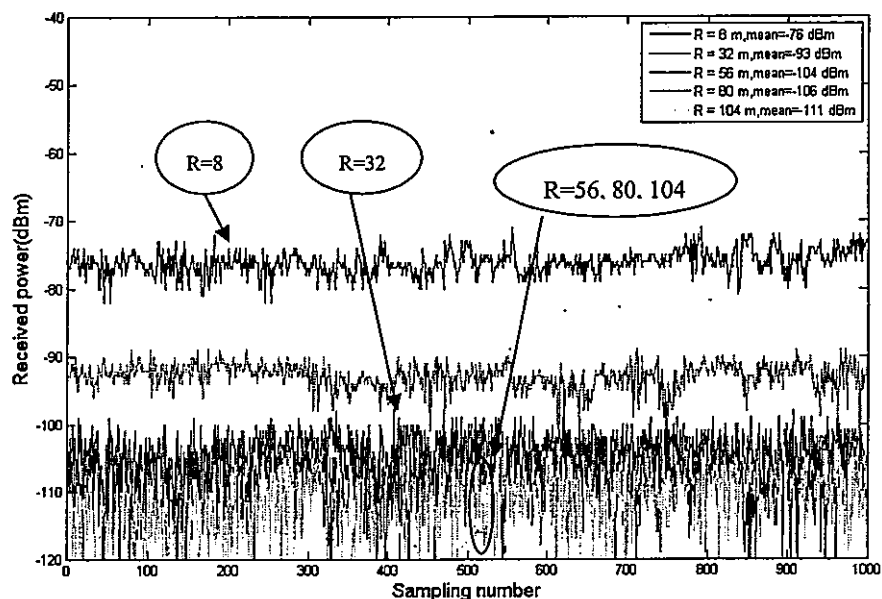
รูปที่ 2.8 การทดสอบการสูญเสียตามเส้นทางและแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการ  
 ถอดอยเชิงเส้นภายในตึกของโรงเรียนที่เป็นตึกคอนกรีต [17]

จากรูปที่ 2.8 เป็นการทดสอบการสูญเสียตามเส้นทางและแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นในคิกของโรงเรียนที่เป็นคิกคอนกรีต พบว่าในกรณีเมื่อการสูญเสียตามเส้นทางที่มีคนเดินผ่านมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานการสูญเสียตามเส้นทางสูงกว่ากรณีที่ไม่มีคนเดินผ่านสังเกตได้จากที่ระยะมากกว่า 54 เมตร ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนของการทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณสูงมากเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีคนเดินผ่าน

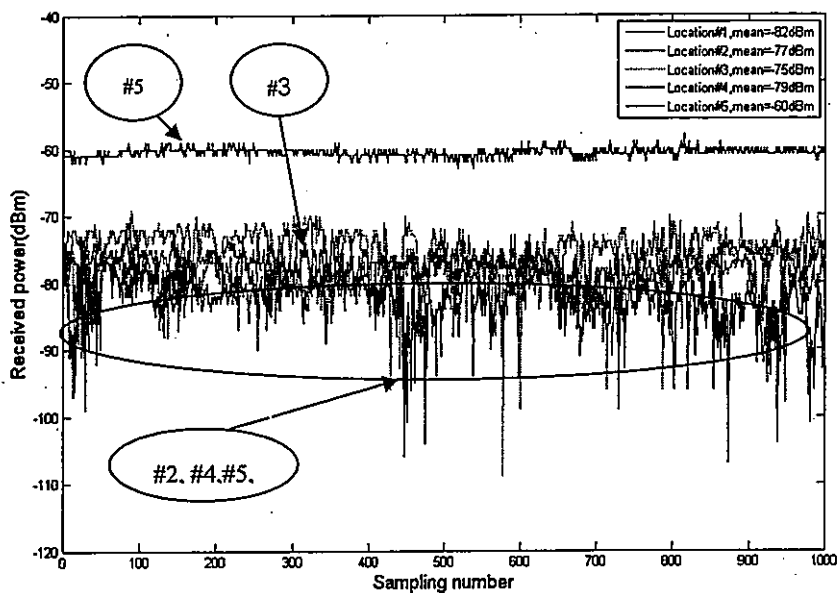
### 2.3.2 การทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางสถิติของการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียน สำหรับโครงข่ายการตรวจจับที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิร์ตซ์ (Statistical Characteristic Measurements of Propagation in Durian Orchard for Sensor Network at 5.8 GHz)

งานวิจัยนี้ถูกนำเสนอโดย Kittisak Phaebua และคณะ ซึ่งเป็นการทดสอบผลเกี่ยวกับค่าคุณลักษณะเฉพาะทางสถิติของโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิร์ตซ์ [18] โดยจะทราบถึงคุณลักษณะเฉพาะของช่องสัญญาณของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในสวนทุเรียน ช่องสัญญาณการสื่อสารข้อมูลจะติดต่อกันระหว่าง เซ็นเซอร์ต่อโหนดและระหว่างโหนดต่อโหนด ซึ่งในการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารนั้นในกรณีการติดต่อกันระหว่างโหนดต่อโหนด จะทำการติดตั้งเครื่องส่งไว้โหนดต้นทุเรียน 1 จุด และจะใช้เครื่องรับที่เป็นเครื่องวิเคราะห์สัญญาณในการตรวจวัดสัญญาณ โดยจะวัดสัญญาณทุกๆ โหนดหรือทุกๆ ต้น

ส่วนในกรณีการติดต่อกันระหว่างเซ็นเซอร์ต่อโหนดจะทำการติดตั้งเครื่องส่งไว้บนกิ่งทุเรียนสำหรับด้านรับจะติดตั้งบนลูกทุเรียน แล้วทั้ง 2 กรณีจะใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณเป็นตัวตรวจวัดสัญญาณที่รับได้



(ก) โหนดต่อโหนด



(จ) เซ็นเซอร์ต่อ โหนด

รูปที่ 2.9 ค่าสัญญาณที่รับ ได้จากการทดสอบ [18]

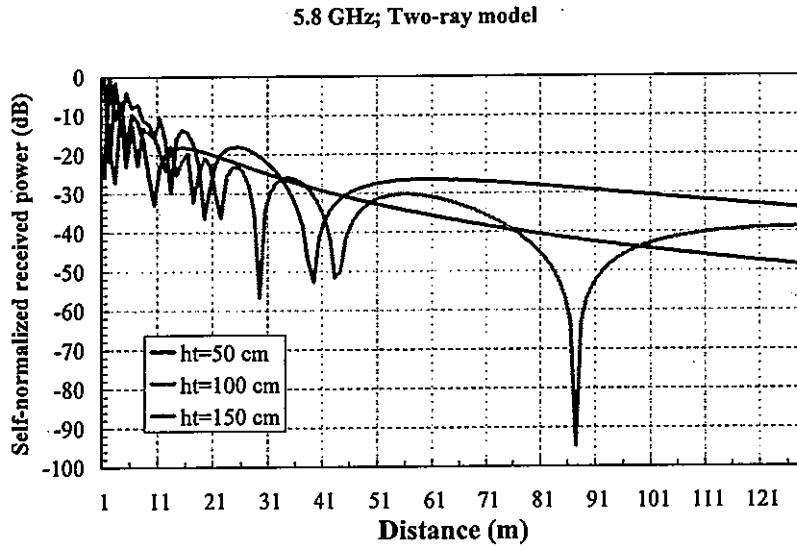
จากรูปที่ 2.9 เป็นค่าระดับของสัญญาณที่รับ ได้ของทั้ง 2 กรณีซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าความเข้มของสัญญาณเปรียบเทียบกับจำนวนของสัญญาณที่ทำการสุ่มวัดโดยจะพบว่าในรูป (ก) เป็นการติดต่อระหว่าง โหนดต่อ โหนด ค่าที่รับ ได้มีความเปลี่ยนแปลงของความเข้มของสัญญาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับรูป (จ) ที่เป็นการติดต่อระหว่างเซ็นเซอร์ต่อ โหนด

สรุปผลค่าต่างๆในกรณีการติดต่อ โหนดต่อ โหนดซึ่งจะทำการทดสอบที่ระยะ 8 32 56 80 และ 104 เมตร พบว่าค่ากำลังงานรับเฉลี่ยมีค่าต่ำสุดที่ 104 เมตรคือ -111 dBm และค่ากำลังงานรับเฉลี่ยมีค่าสูงสุดที่ 8 เมตรคือ -76 dBm ซึ่งเกิดจากการจางหายของสัญญาณเนื่องจากระยะทางที่เพิ่มขึ้นระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ และนำผลมาพล็อตแบบ Histogram plot หาค่า PDF (Probability Density Function)

### 2.3.3 แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและผลการทดสอบที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ของโครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียน (Path Loss Model and Measurements of 5.8 GHz Wireless Network in Durian Garden)

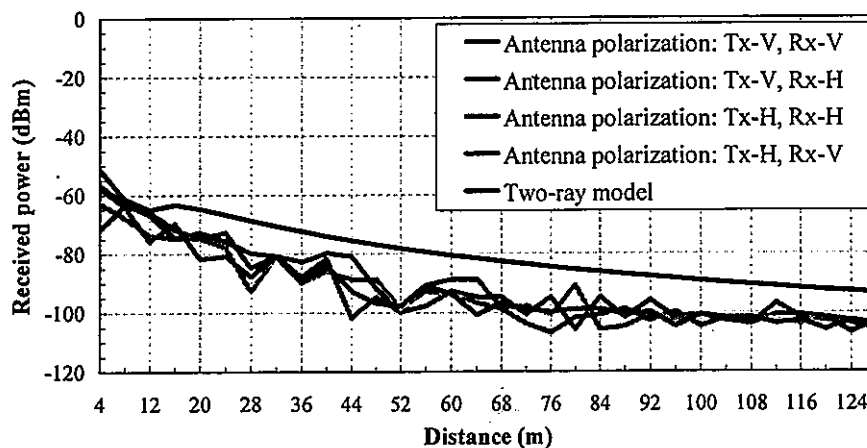
งานวิจัยนี้ถูกนำเสนอ โดย Rattapong Suwalak และคณะ ซึ่งเป็นการวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและการทดสอบผลของสัญญาณในโครงข่ายไร้สายภายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ [19] ซึ่งจะมุ่งสนใจเกี่ยวกับระบบการสื่อสารไร้สายสำหรับการวินิจฉัยและออกแบบระบบการสื่อสารให้กับสวนทุเรียนโดยระบุย่านความถี่ในการสื่อสาร

กำลังงานการส่งผ่าน ตำแหน่งในการติดตั้งสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ค่าการสูญเสียตามเส้นทางที่ระยะทาง 128 เมตร มีค่าเท่ากับ -50 dB



รูปที่ 2.10 ค่ากำลังงานในแบบจำลองสองรังสี [19]

จากรูปที่ 2.10 เป็นแบบจำลองสองรังสีซึ่งเป็นแบบจำลองที่งานวิจัยนี้นำมาเป็นแบบจำลองอ้างอิงกับผลการทดสอบค่าการสูญเสียเนื่องจากระยะทาง โดยที่ค่ากำลังงานที่รับได้ในฟังก์ชันของระยะทางที่ความสูงของสายอากาศแตกต่างกันที่เป็นกราฟของแบบจำลองสองรังสี จากนั้นทำการทดสอบค่ากำลังงานการสูญเสียตามระยะทางในรูปแบบต่างๆ และนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองสองรังสี การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบสัญญาณซึ่งจะให้เครื่องส่งอยู่กับที่ แล้วนำเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมาเป็นตัวรับสัญญาณโดยจะเคลื่อนที่ไปวัดทีละจุดทุกๆ 4 เมตรจนครบ 128 เมตร ซึ่งในการติดตั้งอุปกรณ์นั้นก็แบ่งออกหลายกรณีเช่น ที่โพลาริซชันของสายอากาศส่งและสายอากาศรับอยู่ในแนวนอน หรือในแนวตั้งเป็นต้น



รูปที่ 2.11 ค่ากำลังงานที่รับได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองสองรังสี [19]

จากรูปที่ 2.11 แสดงค่ากำลังงานที่รับได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองสองรังสีโดยพบว่าค่ากำลังงานรับนั้นมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองสองรังสีในทุกกรณี เนื่องจากแบบจำลองสองรังสีเป็นแบบจำลองที่พิจารณาพื้นที่อยู่ระหว่างตัวส่งกับตัวรับเป็นตัวกลางที่ไม่มีการดูดกลืนทำให้ผลของการจำลองมีค่าดีกว่าค่าที่วัดจริงในทุกๆกรณี

## 2.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองช่องว่างอิสระ แบบจำลองสองรังสี และแบบจำลองฮาตะ รวมทั้งทฤษฎีการสร้างแบบจำลองการลดทอนสัญญาณ ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว และแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึง กลไกพื้นฐานในการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วย 3 องค์ประกอบคือการสะท้อน การเลี้ยวเบน และการกระจัดกระจาย รวมถึง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย งานวิจัยขอบเขตบนและล่างของแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางของสัญญาณหลักที่ไม่มีการสูญเสียสำหรับการแพร่กระจายคลื่นของโทรศัพท์มือถือภายในอาคาร งานวิจัยการทดสอบคุณลักษณะเฉพาะทางสถิติของการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนสำหรับโครงข่ายการตรวจจับที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ และงานวิจัยแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและผลการทดสอบที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิรตซ์ ของโครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียน เป็นต้น

โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเทคนิคและวิธีการต่างๆจากงานวิจัยที่มีมาก่อนแล้ว มาประยุกต์ใช้งานยกตัวอย่างเช่น วิธีการถดถอยเชิงเส้น มาใช้เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการกำหนดขอบเขตของการลดทอนของสัญญาณ และนำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมของระยะเปลี่ยนแปลงความชัน  $R$ , สำหรับวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ โดยใช้ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์มาทำการพิจารณาหาค่าระยะเปลี่ยนแปลงความชัน  $R$ , และในส่วนของ 2 ซึ่งได้นำเทคนิคการทดสอบค่าคุณลักษณะเฉพาะทางสถิติของโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายในสวนทุเรียนแล้วนำผลที่วัดได้มาพล็อตแบบ Histogram plot และหาค่า PDF ของการกระจายตัวแบบไรซ์ เพื่อหาค่า  $K$  ซึ่งใช้ในการจำลองหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลในระบบสื่อสาร

### บทที่ 3

## แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น ในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

### 3.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการติดตั้งอุปกรณ์ในการวิเคราะห์สัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางและผลการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทาง (Path loss) ที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ รวมทั้งแสดงกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว และกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าผลการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางในรูปแบบต่างๆ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบตรวจจับ ไร้สาย ที่ทำวิจัยในสวนทุเรียนเพื่อต้องการที่จะทราบว่าลูกทุเรียนมีความสุก แก่พอที่จะเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ในช่วงใด และงานวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาเกี่ยวกับช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นและคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารระหว่าง ตัวตรวจจับที่ติดตั้งที่ลูกทุเรียนกับตัวสื่อสารข้อมูลที่ติดตั้งที่โคนต้นทุเรียน และการสื่อสารระหว่างตัวสื่อสารข้อมูลด้วยกันเอง โดยในการทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ในการรับส่งข้อมูลเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 การติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดต่อโหนด (Communication node to communication node) โดยจะติดตั้งเครื่องส่งและเครื่องรับที่โคนต้นทุเรียน และกรณีที่ 2 การติดต่อสื่อสารระหว่าง เซ็นเซอร์มายังโหนด (Sensor node to communication node) โดยจะติดตั้งเครื่องส่งที่โคนต้นทุเรียนและเครื่องรับที่ลูกทุเรียน

### 3.2 การแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียน



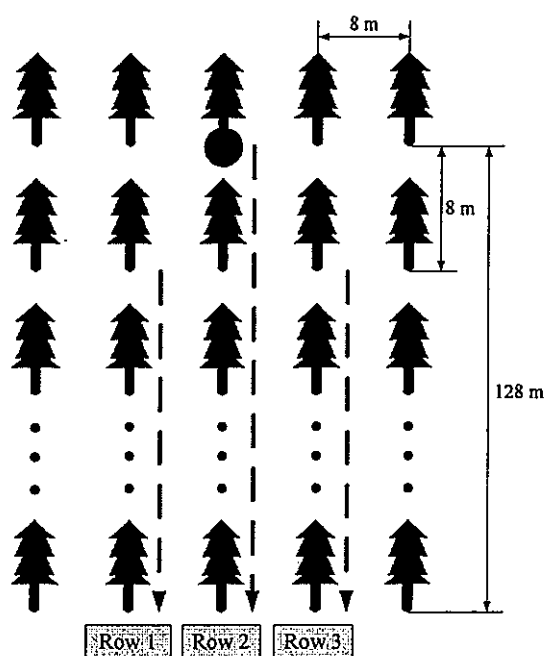
รูปที่ 3.1 ลักษณะของต้นทุเรียนที่ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณ

คันทุเรียนที่ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณมีความสูงประมาณ 10 เมตร มีลักษณะเป็นพุ่มสมมาตรกัน โดยรอบคัน โดยจากสวนทุเรียนที่ทำการทดสอบนั้นจะมีรูปแบบของระยะห่างระหว่างคันทุเรียนที่เท่าๆกัน คือมีระยะห่างระหว่างคันเท่ากับ 8 เมตร และระยะห่างระหว่างแถวเท่ากับ 8 เมตรเช่นกัน โดยมีพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 การติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.2 สามารถเปลี่ยนระดับความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับได้

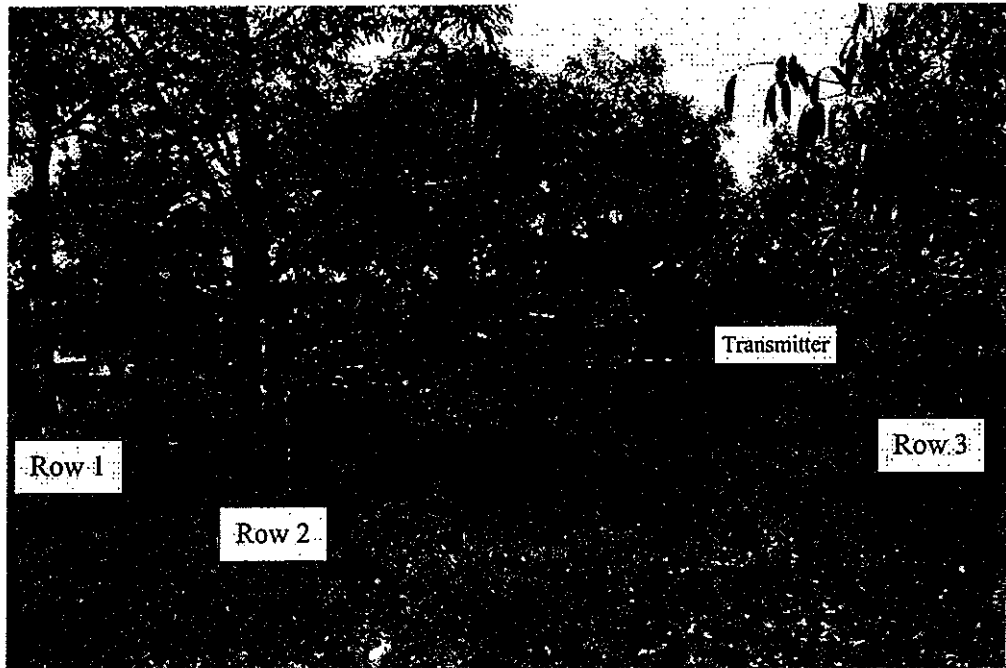


รูปที่ 3.2 การติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ

### 3.3 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความสูงของสายอากาศโดยเปรียบเทียบกับการส่งในแบบต่างๆ



(ก) แบบจำลองสวนทุเรียนที่จะทำการทดสอบ

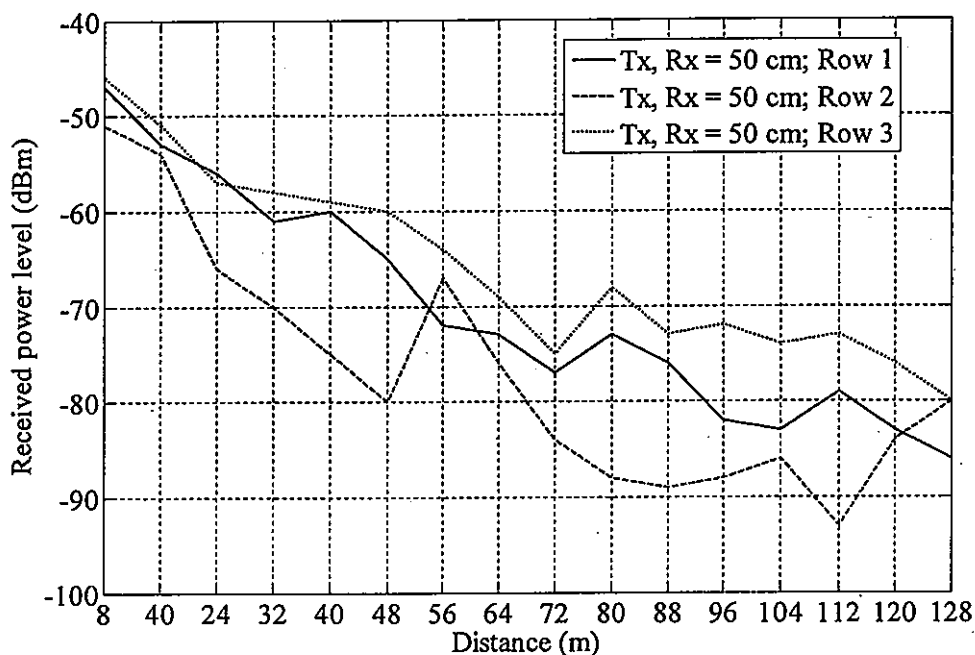


(ข) รูปถ่ายสวนทุเรียนที่ทำการทดสอบ

### รูปที่ 3.3 การติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณภายในสวนทุเรียน

ในการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางจะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) ในการส่งสัญญาณที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ที่มีกำลังงานในการส่งสัญญาณเท่ากับ 10 dBm และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Spectrum analyzer) ในการรับสัญญาณภายในสวนทุเรียน ซึ่งจากรูปที่ 3.3 พบว่าในการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางนั้นจะมีการทดสอบสัญญาณตามแถวของต้นทุเรียนทั้งหมด 3 แถว ซึ่งแต่ละแถวมีระยะห่างกันเท่ากับ 8 เมตร และในระหว่างต้นภายในแถวนั้นก็ยังมีระยะห่างระหว่างต้นเท่ากับ 8 เมตรเช่นกัน จากรูปที่ 3.3 (ก) เป็นรูปแบบการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางภายในสวนทุเรียนที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณไว้ที่โคนต้นทุเรียนที่แถวที่ 2 แล้วทำการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางในแถวที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งระยะทางสูงสุดที่ทำการทดสอบสัญญาณคือ 128 เมตรนั้นเนื่องจาก เป็นระยะทางที่มีการทดสอบสัญญาณการสูญเสียตามเส้นทางภายในสวนทุเรียนที่มีงานวิจัยมาก่อนที่ความถี่ 5.8 กิกะเฮิร์ตซ์ แต่มีการออกแบบ แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่แตกต่างกัน

### 3.3.1 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตร

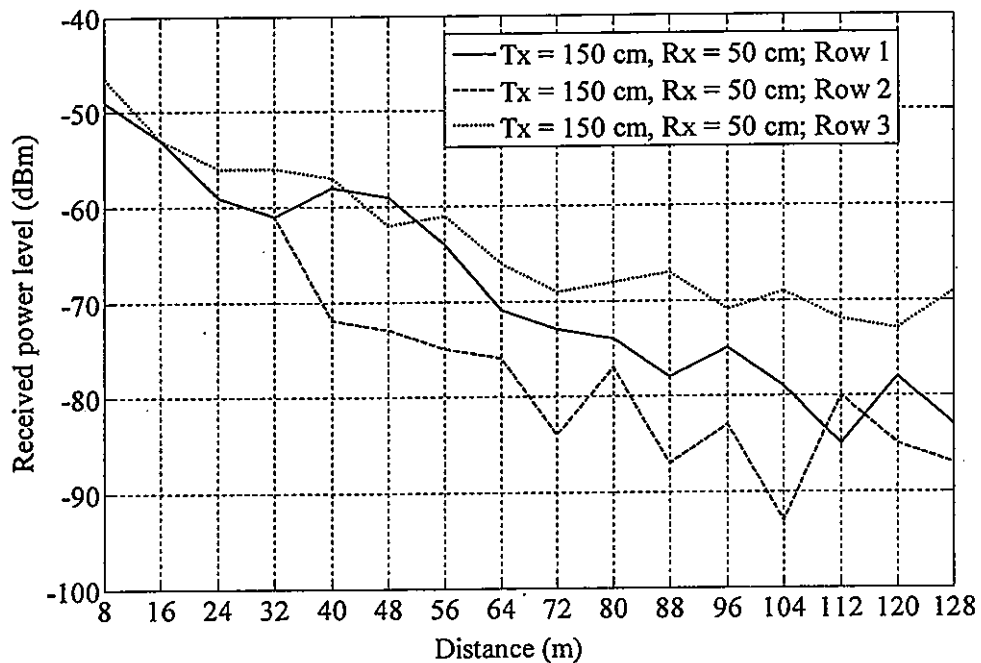


รูปที่ 3.4 กำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศด้านส่งและด้านรับมีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตร

จากรูปที่ 3.4 แสดงกำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง โดยที่ความสูงของสายอากาศด้านส่งและด้านรับมีความสูงเท่ากับ 50 เซนติเมตร โดยสายอากาศทั้งตัวส่งและตัวรับมีการโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง และทำการทดสอบค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางตามแนวของสวนทุเรียนทั้งหมด 3 แถว ซึ่งระยะห่างระหว่างต้นทุเรียนแต่ละต้นมีค่า 8 เมตรเท่าๆกันทั้งหมด โดยในการทดสอบผลของกำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางนั้นจะทำการทดสอบทุกๆ 8 เมตร ซึ่งในผลการทดสอบกำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง ทั้ง 3 แถวนั้น มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานรับที่มีลักษณะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นเป็นไปในลักษณะแบบเดียวกัน ซึ่งเกิดขึ้นจากค่าการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากระยะทางของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณไกลออกไปจากเครื่องส่ง

โดยจากกราฟพบว่าค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางในแถวที่ 1 และ 3 จะมีค่าเฉลี่ยมากกว่าแถวที่ 2 เนื่องจากในการทดสอบสัญญาณในสวนทุเรียนนั้นแถวที่ 1 และ 3 มีสิ่งกีดขวางเส้นทางของสัญญาณน้อยกว่าแถวที่ 2 และเกิดจากการองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อน การหักเหของคลื่นจากสภาพแวดล้อมภายในสวนทุเรียน โดยค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางในรูปที่ 3.4 มีค่าสูงสุดคือ -46 dBm และมีค่าต่ำสุดคือ -93 dBm

### 3.3.2 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศส่ง 150 เซนติเมตร และสายอากาศรับมีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตร

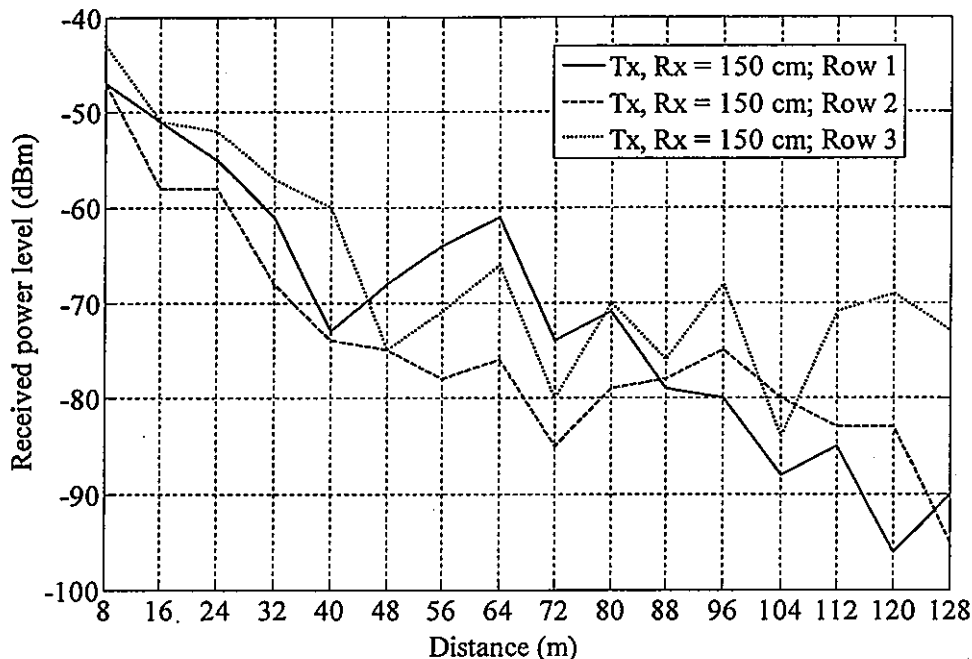


รูปที่ 3.5 กำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศด้านส่ง 150 เซนติเมตร และด้านรับมีค่าเท่ากับ 50 เซนติเมตร

จากรูปที่ 3.5 แสดงกำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง โดยที่ความสูงของสายอากาศด้านส่งเท่ากับ 150 เซนติเมตร และความสูงของสายอากาศด้านรับมีความสูงเท่ากับ 50 เซนติเมตร โดยสายอากาศทั้งตัวส่งและตัวรับมีการโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง และทำการทดสอบค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางตามแถวของสวนทุเรียนทั้งหมด 3 แถว เหมือนกรณีของหัวข้อที่ 3.3.1

ซึ่งในผลการทดสอบกำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางทั้ง 3 แถวนั้น มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานรับที่มีลักษณะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นเป็นไปในลักษณะแบบเดียวกัน ซึ่งเกิดขึ้นจากค่าการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากระยะทางของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ ไกลออกไปจากเครื่องส่ง โดยจากกราฟพบว่าค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางในแถวที่ 1 และ 3 จะมีค่าเฉลี่ยมากกว่าแถวที่ 2 เนื่องจากในการทดสอบสัญญาณในสวนทุเรียนนั้นแถวที่ 1 และ 3 มีสิ่งกีดขวางเส้นทางของสัญญาณน้อยกว่าแถวที่ 2 และเกิดจากการรบกวนประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อน การหักเหของคลื่นจากสภาพแวดล้อมภายในสวนทุเรียน โดยค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางในรูปที่ 3.5 มีค่าสูงสุดคือ -46 dBm และมีค่าต่ำสุดคือ -93 dBm

### 3.3.3 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีค่าเท่ากับ 150 เซนติเมตร



รูปที่ 3.6 กำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศด้านส่งและด้านรับมีค่าเท่ากับ 150 เซนติเมตร

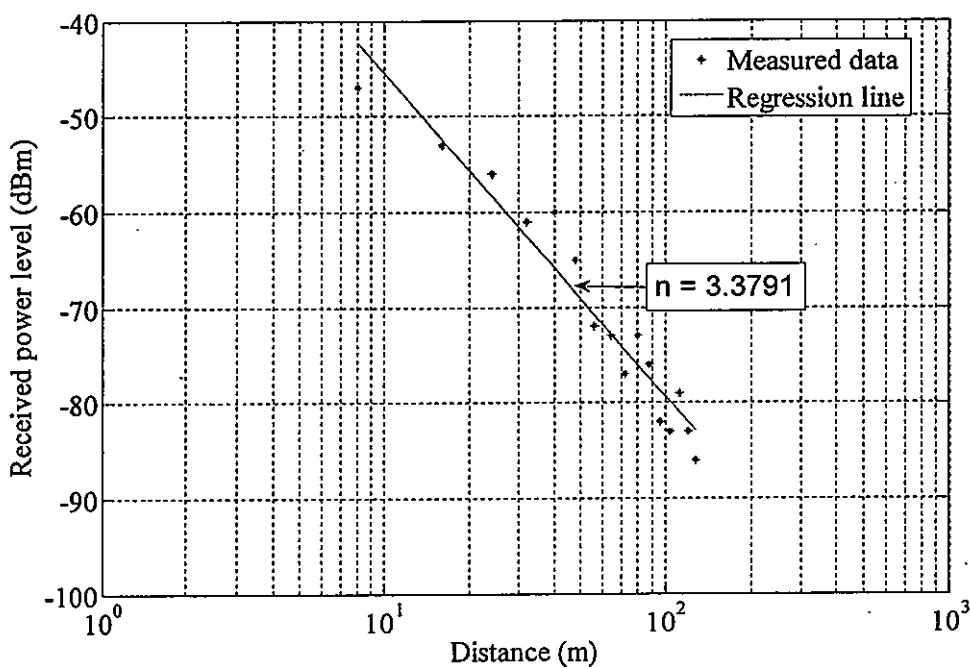
จากรูปที่ 3.6 แสดงกำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง โดยที่ความสูงของสายอากาศด้านส่งและด้านรับเท่ากับ 150 เซนติเมตร โดยสายอากาศทั้งตัวส่งและตัวรับมีการ โพลาริซ์แบบแนวตั้ง และทำการทดสอบค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางตามแถวของสวนทุเรียนทั้งหมด 3 แถว เหมือนกรณีของหัวข้อที่ 3.3.1 และ 3.3.2 ซึ่งในผลการทดสอบกำลังงานรับมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานรับที่มีลักษณะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นเป็นไปในลักษณะแบบเดียวกัน ซึ่งเกิดขึ้นจากค่าการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากระยะทางของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ ไกลออกไปจากเครื่องส่ง โดยจากกราฟพบว่าค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางในแถวที่ 1 และ 3 จะมีค่าเฉลี่ยมากกว่าแถวที่ 2 เนื่องจากในการทดสอบสัญญาณในสวนทุเรียนนั้นแถวที่ 1 และ 3 มีสิ่งกีดขวางเส้นทางของสัญญาณน้อยกว่าแถวที่ 2 และเกิดจากการรบกวนประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อน การหักเหของคลื่นจากสภาพแวดล้อมภายในสวนทุเรียน โดยค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางในรูปที่ 3.6 มีค่าสูงสุดคือ -43 dBm และมีค่าต่ำสุดคือ -96 dBm

หลังจากที่ได้ค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางหรือค่าการสูญเสียตามเส้นทางของสัญญาณ แล้วทำการออกแบบแนวจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว และแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ตามสมการที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ ดังแสดงผลในหัวข้อที่ 3.4 และ 3.5 ต่อไป

### 3.4 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว

#### 3.4.1 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับสูง 50 เซนติเมตร

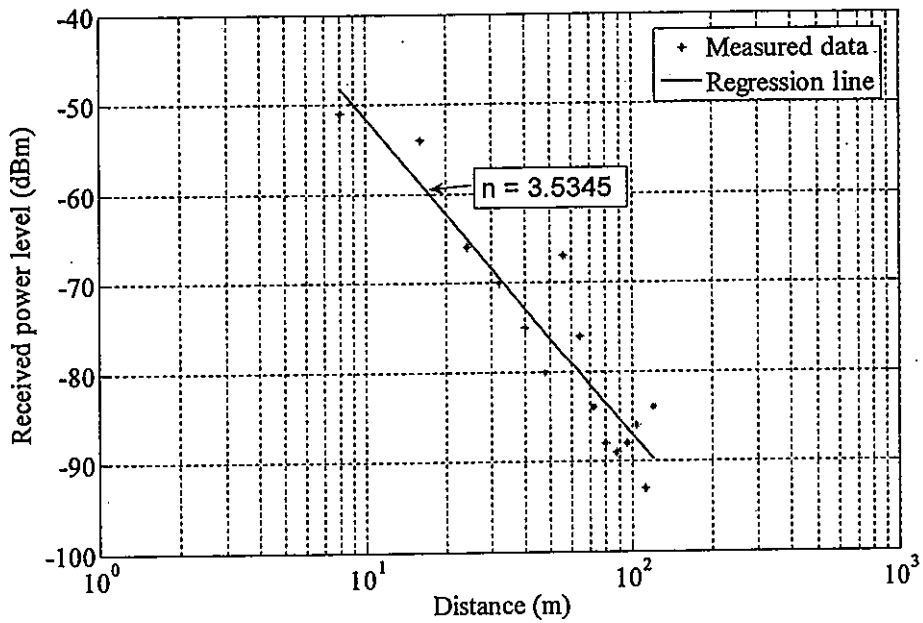
##### 3.4.1.1 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1



รูปที่ 3.7 แบบจำลองความชันเดียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 1

รูปที่ 3.7 แสดงกำลังงานรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่มีโพลาริซันแนวดิ่ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวพบว่าค่าเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน  $n$  มีค่าเท่ากับ 3.3791 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.5 โดยแทนค่า  $n$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เพื่อที่จะตรวจสอบระดับของความถูกต้องของกราฟเส้นตรงที่ลากผ่านกลุ่มจุดข้อมูลที่กำหนด ผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบมีค่าประมาณ 0.93

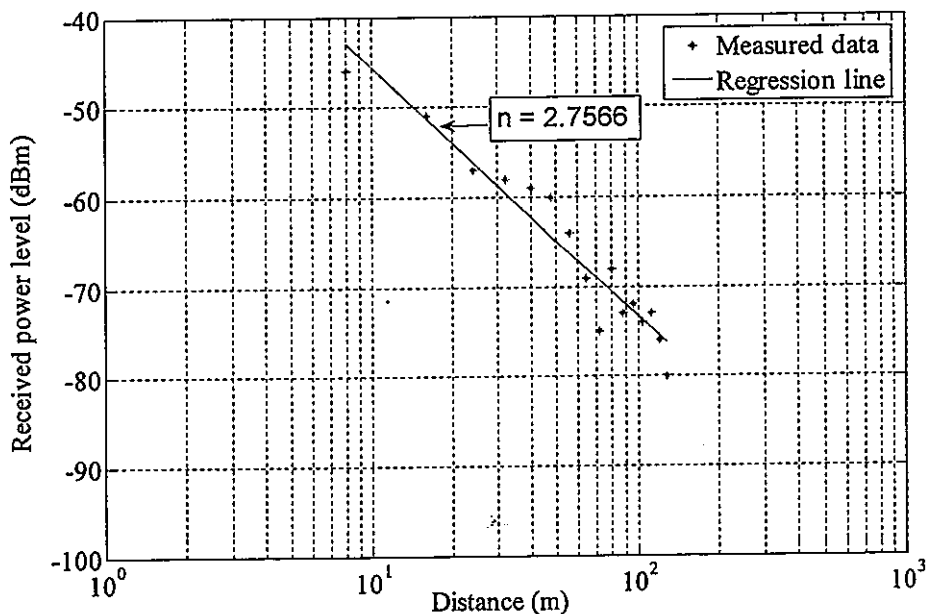
### 3.4.1.2 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2



รูปที่ 3.8 แบบจำลองความชันเดียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 2

รูปที่ 3.8 แสดงกำลังงานรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว พบว่าค่า  $n$  มีค่าเท่ากับ 3.5345 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.5 โดยแทนค่า  $n$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีค่าประมาณ 0.93

### 3.4.1.3 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3

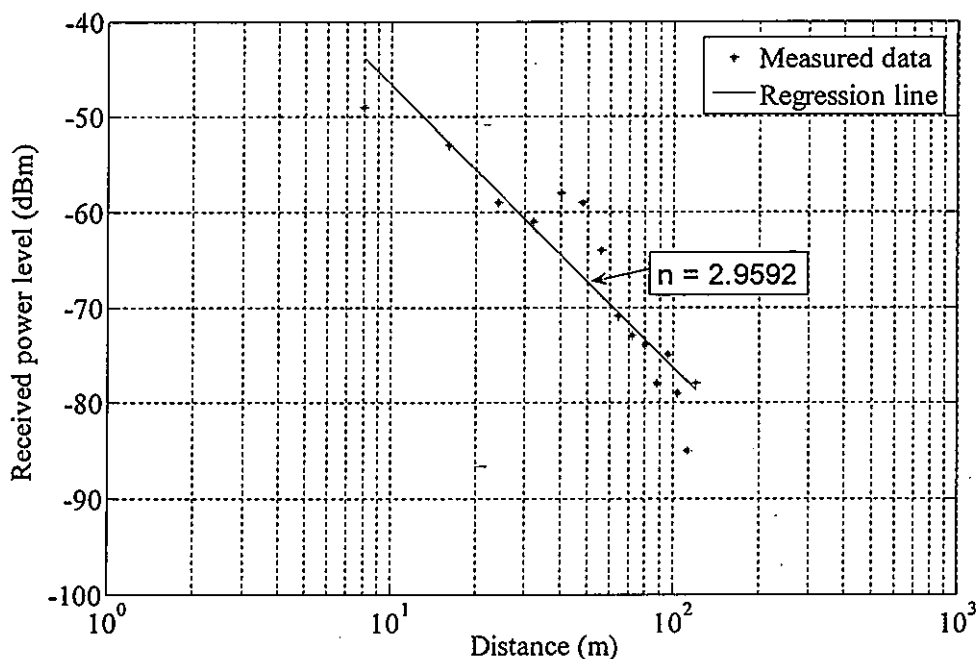


รูปที่ 3.9 แบบจำลองความชันเดียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 3

รูปที่ 3.9 แสดงกำลังงานรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว พบว่าค่า  $n$  มีค่าเท่ากับ 2.7566 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.5 โดยแทนค่า  $n$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความประมาณ 0.93

### 3.4.2 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศส่งสูง 150 เซนติเมตรและสายอากาศรับสูง 50 เซนติเมตร

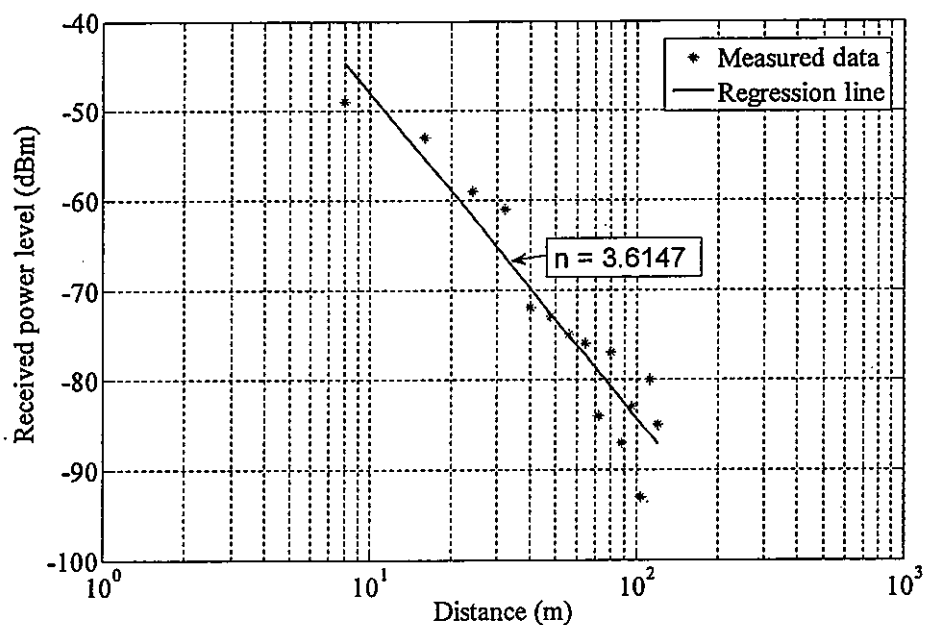
#### 3.4.2.1 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1



รูปที่ 3.10 แบบจำลองความชันเดียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 1

รูปที่ 3.10 แสดงกำลังงานรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว พบว่าค่า  $n$  มีค่าเท่ากับ 2.9592 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.5 โดยแทนค่า  $n$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความประมาณ 0.93

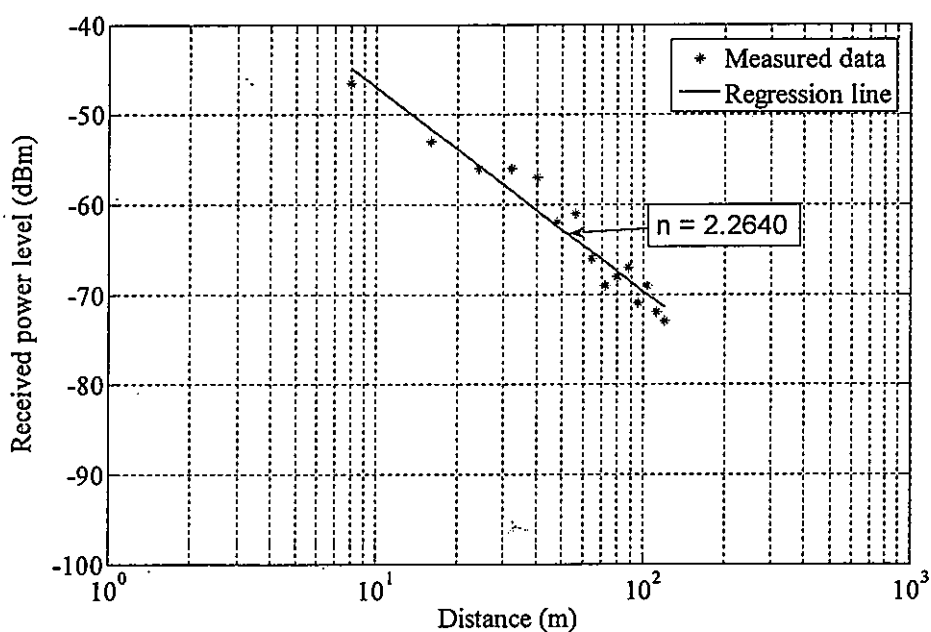
### 3.4.2.2 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2



รูปที่ 3.11 แบบจำลองความชันเดียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 2

รูปที่ 3.11 แสดงกำลังงานรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว พบว่าค่า  $n$  มีค่าเท่ากับ 3.6147 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.5 โดยแทนค่า  $n$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีค่าประมาณ 0.93

### 3.4.2.3 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3

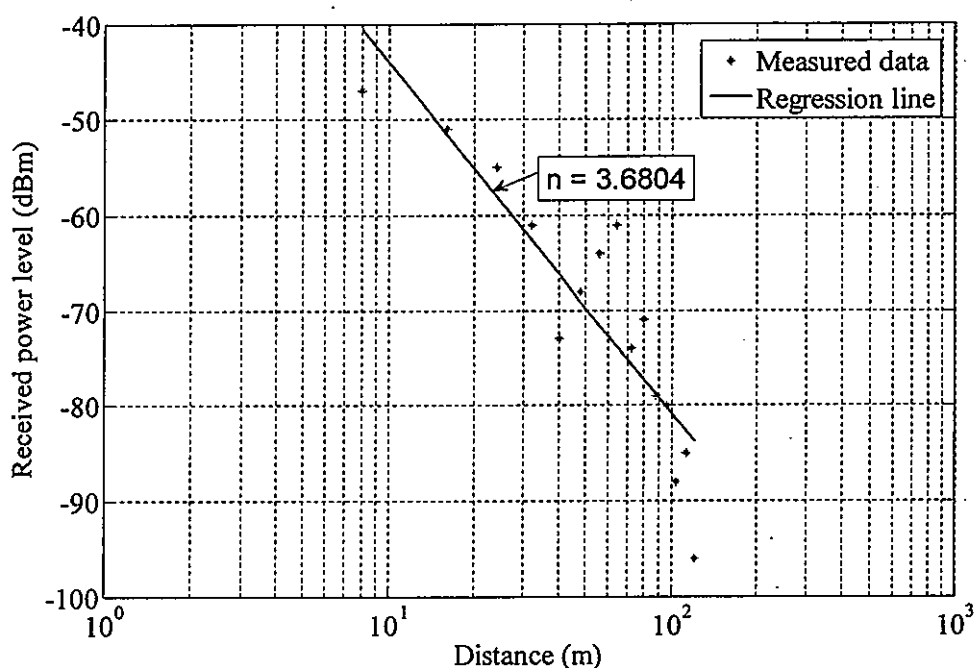


รูปที่ 3.12 แบบจำลองความชันเดียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 3

รูปที่ 3.12 แสดงกำลังงานรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว พบว่าค่า  $n$  มีค่าเท่ากับ 2.2640 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.5 โดยแทนค่า  $n$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความประมาณ 0.93

### 3.4.3 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศส่งสูง 150 เซนติเมตรและสายอากาศรับสูง 150 เซนติเมตร

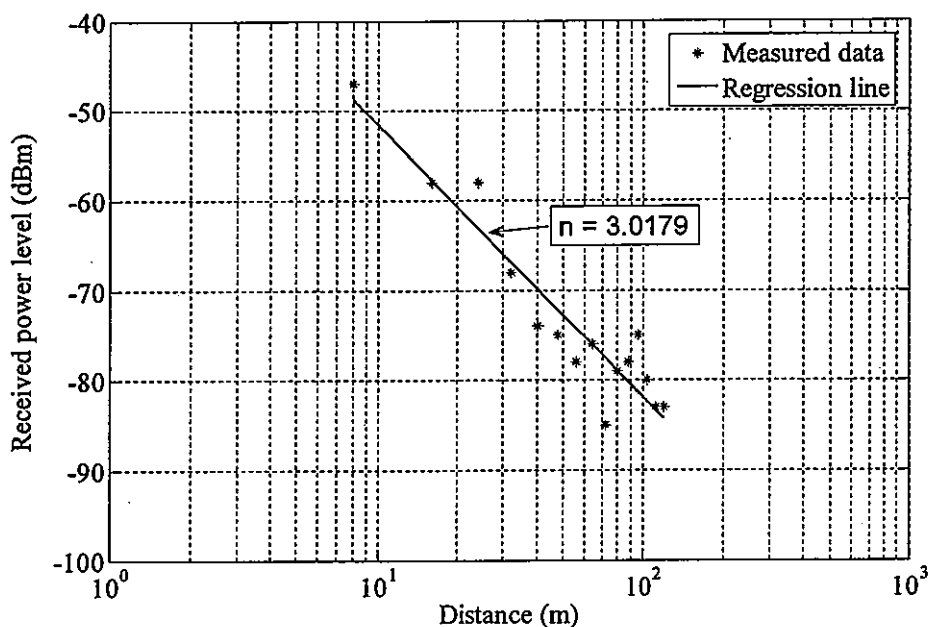
#### 3.4.3.1 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1



รูปที่ 3.13 แบบจำลองความชันเดียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 1

รูปที่ 3.13 แสดงกำลังงานรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว พบว่าค่า  $n$  มีค่าเท่ากับ 3.6804 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.5 โดยแทนค่า  $n$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความประมาณ 0.93

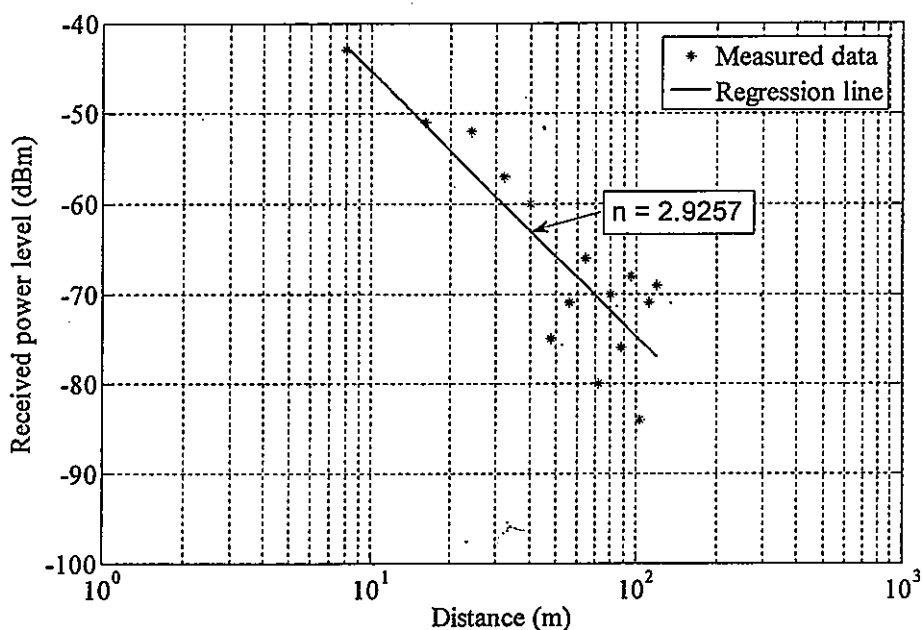
### 3.4.3.2 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2



รูปที่ 3.14 แบบจำลองความชันเดียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 2

รูปที่ 3.14 แสดงกำลังงานรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว พบว่าค่า  $n$  มีค่าเท่ากับ 3.0179 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.5 โดยแทนค่า  $n$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีค่าประมาณ 0.93

### 3.4.3.3 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3



รูปที่ 3.15 แบบจำลองความชันเดียวเมื่ออยู่ในแถวที่ 3

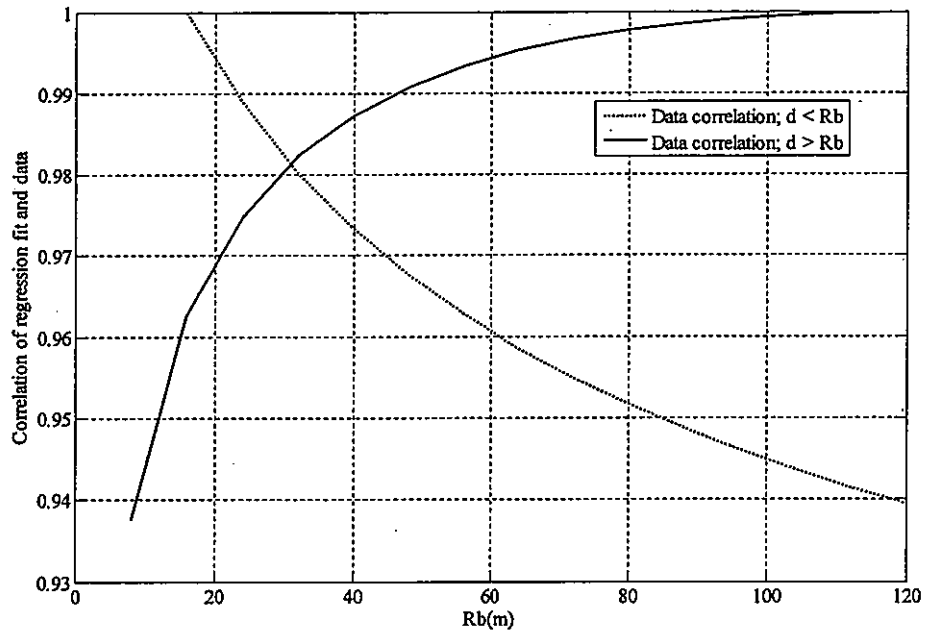
รูปที่ 3.15 แสดงกำลังงานรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวพบว่าค่า  $n$  มีค่าเท่ากับ 2.9257 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.5 โดยแทนค่า  $n$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความใกล้เคียง

### 3.5 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่

จากการออกแบบด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว นั้นใช้ในการออกแบบค่าการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการแพร่กระจายคลื่นในบริเวณสนามระยะใกล้ปานกลาง (Intermediate near zone region) นั้น ค่าการลดทอนของสัญญาณมีแนวโน้มที่ไม่เป็นที่ยอมรับในการออกแบบ เนื่องจากแบบความชันเดียวเหมาะสมที่จะใช้กับความหลากหลายของการลดทอนที่เกิดขึ้นในบริเวณสนามระยะใกล้ปานกลาง ก็ต่อเมื่อนำมาพิสูจน์ ความจริงด้วยการค้นหาค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ระหว่างข้อมูลที่ทำการทดสอบและค่าจากการจำลอง โดยค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเส้นกราฟที่เกิดจากการเทียบโค้ง (Curve fitting) และผลของการทดลอง และถ้าชุดของข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบสมบูรณ์ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์จะมีค่าเท่ากับ 1 จากหัวข้อที่ 3.4 แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียวพบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างผลวัดและแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว มีความใกล้เคียง 0.93

ซึ่งแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ ในหัวข้อนี้ นั้นจำเป็นที่จะแบ่งข้อมูลจากการทดสอบผลออกเป็น 2 ส่วน โดยในการแบ่งนั้นสามารถที่จะทำการหาค่าระยะจุดเปลี่ยน หรือค่าการเปลี่ยนตำแหน่งของเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน ค่าจุดเปลี่ยน ได้มาจากการเพิ่มค่าของระยะจุดเปลี่ยนแปลง จนถึงค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่ดีที่สุด หรือเส้นกราฟที่ตัดกันดังแสดงในรูปที่ 3.16 ของช่วง 2 ช่วงคือค่าก่อนจุดเปลี่ยนและหลังจุดเปลี่ยน ด้วยเหตุนี้แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ จึงมีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว

จากหัวข้อนี้แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ จะมีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ดีกว่าในแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว ซึ่งทำให้ในงานวิจัยนี้เลือกการออกแบบนี้ในการที่จะอธิบายการเกิดการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนดังกล่าว



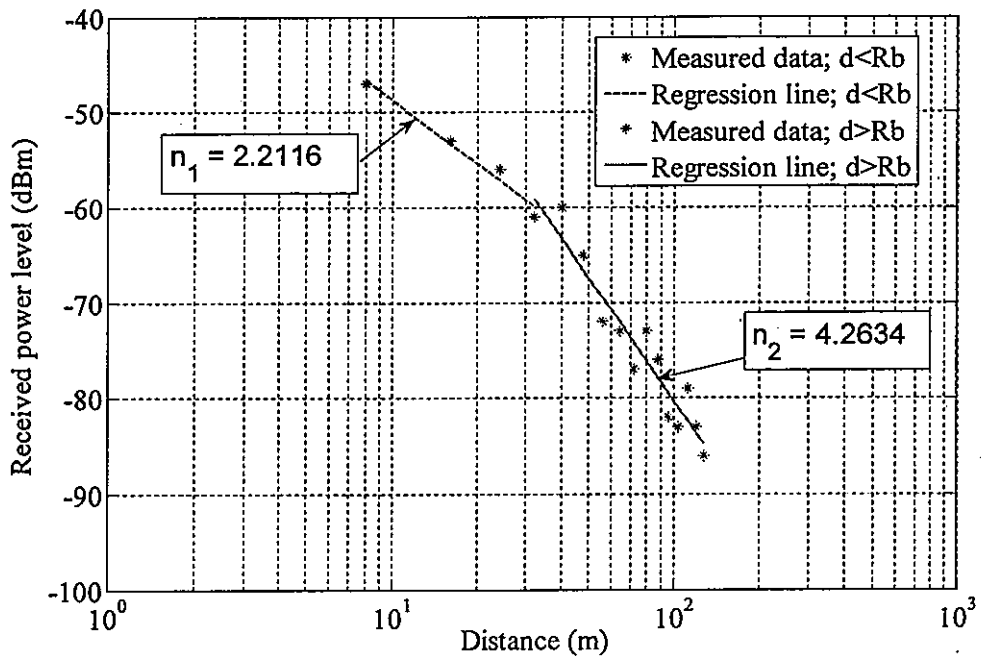
รูปที่ 3.16 ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์

ในการเขียนกราฟลดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่จากผลการทดสอบ ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ ( $R_b$ ) นั้นสามารถหาได้จากค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างกราฟลดถอยเชิงเส้นกับค่าการลดทอนจากการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง  $R_b$  เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด นั่นคือจุดที่เส้นกราฟตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่ระยะทางน้อยกว่า  $R_b$  (เส้นประ) และเส้นกราฟตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่ระยะทางมากกว่า  $R_b$  (เส้นทึบ) ดังแสดงในเส้นที่ตัดกันในรูปที่ 3.16 กราฟค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ ( $R_b$ ) ของสายอากาศส่งและรับมีโพลาริซแนวดังแสดงในรูปที่ 3.16 แสดงถึงตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ทำให้ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ของเส้นกราฟที่ระยะทางน้อยกว่า  $R_b$  และเส้นกราฟตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่ระยะทางมากกว่า  $R_b$  ตัดกัน ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ 31 เมตร

จากการจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ของการทดสอบค่าการลดทอนของสัญญาณในกรณีที่ 1 เมื่อความสูงของสายอากาศด้านส่งและด้านรับมีความสูงเท่ากับ 50 เซนติเมตร กรณีที่ 2 เมื่อความสูงของสายอากาศด้านส่งเท่ากับ 150 เซนติเมตร และความสูงของสายอากาศด้านรับมีความสูงเท่ากับ 50 เซนติเมตร และกรณีที่ 3 เมื่อความสูงของสายอากาศด้านส่งและด้านรับมีความสูงเท่ากับ 150 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.17 ถึงรูปที่ 3.25 จะมีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ ( $R_b$ ) ของสายอากาศส่งและรับมีโพลาริซแนวดังที่เหมือนกันทั้งหมด ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ 31 เมตร มีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ (Correlation) ประมาณ 0.98 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการลดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว

### 3.5.1 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับสูง 50 เซนติเมตร

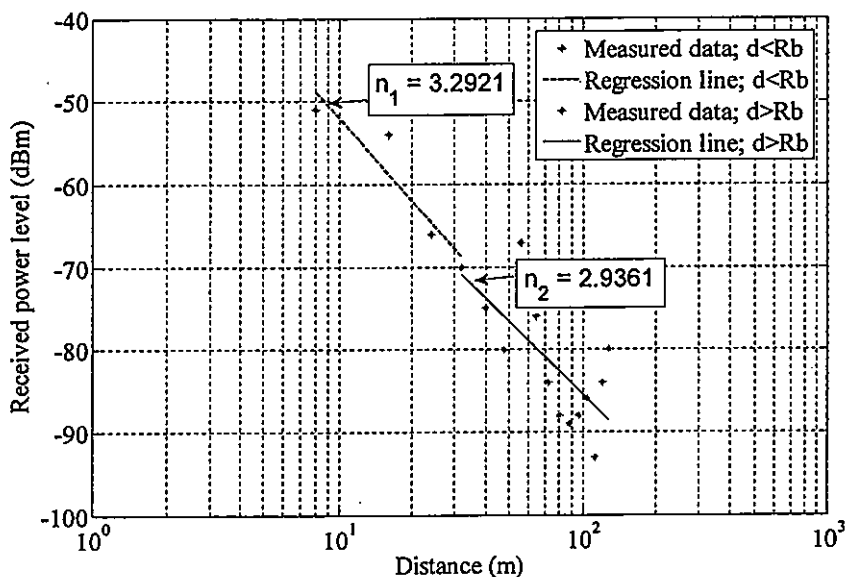
#### 3.5.1.1 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1



รูปที่ 3.17 แบบจำลองความชันคู่เมื่ออยู่ในแถวที่ 1

รูปที่ 3.17 แสดงถึงระดับสัญญาณรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาริซ์แนวตั้ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่พบว่าค่า  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 2.2116 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 4.2634 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.6 โดยแทนค่า  $n_1$ ,  $n_2$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความมากกว่า 0.98 ทั้งสองช่วงความชันกราฟ

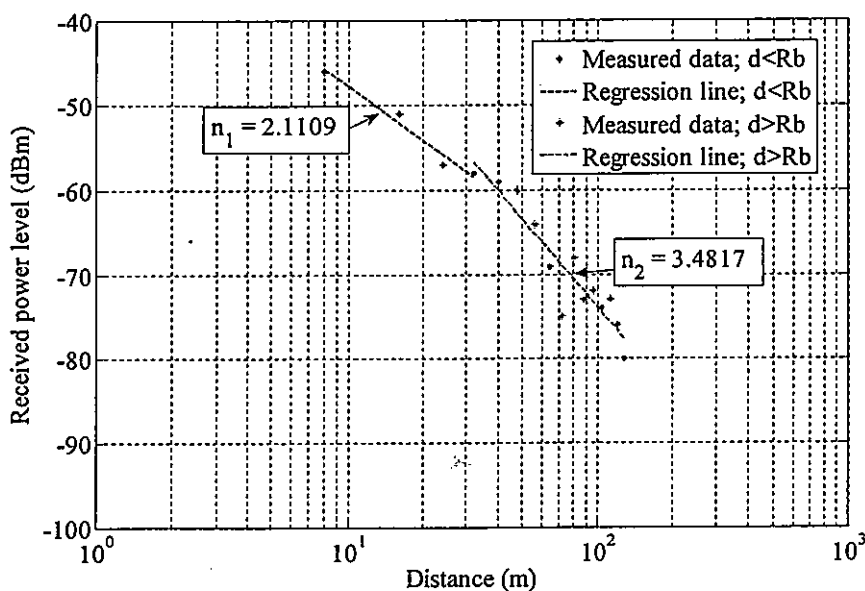
### 3.5.1.2 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2



รูปที่ 3.18 แบบจำลองความชันคู่เมื่ออยู่ในแถวที่ 2

รูปที่ 3.18 แสดงถึงระดับสัญญาณรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาริซเนชันตั้ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่พบว่าค่า  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 3.2921 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 2.9361 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.6 โดยแทนค่า  $n_1$ ,  $n_2$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความมากกว่า 0.98 ทั้งสองช่วงความชันกราฟ

### 3.5.1.3 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3

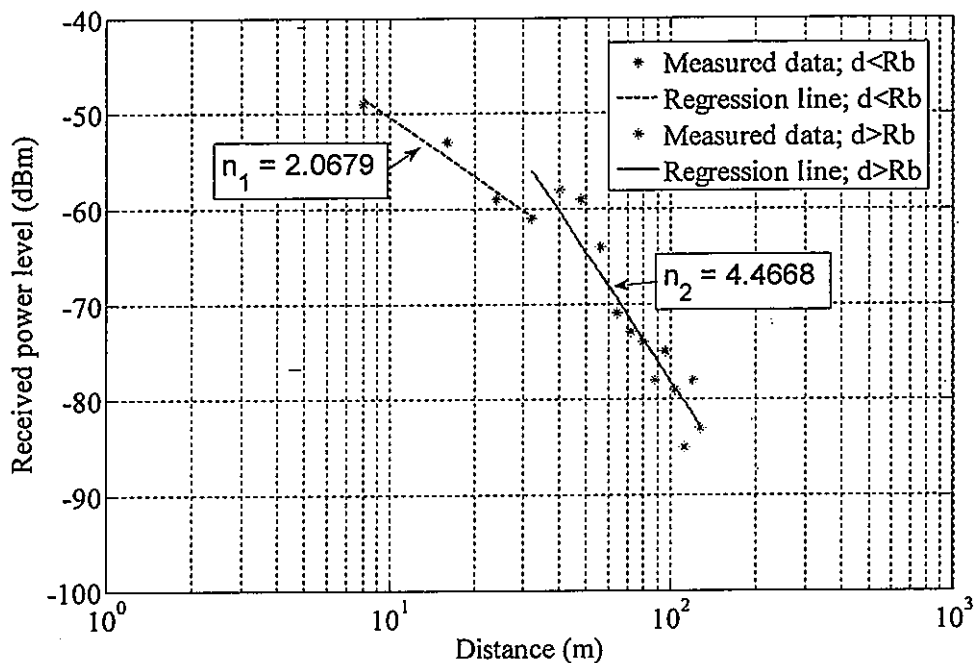


รูปที่ 3.19 แบบจำลองความชันคู่เมื่ออยู่ในแถวที่ 3

รูปที่ 3.19 แสดงถึงระดับสัญญาณรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาริซแนตตั้ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่พบว่าค่า  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 2.1109 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 3.4817 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.6 โดยแทนค่า  $n_1, n_2$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความมากกว่า 0.98 ทั้งสองช่วงความชันกราฟ

### 3.5.2 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศส่งสูง 150 เซนติเมตรและสายอากาศรับสูง 50 เซนติเมตร

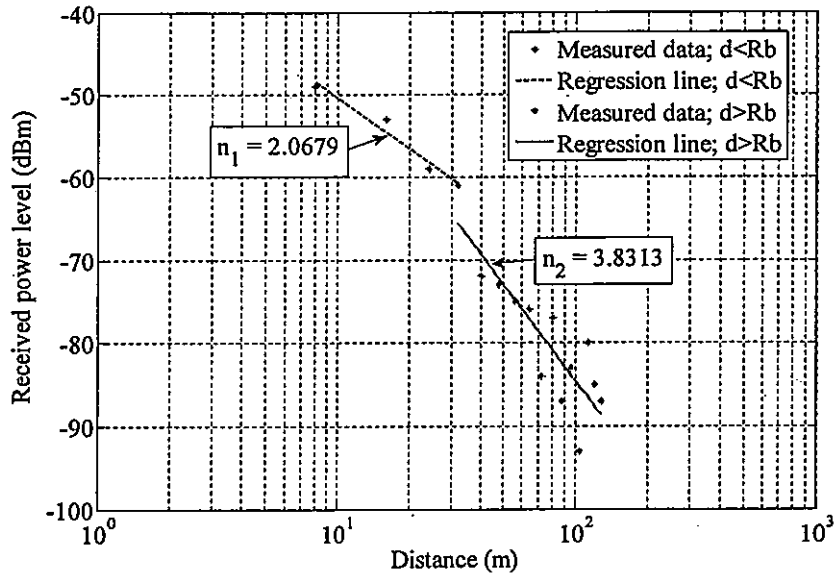
#### 3.5.2.1 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 1



รูปที่ 3.20 แบบจำลองความชันคู่เมื่ออยู่ในแถวที่ 1

รูปที่ 3.20 แสดงถึงระดับสัญญาณรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาริซแนตตั้ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่พบว่าค่า  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 2.0679 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 4.4668 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.6 โดยแทนค่า  $n_1, n_2$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความมากกว่า 0.98 ทั้งสองช่วงความชันกราฟ

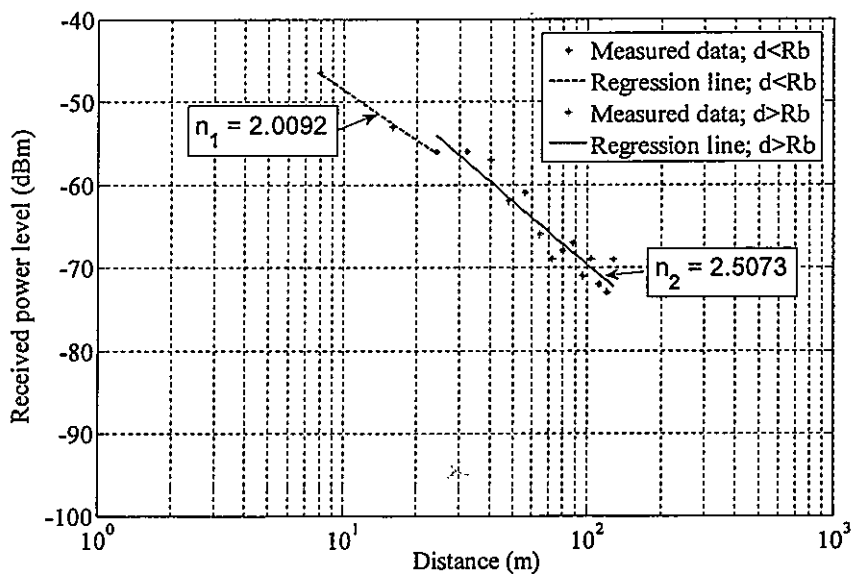
### 3.5.2.2 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 2



รูปที่ 3.21 แบบจำลองความชันคู่เมื่ออยู่ในแถวที่ 2

รูปที่ 3.21 แสดงถึงระดับสัญญาณรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาริซเนชันแนวตั้ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่พบว่าค่า  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 2.0679 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 3.8313 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.6 โดยแทนค่า  $n_1$ ,  $n_2$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความมากกว่า 0.98 ทั้งสองช่วงความชันกราฟ

### 3.5.2.3 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่ออยู่ในแถวที่ 3

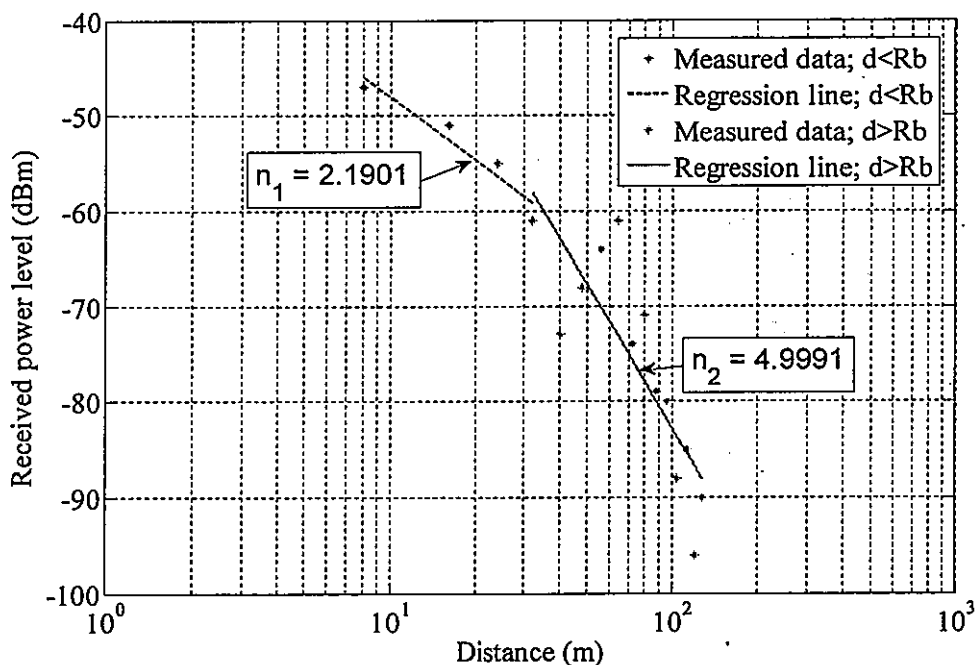


รูปที่ 3.22 แบบจำลองความชันคู่เมื่ออยู่ในแถวที่ 3

รูปที่ 3.22 แสดงถึงระดับสัญญาณรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาริซแนตตั้ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่พบว่าค่า  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 2.0092 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 2.5073 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.6 โดยแทนค่า  $n_1, n_2$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความมากกว่า 0.98 ทั้งสองช่วงความชันกราฟ

### 3.5.3 ค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อความสูงของสายอากาศส่งสูง 150 เซนติเมตรและสายอากาศรับสูง 150 เซนติเมตร

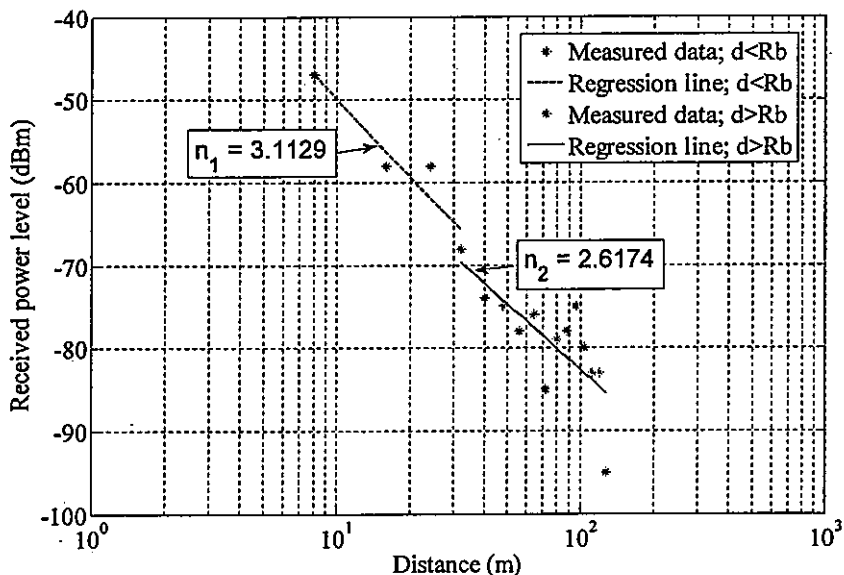
#### 3.5.3.1 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางเมื่ออยู่ในแถวที่ 1



รูปที่ 3.23 แบบจำลองความชันคู่เมื่ออยู่ในแถวที่ 1

รูปที่ 3.23 แสดงถึงระดับสัญญาณรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาริซแนตตั้ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่พบว่าค่า  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 2.1901 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 4.9991 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.6 โดยแทนค่า  $n_1, n_2$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความมากกว่า 0.98 ทั้งสองช่วงความชันกราฟ

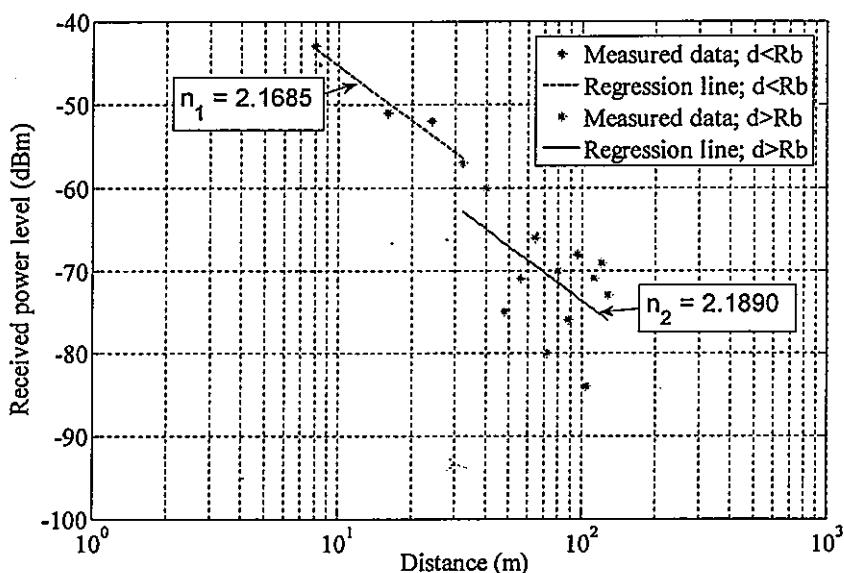
### 3.5.3.2 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางเมื่ออยู่ในแถวที่ 2



รูปที่ 3.24 แบบจำลองความชันคู่เมื่ออยู่ในแถวที่ 2

รูปที่ 3.24 แสดงถึงระดับสัญญาณรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาริซแนตตั้ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่พบว่าค่า  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 3.1129 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 2.6174 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.6 โดยแทนค่า  $n_1, n_2$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความมากกว่า 0.98 ทั้งสองช่วงความชันกราฟ

### 3.5.3.3 กรณีการทดสอบค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางเมื่ออยู่ในแถวที่ 3



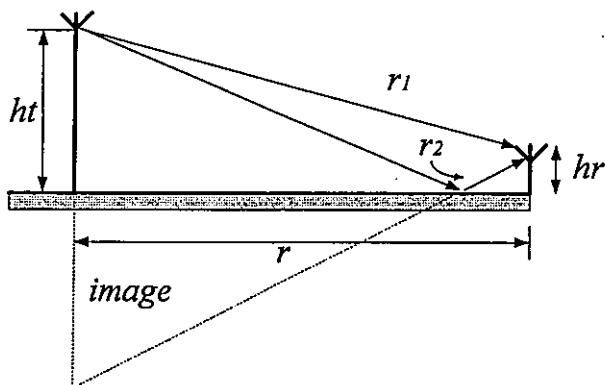
รูปที่ 3.25 แบบจำลองความชันคู่เมื่ออยู่ในแถวที่ 3

รูปที่ 3.25 แสดงถึงระดับสัญญาณรับและกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางของสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีโพลาริซ์แนวตั้ง จากกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่พบว่าค่า  $n_1$  มีค่าเท่ากับ 2.1685 และค่า  $n_2$  มีค่าเท่ากับ 2.1890 ดังนั้นสามารถทำนายค่าการลดทอนของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ ได้จากสมการที่ 2.6 โดยแทนค่า  $n_1, n_2$  และค่าการลดทอนเริ่มต้นลงในสมการ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ระหว่างกราฟการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวและค่าระดับสัญญาณที่ได้จากการทดสอบพบว่ามีความมากกว่า 0.98 ทั้งสองช่วงความชันกราฟ

### 3.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยผลการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น ทั้งแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว และแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ จากผลการทดสอบระดับสัญญาณ ค่าการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น โดยในการนำเสนอจะแบ่งออกเป็นหลายกรณี ในการหาค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทาง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ในทุกกรณีจะมีทั้งแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว และแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ โดยจากแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่นั้นพบว่า แบบจำลองนี้สอดคล้องกับค่าการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนมากกว่าแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว เนื่องจากแบบจำลองนี้มีการแบ่งช่วงการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง ทำให้แบบจำลองมีผลการจำลองที่เป็นไปตามค่าการทดสอบสัญญาณจริงมากที่สุด

ซึ่งจากแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยวพบว่าค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.93 และจากแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ ( $R_p$ ) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ 31 เมตร มีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ประมาณ 0.98 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว โดยจากแบบจำลองนี้มีการแบ่งช่วงการพิจารณานั้นสามารถที่จะทำการหาค่าระยะจุดเปลี่ยนแปลง หรือค่าการเปลี่ยนตำแหน่งของเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน ซึ่งได้มาจากการเพิ่มค่าของระยะจุดเปลี่ยนแปลงจนถึงค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่ดีที่สุดหรือเส้นกราฟที่ตัดกันของช่วง 2 ช่วง ด้วยเหตุนี้แบบจำลองแบบความชันคู่ จึงมีความถูกต้องมากกว่าแบบความชันเดี่ยว



จากรูปด้านบน [2] เป็นลักษณะของการสะท้อนคลื่นจากพื้นโลก ในการแพร่กระจายคลื่น (Ground reflect wave) ซึ่งจะเกิดขึ้นในการทดสอบสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทำให้สัญญาณที่รับได้มีความต่างเฟสกัน แต่ในการหาค่าจุดเปลี่ยนแปลงความชันนั้นเป็นตำแหน่งที่คลื่นที่เกิดจากการสะท้อนกับพื้นโลกมีค่าความต่างเฟสกันน้อยมาก ซึ่งปรากฏการณ์การสะท้อนคลื่นจากพื้นโลกมีผลต่อค่าจุดเปลี่ยนแปลงความชัน ซึ่งหมายถึงจุดเปลี่ยนแปลงความชันที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลที่เกิดจากการทดสอบและระยะทางที่ใช้ในการทดสอบเป็นตำแหน่งที่มีเฟสของสัญญาณที่เกิดจากสัญญาณหลักและเฟสของสัญญาณที่มาจากหลายทิศทางที่แตกต่างกันน้อยมาก

ในการแบ่งช่วงการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วงนั้น ทำให้แบบจำลองมีผลการจำลองที่เป็นไปตามค่าการทดสอบสัญญาณจริง สังเกตได้จากกราฟแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ ที่มีเส้นกราฟ 2 ช่วงที่มีค่าการเปลี่ยนตำแหน่งของเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน 2 ค่า โดยมีความสอดคล้องและใกล้เคียงไปตามค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางทั้ง 2 ช่วงของสัญญาณด้วยเช่นกัน ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดี่ยว แล้วพบว่าค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่ไม่สอดคล้องกับค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางมากนัก เนื่องจากมีการกระจายตัวของค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางมาก ทำให้แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่มีความถูกต้องและถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

## บทที่ 4

# คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น

### 4.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทางสถิติ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate; BER) และ การทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูลผ่านทาง การจำลองช่องสัญญาณการสื่อสาร ซึ่งผลการทดสอบสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทางสถิตินั้นเป็นผลการทดสอบสัญญาณที่คล้ายคลึงกับการทดสอบการสูญเสียตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นในบทที่ 3 โดยจะแตกต่างกันคือ จะเป็นการสุ่มวัดสัญญาณ ณ จุดๆหนึ่งในช่วงเวลาหนึ่ง และจากการทดสอบสัญญาณและวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสุ่มสัญญาณทุกๆ 2 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสัญญาณได้เหมาะสม แต่ถ้าทำการสุ่มสัญญาณทุก 1 วินาทีแล้วจะทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้เนื่องจากมีเวลาในการอ่านค่าสัญญาณน้อยเกินไป และจำนวนสัญญาณที่ทำการสุ่มจะมีค่าเท่ากับ 1,000 ค่า แล้วนำผลที่ได้มาหาคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นต่อไป

### 4.2 คุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทางสถิติ

ในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายนั้น สัญญาณที่แพร่กระจายมาถึงสายอากาศรับจะประกอบด้วยองค์ประกอบของสัญญาณหลักที่ไม่มีเงาเงา (Line of sight component) และองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อน หักเหของคลื่นจากสภาพแวดล้อม (Multiple reflective components) สำหรับการเงาเงาของสัญญาณได้มีการนำมาวิเคราะห์ทางสถิติอย่างมากมาย ตัวอย่างเช่น การกระจายตัวแบบไรซ์ และการกระจายตัวแบบเรย์ลี สำหรับในกรณีของการกระจายตัวแบบไรซ์ ได้ถูกนำมาวิเคราะห์สัญญาณที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบของสัญญาณหลัก เช่น การแพร่กระจายในแนวเส้นสายตา และองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อน หักเหของคลื่นจากสภาพแวดล้อม การกระจายตัวแบบไรซ์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \quad (4.1)$$

- โดยที่  $r$  คือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้  
 $A$  คือ แอมพลิจูดของสัญญาณหลัก  
 $I_0(\cdot)$  คือ ฟังก์ชันของเบสเซลดัดแปลง (Modified Bessel Function)

เมื่อสัญญาณในส่วนขององค์ประกอบหลักมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายเส้นทางที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนจากทิศทางอื่น ดังนั้นการกระจายตัวของสัญญาณจะเป็นลักษณะของเรย์ลีห์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (4.2)$$

การกระจายตัวแบบไรซ์ [6] นั้นสามารถอธิบายในเทอมของค่า  $K$  ได้ ซึ่งกำหนดเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณองค์ประกอบหลักที่ไม่มีการจางหายต่อค่าของระดับสัญญาณที่มาจากหลากหลายทิศทาง ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$K(\text{dB}) = 10 \log\left(\frac{A^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.3)$$

ดังนั้นการกระจายตัวแบบเรย์ลีห์ สามารถพิจารณาเป็นกรณีของช่องสัญญาณการสื่อสารที่ไม่อยู่ในแนวเส้นสายตา สำหรับตัวอย่างการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายที่มีการกระจายตัวเป็นแบบไรซ์ เช่น การติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับตัวเซ็นเซอร์ที่ติดบนรถยนต์ การแพร่กระจายคลื่นในสวนที่มีต้นไม้ไม่หนาที่มากนัก เป็นต้น และตัวอย่างการกระจายตัวแบบเรย์ลีห์ เช่น การติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับส่วนประกอบของเครื่องยนต์ที่มีการกีดขวางการแพร่กระจายคลื่น หรือการแพร่กระจายคลื่นในป่าที่มีลักษณะของต้นไม้หนาที่มาก เป็นต้น

โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการกระจายตัวเป็นแบบไรซ์ เนื่องจาก การแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนนั้น ใบของทุเรียนมีลักษณะที่ไม่หนาที่มาก ระยะห่างของต้นทุเรียนมีระยะเท่ากับ 8 เมตร การทดสอบสัญญาณทำโดยการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในทางสถิติ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1.) การจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนดดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) ระยะห่างจากตัวส่งในแต่ละจุดของการทดสอบคือ 16 32 48 และ 64 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ (2.) การจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนดดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) โดยระยะที่ทำการทดสอบจะสูงจากพื้น 2 เมตรและ 4 เมตร



(ก)



(ข)

#### รูปที่ 4.1 การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นในทางสถิติ

(ก) การจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด

(ข) การจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนด

#### 4.3 ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate; BER)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบและผลที่ได้จากการจำลองระบบ โดยผลที่ได้จะแสดงให้เห็นสมรรถนะของระบบเมื่อนำวิธีการที่นำเสนอมาใช้เปรียบเทียบกับวิธีการแบบพื้นฐาน เมื่อส่งสัญญาณผ่านสภาพแวดล้อมที่มีการลดทอนของสัญญาณจากหลายทิศทาง จากการทดสอบระดับสัญญาณทางสถิติทำให้ทราบถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณเบื้องต้นผ่านค่าตัวแปร  $K$  ของช่องสัญญาณการจางหายแบบไรซ์ ดังนั้นสามารถที่จะทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูลอย่างง่ายได้ 2 วิธีด้วยกันคือ

- ทำนายค่าความผิดพลาดของการสื่อสารข้อมูลผ่านทางทฤษฎีการสื่อสารข้อมูลที่ได้จากสมการรูปแบบสำเร็จ
- ทำนายค่าความผิดพลาดของการสื่อสารข้อมูลผ่านทางวิธีการจำลองระบบการสื่อสารโดยวิธีมอนติคาร์โล Monte Carlo Method

วิธีมอนติคาร์โล เป็นทฤษฎีพื้นฐานอย่างหนึ่งของขั้นตอนวิธีสุ่มกระจาย (Randomized Algorithms) ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตามทฤษฎีความน่าจะเป็นกับข้อมูลตัวเลขทางคณิตศาสตร์ ฟิสิกส์ และการจำลองเสมือนด้วยคอมพิวเตอร์ สำหรับประยุกต์ใช้ในการลดความซับซ้อนของการคำนวณ และประยุกต์ใช้ในการสร้างชุดสุ่มกระจายข้อมูลที่น่าเชื่อถือ เพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำสำหรับการคำนวณที่ต้องการคำตอบที่เป็นธรรมชาติมากกว่ารูปแบบตายตัวที่ถูกกำหนดไว้แล้วล่วงหน้าจากคอมพิวเตอร์

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการคำนวณการสื่อสารในระบบ Frequency Shift Keying (FSK) ซึ่งเป็นการมอดูเลตพื้นฐานที่ใช้ในระบบตรวจจับแบบไร้สายโดยทั่วไป เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบตรวจจับไร้สาย (Wireless sensor network in fruits inspection) ที่มีการออกแบบระบบการสื่อสารที่เป็นการมอดูเลตแบบ Frequency Shift Keying ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณการสื่อสารในระบบ FSK เช่นเดียวกันกับงานวิจัยนี้

#### 4.3.1 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตในช่องสัญญาณแบบ Rayleigh

$$P_s = 1 - \int_0^{\infty} \frac{1}{(1+\bar{\gamma})^L (L-1)!} U^{L-1} e^{-\frac{U}{1+\bar{\gamma}}} (1 - e^{-U \sum_{k=0}^{L-1} \frac{U^k}{k!}})^{M-1} dU \quad (4.4)$$

$$P_b = \frac{1}{2} \frac{M}{M-1} P_s \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.4 เป็นสมการความน่าจะเป็นสัญลักษณ์ผิดพลาด และสมการที่ 4.5 เป็นสมการความน่าจะเป็นบิตผิดพลาด เป็นสมการที่ใช้ในการหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลของช่องสัญญาณแบบเรย์ลีห์ [13-16] กำหนดให้มีการมอดูเลตแบบ FSK อันดับ สอง และการดีมอดูเลตแบบ Noncoherent และมีไคเวอร์จิตี้เท่ากับ 1

#### 4.3.2 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตในช่องสัญญาณแบบ Rician

$$P_s = \sum_{r=1}^{M-1} \frac{(-1)^{r+1} e^{-LK\bar{\gamma}_r/(1+\bar{\gamma}_r)} \binom{M-1}{r} \sum_{n=0}^{(L-1)} \beta_{nr} \frac{\Gamma(L+n)}{\Gamma(L)} \left[ \frac{1+\bar{\gamma}_r}{r+1+r\bar{\gamma}_r} \right]^n F_1 \left( L+n, L; \frac{LK\bar{\gamma}_r/(1+\bar{\gamma}_r)}{r(1+\bar{\gamma}_r)+1} \right) \quad (4.6)$$

$$P_b = \frac{1}{2} \frac{M}{M-1} P_s \quad (4.7)$$

จากสมการที่ 4.6 เป็นสมการความน่าจะเป็นสัญลักษณ์ผิดพลาด และสมการที่ 4.7 เป็นสมการความน่าจะเป็นบิตผิดพลาด ใช้ในการหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลของช่องสัญญาณการจางหายแบบไรซ์ [11-12]

จากหัวข้อที่ 4.3.1 และ 4.3.2 พิจารณาจากสมการกำหนดให้  $P_b$  คือความน่าจะเป็นสัญลักษณ์ผิดพลาด  $P_b$  คือความน่าจะเป็นบิตผิดพลาด และ  $\bar{\gamma}_r = \frac{1}{1+K} \bar{\gamma}$  สำหรับ  $\bar{\gamma}$  คือค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนส่วนด้วยสัญลักษณ์และส่วนด้วยไคเวอร์ซิติ  $L$  คือจำนวนไคเวอร์ซิติเมื่อ  $K$  คือค่าอัตราส่วนขององค์ประกอบกำลังงานการแพร่กระจายคลื่น และค่า  $M$  คือ Moment generating ของไคเวอร์ซิติ จากสมการที่มีช่องสัญญาณการจางหายแบบ Rayleigh:  $M_{\bar{\gamma}_r}(s) = \frac{1}{1-s\bar{\gamma}_r}$  และการจางหายแบบ Rician:  $M_{\bar{\gamma}_r}(s) = \frac{1+K}{1+K-s\bar{\gamma}_r} e^{\left[ \frac{Ks\bar{\gamma}_r}{(1+K)-s\bar{\gamma}_r} \right]}$  ซึ่งช่องสัญญาณแบบไรซ์เป็นช่องสัญญาณที่ใช้การหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล

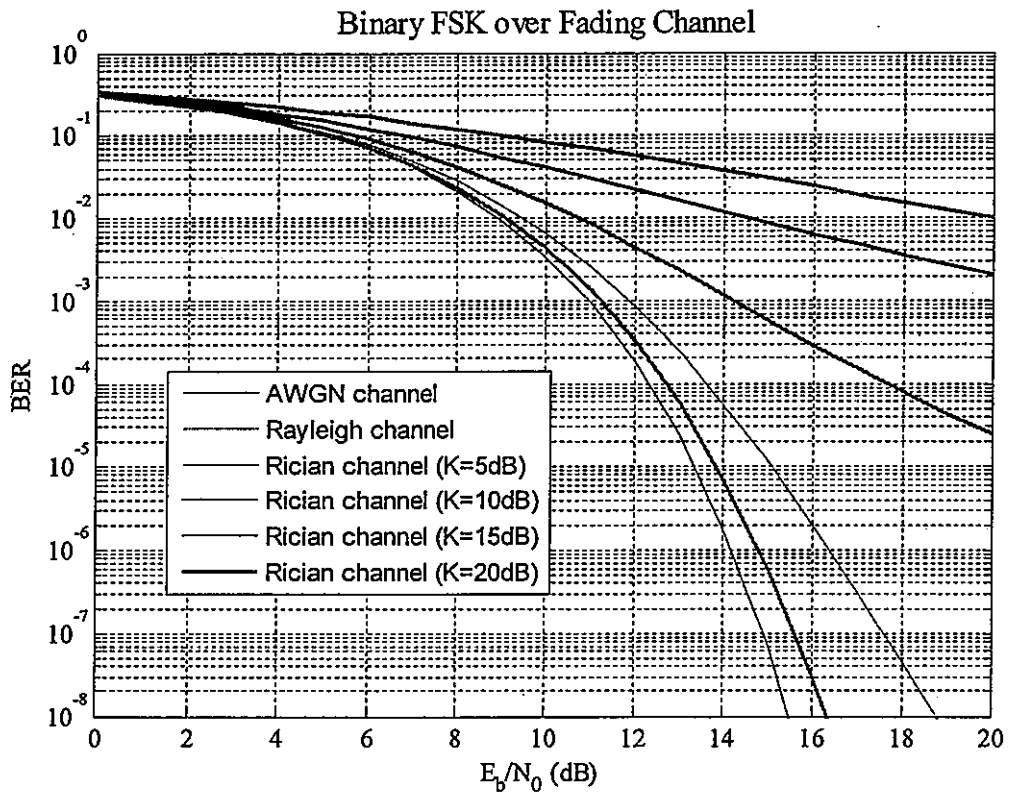
#### 4.4 การทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตทางทฤษฎี

การทำนายทางทฤษฎีการสื่อสารข้อมูลที่ได้จากสมการแม่นยำจะเป็นการคำนวณแบบประมาณที่ประกอบด้วยฟังก์ชันค่าความผิดพลาดในทางสถิติสำหรับเป็นตัวแทนการมอดูเลตสัญญาณในแบบต่างๆ โดยสามารถรวมผลของลักษณะช่องสัญญาณทางสถิติร่วมด้วยในการทำนาย โดยจะทำการจำลองช่องสัญญาณการสื่อสาร เพื่อทำนายค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลในทางทฤษฎีได้

โดยจะกำหนดค่าความผิดพลาดบิตทางทฤษฎี และให้ช่วงของค่า  $E_b/N_0$  มีค่า 0 ถึง 20 dB โดยจากรูปที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดบิตของช่องสัญญาณ 3 ช่องสัญญาณ มีช่องสัญญาณ AWGN ช่องสัญญาณเรย์ลีห์และช่องสัญญาณไรซ์ ที่มีค่า  $K$  แตกต่างกัน และจะใช้ช่องสัญญาณแบบต่างๆที่กล่าวมาแล้วมาเปรียบเทียบกัน และใช้การมอดูเลตแบบ 2-FSK

ในการคำนวณทางทฤษฎี ทำการกำหนดชนิดการมอดูเลตแบบ FSK อันดับสอง (2-FSK) ซึ่งใช้ 2 บิตแทน 1 สัญลักษณ์ การแพร่กระจายคลื่นผ่านช่องสัญญาณที่มีลักษณะการกระจายตัวทางสถิติแบบไรซ์ ( $K = 5$  10 15 และ 20 dB) ช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียน และช่องสัญญาณแบบเรย์ลีห์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) เพื่อทำนายค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูล

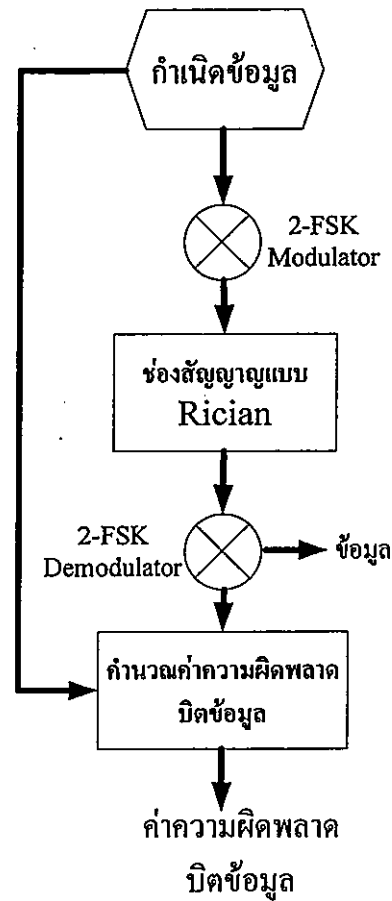
#### 4.5 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตทางทฤษฎี



รูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดบิตข้อมูล

จากรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลในช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน ช่องสัญญาณแบบเรย์ลีห์ จะเหมาะสมกับการทำนายการสื่อสารในลักษณะที่ไม่เห็นแหล่งกำเนิด หรือไม่มีองค์ประกอบสัญญาณหลัก ซึ่งค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลจะมีค่ามากในทุกๆ อัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน เมื่อเปรียบเทียบกับช่องสัญญาณแบบไรซ์ ( $K = 5, 10, 15$  และ  $20$  dB) ซึ่งถูกใช้เป็นตัวแทนการสื่อสารในลักษณะที่เห็นแหล่งกำเนิด และมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่เกิดจากการสะท้อน หักเห รวมเข้าด้วยกันที่จุดสังเกต ถ้าค่า  $K$  มีค่าน้อย ค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลจะเข้าใกล้ในกรณีของช่องสัญญาณแบบเรย์ลีห์ สำหรับช่องสัญญาณแบบ Gaussian เป็นช่องสัญญาณที่มีการจางหายค่าซึ่งไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ

#### 4.6 การทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูลผ่านทาง การจำลองระบบการสื่อสาร



รูปที่ 4.3 ลำดับขั้นการจำลองระบบสื่อสาร (การสื่อสารแบบ 2-FSK บนช่องสัญญาณแบบไรซ์)

รูปที่ 4.3 แสดงลำดับขั้นการคำนวณเพื่อทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูลผ่านทาง การจำลองระบบการสื่อสาร ขั้นตอนที่ 1 เป็นการกำเนิดข้อมูลที่มีลักษณะตรรก 0 และ 1 (Binary) ที่ใช้ 2 บิตแทน 1 สัญลักษณ์ กำเนิดจำนวนบิตเท่ากับ 100,000 บิต และ 500,000 บิต ผ่านการมอดูเลตแบบ 2-FSK ผ่านช่องสัญญาณแบบไรซ์ ที่มีค่า  $K$  ต่างกันซึ่งได้จากการทดสอบทางสถิติในบทที่ 5 ที่แสดงในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 จากนั้นทำการดีมอดูเลต และนำมาคำนวณค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลกับข้อมูลต้นแบบ โดยที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) จาก 1 dB ไปจนถึง 20 dB แล้วนำค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่เป็นช่องสัญญาณแบบไรซ์ ที่มีค่า  $K$  ต่างกันซึ่งได้จากการทดสอบทางสถิติในบทที่ 5 ที่แสดงในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 เช่นกันดังแสดงในบทที่ 5 ต่อไป

## 4.7 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น กล่าวถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทางสถิติ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต และการทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูลผ่านทาง การจำลองช่องสัญญาณการสื่อสาร ซึ่งค่าอัตราความผิดพลาดบิต นั้นมีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของช่องสัญญาณการสื่อสารแบบดิจิทัล ที่มีความเร็วในการส่งสัญญาณสูง

โดยในการหาคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้น จะเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นทางสถิติ ซึ่งจะเป็นการสุ่มวัดสัญญาณ ณ จุดๆหนึ่งในช่วงเวลาหนึ่ง และจากการทดสอบสัญญาณและวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสุ่มสัญญาณทุกๆ 2 วินาทีเพื่อที่จะให้ได้จำนวนสัญญาณสุ่ม 1,000 ค่า แล้วนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความหนาแน่นของการกระจายตัวทางสถิติในรูปของ Histogram plot และทำการเขียนกราฟเส้น Histogram เมื่อทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสัญญาณที่จุดต่างๆ (PDF) ซึ่งจากสมการที่ 4.3 หาค่า K เพื่อที่จะนำมาหาคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น ที่ได้จากสมการแม่นยำตรงจะเป็นการคำนวณแบบประมาณที่ประกอบด้วยฟังก์ชันค่าความผิดพลาดในทางสถิติของระบบสื่อสารแบบ FSK ที่ใช้จำนวนบิตข้อมูล 2 บิตต่อ 1 สัญลักษณ์ สำหรับขั้นตอนการคำนวณเพื่อทำนายค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูลผ่านทาง การจำลองระบบการสื่อสาร ขั้นตอนที่ 1 เป็นการกำเนิดข้อมูล ที่มีจำนวนบิตเท่ากับ 100,000 บิต และ 500,000 บิต ผ่านการมอดูเลตแบบ 2-FSK ผ่านช่องสัญญาณแบบไร้ซึ่งที่มีค่า K ต่างกันซึ่งได้จากการทดสอบทางสถิติในบทที่ 5 จากนั้นทำการดีมอดูเลต และนำมาคำนวณค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลกับข้อมูลต้นแบบ โดยที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) ผลจากการจำลองทางสถิติจะเป็นประโยชน์ในการติดตั้งระบบสื่อสาร ณ จุดที่มีระดับค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) ที่เหมาะสม

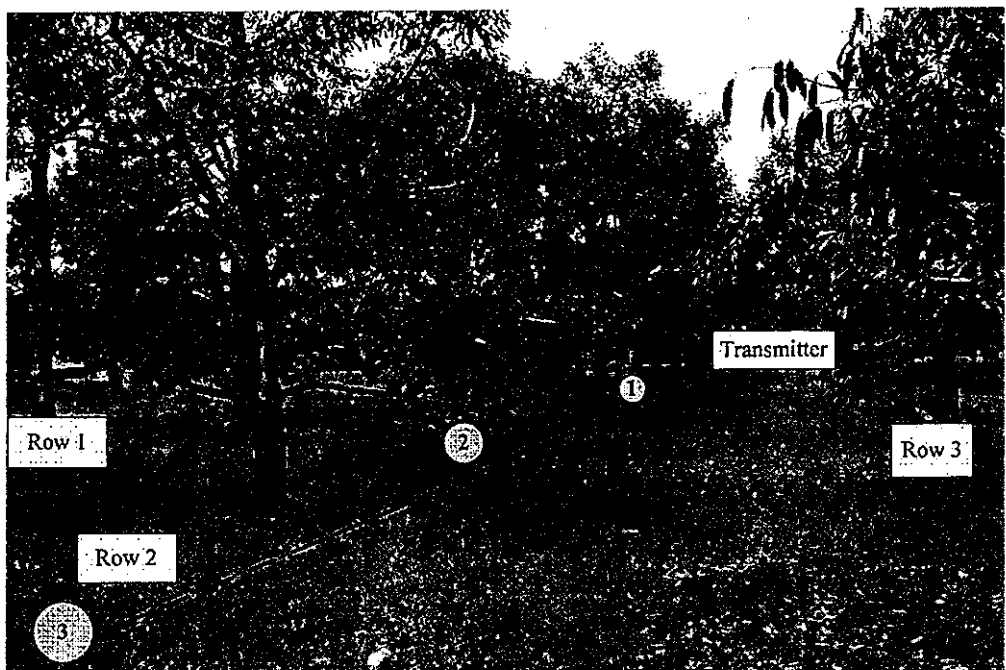
## บทที่ 5

# ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณ การแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียน

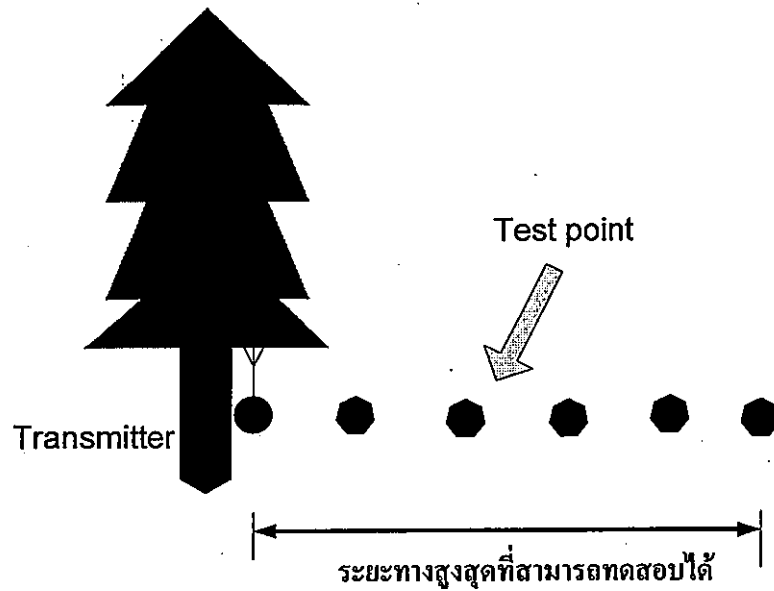
### 5.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด และการทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนด การทำนายอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูล โดยการจำลองระบบการสื่อสาร และผลการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการจำลองอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลนั้นในการกำหนดค่าคงที่ของช่องสัญญาณแบบไรซ์ นั้นจะนำมาจาก การทดสอบสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นทางสถิติในบทที่ 3 แล้วนำค่าคงที่ของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแบบไรซ์ ที่มาจากการหาค่าความหนาแน่นความน่าจะเป็นของสัญญาณที่จุดต่างๆ PDF (Probability Density Function)

### 5.2 การทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด



(ก) ต้นทุเรียนที่ใช้ในการทดสอบจริง



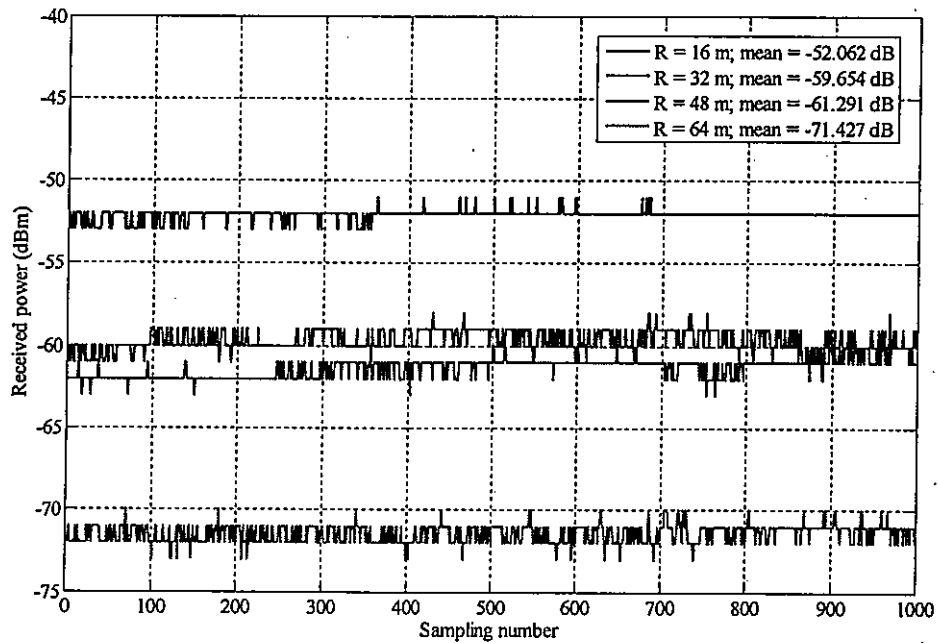
(ข) แบบจำลองการทดสอบ

### รูปที่ 5.1 แผนผังการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด

การทดสอบการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.1 (ก) และ (ข) นั้น ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณให้มีความสูงประมาณ 0.5 เมตร เครื่องส่งทำงานที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยกำลังส่งเท่ากับ -10 dBm สายอากาศทางด้านส่งและทางด้านรับที่ทำการทดสอบเป็นสายอากาศโมโนโพลหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่นมีอัตราการขยายประมาณ 2 dBi โดยในการทดสอบได้ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณที่บริเวณโคนต้นไม้เรียน ส่วนทางด้านรับทำการติดตั้งเครื่องวิเคราะห์สัญญาณห่างออกมาจากเครื่องกำเนิดสัญญาณในแนวเส้นสายตาที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งในที่นี้ได้ทำการทดสอบการรับสัญญาณทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ที่ระยะต่างๆ ดังนี้คือ 16 32 48 และ 64 เมตร ตามลำดับ และในแต่ละตำแหน่งจะทำการบันทึกค่าสัญญาณที่รับได้ในทุกๆ 2 วินาที จนครบจำนวน 1,000 ค่า หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของสัญญาณในทางสถิติต่อไป

### 5.2.1 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด

การจางหายของสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลาของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้น เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่จะต้องทราบ เพราะในการสื่อสารแบบไร้สาย การเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณอย่างรวดเร็ว ระดับเฉลี่ยของสัญญาณ และการหน่วงเฟสของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศรับจะส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดในการสื่อสารเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการสื่อสารแบบดิจิทัล การทราบข้อมูลของช่องสัญญาณนั้นๆจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการออกแบบระบบในการสื่อสาร

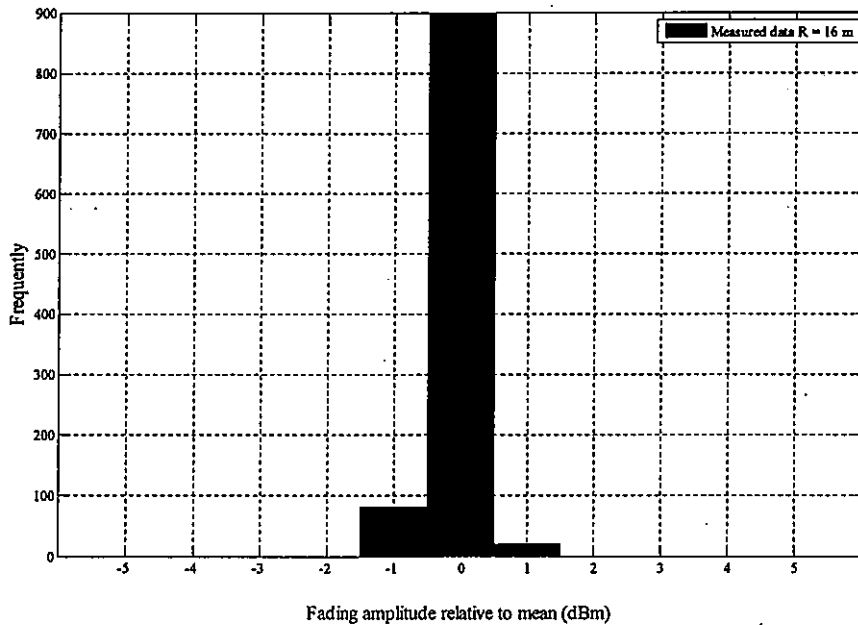


รูปที่ 5.2 ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ระยะทางต่างๆเป็นฟังก์ชันของจำนวนการสุ่มสัญญาณ

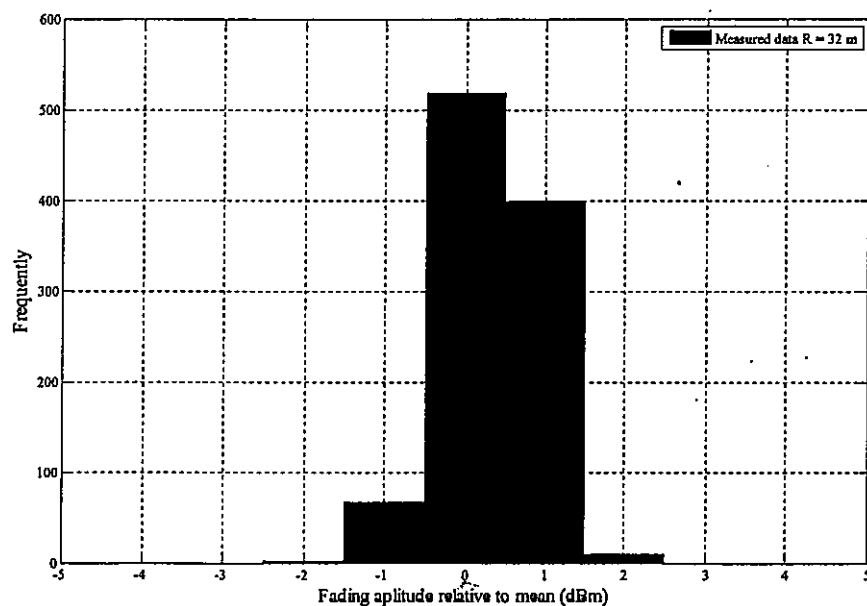
ในรูปที่ 5.2 แสดงถึงระดับของสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลาที่รับได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ จำนวน 4 ตำแหน่ง โดยที่ระดับของสัญญาณรบกวนของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณอยู่ที่ -110 dBm พบว่า เมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณห่างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 16 เมตร หรือตำแหน่งที่ 1 จะมีระดับสัญญาณเฉลี่ยเท่ากับ -52.062 dBm และมีค่าของสัญญาณที่คงที่เนื่องจากเครื่องรับนั้นรับสัญญาณที่เป็นสัญญาณหลักได้มากและมีสัญญาณที่เกิดจากสัญญาณที่มาจากหลายทิศทางมีค่าน้อย และระดับของสัญญาณที่รับได้ในระยะ 32 48 และ 64 เมตร จะมีระดับของสัญญาณเฉลี่ยลดลงเป็น -59.654 dBm -61.291 dBm และ -71.427 dBm ตามลำดับ สาเหตุเกิดจากการสูญเสียตามระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงการแกว่งของระดับสัญญาณในตำแหน่งที่ 2 3 และ 4 พบว่า ที่ระยะไกลขึ้นจะมีการแกว่งของสัญญาณมากขึ้น เนื่องจากสัญญาณที่มาถึงเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเป็นองค์ประกอบสัญญาณที่มาจากหลาย

เส้นทาง ซึ่งเกิดจากการสะท้อนจากสภาพแวดล้อม เช่น ต้นไม้ พื้นดิน โดยที่องค์ประกอบของสัญญาณหลักมีค่าน้อยลงเนื่องจากการกีดขวางจากต้นไม้เรือน

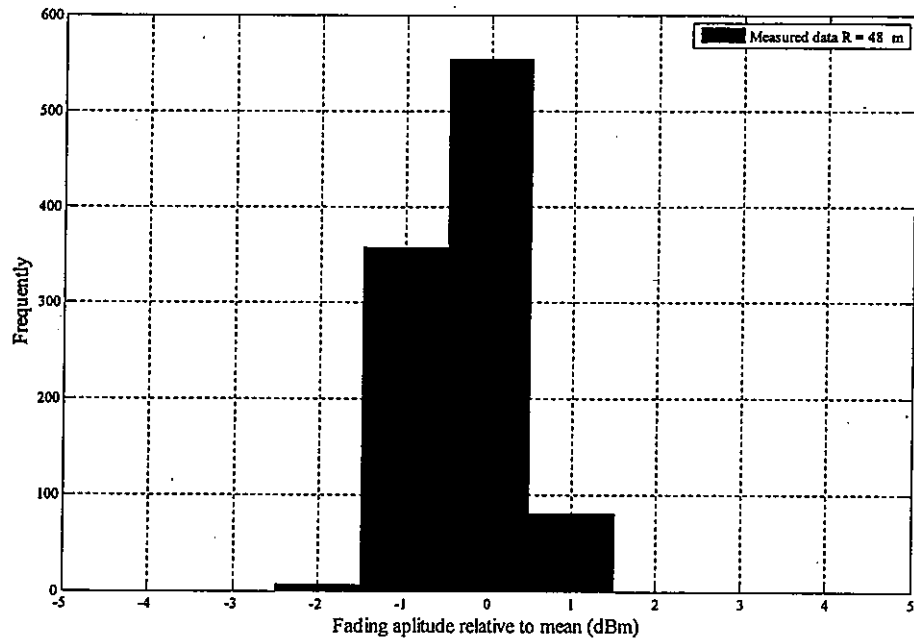
จากการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลา นำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยการนำมาเขียนกราฟความหนาแน่นของการกระจายตัวทางสถิติในรูปของ Histogram plot และทำการเขียนกราฟเส้น Histogram จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับรูปแบบการกระจายตัวทางสถิติที่สื่อถึงลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้นๆ



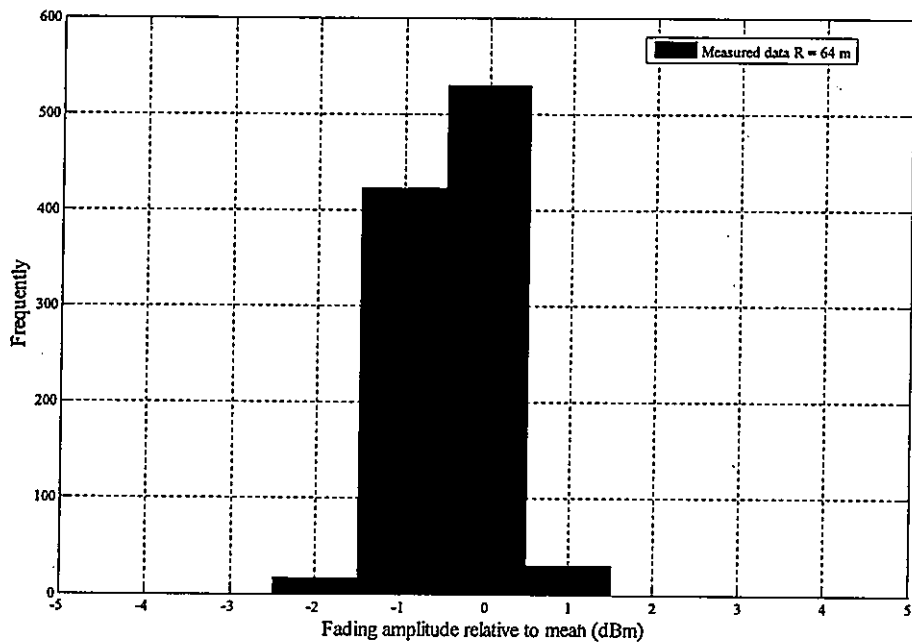
รูปที่ 5.3 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 16 เมตร



รูปที่ 5.4 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 32 เมตร



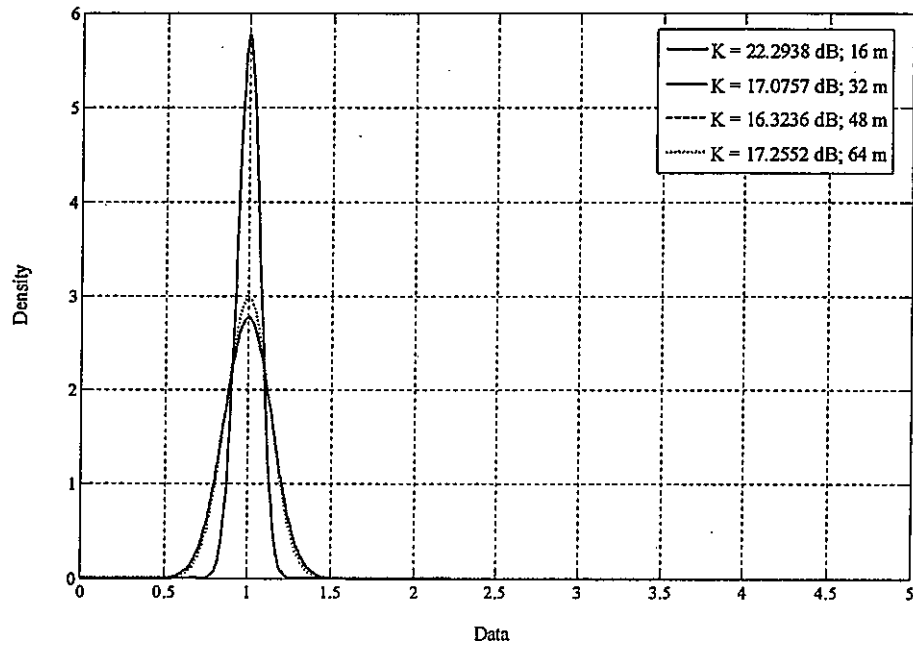
รูปที่ 5.5 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 48 เมตร



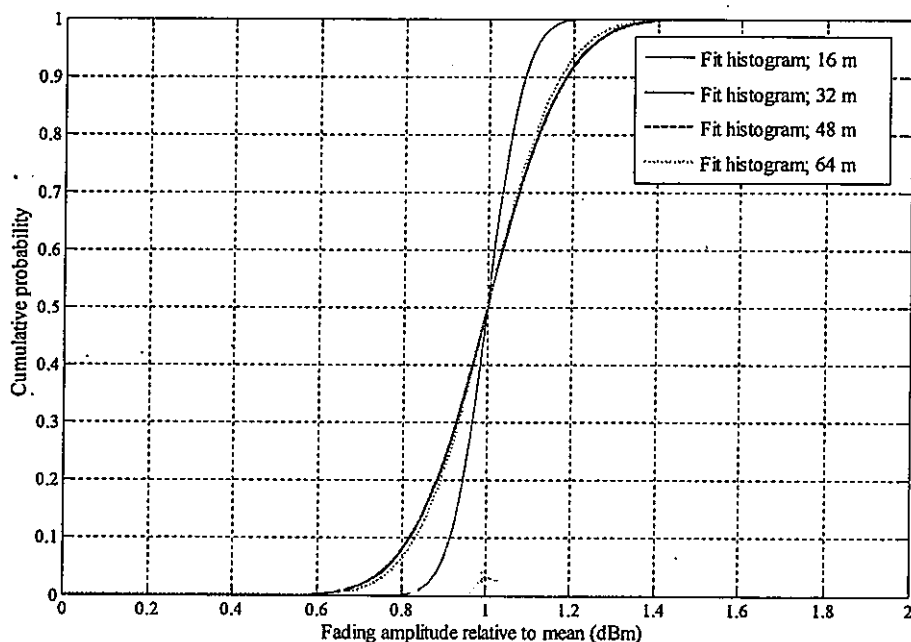
รูปที่ 5.6 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่ระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีค่าเท่ากับ 64 เมตร

จากรูปที่ 5.3 ถึง 5.6 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ นั่นคือ ที่ตำแหน่งเครื่องวิเคราะห์สัญญาณห่างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 16 32 48 และ 64 เมตร ตามลำดับ พบว่า ที่ระยะห่างระหว่างเครื่องวิเคราะห์

สัญญาณกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 16 เมตร จะมีค่าการเบี่ยงเบนที่ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับที่ระยะ 32 48 และ 64 เมตร นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะห่างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ไกลมากขึ้น จะส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย สาเหตุเกิดจากเมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณอยู่ไกลขึ้น ทำให้สัญญาณที่รับได้มีค่าที่ต่ำลง รวมทั้งผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการสะท้อนจากสภาพแวดล้อม จึงส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของสัญญาณที่รับมากขึ้นนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.7 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูดของสัญญาณ



รูปที่ 5.8 ความน่าจะเป็นสะสมที่เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูดของสัญญาณ

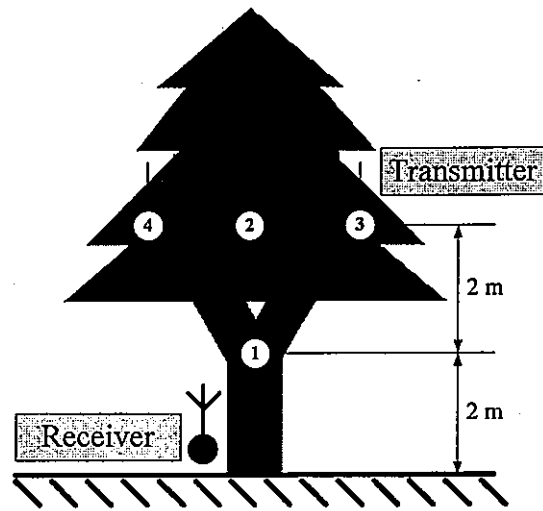
จากรูปที่ 5.7 แสดงกราฟ PDF (Probability Density Function) และรูปที่ 5.8 แสดงกราฟ CDF (Cumulative Distribution Function) เมื่อทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของความเป็นของสัญญาณที่จุดต่างๆ พบว่า เมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะห่างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 16 เมตร จะมีการกระจายตัวของสัญญาณน้อย ซึ่งจากสมการที่ 4.3 จะทำให้ได้ค่า K ที่มีค่าค่อนข้างสูง (คือมีค่าเท่ากับ 22.2938 dB) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะ 32 48 และ 64 เมตร ทั้งนี้ในสถานะการทดสอบจริงเครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะถูกต้นทุเรียนก็คขวางเป็นอย่างมากที่ระยะทาง 32 48 และ 64 เมตร และเครื่องกำเนิดสัญญาณมีระดับกำลังงานส่งที่ต่ำทำให้เกิดการกระจายตัวทางสถิติ

ตารางที่ 5.1 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณ กำลังงานที่รับ และรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม โดยที่กำลังส่งมีค่าเท่ากับ -10 dBm ส่งและรับสัญญาณด้วยสายอากาศโมโนโพล

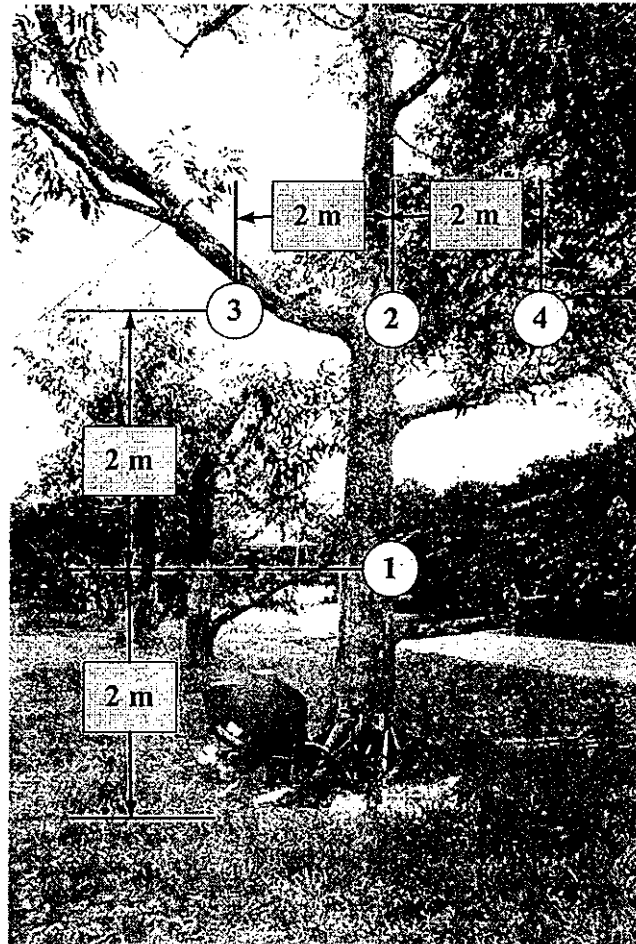
Location	Average received power (dBm)	Variance ( $\sigma^2$ ) (PDF)
		Received power (dBm)
		Rician
R = 16 เมตร	-52.062	0.00294839 (K=22.2938)
R = 32 เมตร	-59.654	0.00980383 (K=17.0757)
R = 48 เมตร	-61.291	0.01165750 (K=16.3236)
R = 64 เมตร	-71.427	0.00940679 (K=17.2552)

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความแปรปรวนของสัญญาณเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ และนำการกระจายตัวแบบไรซ์ มาออกแบบช่องสัญญาณเพื่อที่จะหาค่าความผิดพลาดบิต เนื่องจากการกระจายตัวชนิดนี้ได้รับความนิยมในการนำมาทำนายหรือทำการคำนวณในด้านการสื่อสารเป็นอย่างมาก เพราะให้ความถูกต้องและเหมาะสมกับการสื่อสารในกรณีที่มีหลายเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่มาถึงยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมากกว่าการกระจายตัวในรูปแบบอื่นๆ

### 5.3 การทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนด



(ก) แบบจำลองการทดสอบ



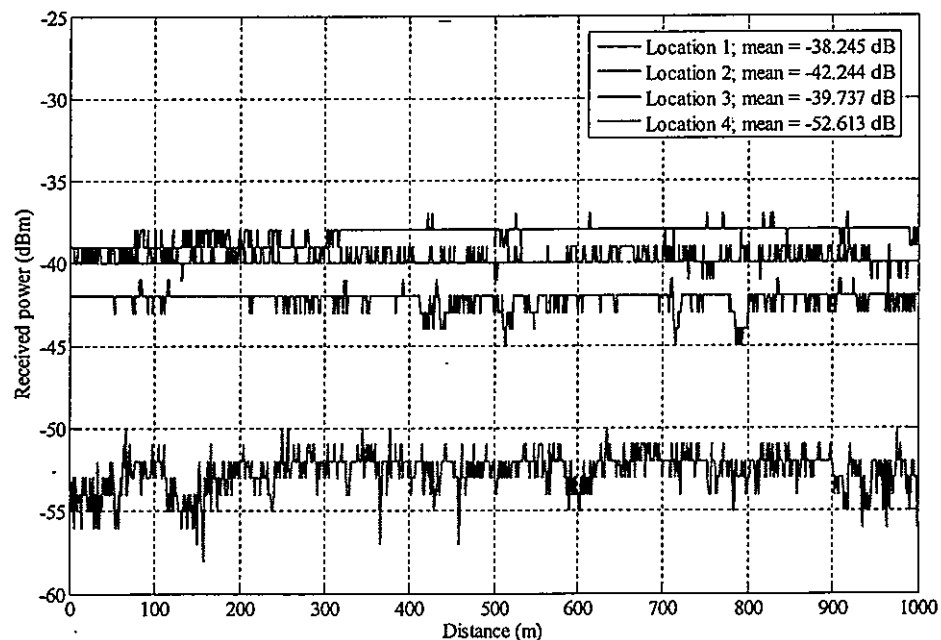
(ข) รูปถ่ายต้นไม้จริงที่ใช้ในการทดสอบจริง

รูปที่ 5.9 ตำแหน่งของเซ็นเซอร์บนผลทุเรียน

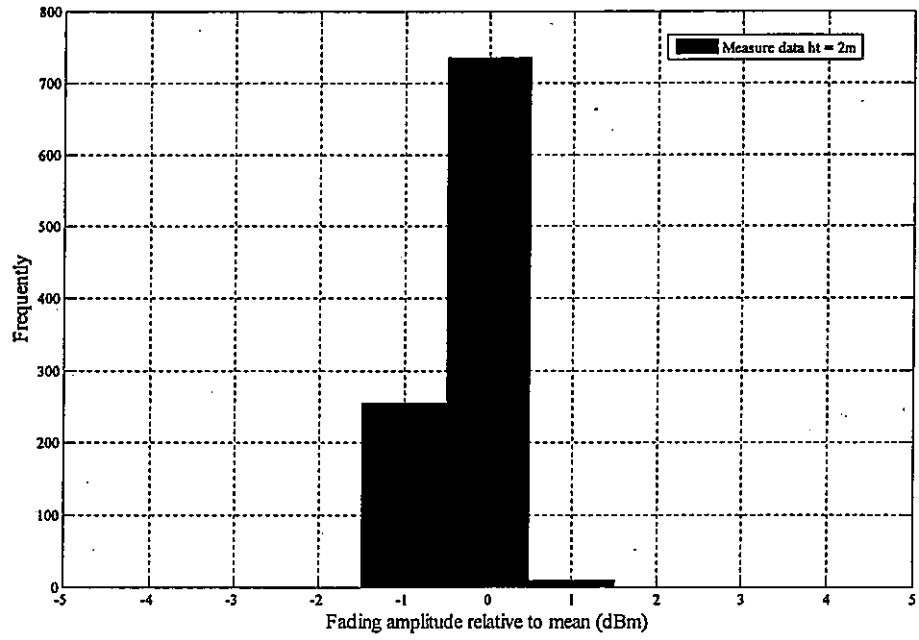
ในส่วนนี้จะทำการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นทางด้านสถิติเช่นเดียวกัน แต่ในหัวข้อนี้ จะเป็นการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์ที่ติดบนผลทุเรียนที่ตำแหน่งต่างๆ มายัง โหนดที่ติดตั้งอยู่บริเวณ โคนของต้นทุเรียน ดังที่แสดงในรูปที่ 5.9 (ก) และ (ข) โดยที่ในการ ทดสอบการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะทำการจำลองตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่จะทำการส่งสัญญาณ มายังโหนดทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่ 1 มีความสูงเท่ากับ 2 เมตร และตำแหน่งที่ 2 3 และ 4 มีความสูงเท่ากับ 4 เมตร ระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่ 1 และ 2 ห่างกันเท่ากับ 2 เมตร ดังแสดง ในรูปที่ 5.9 (ก) และ (ข) ซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะทำการบันทึกค่าทางสถิติจำนวน 1,000 ค่า โดยที่ แต่ละค่าจะทำการบันทึกในทุกๆ 2 วินาที หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

### 5.3.1 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์มายังโหนด

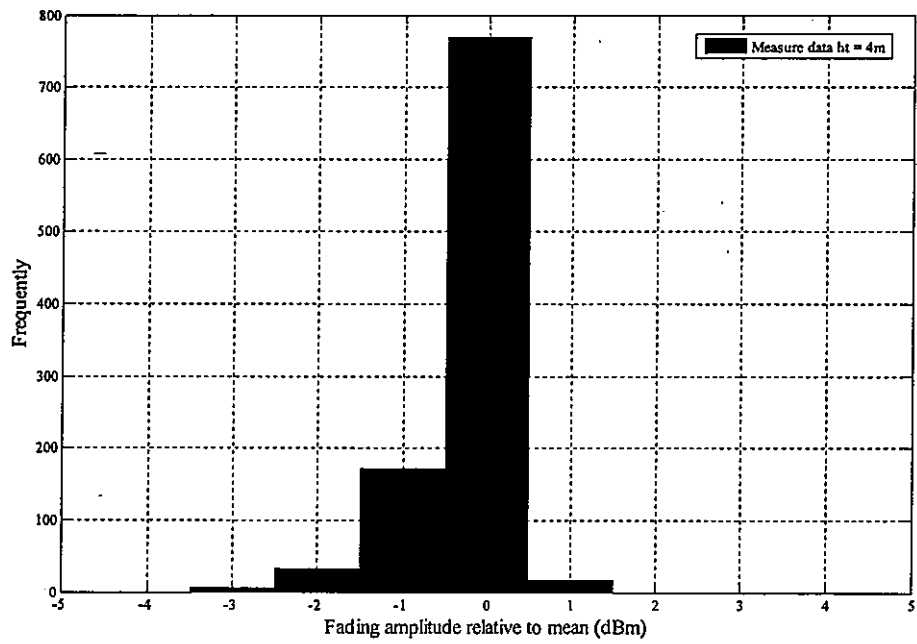
จากการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ ดัง แสดงในรูปที่ 5.9 (ก) และ (ข) มายังโหนดที่อยู่บริเวณ โคนต้นทุเรียน พบว่า ระดับของสัญญาณที่ เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้มีค่าเฉลี่ยที่ตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 คือ มีค่าประมาณ -40 dBm แต่จะ พบว่า ตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมี ระยะห่างกันมากที่สุด จะมีระดับของสัญญาณเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ -52.613 dBm ดังแสดง ในรูปที่ 5.10 และเมื่อพิจารณาสัญญาณตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีระยะทางที่ไกลที่สุด พบว่า มีการแกว่งของระดับสัญญาณที่สูงกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ



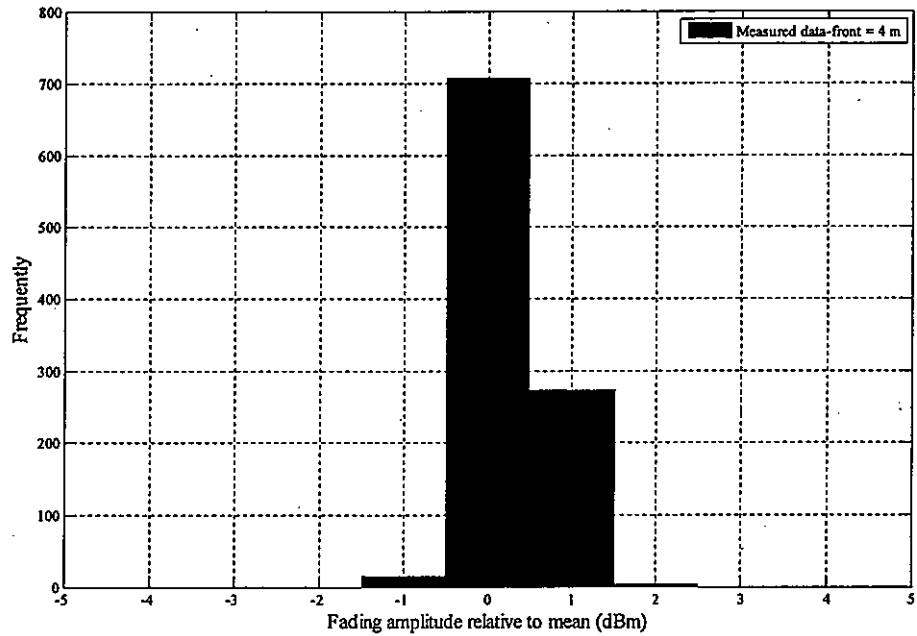
รูปที่ 5.10 ระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นฟังก์ชันของ จำนวนการสุ่มสัญญาณ



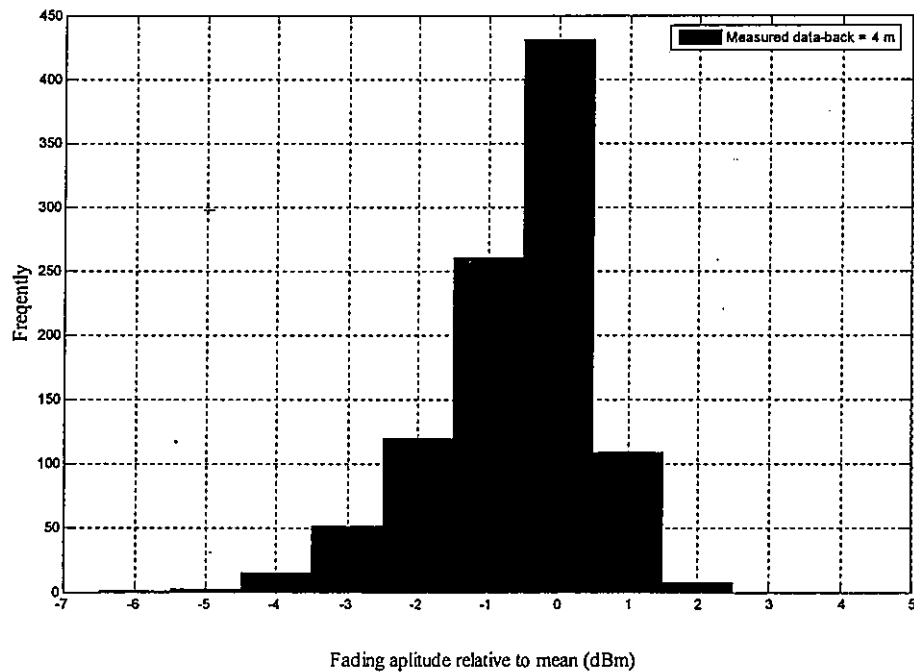
รูปที่ 5.11 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 5.12 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2



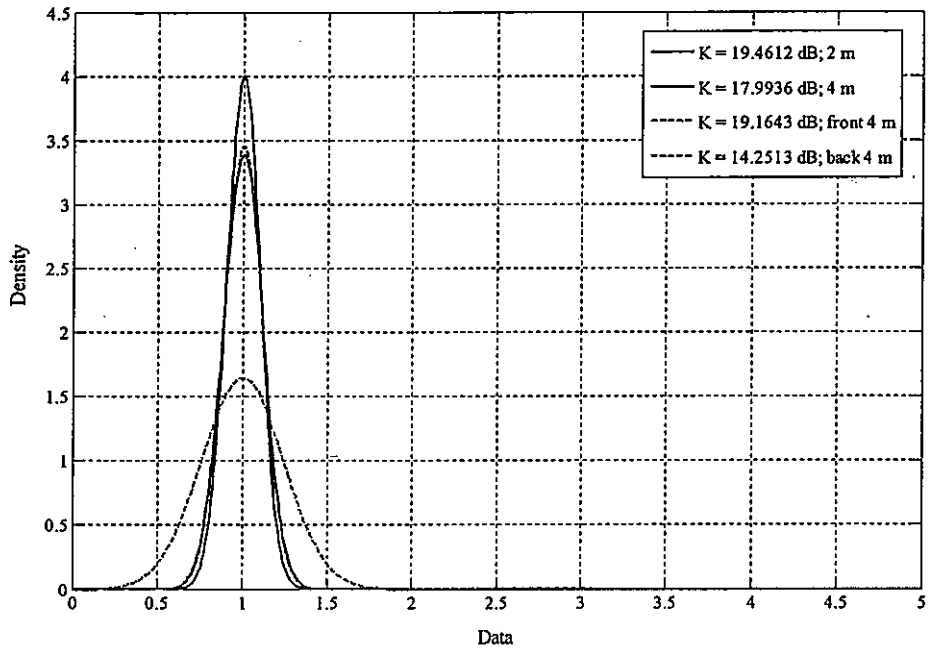
รูปที่ 5.13 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 3



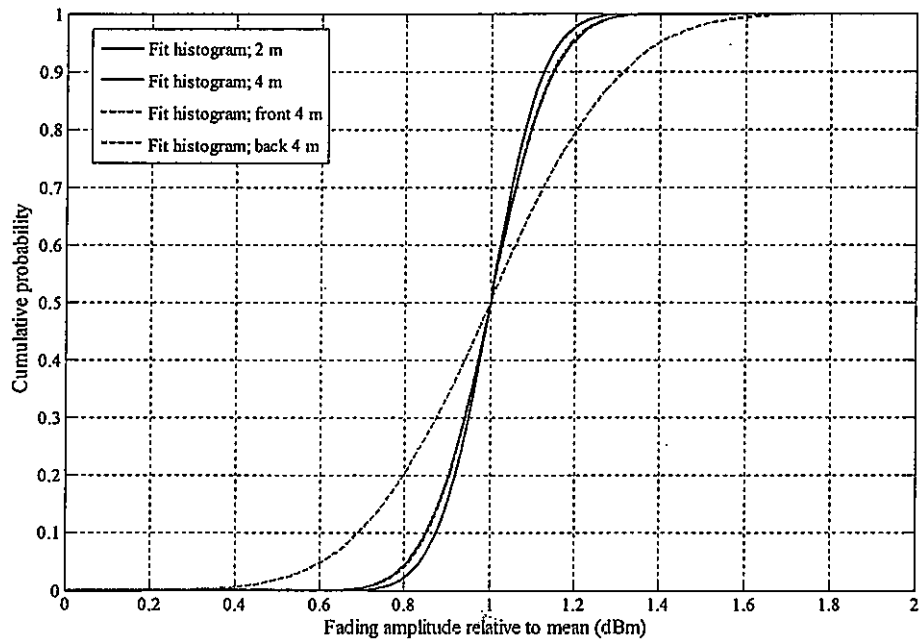
รูปที่ 5.14 ลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณเมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 4

จากการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลา นำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ และทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 5.2.1 โดยในรูปที่ 5.11 ถึง 5.14 แสดงถึงลักษณะการกระจายตัวของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้ที่ตำแหน่งต่างๆ นั่นคือ เครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่า ที่ตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 จะมีการกระจายตัว

ของสัญญาณต่ำกว่าที่ตำแหน่งที่ 4 โดยที่ตำแหน่งที่ 4 นั้น สาเหตุเกิดจากระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะทางที่ไกลกว่าตำแหน่งอื่นๆ ส่วนที่ตำแหน่งที่ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ใกล้กว่านั้น สาเหตุเกิดจากการที่มีกิ่งของคลื่นเวียนมาขวางสัญญาณที่ส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ



รูปที่ 5.15 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูดของสัญญาณ



รูปที่ 5.16 ความน่าจะเป็นสะสมที่เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูดของสัญญาณ

จากรูปที่ 5.15 และ 5.16 แสดงกราฟ PDF และกราฟ CDF ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสัญญาณที่จุดต่างๆ พบว่า เมื่อเครื่องกำเนิดสัญญาณอยู่ตรงตำแหน่งที่ 1 จะมีการกระจายตัวของสัญญาณน้อย ซึ่งจากสมการที่ 4.3 จะทำให้ได้ค่า K ที่มีค่าค่อนข้างสูงมาก (คือ มีค่าเท่ากับ 19.4612 dB) เมื่อเปรียบเทียบกับที่ตำแหน่งอื่นๆ และผลในรูปที่ 5.10 จะเห็นว่า กราฟของข้อมูลจากการทดสอบมีความสอดคล้องกันมาก สาเหตุเนื่องจากระยะทางที่ใกล้และไม่มีสิ่งกีดขวาง แต่เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 2 3 และ 4 พบว่า ในตำแหน่งที่ 4 จะมีการกระจายตัวของสัญญาณมากที่สุด สาเหตุเนื่องมาจากตำแหน่งที่ 4 มีการกีดขวางของกิ่งไม้ ส่งผลให้ระดับกำลังงานส่งต่ำลงและเกิดการสะท้อนในหลายทิศทาง ทำให้เกิดการกระจายตัวทางสถิติมาก

ตารางที่ 5.2 ค่าความแปรปรวนของสัญญาณ กำลังงานที่รับ และรูปแบบความหนาแน่นทางสถิติที่เหมาะสม โดยที่กำลังส่งมีค่าเท่ากับ -10 dBm ส่งและรับสัญญาณด้วยสายอากาศโมโนโพล

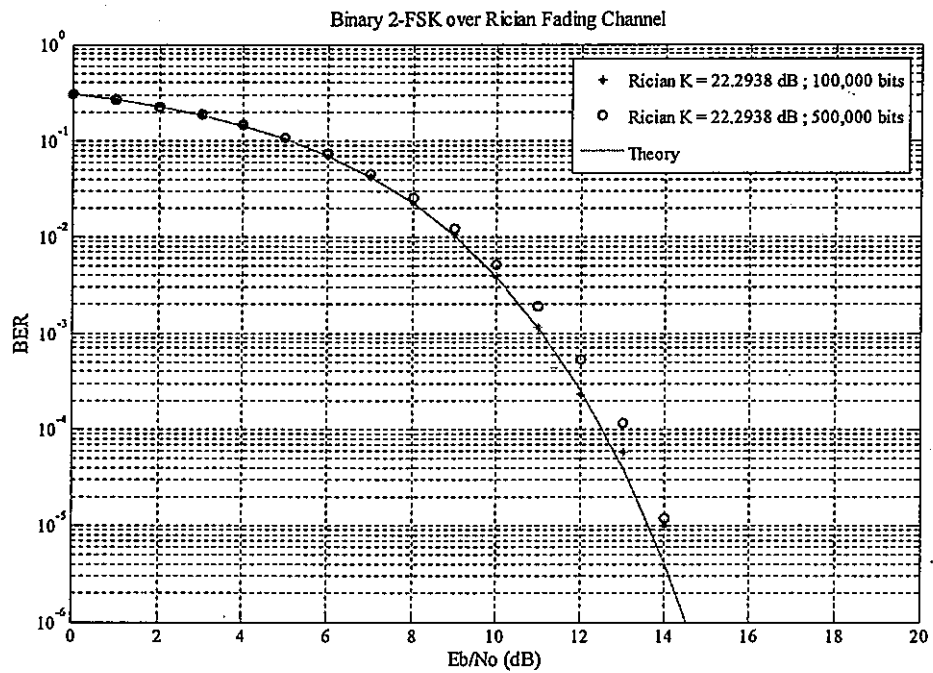
Location	Average received power (dBm)	PDF Variance ( $\sigma^2$ )
		Received power (dBm)
		Rician
1	-38.245	0.0056604 (K=19.4612 dB)
2	-42.244	0.00793598 (K=17.9936 dB)
3	-39.737	0.00606085 (K=19.1643 dB)
4	-52.613	0.01878610 (K=14.2513 dB)

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความแปรปรวนของสัญญาณเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ และนำการกระจายตัวแบบไรซ์ มาออกแบบช่องสัญญาณเพื่อที่จะหาค่าความผิดพลาดบิต เนื่องจากการกระจายตัวชนิดนี้ได้รับความนิยมในการนำมาทำนายหรือทำการคำนวณในด้านการสื่อสารเป็นอย่างมาก เพราะให้ความถูกต้องและเหมาะสมกับการสื่อสารในกรณีที่มีหลายเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นที่มาถึงยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมากกว่าการกระจายตัวในแบบอื่นๆ

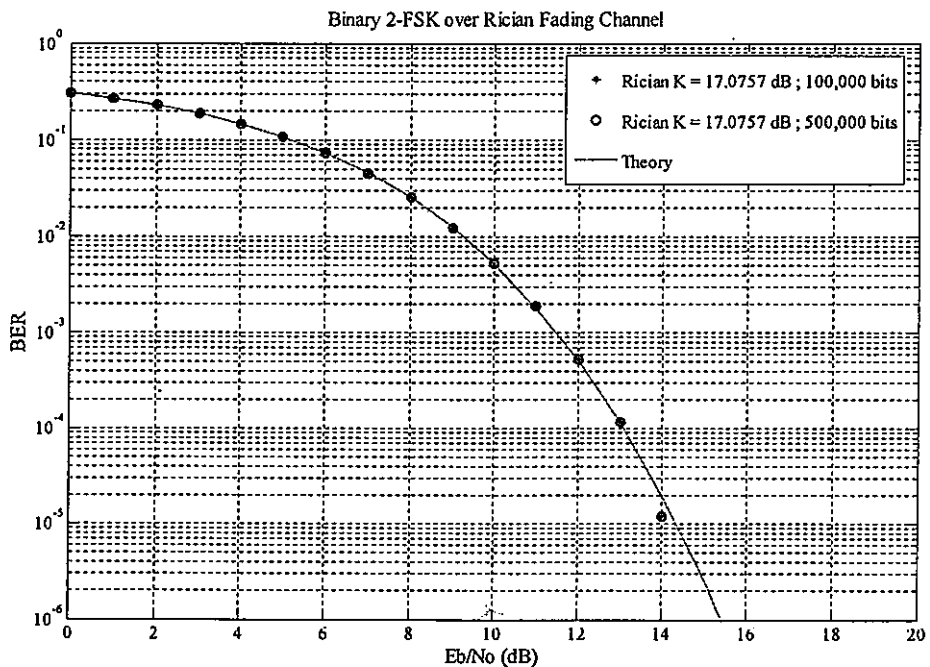
## 5.4 ผลการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล

จากช่องสัญญาณแบบไรซ์ ค่า  $K$  ในการทดสอบทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 5.1 และ ตารางที่ 5.2 นำมาหาค่าช่องสัญญาณแบบไรซ์ และทำการจำลองค่าความผิดพลาดบิตข้อมูล เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบติดตั้งระบบตัวตรวจจับแบบไร้สาย

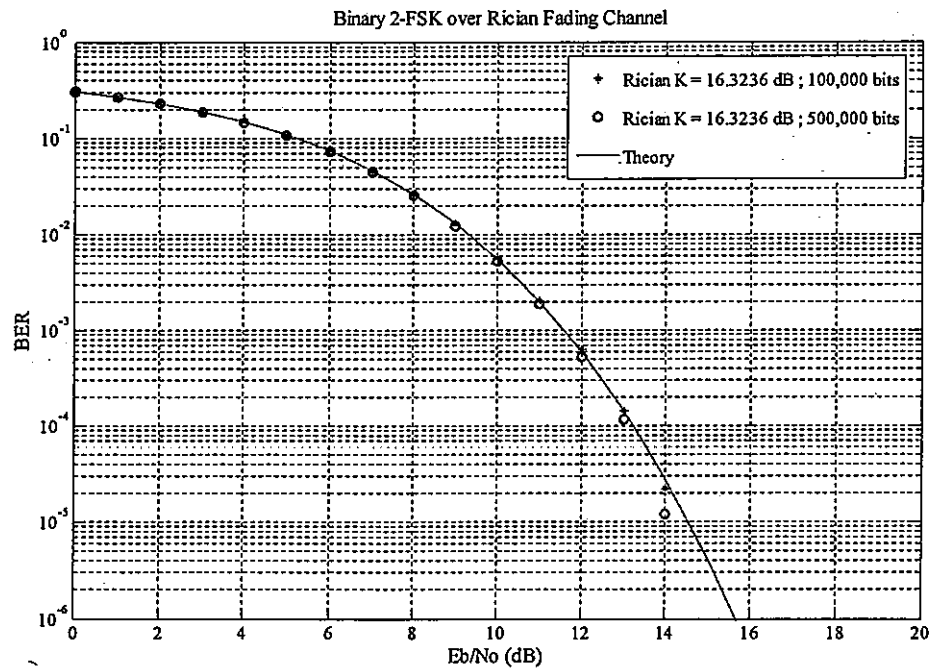
### 5.4.1 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด



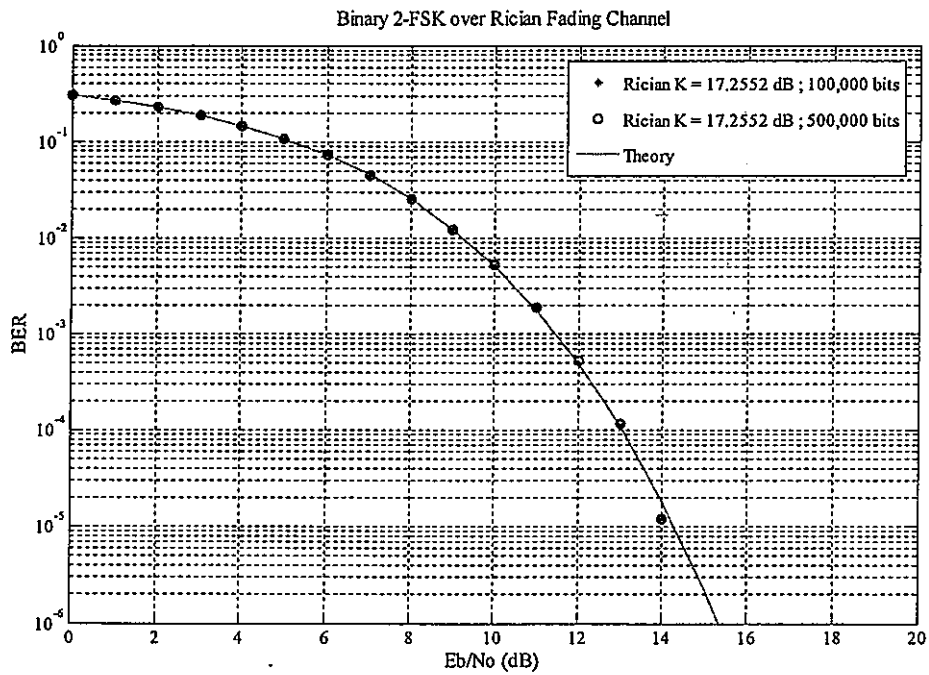
(ก) ระยะทาง 16 เมตร



(ข) ระยะทาง 32 เมตร



(ค) ระยะทาง 48 เมตร



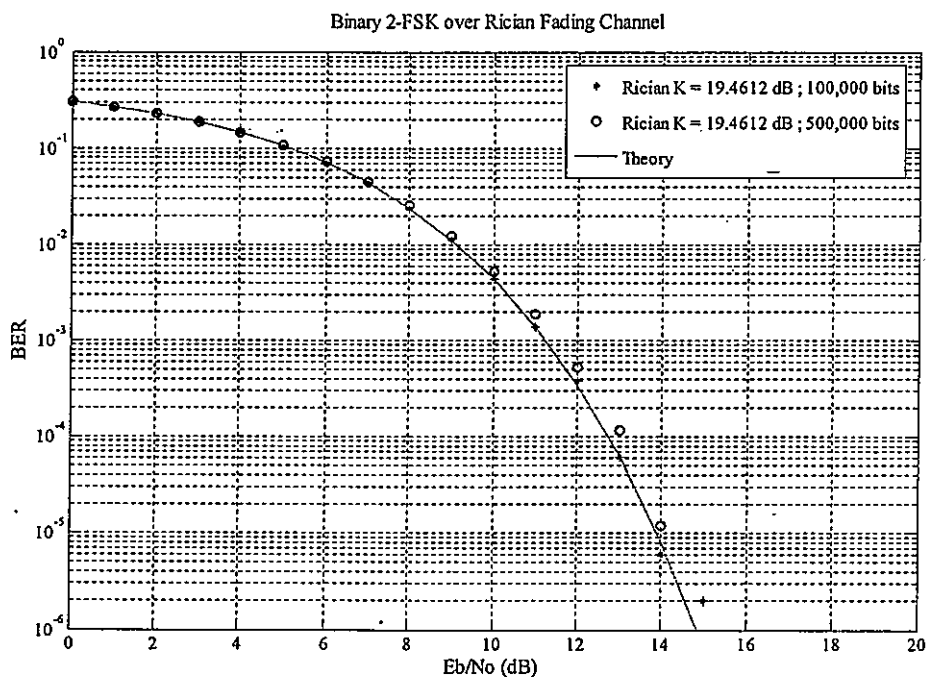
(ง) ระยะทาง 64 เมตร

รูปที่ 5.17 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน (โหนดต่อโหนด)

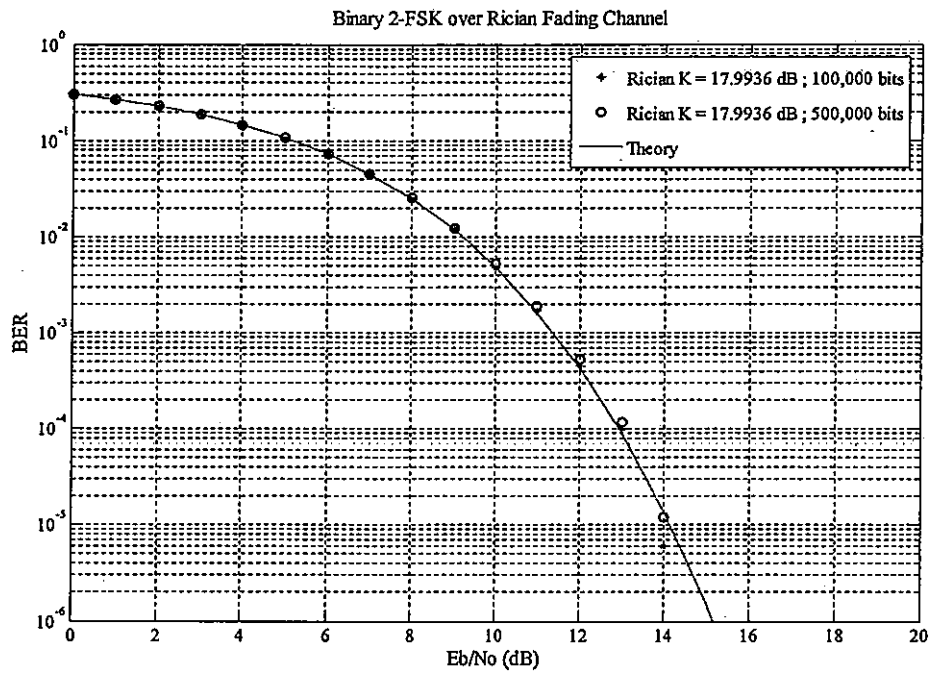
รูปที่ 5.17 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ผลที่ได้จากการจำลองพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีเป็นอย่างดี ซึ่งพบว่าพบว่าที่ตำแหน่งที่ 32 48 และ 64 เมตร ค่า  $K$  มีค่าเท่ากับ 17.0757 dB 16.3236 dB และ 17.2552 dB ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าตำแหน่งที่ 1 จะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลที่มากขึ้น สำหรับในตำแหน่งที่ 16 เมตรนั้น พบว่ามีค่า  $K$  สูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 22.2938 dB ค่า  $K$  มีค่าต่ำจะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลที่มากขึ้น ในการออกแบบระบบจะต้องกำหนดค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ เพื่อหาค่ากำลังงานที่เหมาะสม

จากรูปที่ 5.17 พบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล ของการทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด นั้นเมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบเมื่อกำเนิดบิตข้อมูล 100,000 บิต และเพิ่มจำนวนบิตเท่ากับ 500,000 บิตนั้นที่ค่าคงที่  $K$  ต่างๆค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลของกราฟข้อมูล 100,000 บิต และ 500,000 บิต นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก และกราฟทั้ง 2 เส้น นั้นก็มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าทางทฤษฎีที่เป็นค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่มีช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแบบไร้ชรั

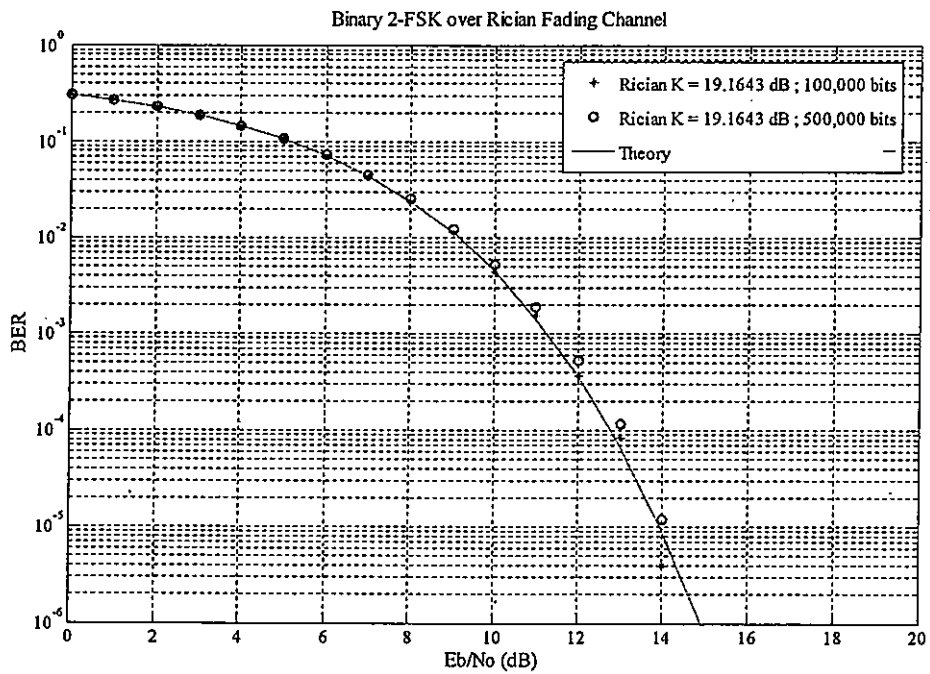
#### 5.4.2 ผลการทดสอบในกรณีจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์มายังโหนด



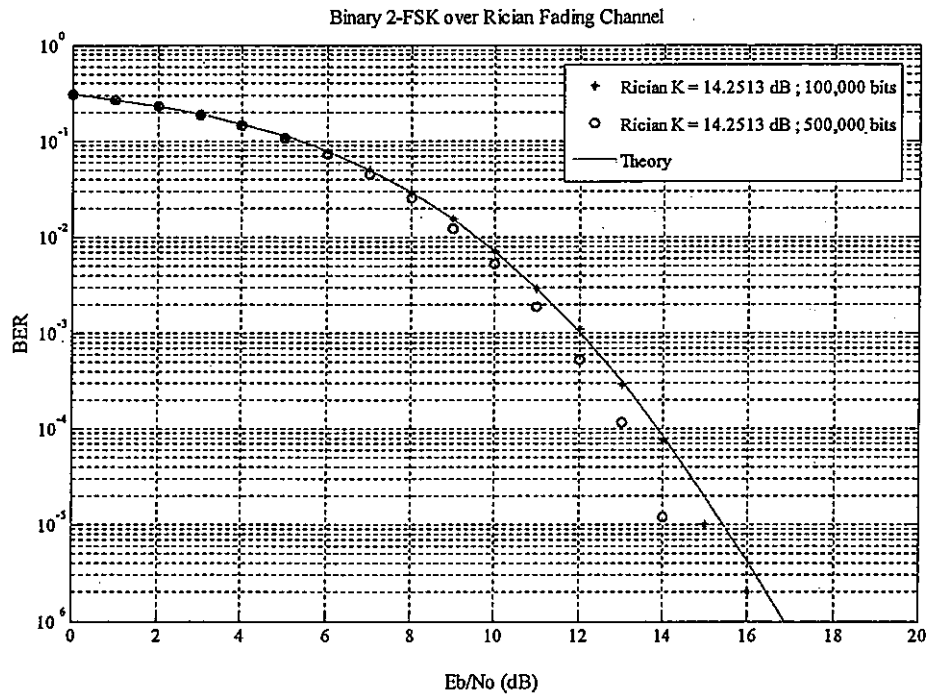
(ก) ตำแหน่งที่ 1



(a) ตำแหน่งที่ 2



(ค) ตำแหน่งที่ 3



(ค) ตำแหน่งที่ 4

รูปที่ 5.18 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน (เซ็นเซอร์มายังโหนด)

รูปที่ 5.18 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ผลที่ได้จากการจำลองพบที่มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีเมื่อเพิ่มจำนวนบิตเท่ากับ 500,000 บิต ผ่านการมอดูเลตแบบ 2-FSK ผ่านช่องสัญญาณแบบไรซ์ ที่มีค่า  $K$  ต่างกันซึ่งได้จากการทดสอบทางสถิติที่แสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2 จากนั้นทำการคิมอูเลต และนำมาคำนวณค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลกับข้อมูลต้นแบบ ในรูปที่ 5.17 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวนเมื่อกำหนดบิตข้อมูล 100,000 บิต และเพิ่มจำนวนบิตเท่ากับ 500,000 บิต ในกรณีการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด ผลที่ได้จากการจำลองพบที่มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งพบว่า ที่ระยะ 32 48 และ 64 เมตรนั้น ค่า  $K$  มีค่าเท่ากับ 17.0757 dB 16.3236 dB และ 17.2552 dB ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าที่ระยะ 16 เมตร จะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลที่สูงขึ้น สำหรับในระยะ 16 เมตร พบว่ามีค่า  $K$  สูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 22.2938 dB เนื่องจากอยู่ใกล้กับเครื่องส่งสัญญาณมากที่สุด ส่วนในกรณีในกรณีการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์มายังโหนด ดังแสดงในรูปที่ 5.18 ผลที่ได้จากการจำลองพบที่มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งพบว่า ที่ตำแหน่งที่ 2 3 และ 4 เมตรนั้นค่า  $K$  มีค่าเท่ากับ 17.9936 dB 19.1643 dB และ 14.2513 dB ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าที่ระยะ 16 เมตร จะส่งผลต่อค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลที่สูงขึ้น สำหรับในตำแหน่งที่ 1 พบว่ามีค่า  $K$  สูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 19.4612 dB

## 5.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียน ประกอบด้วยการทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด และการทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนด การทำนายอัตราความผิดพลาดบิตของการสื่อสารข้อมูล โดยการจำลองระบบการสื่อสาร และผลการจำลองค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล และจากกราฟอัตราความผิดพลาดบิตที่เป็นฟังก์ชันระหว่างค่าอัตราความผิดพลาดบิตและค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) พบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตทางทฤษฎีของช่องสัญญาณแบบไร้ชรั

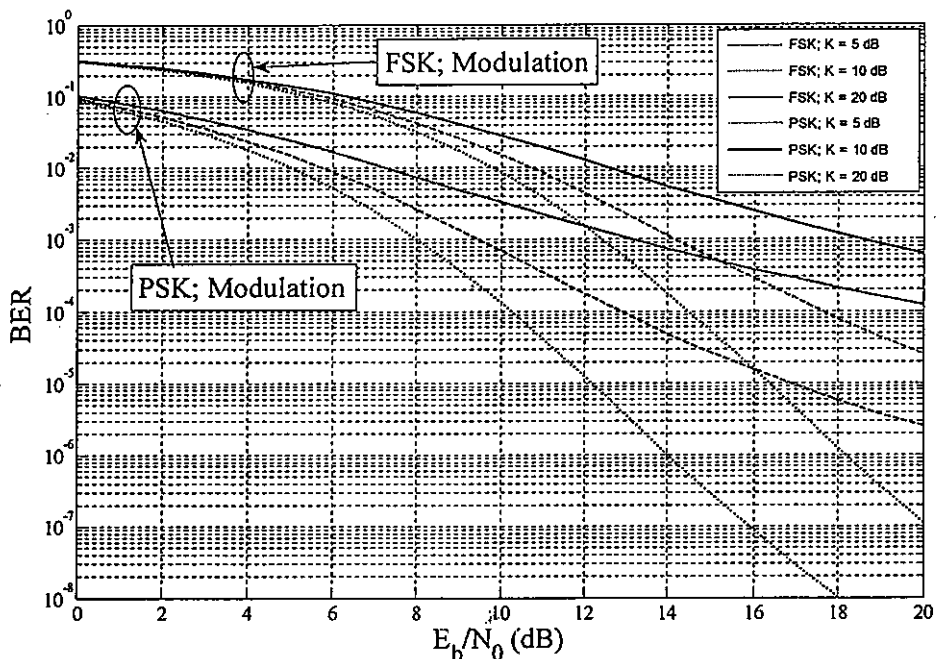
โดยผลการทดสอบคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด พบว่าระดับของสัญญาณที่เปลี่ยนไปตามเวลาที่รับได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ จำนวน 4 ตำแหน่ง โดยที่ระดับของสัญญาณรบกวนของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณอยู่ที่  $-110$  dBm เมื่อเครื่องวิเคราะห์สัญญาณห่างจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 16 32 48 และ 64 เมตร จะมีระดับของสัญญาณเฉลี่ยลดลง และเมื่อพิจารณาถึงการแกว่งของระดับสัญญาณ พบว่าที่ระยะไกลขึ้นจะมีการแกว่งของสัญญาณมากขึ้น เนื่องจากสัญญาณที่มาถึงเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเป็นองค์ประกอบสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง ซึ่งเกิดจากการสะท้อนจากสภาพแวดล้อม เช่น ต้นไม้ พื้นดิน และการทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นจากเซ็นเซอร์มายังโหนด พบว่าระดับของสัญญาณที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณรับได้มีค่าเฉลี่ยที่ตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 คือ มีค่าประมาณ  $-40$  dBm แต่จะพบว่า ตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เครื่องกำเนิดสัญญาณและเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะห่างกันมากที่สุด จะมีระดับของสัญญาณเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ  $-52.613$  dBm และสัญญาณตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีระยะทางที่ไกลที่สุด พบว่ามีการแกว่งของระดับสัญญาณที่สูงกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ เนื่องจากสัญญาณที่รับได้มีองค์ประกอบสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทาง ซึ่งเกิดจากการสะท้อนจากสภาพแวดล้อมภายในสวนทุเรียน

หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการนำมาเขียนกราฟความหนาแน่นของการกระจายตัวทางสถิติ Histogram plot และทำการเขียนกราฟเส้น Histogram เมื่อทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสัญญาณที่จุดต่างๆ (PDF) ซึ่งจากสมการที่ 4.3 หากค่า  $K$  เพื่อที่จะนำมาหาคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น ที่ได้จากการแม่นยำจะเป็นการคำนวณแบบประมาณที่ประกอบด้วยฟังก์ชันค่าความผิดพลาดในทางสถิติสำหรับเป็นตัวแทนการมอดูเลตสัญญาณในแบบต่างๆ โดยสามารถรวมผลของคุณลักษณะช่องสัญญาณทางสถิติร่วมด้วยในการทำนาย โดยจะเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดบิตระหว่างค่าที่ได้มาจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติและค่าทางทฤษฎี โดยจะกำหนดค่าความผิดพลาดบิตเชิงทฤษฎี และให้ช่วง

ของค่า  $E_b/N_0$  มีค่า 0 ถึง 20 dB ทำการกำหนดชนิดการมอดูเลตแบบ FSK อันดับ 2 การแพร่กระจายคลื่นผ่านช่องสัญญาณที่มีลักษณะการกระจายตัวทางสถิติแบบไรซ์ และทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ )

ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าอัตราผิดพลาดบิตข้อมูลของการทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 กรณี ของการวิเคราะห์ผลทางสถิติและทฤษฎีนั้น เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบเมื่อกำเนิดบิตข้อมูล 100,000 บิต และเพิ่มจำนวนบิตเท่ากับ 500,000 บิต ที่ค่าคงที่  $K$  ต่างๆค่าอัตราผิดพลาดบิต มีค่าใกล้เคียงกันมาก และกราฟทั้ง 2 เส้นก็มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าทางทฤษฎีที่เป็นค่าอัตราผิดพลาดบิตข้อมูลที่มีช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแบบไรซ์ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้การสื่อสารข้อมูลของระบบโครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ นั้นสามารถติดต่อสื่อสารได้โดยมีแนวโน้มของค่าอัตราผิดพลาดบิตข้อมูลดังผลการทดสอบที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากผลการทดสอบหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตของช่องสัญญาณแบบไรซ์ ที่มีการมอดูเลตแบบ FSK กำลังสอง พบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการทดสอบนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราความผิดพลาดบิตทางทฤษฎีมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณหลักที่ไม่มีภาระงานต่อค่าของระดับสัญญาณที่มาจากหลายทิศทาง ( $K$ ) ค่าเดียวกัน ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลจากการทดสอบชุดเดียวกันมาหาค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่มีการมอดูเลตแบบอื่น ย่อมมีผลของค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีของระบบที่มีการมอดูเลตแบบเดียวกัน และมีค่า  $K$  เดียวกันด้วย ดังนั้นจึงยกตัวอย่างค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่มีการมอดูเลตแบบ PSK กำลังสองมาเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของข้อมูล เปรียบเทียบระหว่างการมอดูเลตแบบ 2-FSK และ BPSK ที่มีค่า  $K = 5$  10 และ 20 dB ของทั้งสองกรณี

จากการคำนวณหาค่าอัตราความผิดพลาดบิต ที่มีการมอดูเลตแบบ FSK นั้นที่ค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) เริ่มต้นเท่ากับศูนย์พบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าเริ่มต้นที่  $BER = 10^{-8}$  และจะมีค่าลดลงตามค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวนที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณหลักที่ไม่มีการจางหายต่อค่าของระดับสัญญาณที่มาจากหลายทิศทาง (K) มีค่าต่างๆ และในกรณีที่มีการมอดูเลตแบบ PSK นั้นที่ค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) เริ่มต้นเท่ากับศูนย์พบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตมีค่าเริ่มต้นที่  $BER = 10^{-11}$  และจะมีค่าลดลงตามค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวนที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของสัญญาณหลักที่ไม่มีการจางหายต่อค่าของระดับสัญญาณที่มาจากหลายทิศทาง (K) มีค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.19

จากรูปพบว่าค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่มีการมอดูเลตแบบ FSK และ PSK มีลักษณะที่ลดลงตามค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) ที่เพิ่มขึ้น และมีความคล้ายคลึงกันมากแต่จะแตกต่างกันที่ระดับของค่าอัตราความผิดพลาดบิตของการมอดูเลตแบบ FSK มีค่าที่สูงกว่าในกรณีการมอดูเลตแบบ PSK

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ โดยเนื้อหาจะประกอบด้วย การสรุปผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในการศึกษาแบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและคุณลักษณะช่องสัญญาณของระบบ โครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

### 6.2 สรุปผลการวิจัย

จากการหาค่ากำลังงานรับที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง หรือค่าการสูญเสียตามเส้นทาง แล้วทำการออกแบบแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว และแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ โดยจากแบบจำลองแบบความชันคู่ นั้นพบว่า แบบจำลองนี้สอดคล้องกับค่าการสูญเสียตามเส้นทาง การแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียนมากกว่าแบบจำลองแบบความชันเดียว เนื่องจากแบบจำลองนี้มีการแบ่งช่วงการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง ทำให้แบบจำลองมีผลการจำลองที่เป็นไปตามค่าการทดสอบสัญญาณจริงมากที่สุด ซึ่งจากแบบจำลองแบบความชันเดียวพบว่าค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.93 และจากแบบจำลองแบบความชันคู่ค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันของระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ ( $R_p$ ) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ 30 เมตร มีค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ประมาณ 0.98 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าแบบจำลองแบบความชันเดียว โดยในการแบ่งช่วงสามารถที่จะทำการหาค่าระยะจุดเปลี่ยนแปลง หรือค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน ค่าจุดเปลี่ยน ได้มาจากการเพิ่มค่าของระยะจุดเปลี่ยนแปลงจนถึงค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ที่ดีที่สุด หรือเส้นกราฟที่ตัดกันของช่วง 2 ช่วง ด้วยเหตุนี้แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ จึงมีความถูกต้องมากกว่าแบบความชันเดียว และมีผลการจำลองที่เป็นไปตามค่าการทดสอบสัญญาณจริง

จากกราฟแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ ที่มีเส้นกราฟ 2 ช่วงที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเลขชี้กำลังของค่าการลดทอน 2 ค่า โดยมีความสอดคล้องและใกล้เคียงไปตามค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางทั้ง 2 ช่วงของสัญญาณด้วยเช่นกัน ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันเดียว แล้วพบว่าค่าตัวประกอบสหสัมพันธ์ ที่ไม่สอดคล้องกับค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางมากนักเนื่องจากการกระจายตัวของค่าการสูญเสียของสัญญาณตามระยะทางมาก

ทำให้แบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นแบบความชันคู่ถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

จากการทดสอบทางสถิติในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นระหว่างโหนดต่อโหนด จะทำการบันทึกค่าทางสถิติจำนวน 1,000 ค่า โดยที่แต่ละค่าจะทำการบันทึกในทุกๆ 2 วินาที หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ พบว่าที่ระยะห่างระหว่างเครื่องวิเคราะห์สัญญาณกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ มีค่าเท่ากับ 16 32 และ 48 เมตร จะมีค่าการเบี่ยงเบนที่ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับที่ระยะ 64 เมตร นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ระยะทางมากขึ้นจะส่งผลต่อการเบี่ยงเบนของสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากระดับสัญญาณต่ำลง และผลของสภาพแวดล้อม จึงส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของสัญญาณที่รับมากขึ้น จากการทดสอบการแพร่กระจายคลื่น โดยการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์มายัง โหนด พบว่าที่ตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 จะมีการกระจายตัวของสัญญาณน้อยกว่าที่ตำแหน่งที่ 4 สาเหตุเกิดจากระยะห่างระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีระยะทางที่ใกล้กว่าตำแหน่งอื่นๆ ผลการทดสอบทางสถิติทั้งหมด พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกับการกระจายตัวทางสถิติแบบไรซ์ ซึ่งเป็นการกระจายตัวทางสถิติที่ใช้อธิบายการแพร่กระจายคลื่น โดยที่ผลการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกับการกระจายตัวแบบไรซ์ ที่มีค่า  $K$  มากกว่า 14.2513 dB ซึ่งแสดงว่าช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นที่ทำการมอดูเลตประกอบของสัญญาณหลักในแนวเส้นสายตามากกว่าองค์ประกอบของสัญญาณที่มาจากหลายทิศทาง แต่ค่า  $K$  ที่ได้จากการทดสอบค่อนข้างสูงแสดงถึงช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนี้ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์มีความแปรปรวนของสัญญาณที่ค่อนข้างต่ำ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการนำมาเขียนกราฟความหนาแน่นของการกระจายตัวทางสถิติ และทำการเขียนกราฟเส้น เมื่อทำการวิเคราะห์ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสัญญาณที่จุดต่างๆ (PDF) หาค่า  $K$  เพื่อที่จะนำมาหาคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น ที่ได้จากสมการแม่นตรงจะเป็นการคำนวณแบบประมาณที่ประกอบด้วยฟังก์ชันค่าความผิดพลาดในทางสถิติสำหรับเป็นตัวแทนการมอดูเลตสัญญาณในแบบต่างๆ โดยสามารถรวมผลของลักษณะช่องสัญญาณทางสถิติร่วมด้วยในการทำนายค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลในทางทฤษฎี โดยจะกำหนดค่าความผิดพลาดบิตเชิงทฤษฎี และให้ช่วงของค่า  $E_b/N_0$  มีค่า 0 ถึง 20 dB ทำการกำหนดชนิดการมอดูเลตแบบ FSK อันดับสอง การแพร่กระจายคลื่นผ่านช่องสัญญาณที่มีลักษณะการกระจายตัวทางสถิติแบบไรซ์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวน ( $E_b/N_0$ ) เพื่อทำนายค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูล ซึ่งค่าอัตราผิดพลาดบิตข้อมูล ของการทดสอบการจำลองการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 กรณี นั้นเมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบเมื่อกำเนิดบิตข้อมูล 100,000 บิต และเพิ่มจำนวนบิตเท่ากับ 500,000 บิตนั้นที่ค่า  $K$  ต่างๆค่าอัตราผิดพลาดบิตนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก และกราฟทั้ง 2 เส้นนั้นก็มีความใกล้เคียงกันกับค่าทางทฤษฎีที่เป็นค่าอัตราผิดพลาดบิตข้อมูลที่มีช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นแบบไรซ์ ซึ่งเป็น

เหตุผลที่ทำให้การสื่อสารข้อมูลของระบบโครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ นั้นสามารถติดต่อสื่อสารได้โดยมีแนวโน้มของค่าอัตราผิดพลาดบิตข้อมูลดังผลการทดสอบที่ได้กล่าวมาแล้ว

สำหรับผลการจำลองระบบของค่าความผิดพลาดบิตข้อมูลในฟังก์ชันของอัตราส่วนพลังงานบิตต่อระดับสัญญาณรบกวนพบว่ามีผลสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎี และการออกแบบติดตั้งระบบตรวจจับแบบไร้สายจะต้องกำหนดค่าความผิดพลาดบิตของข้อมูลที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ของระบบ เพื่อหาค่ากำลังงานที่เหมาะสม หรือหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวตรวจจับ เพื่อให้ระบบสื่อสารที่ทำการออกแบบมีความน่าเชื่อถือสูง ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการทำนายความต้องการของระบบ นั่นคือ จะต้องทราบถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คลื่นแพร่กระจายผ่าน เช่น โครงสร้างของอาคาร ต้นไม้ สิ่งกีดขวาง และลักษณะการติดตั้งสายอากาศ เป็นต้น โดยที่จะอยู่ในรูปของการลดทอนตามระยะทางและการแปรปรวนของสัญญาณที่แพร่กระจายคลื่น เพื่อใช้ในการออกแบบระบบการสื่อสารให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษาความน่าจะเป็นในการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นในสวนทุเรียน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับระบบตรวจจับไร้สาย (Wireless sensor network in fruits inspection) ซึ่งเป็นโครงการที่ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ โดยมุ่งศึกษาและวิจัยในทุเรียนก่อน เนื่องจากทุเรียนเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของไทย และการนำแบบจำลองแบบความชันคู่นี้ไปประยุกต์ใช้งานนั้นสามารถที่จะใช้งานได้ ในกรณีที่สวนผลไม้ดังกล่าวมีลักษณะการวางตัวของต้นไม้ที่มีระยะห่างระหว่างแถวและระหว่างต้นมีค่าประมาณที่เท่ากัน และมีลักษณะของต้นไม้ที่มีใบไม่หนาแน่นมากนัก เนื่องจากถ้าใบไม้มีความหนาแน่นสูงจะทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณสูง และมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณตามเวลาสูงขึ้น

ในกรณีที่ค่าสถานะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป เช่นความชื้นสูงนั้น ถ้าเป็นกรณีที่มีการทดสอบสุ่มสัญญาณทางสถิติที่มีค่ามากเพียงพอ และมีการเก็บข้อมูลในหลายๆฤดูกาลแล้ว เราสามารถที่จะนำแบบจำลองนี้มาอธิบายคุณลักษณะช่องสัญญาณการสื่อสารภายในสวนทุเรียนในทุกฤดูกาลได้เช่นกัน จากการศึกษาแบบจำลองการลดทอนสัญญาณด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นพบว่า เมื่อพิจารณาแบบจำลองแบบความชันเดี่ยวจะประกอบด้วยพจน์ของค่าการลดทอนสองพจน์ซึ่งเป็นค่าของสมการของการลดทอนของสัญญาณเริ่มต้น บวกด้วยสมการของการลดทอนของสัญญาณในระยะทางต่างๆ และในกรณีแบบความชันคู่ก็เช่นกันแต่จะมีการรวมสมการของการลดทอนที่ช่วงความชันที่สองเข้าไปด้วย ซึ่งเราสามารถที่จะพิจารณาการลดทอนทั้งหมดเป็นแบบสามความชัน หรือสี่ความชันได้ แต่จะเกิดความยุ่งยากในการคำนวณหาค่าการลดทอนเนื่องจากสมการจะประกอบไปด้วยสมการที่ซับซ้อนเกินไป ในตำแหน่งต่างๆและที่ช่วงความชันต่างๆ

ในการนำไปประยุกต์ใช้งานกับสถานะแวดล้อมอื่นๆ เนื่องจากผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบนั้น มีการเก็บผลการทดสอบจากสวนทุเรียนที่มีระยะการวางตัวของต้นทุเรียนที่มีระยะห่างเท่าๆกันตลอดทั้งสวน ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลองนี้ไปใช้งานในสถานะที่ต่างออกไปนั้น ควรมีการทดสอบการลดทอนของสัญญาณเพื่อเก็บผล ไปวิเคราะห์หาค่าการลดทอนเฉลี่ยตามระยะทางนั้นๆใหม่เช่นกัน เนื่องจากในสวนผลไม้แต่ละสวนมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามภูมิประเทศ แต่ถ้านำไปประยุกต์ใช้งานกับสวนผลไม้ที่มีลักษณะทางกายภาพที่คล้ายคลึงกันก็สามารถที่จะนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้

เนื่องจากแบบจำลองการลดทอนของสัญญาณด้วยวิธีการลดออยเชิงเส้นแบบความชันคู่ นั้นเป็นแบบจำลองที่เป็น Empirical Model ที่สามารถออกแบบการลดทอนของสัญญาณได้จากการทดสอบ ซึ่งหมายถึงเป็นแบบจำลองที่สร้างมาจากผลการทดสอบ ซึ่งต่างจากแบบจำลองทาง Physical Model ทัวไปที่ทำการออกแบบ ลักษณะของการเดินทางของสัญญาณ และการลดทอนของสัญญาณก่อน แล้วจึงทำการทดสอบระดับการลดทอนของสัญญาณและอธิบายผลของสัญญาณที่ทดสอบได้ด้วยแบบจำลองนั้นๆ ดังนั้นแบบจำลองการลดทอนของสัญญาณด้วยวิธีการลดออยเชิงเส้นแบบความชันคู่จึงไม่สามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทาง Physical Model ได้

### 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

1. สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบผลการสูญเสียตามเส้นทางนั้น ในช่วงเวลาในการทดสอบสัญญาณนั้นควรจะติดตั้งและทดสอบสัญญาณในช่วงที่ทุเรียนติดผลและมีขนาดผลที่ใหญ่พอสมควรเนื่องจากปกติแล้วชาวสวนทุเรียนจะมีการตัดแต่งกิ่งและผลที่ไม่สมบูรณ์ออกไปในช่วงที่หลังจากทุเรียนติดผล ซึ่งอาจจะมีผลต่อการทดสอบค่าการสูญเสียตามเส้นทาง
2. ในการทดสอบคุณลักษณะช่องสัญญาณของระบบ โครงข่ายไร้สายหรือ การทดสอบค่าทางสถิติของสัญญาณควรมีการสุ่มวัดสัญญาณที่มีจำนวนการสุ่มสัญญาณที่สูงกว่านี้ เพราะจะทำให้มีค่าคุณลักษณะช่องสัญญาณที่เป็นจริงมากยิ่งขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้มีการสุ่มวัดสัญญาณที่ไม่สูงมากนัก เนื่องจากมีขีดจำกัดเรื่องเวลา และสถานที่

ในวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นการออกแบบ แบบจำลองการสูญเสียตามเส้นทางและคุณลักษณะช่องสัญญาณของระบบ โครงข่ายไร้สายในสวนทุเรียนที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ โดยอธิบายแต่ละขั้นตอนในการออกแบบ แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น และขั้นตอนในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของช่องสัญญาณพร้อมทั้งการทดสอบสัญญาณต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดภายในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานต่อไป

## บรรณานุกรม

- [1] H. L. Bertoni, Radio propagation for modern wireless systems, Prentice Hall PTR, 2000.
- [2] S. R. Saunders, Antennas and propagation for wireless communication systems, John Wiley & Sons Ltd, 1999.
- [3] J. Buckley, K. Aherne, B. O' Flynn, J. Barton, A. Murphy and C. O'Mathuna, "Antenna performance measurements using wireless sensor networks," *Proceedings of the 56<sup>th</sup> 2006 Electronic Components and Technology Conference*, 6 pages, May 2006.
- [4] M. M. Carvalho and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Modeling single-hop wireless networks under Rician fading channels," *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference*, Vol. 1, pp. 219 – 224, Mar. 2004.
- [5] Y. Ziade, H. Roussel and W. Tabbara, "A theoretical model of propagation in forest compared with experimental results," *Proceedings of the 2005 Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. 2, pp. 1357 – 1360, July 2005.
- [6] C. Xiao, Y.R. Zheng and N.C. Beaulieu, "Statistical simulation models for Rayleigh and Rician fading," *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Communications*, Vol. 5, pp. 3524 – 3529, May 2003.
- [7] R.A. Foran, T.B. Welch and M.J. Walker, "Very near ground radio frequency propagation measurements and analysis for military applications," *Proceedings of the 1999 IEEE Military Communications Conference*, Vol. 1, pp. 336 – 340, Oct. 1999.
- [8] T.B. Welch, J.R. Wood, R.W. McParlin, L.K. Schulze, T.P. Flaherty, S.G. CarloneHanson, R.J. Cahill and R.A. Foran, "Very near ground RF propagation measurements for wireless systems," *Proceedings of the 2000 IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 3, pp. 2556 – 2558, May 2000.
- [9] B. Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems Part I: characterization," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 35, pp. 90 – 100, Jul. 1997.
- [10] G.G. Joshi, C.B. Dietrich, C.R. Anderson, W.G. Newhall, W.A. Davis, J. Isaacs and G. Barnett, "Near-ground channel measurements over line-of-sight and forested paths," *Proceedings of the IEE Microwaves, Antennas and Propagation*, pp. 589 – 596, Dec. 2005.

- [11] W. C. Lindsey, "Error probabilities for Rician fading multichannel reception of binary and N-ary signals," *IEEE Trans. Information Theory*, Vol. 10, pp. 339 – 350, Oct. 1964.
- [12] M. Z. Win and R. K. Mallik, "Error analysis of noncoherent M-ary FSK with postdetection EGC over correlated Nakagami and Rician channels," *IEEE Trans. Communications*, Vol. 50, pp. 90-100, Mar. 2002.
- [13] D. A. Zogas, G. K. Karagiannidis and S. A. Kotsopoulos, "Equal gain combining over Nakagami-n (Rice) and Nakagami-q (Hoyt) generalized fading channels," *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol. 4, pp. 370-379, Mar. 2005.
- [14] M. Frikel, B. Targui, F. Hamon and M. M'SAAD, "Adaptive equalization using controlled equal gain combining for uplink/downlink MC-CDMA systems," *International Journal of Signal Processing* 4, pp. 230-237, 2008.
- [15] S. Gezici, Z. Sahinoglu and H. Vincent Poor, "On the optimality of equal gain combining for energy detection of unknown signals," *IEEE Communications Letters*, Vol. 10, pp. 772-774, Nov. 2006.
- [16] Y. Song, S. D. Blostein and J. Cheng, "Exact outage probability for equal gain combining with cochannel interference in Rayleigh fading," *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol. 2, no. 5, Sep. 2003.
- [17] S. Phaiboon, P. Phokharatkulb and S. Somkuarnpanita, "New upper and lower bounds line of sight path loss model for mobile propagation in buildings," *International Journal of Electronics and Communications*, pp. 207-215, 2008.
- [18] K. Phaebua, R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, "Statistical characteristic measurements of propagation in durian orchard for sensor network at 5.8 GHz," *Proceedings of the 2008 International Symposium on Communications and Information Technologies*, pp. 520-523, Oct. 2008.
- [19] R. Suwalak, K. Phaebua, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, "Path loss model and measurements of 5.8 GHz wireless network in durian garden," *Proceedings of the 2008 International Symposium on Communications and Information Technologies*, pp. 698-701, Oct. 2008.

**ภาคผนวก**

**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่**

2

2009 6th International Conference  
on Electrical Engineering/Electronics,  
Computer, Telecommunications,  
and Information Technology

# ECTI-CON

May 6th - 9th, 2009

Ambassador City Jomtien  
Pattaya, Chonburi, Thailand

ISBN 978-1-4244-3388-9  
IEEE Catalog Number: CFP0906E  
Library of Congress: 2008910219



**NECTEC**  
a member of NSTDA

**IEEE**  
THAILAND SECTION

A Study on the Triple Band (DCS, PCS, UPCS) Internal Chip Antenna <i>Sungil Park, Younghuk Ko, Hyeonjin Lee, and Yeongseog Lim</i>	778
---	-----

#### Session TP-1-2: Antenna & Propagation

A Wideband Bidirectional Antenna Using Truncated Circular Sector Fed by Rectangular Monopole <i>T. Tipsawate, C. Phongcharoenpanich, and S. Kosulvit</i>	782
Finding Capability Enhancement for 360-degree DOA Finder <i>N. Sangmanee, P. Uthansakul, R. Wongsan, and M. Uthansakul</i>	786
Dual V-shape Slot microstrip Antenna for a bi- and uni-directional radiation pattern <i>Tanawat Pantui, Chatchai Suppitaksakul, and Paitoon Rakuea</i>	790
UHF-RFID Tag Antenna Design Using Dipole with Parasitic Lines <i>P. Wongsintorn, C. Phongcharoenpanich, D. Torrungrueng, and M. Krainiksh</i>	794

#### Session TP-2-2: Communication & Information Theory

Tighter Upper Bounds for Terminated Convolutional Codes in Rayleigh Fading Channels <i>Pushpika Wijesinghe, Upul Gunawardana, and Ranjith Liyanapathirana</i>	800
Fast Simulation of Turbo Codes over Rayleigh Fading Channels <i>Upul Gunawardana, Kim Chi Nguyen, and Ranjith Liyana-Pathirana</i>	804
A Novel formulation of Hamming Code <i>A. Ahmadvpour, A. Ahadvpour Shal, and M. Ziabari</i>	808
Accelerating Asymmetric-Key Cryptography using Parallel-key Cryptographic Algorithm (PCA) <i>Thongpon Teerakanok and Sinchai Kamolphiwong</i>	812
Path Loss Modeling in Durian Orchard for Wireless Network at 5.8 GHz <i>K. Nuangwongsa, K. Phaebus, T. Lertwiryaprapa, C. Phongcharoenpanich, and M. Krainiksh</i>	816

#### Session TP-3-2: Microwave Theory and Technique

Applications of the Modified Extended ZY T-Chart for Problems Associated with CCITLs with Active Characteristic Impedances <i>Kenokwan Vudhivorn, Danai Torrungrueng, and Tuptim Angkaew</i>	822
Graphical Tool in Analysis of Active Loaded Transmission Lines <i>Chatpol Lertsinimit and Danai Torrungrueng</i>	826
Microwave Planar Circuit Design Tool in the Teaching of Microwave Engineering <i>Sommat Khamkleang and Somsak Akatimagool</i>	830
Ultra-Compact Wideband Ka-Band CMOS Hybrid Ring <i>M. Chirala and C. Nguyen</i>	834
Design of an Ultra-Wideband Power-Efficient Distributed Low-Noise Amplifier <i>X. Guan and C. Nguyen</i>	836

# Path Loss Modeling in Durian Orchard for Wireless Network at 5.8 GHz

K. Nuangwongsa<sup>1</sup>, K. Phaebua<sup>1</sup>, T. Lertwiriayaprapa<sup>2</sup>, C. Phongcharoenpanich<sup>1</sup>, and M. Krairiksh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.  
E-mail: kpchuwon@kmitl.ac.th

<sup>2</sup>Department of Teacher Training in Electrical Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand.

**Abstract**—The path loss measurements and modeling in durian orchard for wireless network at 5.8 GHz are presented. The path loss model is important to predict and design the wireless communication system in the durian orchard. The transmitter is set up near the bole of a durian tree and received the signal strength by spectrum analyzer. The communication channel is connected between the communication nodes. From the measurement results, it is observed that the path loss along the distance of 128 meters from the transmitter is less than -50 dB. The dual-slope modeling is employed to represent the path loss propagation in the durian orchard at 5.8 GHz.

## I. INTRODUCTION

For the propagation of the electromagnetic wave in forest scenario, the attenuation along the propagation path is depended on the characteristic of the medium that can reduce the communication range of the wireless communication system [1]-[5]. Generally, fading types can be classified into large-scale and small-scale fading [6]-[8]. For the network planning, the path loss is important in the design of routing network [9]-[11]. This paper focuses on the large-scale fading and construction of the model to predict the received signal strength in the durian orchard because this work is a part of wireless sensor network for fruits inspection which is supported by National Research Council of Thailand (NRCT).

The operating frequency is 5.8 GHz. The transmitting antenna and the receiving antenna are located at a durian tree. The empirical models such as the single slope and dual slope model are used to represent the path loss. The comparison between single slope and dual slope model are also presented.

This paper is organized as follows. Section II describes the method of measurement. The measurement results such as single slope and dual slope regression are presented in Section III. The comparison between measurement results and the path loss modeling are discussed. Finally, Section IV is the conclusions.

## II. MEASUREMENT SET UP

The propagation measurement in durian orchard scenario is shown in Fig. 1. The photograph of the measurement setup and location of measurement is shown in Fig. 2. The distance

between durian trees is about 8 m. The average height of durian trees is higher than 10 m.

At the test points, the spectrum analyzer is used to receive the signal strength. The measurements can be classified into two cases. For the first case, the transmitting and receiving antennas radiate vertical polarization. For the second case, the transmitting and receiving antennas radiate horizontal polarization. The heights of transmitting and receiving antennas are 50 cm. The test points are moved with the distance of 4, 8, 12, ..., 128 meters from the transmitting antenna as illustrated in Fig. 2.



Figure 1. Propagation measurement in durian orchard.

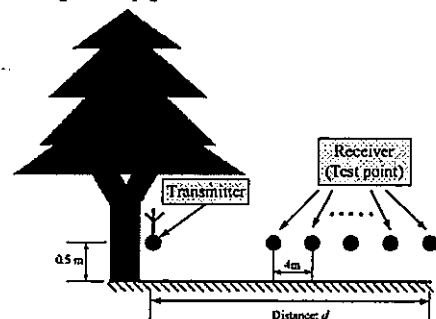


Figure 2. Measurement system (Tx, Rx antenna height of 50 cm).

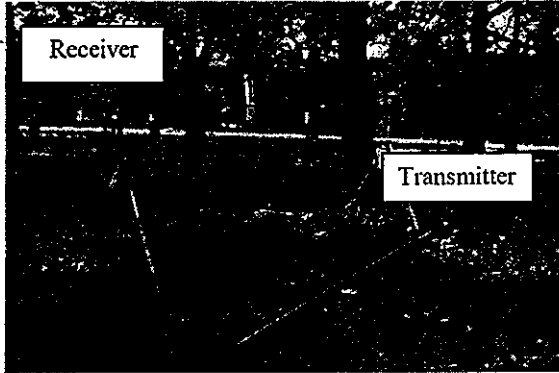


Figure 3. Measurement setup for the received power measurement.

The measurement is performed by using -10 dBm transmitted power, and the spectrum analyzer is used for monitoring the received signal strength. The dipole antennas are used as transmitting and receiving antennas. The measurement system is illustrated in Fig. 3.

### III. MEASUREMENT RESULTS AND PATH LOSS MODELING

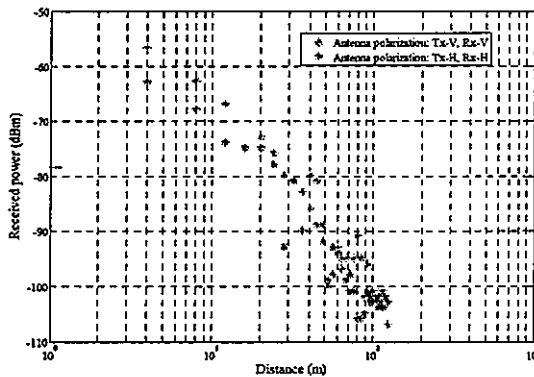


Figure 4. Comparison of received power ( $h_t = 50$  cm).

The measurement results of the signal strength in the durian orchard are shown in Fig. 4. The path loss along the distance of 128 meters from the transmitter is less than -50 dB (relative to the maximum value). The trends of path loss of two cases are same.

## IV. PATH LOSS MODELING

### A. Single slope regression model

The mean Line of Sight (LOS) path loss is a function of distance to the power  $n$  as shown below

$$L_{LOS}(d) = L_{d_0} + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right)^n \quad (\text{dB}), \quad (1)$$

where  $L_{LOS}$  is the path loss at the distance  $d$  from the transmitter, and  $L_{d_0}$  is the path loss at the reference distance  $d_0$  from the transmitter.  $n$  is the path loss exponent.

### B. Dual slope regression model

Propagation loss as a function of distance has two distinct regions as follows

$$L_{LOS}(d) = \begin{cases} L_{RB,1} + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{R_b} \right)^{n_1} & \text{for } d < R_b \\ L_{RB,2} + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{R_b} \right)^{n_2} & \text{for } d > R_b \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

The parameter  $R_b$  is the break point distance that measured from the transmitting antenna. The  $L_{RB,1}$  and  $L_{RB,2}$  are the initial field strengths. The  $n_1$  and  $n_2$  are the path loss exponents on the first region and the second region, respectively.

The single slope regression model is used to construct the model of path loss propagation. However, for the propagation in the intermediate near zone region, the attenuation tendency is not agreed well with the single slope regression model. This is due to the fact that the complication of the attenuation occurs in the intermediate near zone region, which can be verified by finding the correlation between the measured data and the regression model. The correlation factor is used to describe the relation between curve fitting and experimental results. Note that if the two results are perfectly matched, the correlation factor becomes unity. It is found that the correlation factor between the measurement and the single slope regression model is lower than 0.92. To improve the correlation factor, it is of interest to apply the dual slope regression model. It is also necessary to separate the measured data to be two groups. The separation can be done by finding the break point distance (interchange point of path loss exponent). The break point is obtained by varying the break point that achieves the optimal correlation factor (cross point) of two regions (beyond break point and behind break point). Therefore, the dual slope regression model is more flexible than the single slope regression model and it is also found later that the dual slope regression model provides a better correlation factor than the single slope one. This leads ones to have a better model to predict the path loss in the durian orchard.

A. The polarization of transmitting and receiving antennas are vertical

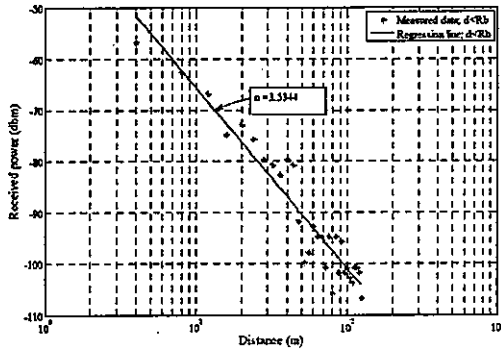


Figure 5. Single slope regression model (Tx, Rx-Vertical and  $h_t = 50$  cm).

B. The polarization of transmitting and receiving antennas are horizontal

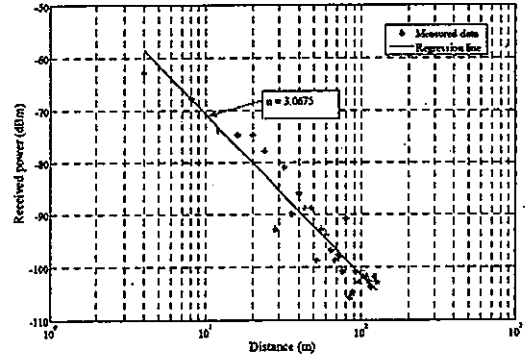


Figure 8. Single slope regression model (Tx, Rx-Horizontal and  $h_t = 50$  cm).

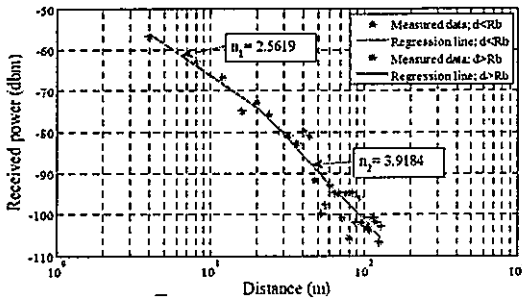


Figure 6. Dual slope regression model (Tx, Rx-Vertical and  $h_t = 50$  cm).

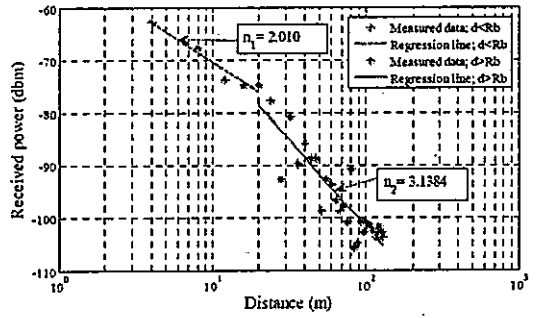


Figure 9. Dual slope regression model (Tx, Rx-Horizontal and  $h_t = 50$  cm).

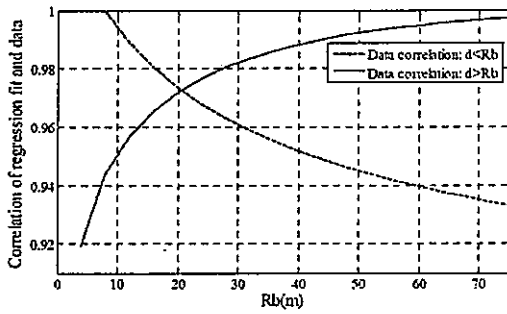


Figure 7. Correlation factor (Tx-Vertical, Rx-Vertical and  $h_t = 50$  cm).

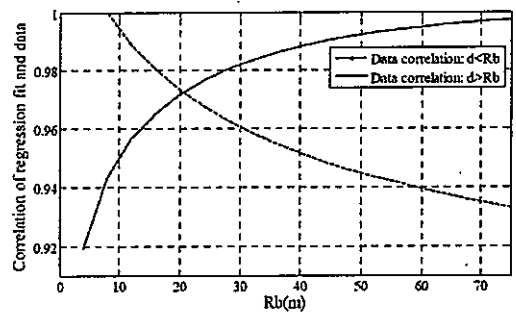


Figure 10. Correlation factor (Tx, Rx-Horizontal and  $h_t = 50$  cm).

The measured data and single regression line for the vertical polarization of transmitting and receiving antennas are shown in Fig. 5. The path loss exponent  $n$  is equal to 3.5344. The correlation factor of single slope regression model is lower than 0.92. The measured data and the dual slope regression are shown in Fig. 6. The path loss exponent of first region  $n_1$  and second region  $n_2$  are equal to 2.5619 and 3.9184, respectively. Fig. 7 illustrates the optimal correlation factor that is calculated from measured data and regression data of upper and lower break points. The optimal distance of break point is about 20 m from transmitting antenna. The correlation factor of dual slope regression is better than 0.97 and more than single slope regression as shown in Fig. 7.

The measured data and single regression line in case of horizontal polarization of transmitting and receiving antennas are shown in Fig. 8. The breakpoint distance is optimum at 20 m. The path loss exponent  $n$  is equal to 3.0675. The correlation factor between single slope regression model and received power measurement is lower than 0.92. The dual slope regression model is shown in Fig. 9. The path loss exponent of the first region  $n_1$  and the second region  $n_2$  are equal to 2.010 and 3.1384, respectively. Fig. 10 illustrates the optimal correlation factor. The correlation factor of dual slope regression is better than 0.97 and more than single slope regression as shown in Fig. 10.

#### V. CONCLUSIONS

This paper presents the path loss modeling in durian orchard for wireless network. The measurement was performed at 5.8 GHz. The results show the measured received signal strength comparing with the single slope regression model and the dual slope regression model. It is observed that the path loss within 128 m from the transmitter is less than -50 dB. For the regression models, it is found that the dual slope regression model has correlation factor higher than the single slope regression model. The dual slope model can be used to predict the signal strength at the desired distance that is calculated from the path loss exponent  $n_1$  and  $n_2$ . The measured results and propagation model in this paper is benefit to set up the wireless network in durian orchard.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by National Research Council of Thailand.

#### REFERENCES

- [1] S. A. Tonico, H. L. Bertoni, and R. H. Lang, "Modeling tree effects on path loss in a residential environment," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 46, No. 6, pp. 872–880, June 1988.
- [2] D. A. J. Pearce, A. G. Burr, and T. C. Tozer, "Modelling and prediction the fading performance of fixed radio links through vegetation," *1999 IEE National Conference on Antennas and Propagation*, pp. 263–266, 31 March–1 April 1999.
- [3] J. C. R. D. Bello, G. L. Siqueira, and H. L. Bertoni, "Theoretical analysis and measurement results of vegetation effects on path loss for mobile cellular communication systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, No. 4, pp. 1285–1293, July 2000.
- [4] C. R. Anderson, H. I. Volos, W. C. Headley, F. C. B. F. Müller, and R. M. Buehrer, "Low antenna ultra wideband propagation measurements and modeling in a forest environment," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2008*, pp. 1229–1234, March 31 2008 – April 3 2008.
- [5] I. Z. Kovács, P. C. F. Eggers, and K. Olesen, "Radio channel characterization for forest environments in the VHF and UHF frequency bands," *IEEE Vehicular Technology Conference 1999*, vol. 3, pp. 1387–1391, 1999.
- [6] K. Phaebua, R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh, "Statistical characteristic measurements of propagation in durian orchard for sensor network at 5.8 GHz," *International Symposium on Communications and Information Technologies 2008*, pp. 520–523, October 2008.
- [7] R. Suwalak, K. Phaebua, C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh, "Path loss model and measurements of 5.8 GHz wireless network in durian garden," *International Symposium on Communications and Information Technologies 2008*, pp. 689–701, October 2008.
- [8] S. Phaiboon, P. Phokharatkul, and S. Sornkuampanit, "New upper and lower bounds line of sight path loss model for mobile propagation in buildings," *International Journal of Electronics and Communications (AEU)*, vol. 62, pp. 207–215, March 2008.
- [9] S. Phaiboon, P. Phokharatkul, S. Sornkuampanit, and S. Boonpiyathud, "Upper-and lower-bound path-loss modeling for indoor line-of-sight environments," *2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, Suzhou, China, vol. 4, December 2005.
- [10] S. R. Saunders, *Antennas and Propagation for Wireless Communication System*, University of Surrey, Guildford, UK, 2000.
- [11] H. L. Bertoni, *Radio propagation for modern wireless systems*, United States of America, 2000.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายคณะวัติ เนื่องวงษา
วัน เดือน ปีเกิด	26 มกราคม 2525
ที่อยู่	164/1 หมู่ 12 ตำบล ศิลา อำเภอบึง เมือง จังหวัด ขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) สายอากาศ 2) การแพร่กระจายคลื่น 3) โครงข่ายการสื่อสารไร้สาย

### บทความที่ได้ตีพิมพ์

1. K. Nuangwongsa and C. Phongcharoenpanich, "Elliptical Monopole Antenna with Circular Ring for UWB Applications," *Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Bangkok, pp. 139-139, July 2008.
2. K. Nuangwongsa, K. Phaebua, T. Lertwiryaprapa, C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh, "Path Loss Modeling in Durian Orchard for Wireless Network at 5.8 GHz," *Proceedings of the 2009 6<sup>th</sup> Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) International Conference*, Pattaya, pp. 816-819, May 2009.
3. K. Nuangwongsa and C. Phongcharoenpanich, "Investigations of an Elliptical Monopole Antenna with Circular Ring for UWB Applications," *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, in press.