

การวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณเพื่อการประเมินจุดบกพร่องของเครือข่าย

**Signal Quality Analysis for Network Communication**

**Vulnerability Evaluation**

ภารตะ เพ็ชศรี

**Parata Phetsri**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of**

**Master of Engineering in Industrial Management**

**Prince of Songkla University**

**2556**

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณเพื่อการประเมินจุดบกพร่องของเครือข่าย

ผู้เขียน นายภรตะ เพ็ชศรี

สาขาวิชา การจัดการอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ สังขพงศ์)

(รองศาสตราจารย์สมชาย ชูโณม)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิกรม ชีรภาพจรเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ไพบูลย์)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ โภการัตน์กุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ สังขพงศ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ไพบูลย์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ  
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ สังขพงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นาย ภาวตะ เพ็ชศรี)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นาย ภารตะ เพ็ชรศรี)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณเพื่อการประเมินจุดบกพร่องของเครือข่าย  
ผู้เขียน นายภรตตะ เพ็ชศรี  
สาขาวิชา การจัดการอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2555

### บทคัดย่อ

การทำนายการแพร่กระจายคลื่นด้วยค่ากำลังสูญเสียตามวิถี (Path Loss) เป็นการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยใช้แบบจำลองเนินเขาและต้นไม้ (Hilly-Forest) สำหรับเขตขนาดเล็กรวมชนเมืองที่เต็มไปด้วยเนินเขาและป่าไม้ ด้วยวิธีการเลือกพื้นที่ที่มีปัญหาคุณภาพของสัญญาณอ่อนและไม่มีสัญญาณโดยอ้างอิงจากข้อมูลการร้องเรียนของลูกค้า แล้วนำมาวิเคราะห์และปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของสถานีฐาน ได้แก่ ความสูงสถานีฐาน อัตราขยายสายอากาศ และมุมสายอากาศ ให้สามารถอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบผสม (Hybrid Model) ที่มีทั้งแบบจำลองลี (Lee Model) และแบบจำลองต้นไม้ (Tree Model) สำหรับการเลือกพื้นที่ทดสอบในการทำวิทยานิพนธ์จะประกอบด้วยพื้นที่ที่เป็นเนินเขาและสวนยางพาราโดยใช้เส้นทางถนนหมายเลข 41 ในช่วงระหว่างป้อมพาทองและแยกสวนผัก ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยอาศัยแบบจำลองแบบผสมมาวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่รับได้ผ่านลักษณะภูมิประเทศจริง และการวิเคราะห์เส้นทางเดินทางของคลื่น (Path Profile) ผ่านภาพถ่ายทางอากาศเพื่อการตรวจดูความสูงและตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง สำหรับผลการทำนายการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละแบบจำลองจะนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบคุณภาพสัญญาณจริง นอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์นี้ยังใช้แบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) ทำการทดสอบพื้นที่ชุมชนเมืองตำบลในเมืองจังหวัดนครศรีธรรมราช โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจะสามารถทำนายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณเพื่อเป็นแนวทางแก้ปัญหาสัญญาณบกพร่องของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์และสามารถวางแผนเครือข่ายให้มีพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่ต้องการมากที่สุดด้วยระดับสัญญาณที่เพียงพอและตำแหน่งที่เหมาะสม

<b>Thesis Title</b>	Signal Quality Analysis for Network Communication Vulnerability Evaluation
<b>Author</b>	Mr. Parata Phetsri
<b>Major Program</b>	Industrial Management
<b>Acedemic Year</b>	2012

### **ABSTRACT**

This paper presents the path loss prediction model to improve signal quality by using a modified hilly-forest model. The study area was located in hilly suburban area which has a problem in signal quality which referred to the customer complaint records. These data have been analyzed by using the hybrid model to improve the model parameters of base station such as appropriated height of base station, transmitting power, and angle of the antenna. The hybrid model consists of lee model, tree model rubber forest, and walfisch-ikegami model. The study area for testing hybrid model consists of both the hilly and the rubber tree plantation along the road number 41 from Phatong Petrol Station to Sounpak Conjunction at Thamyai Sub-District, Tungsong District, Nakhon Si Thammarat Province and the urban area in Nimuang Sub-District, Muang District, Nakhon Si Thammarat Province. The predicted result from hybrid model was verified by testing the signal quality in the realistic geography and analyzing the path profile by using aerial photograph for finding the position and height of barrier. The results of prediction of diffraction from each model were verified with the diffraction result from the extensive drive test. The result of this study shows that the modified path loss model can be used for microcell planning and signal quality improvement.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ สังข์พงศ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ไพบูลย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาคอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และชี้แนวทางในการทำวิจัยมาโดยตลอด จึงขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ได้ให้ทักษะ วิชาความรู้ จนทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่พจณีย์ เพ็ชศรี คุณพ่อสมพร เพ็ชศรี บุพการีผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างกับผู้วิจัย ตลอดจนญาติๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและการช่วยเหลือเสมอมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจจนทำให้การศึกษาค้นคว้าในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ภารตะ เพ็ชศรี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(14)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย	4
1.5 โครงการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2. หลักการและทฤษฎี	10
2.1 ความรู้เบื้องต้นของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	10
2.2 แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในอวกาศว่าง	12
2.3 กลไกพื้นฐานการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ	14
2.4 การสะท้อน (Reflection)	17
2.5 แบบจำลองการสะท้อนพื้นดิน 2 แนวคลื่น (Ground Reflection Two-Ray Model)	19
2.6 การเลี้ยวเบน (Diffraction)	22
2.7 การกระจัดกระจาย (Scattering)	29
2.8 การทำนายการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่	31
2.9 คุณสมบัติการลดทอนของสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่	42
2.10 การสูญเสียกำลัง (Path Loss)	44



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11 คลื่นวิทยุ	50
2.12 การจางหาย (Fading)	54
3.วิธีการดำเนินการวิจัย	59
3.1 ระบบการวัดสัญญาณ	59
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	61
3.3 ขั้นตอนการวัดสัญญาณ	62
3.4 สถานที่วัดสัญญาณ	68
3.5 วิธีการทดสอบ	70
4.ผลการวิจัย	72
4.1 แบบจำลองลี (Lee Model)	72
4.2 แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest )	76
4.3 แบบจำลองวอล์ฟฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)	83
5.สรุปผลและข้อเสนอแนะ	89
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก	94
ประวัติผู้เขียน	116

## รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของวัตถุที่ความถี่ต่างๆ	19
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างเลขกำลังการสูญเสียตามวิถีที่สภาพแวดล้อมต่างๆ	33
ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์แพร่กระจายคลื่นแบบจำลองลิย	41
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่า $n$ ที่ใช้ในการคำนวณการลดทอน (Path Loss) ในบริเวณต่างๆ	43
ตารางที่ 2.5 การแบ่งย่านความถี่วิทยุ (Radio Frequency Spectrum)	52
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของใบไม้	65
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องส่ง (สถานีฐาน) เพื่อใช้ในการทดสอบ	70
ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถีก่อนและหลังดำเนินการแบบจำลองลิย (Lee Model)	75
ตารางที่ 4.2 แสดงระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ	76
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการทดลองแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest)	77
ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถีก่อนและหลังดำเนินการแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลิย (Lee Model)	79
ตารางที่ 4.5 แสดงระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ	80
ตารางที่ 4.6 แสดงความสูงระดับน้ำทะเลของแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest)	81
ตารางที่ 4.7 แสดงความสูงระดับน้ำทะเลของแบบจำลองวอล์ฟฟิช-ไอเคกามิ	85
ตารางที่ 4.8 ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถีก่อนและหลังดำเนินการแบบจำลองวอล์ฟฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)	86
ตารางที่ 4.9 แสดงระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ	88

## รายการภาพประกอบ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 ปัญหาการใช้งานของลูกค้าที่ใช้บริการต่อปี	2
ภาพที่ 1.2 ระบบความสมดุลของกำลังส่ง(System Balancing)	6
ภาพที่ 2.1 การจางหายสเกลเล็กและสเกลใหญ่	11
ภาพที่ 2.2 กลไกของการแพร่กระจายคลื่น	16
ภาพที่ 2.3 แนวทางเดินของคลื่นสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างไดอิเล็กตริก ทั้งสอง	18
ภาพที่ 2.4 แบบจำลองการสะท้อนพื้นดินสองแนวคลื่น	20
ภาพที่ 2.5 วิธีเชิงเงาใช้ในการหาผลต่างของระยะทางเดินของคลื่นทั้งสองแนว	20
ภาพที่ 2.6 เฟสเซอร์ไคอะแกรมแสดงการรวมกันขององค์ประกอบสนามคลื่นทั้งสอง	21
ภาพที่ 2.7 หลักการของฮอยเกนส์	22
ภาพที่ 2.8 การเลี้ยวเบนของคลื่นที่เหลี่ยมคมของสิ่งกีดขวาง	23
ภาพที่ 2.9 ไคอะแกรมของเรขาคณิตการเลี้ยวเบนผ่านเหลี่ยมคม	24
ภาพที่ 2.10 วงกลมที่มีจุดศูนย์กลางรวมกันซึ่งใช้นิยามขอบเขตสำหรับเขตเฟรเนล	25
ภาพที่ 2.11 เขตเฟรเนลสำหรับการเลี้ยวเบนจากเหลี่ยมคมในลักษณะต่างๆมีผลกระทบต่อ สัญญาณที่รับได้เมื่อมีสิ่งกีดขวางทางเดินของคลื่น (Shadowing)	26
ภาพที่ 2.12 อัตรายายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมที่ค่า $\nu$ ต่างๆ	28
ภาพที่ 2.13 หลักการของขอบเหลี่ยมคมของสิ่งกีดขวางเทียบเคียง	29
ภาพที่ 2.14 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกับมุมตกกระทบของผนังหินขรุขระ	30
ภาพที่ 2.15 การลดทอนสัญญาณในสภาพแวดล้อมต่างๆ ของแบบจำลองโอคูมูระ	35
ภาพที่ 2.16 แพลตเตอร์อัตรายายเนื่องจากลักษณะของสภาพแวดล้อม	36
ภาพที่ 2.17 สภาพแวดล้อมของแบบจำลองวอล์ฟฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)	37
ภาพที่ 2.18 มุมที่คลื่นตกกระทบทำมุมกับแนวถนน	38
ภาพที่ 2.19 ความสูงสายอากาศสถานีฐานที่มีผลต่อการคำนวณ	42
ภาพที่ 2.20 ตัวอย่างแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณที่รับได้เนื่องจาก ผลกระทบของมลติพาทเฟดดิ้งและชาโดว์อิ้ง (Shadowing)	43

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.21 ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนกับพื้นผิวเรียบต่อสัญญาณที่ได้รับได้	45
ภาพที่ 2.22 แสดงการเดินทางของคลื่นตรงและคลื่นสะท้อน	48
ภาพที่ 2.23 แสดงสัญญาณถูกบดบังจากสิ่งกีดขวาง	49
ภาพที่ 2.24 แสดงเส้นทางการแพร่กระจายของคลื่นหลายเส้นทาง	50
ภาพที่ 2.25 แสดงคุณลักษณะแพร่กระจายคลื่นโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Propagation Characteristics)	50
ภาพที่ 2.26 แสดงภาพตัดขวางของลูกคลื่น	51
ภาพที่ 2.27 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( An Electromagnetic Plan Wave “Frozen” in Time )	52
ภาพที่ 2.28 การจางหายแบบหลายเส้นทาง	55
ภาพที่ 2.29 สัญญาณที่ได้รับได้เมื่อเกิดการจางหาย	56
ภาพที่ 2.30 ล็อกนอร์มอลเฟดดิ้ง (Log-Normal Fading)	58
ภาพที่ 2.31 เฟดดิ้งแบบเรย์ลี (Raylight Fading)	58
ภาพที่ 3.1 ระบบการวัดสัญญาณ	60
ภาพที่ 3.2 โทรศัพท์มือถือยี่ห้อ โซนี่ อิริคสัน รุ่น K790i	61
ภาพที่ 3.3 จีพีเอส ยี่ห้อ GARMIN รุ่น GPS 18 USB	61
ภาพที่ 3.4 การแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณผ่านต้นไม้และใบไม้	64
ภาพที่ 3.5 ค่ากำลังสูญเสียตามวิถีของปริมาตรกลุ่มใบไม้และความถี่	66
ภาพที่ 3.6 สถานที่ทดสอบสัญญาณ	68
ภาพที่ 3.7 ภาพถ่ายทางอากาศของสถานที่ทดสอบสัญญาณแบบจำลองลี (Lee Model) และแบบจำลองต้นไม้ (Tree Model Rubber forest)	69
ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายทางอากาศของสถานที่ทดสอบสัญญาณแบบจำลองวอล์ฟฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)	69
ภาพที่ 3.9 ชุดกล่องลูกบาศก์เมตร	70
ภาพที่ 3.10 ชุดกล่องลูกบาศก์เมตรวางครอบชุดกิ่งไม้กลุ่มตัวอย่าง	71
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายทางอากาศของสภาพภูมิประเทศที่ทดสอบ	73

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.2 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นที่เหลี่ยมคมของสิ่งกีดขวาง	74
ภาพที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิธีก่อน ดำเนินการแบบจำลองลี (Lee Model)	74
ภาพที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิธีหลัง ดำเนินการแบบจำลองลี (Lee Model)	76
ภาพที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิธีก่อน ดำเนินการแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับ แบบจำลองลี (Lee Model)	78
ภาพที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิธีหลัง ดำเนินการแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับ แบบจำลองลี (Lee Model)	80
ภาพที่ 4.7 ภาพถ่ายทางอากาศของสภาพภูมิประเทศที่ทดสอบ แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลี (Lee Model)	81
ภาพที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิธีก่อน ดำเนินการแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)	84
ภาพที่ 4.9 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นที่สิ่งกีดขวาง	84
ภาพที่ 4.10 แสดงการประกอบสูตรแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)	85
ภาพที่ 4.11 ภาพถ่ายทางอากาศของสภาพภูมิประเทศที่ทดสอบ	87
ภาพที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิธีหลัง ดำเนินการ แบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)	87
ภาพที่ 5.1 แสดงปัญหาการใช้งานของลูกค้าที่ใช้บริการอำเภอทุ่งสงหลังดำเนินการ	91

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

EIRP	มาจากคำว่า	Effective Isotropic Radiated Power
ERP	มาจากคำว่า	Effective Radiated Power
LOS	มาจากคำว่า	Line of Sight
NLOS	มาจากคำว่า	Non-Line-of-Sight
WI	มาจากคำว่า	Walfisch-Ikegami Model
PL	มาจากคำว่า	Path Loss
Tx	มาจากคำว่า	Transmitter
Rx	มาจากคำว่า	Receiver
BTS	มาจากคำว่า	Base Station
MS	มาจากคำว่า	Mobile Station
Pout	มาจากคำว่า	Power Output
Lc	มาจากคำว่า	Combiner Loss
Gd	มาจากคำว่า	Diversity Gain
$\Gamma$	มาจากคำว่า	Fresnal Reflection Coefficient
RCS	มาจากคำว่า	Radar Cross Section
$L_p$	มาจากคำว่า	Path Loss
RMS	มาจากคำว่า	Root Mean Square
CPS	มาจากคำว่า	Cycles Per Second
ELF	มาจากคำว่า	Extremely Low Frequency
VF	มาจากคำว่า	Voice Frequency
VLF	มาจากคำว่า	Very Low Frequency
LF	มาจากคำว่า	Low Frequenc
MF	มาจากคำว่า	Medium Frequency
HF	มาจากคำว่า	High Frequency
VHF	มาจากคำว่า	Very High Frequency
UHF	มาจากคำว่า	Ultra High Frequency
SHF	มาจากคำว่า	Super High Frequency

**สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)**

EHF	มาจากคำว่า	Extremely High Frequency
ISI	มาจากคำว่า	Inter Symbol Interference
AWGN	มาจากคำว่า	Additive While Gaussian Noise

# บทที่ 1

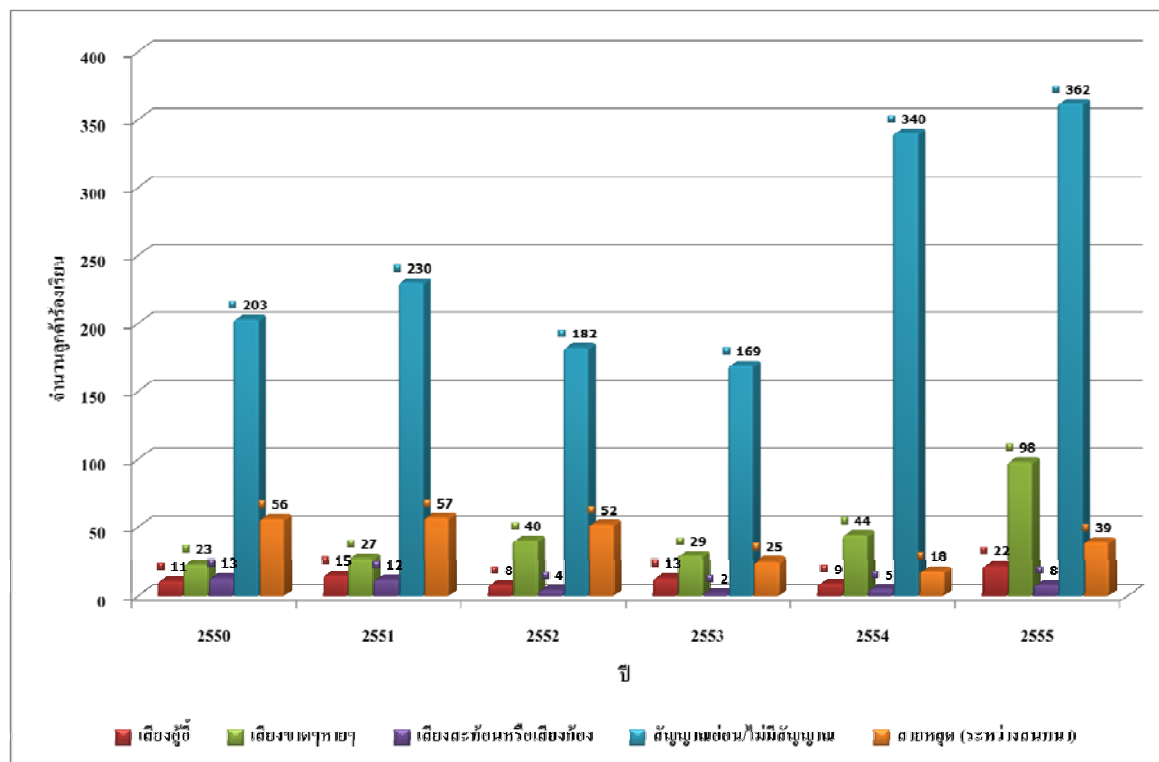
## บทนำ

### 1.1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจำเป็นต้องมีการออกแบบพื้นที่ครอบคลุมและระดับกำลังสัญญาณที่เพียงพอ โดยมีเป้าหมายหลักให้สามารถได้พื้นที่ครอบคลุมที่ต้องการมากที่สุดและมีตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อให้ได้รับคุณภาพของการให้บริการที่ดี ทำให้เครื่องลูกข่ายและสถานีฐานสามารถติดต่อสื่อสารกันได้อย่างมีประสิทธิภาพได้โดยปราศจากสิ่งกีดขวางใดๆ ที่เรียกว่า การสื่อสารเส้นทางตรงแบบแนวสายตา (Line of Sight) และในบางครั้งเครื่องรับ-ส่ง อาจอยู่ในแนวสิ่งกีดขวาง เช่น อาคารบ้านเรือน ภูเขา พื้นที่ป่าหนาแน่น เป็นต้น ที่เรียกว่า การสื่อสารทิศทางอ้อม(Non-Line-of-Sight) อาจจะได้รับมาจากหลายทิศทางทั้งสัญญาณที่ลอดผ่านสิ่งกีดขวาง (Absorption) สัญญาณอ้อมผ่านสิ่งกีดขวาง (Diffraction) และสัญญาณสะท้อน (Reflection) สัญญาณจากคนละทิศทางจะมีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน ทั้งความแรงของสัญญาณ เฟสของสัญญาณ โพลาริเซชัน และความล่าช้าของสัญญาณ จากสาเหตุความไม่แน่นอนของลักษณะของสื่อกลางนี้ทำให้คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของเครื่องส่ง ไปยังเครื่องรับมีความผันผวนของระดับสัญญาณรับมาก ทำให้การออกแบบระบบการสื่อสารไร้สายจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติการแพร่ของคลื่นซึ่งจะมีผลต่อการกำหนดตัวแปรต่างๆของระบบ เช่น กำลังส่ง เป็นต้น การปรับปรุงคุณภาพของเครือข่ายให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยมุ่งเน้นทั้งบริการด้านเสียง ที่พัฒนาให้ต้องสามารถโทรติดต่อสื่อสาร เข้า-ออกได้ตลอดเวลา มีความต่อเนื่องของการใช้งาน มีคุณภาพความคมชัดของเสียง เป็นต้น รวมถึงมีระยะเวลาในการเข้าถึงบริการ และการตอบรับของระบบที่รวดเร็วมากยิ่งขึ้นอีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นการขยายเครือข่าย การพัฒนาคุณภาพเครือข่าย สำหรับการแก้ไขปัญหาด้านเครือข่ายให้ลูกค้าจะต้องผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์และหาแนวทางอย่างละเอียดและถี่ถ้วน ต้องพิจารณาเกี่ยวกับ



งบประมาณในการลงทุน ผลได้ ผลเสีย ที่จะเกิดขึ้น โดยปัญหาสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่จากสิ่งกีดขวางก่อให้เกิดเสียงอู้อี้ เสียงขาดๆ หายๆ เสียงสะท้อนหรือเสียงก้อง สัญญาณอ่อนไม่มีสัญญาณ และสายหลุด (ระหว่างสนทนา) ดังแสดงในภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 ปัญหาการใช้งานของลูกค้าที่ใช้บริการต่อปี

( ที่มา : ข้อมูลจากเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ปี 2550 – 2555 จังหวัดนครศรีธรรมราช )

จากข้อมูลเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ปี 2550 – 2555 ได้แสดงให้เห็นว่าปัญหาการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ของลูกค้าที่ใช้บริการในจังหวัดนครศรีธรรมราชตั้งแต่ปี 2550 – 2555 พบว่าโดยส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาสัญญาณอ่อนไม่มีสัญญาณ สำหรับในเขตพื้นที่ให้บริการนั้นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความสูงและกำลังส่งของเครื่องส่ง(สถานีฐาน) มุมสายอากาศ ลักษณะภูมิประเทศ ความสูงและความหนาแน่นสิ่งปลูกสร้าง เป็นต้นแบบจำลองจึงมีความจำเป็นที่สามารถช่วยให้ทราบถึงขอบเขตการใช้งาน สามารถนำมาช่วยวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แนวทางพัฒนาจากแบบจำลองลิซ (Lee Model) ที่มุ่งเน้นสภาพภูมิประเทศที่เป็นเนินเขาบริเวณขอบเหลี่ยมคม (Knife-Edge) และผลกระทบของความสูงของสายอากาศกับลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่าง กันไป โดยหากสายอากาศของเครื่องส่ง (สถานีฐาน) ที่ใช้งานอยู่ต่ำ

กว่าและเนินเขาที่มีลักษณะเป็นคลื่นเพิ่มขึ้นในบางพื้นที่รวมทั้งสัญญาณอาจมีการขาดหายจากสิ่งก่อสร้าง แล้วนำมาวิเคราะห์เชิงตัวเลขในลักษณะการลดทอนบนเนินเขาและถนน (Lee,1998) ใช้ทำนายความเข้มของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศของเครื่องส่ง (สถานีฐาน) ถึงสายอากาศของเครื่องรับ(โทรศัพท์เคลื่อนที่) ตามการลดทอนสัญญาณ (Lee,1992) ความเปลี่ยนแปลงในลักษณะภูมิประเทศหุบเขาและภูเขา เป็นต้น ส่งผลให้สัญญาณที่รับได้อ่อนและเข้ม ขึ้นอยู่กับเกณฑ์ของสายอากาศหรือการลดทอนสำหรับกรณีไม่มีสิ่งกีดขวางและขึ้นอยู่กับการแตกกระจายของคลื่นที่ผ่านวัตถุที่ขวางหน้าสำหรับกรณีมีสิ่งกีดขวาง (Lee ,2010) แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest ) การคำนวณลดทอนระหว่างเครื่องส่ง (สถานีฐาน)กับเครื่องรับ(โทรศัพท์เคลื่อนที่) ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นต้นไม้และที่ปกอาศัยโดยมีต้นไม้อยู่หนาแน่น การทำนายการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องความลึกของผิวใบไม้ลักษณะการลดทอนจากร่มใบของต้นไม้สำหรับความแตกต่างของการส่งและรับ โดยทางกายภาพ เช่น จำนวนของใบ ขนาดความหนา และการวางของก้านใบ (กึ่งก้านหลักและรอง) พิจารณาจากความสูงต่ำของต้นไม้ที่ปกคลุมวางเรียงตัวกันไป (Torricco Lang,2007) และแบบจำลองวอลฟ์ฟิชซ์-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) ใช้กับการคำนวณ ลดทอนกับสิ่งแวดล้อมตัวเมืองเป็นแบบจำลองที่ใช้งานกับสิ่งแวดล้อมที่หนาแน่นและเหมาะสมกับเซลล์ที่มีพื้นที่ไม่เกิน 1 กิโลเมตร โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ โมเดลทางเรขาคณิต การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของสถานที่ นิยมใช้สำหรับพื้นที่ในเขตตัวเมืองและชานเมือง โดยแบบจำลองชนิดนี้ จะใช้ข้อมูลบางอย่างของสภาพแวดล้อม มาใช้ในการคำนวณ โดยเป็นโมเดลที่รวมในแหล่งชุมชนจากสิ่งปลูกสร้าง นำมาประยุกต์ใช้กับพื้นที่ที่ทดลองปัญหาจากการใช้แบบจำลองเดิมและต้องคิดค้นแบบจำลอง (Yihuai , et al.,2009) ในแหล่งชุมชนจากสิ่งปลูกสร้าง นำมาประยุกต์ใช้กับพื้นที่ทดลองโดยการลดทอนของสัญญาณระหว่างสถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่จากสภาพภูมิประเทศที่แตกต่างกันนั้นเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการใช้งานของลูกค้าโดยการทำให้ความแรงและคุณภาพของสัญญาณสูงส่งผลให้สามารถใช้งานเครือข่ายได้เต็มประสิทธิภาพถึงแม้ว่าแบบจำลองข้างต้นจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะกับพื้นที่ดังกล่าว อย่างไรก็ตามในพื้นที่จริงนั้นมีลักษณะจำเพาะที่จะต้องมีการปรับปรุงแบบจำลองก่อนนำมาใช้ (M. B. Roslee ,K. F. Kwan. 2010) ความเจริญของระบบสื่อสารโทรคมนาคมเพิ่มสูงขึ้นในระบบสื่อสารโทรคมนาคมมีความแตกต่างกันทั้งเซลล์ภายในอาคาร และเซลล์ภายนอกอาคาร (Xia. ,1997) บ่อยครั้งที่พบว่ามีการสิ่งก่อสร้างวางเรียงเป็นคลื่นและเนินเขาดังนั้นจากการแพร่กระจายคลื่นในเวลาเดียวกันส่งผลกระทบจากทั้งตึก อาคาร สิ่งก่อสร้างและลักษณะภูมิประเทศ (Piazzi, L.Bertoni,1998)

ดังนั้นการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะดำเนินการประยุกต์แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบจำลองผสม (Hybrid Model) โดยอาศัยข้อมูลเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ปี 2550 – 2555 ของจังหวัดนครศรีธรรมราช ใน 2 พื้นที่ คือ ทดสอบสัญญาณในเส้นทางถนนหมายเลข 41 ในช่วงระหว่างป้อมพาทองถึงแยกสวนผัก ตำบลท่าใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช และ ชุมชนเมืองตำบลในเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช

## 1.2. วัตถุประสงค์

เพื่อปรับปรุงคุณภาพสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบผสม (Hybrid Model)

## 1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางการแก้ปัญหาสัญญาณบกพร่องของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์

2. สามารถวางแผนเครือข่ายให้มีพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่ต้องการมากที่สุดด้วยระดับสัญญาณที่เพียงพอและตำแหน่งที่เหมาะสม

## 1.4. ขอบเขตการวิจัย

ทำการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณโดยการออกแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบผสม (Hybrid Model) โดยใช้ถนนทางหลวงหมายเลข 41 ระหว่างอำเภอทุ่งสง-จุฬาภรณ์ ที่มีสภาพภูมิประเทศหลายแบบ และ ชุมชนเมืองตำบลในเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นกรณีศึกษา

## 1.5. โครงการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Technical Knowledge Management Dept. (2554) ศึกษาการสื่อสารแบบไร้สายของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบเซลลูลาร์นั้นมักจะพบปัญหาเกี่ยวกับการส่งสัญญาณเนื่องจากเป็นการใช้คลื่นวิทยุโดยปัญหาที่พบบ่อย 2 หัวข้อ ได้แก่

1. การสูญเสียกำลัง (Path Loss) เกิดขึ้นเมื่อมีการรับสัญญาณเข้ามาต่ำเมื่อระยะทางระหว่างเครื่องรับ (โทรศัพท์เคลื่อนที่) และเครื่องส่ง (สถานีฐาน) เพิ่มขึ้น ถ้าไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างสายอากาศโทรศัพท์เคลื่อนที่และสถานีฐานจะมีเพียงการสูญเสียของสัญญาณในอวกาศว่าง (Free Space Loss) ทำให้สัญญาณที่รับได้จะแปรผันกับระยะทาง (d) และความถี่ (f) ยกกำลังสอง

$$L_p \sim d^2 f^2$$

สมการที่ 1.1

โดยที่

$L_p$  = การสูญเสียกำลังของสัญญาณในอวกาศว่าง หน่วย เดซิเบล (dB)

$d$  = ระยะทางระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง หน่วย เมตร (m)

$f$  = ความถี่ หน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

ถ้าความถี่สูงการสูญเสียกำลังจะยิ่งมาก สำหรับปัญหาการสูญเสียกำลัง (Path Loss) เป็นปัญหาในระบบเซลลูลาร์อยู่แล้ว โดยในพื้นที่ต่างๆกันจะมีค่าการสูญเสียกำลังแตกต่างกัน โดยส่วนมากแล้วมักจะมีการแบ่งพื้นที่เป็น 3 แบบ คือ ชุมชนหนาแน่น (Urban Area) กึ่งชุมชน (Suburban Area) และพื้นที่โล่ง (Open Area)

2.การจางหาย (Fading) ในการสื่อสารไร้สาย สัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง (สถานีฐาน) จะมาถึงสายอากาศที่เครื่องรับ (โทรศัพท์เคลื่อนที่) ได้นั้นจะมีหลายทิศทาง โดยที่การแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อน เลี้ยวเบน หักเห หรือกระจายได้ ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมในขณะนั้น โดยที่การจางหายที่เกิดจากสิ่งกีดขวาง เช่น เนินเขา ดึกหรืออาคารระหว่างสายอากาศเครื่องส่งและเครื่องรับ เป็นต้น สำหรับสิ่งกีดขวางนี้จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ซาโดว์อิง (Shadowing) ที่สามารถลดความแรงของสัญญาณรับลงได้ ขณะที่โทรศัพท์มีการเคลื่อนที่ไป ทำให้สัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปชั่วขณะจากสิ่งแวดล้อมรอบข้าง และเมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้นสัญญาณที่รับได้ก็จะมีกำลังแรงดังเดิม ดังนั้นระดับของสัญญาณที่รับได้มักจะเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเท่าๆ กับขนาดของสิ่งกีดขวาง ดังนั้นความแรงของสัญญาณจึงขึ้นอยู่กับสิ่งกีดขวางระหว่างสายอากาศส่ง (Tx) และรับ (Rx) แต่หากเกิดขึ้นจากการรับสัญญาณมากกว่าหนึ่งเส้นทางระหว่างสายอากาศส่ง (Tx) และรับ (Rx) จากการที่สายอากาศของเครื่องรับสัญญาณอยู่ใกล้กับพื้นผิวมาก ดังนั้นสิ่งกีดขวางต่างๆ รอบข้างจึงส่งผลให้เกิดการสะท้อนและการหักเหของสัญญาณในหลายทิศทาง ส่งผลทำให้สัญญาณที่รับได้ประกอบด้วยจำนวนสัญญาณหลายๆ สัญญาณที่เดินทางมาจากทิศทางที่แตกต่างกัน โดยมีทั้งขนาดและเฟสที่แตกต่างกัน ผลกระทบของมัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath Fading) ทำให้ระดับของสัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างบ่อยครั้งมาก และการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงระยะเดียวกันกับขนาดของความยาวคลื่น การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอาจจะเกิดขึ้นได้มากถึง 30-40 dB เพียงผู้ใช้โทรศัพท์มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะเพียงเศษส่วนของความยาวคลื่น

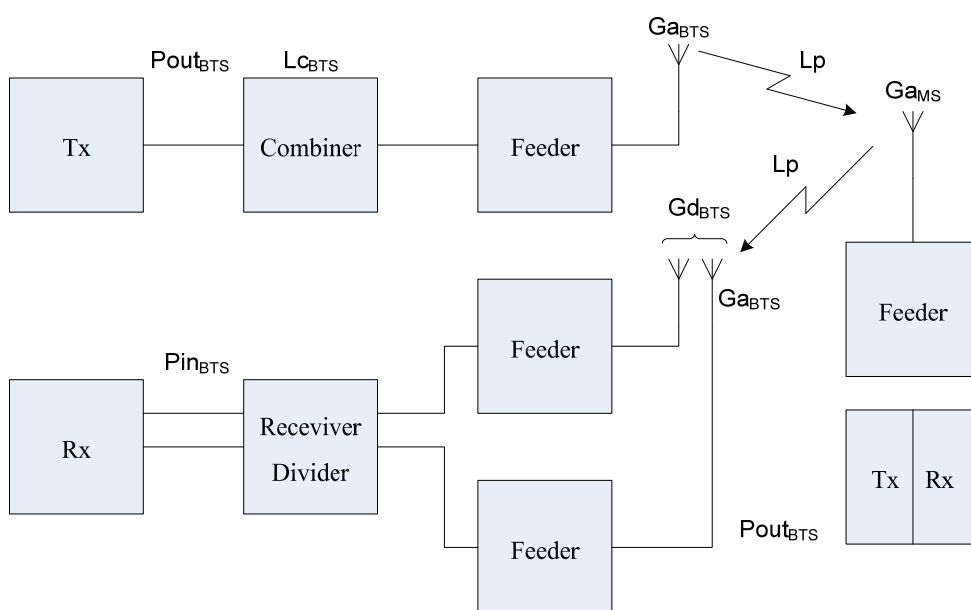
สำหรับสายอากาศที่ใช้งานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์มี 2 ประเภท แบ่งตามการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องใช้ คือสายอากาศรอบทิศทาง (Omnidirectional Antenna) จะมีการแพร่กระจายคลื่นเทียบกับทิศทางในแนวนอนและอัตราการขยายของสายอากาศจะอยู่ในช่วง 8-11

dBi และสายอากาศแบบทิศทาง (Uni-Directional Antenna) สายอากาศประเภทนี้จะไม่มีการแพร่กระจายคลื่นของแวนอนและแนวตั้งที่แน่นอน นิยมใช้เพื่อเพิ่มอัตราการขยายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ (Coverage) โดยจะมีอัตราการขยายมากกว่าสายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omnidirectional Antenna) ต่อมาพิจารณาถึงความสมดุลระบบกำลังส่ง (System Power Balance) โดยต้องแน่ใจว่าตำแหน่งของโทรศัพท์ (Mobile) และเครื่องส่ง (Base Station) นั้นสามารถรับความไวของสัญญาณ (Sensitivity) ที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันได้ หากความไวสัญญาณของเครื่องส่งต่ำกว่าโทรศัพท์ จำเป็นต้องให้กำลังส่งจากเครื่องส่งสูงขึ้น โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 1.2

$$P_{out_{BTS}} = P_{out_{MS}} + L_{CBTS} + G_{dBTS} + (P_{in_{MS}} - P_{in_{BTS}}) \quad \text{สมการที่ 1.2}$$

โดยที่

$P_{out_{BTS}}$	=กำลังส่งของเครื่องส่ง (Power Output Base Station) หน่วยเดซิเบล (dBm)
$P_{out_{MS}}$	=กำลังส่งของโทรศัพท์ (Power Output Mobile) หน่วยเดซิเบล (dBm)
$L_{CBTS}$	=การลดทอนของสาย (Combiner Loss) หน่วย เดซิเบล (dB)
$G_{dBTS}$	= อัตราการขยายความแตกต่าง (Diversity Gain) หน่วย เดซิเบล (dBi)
$P_{in_{MS}}$	=ความไวของโทรศัพท์ ( Mobile Sensitivity) หน่วย เดซิเบล (dBm)
$P_{in_{BTS}}$	=ความไวของเครื่องส่ง( Base Station Sensitivity) หน่วย เดซิเบล (dBm)



ภาพที่ 1.2. ระบบความสมดุลของกำลังส่ง (System Balancing)

ที่มา : Technical Knowledge Management Dept. (2554)

จากภาพที่ 1.2 จะเห็นได้ว่ากำลังของเครื่องส่งจะถูกลดทอนจากสายส่งสัญญาณ และสิ่งกีดขวางจนไปถึงเครื่องรับโทรศัพท์ โดยในแต่ละบล็อกละก็แสดงส่วนที่เพิ่มอัตราการขยาย และลดทอนสัญญาณ สำหรับส่วนที่มีอัตราการขยายเพิ่มขึ้น จะเป็นในภาคของอัตราการขยาย สายอากาศเครื่องส่งและอัตราการขยายสายอากาศเครื่องรับ ปกติแล้วกำลังงานจากสถานีฐาน จะต้องมากกว่ากำลังงานของ โทรศัพท์เคลื่อนที่เพราะไม่เพียงแต่สถานีฐานจะมีความไว (Sensitivity) มากกว่าคือ สามารถรับสัญญาณที่มีความแรงต่ำๆ ได้ สถานีฐานยังมีการสูญเสียอย่างมากขณะที่มีการส่งคลื่น เช่น การสูญเสียจากอุปกรณ์รวมสัญญาณ (Combiner) และอัตราการขยาย ขณะที่มีการรับคลื่นมาก อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนสัญญาณครอบคลุมสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราการขยายสายอากาศแต่ไม่ใช่เป็นการเพิ่มกำลังส่งของสถานีฐาน สำหรับการลดพื้นที่ ครอบคลุมสัญญาณสามารถลดกำลังส่งของสถานีฐานได้

Lee (1998) ได้ศึกษามุ่งเน้นสภาพภูมิประเทศที่เป็นเนินเขาบริเวณขอบเหลี่ยมคม (Knife-Edge) โดยการใช้ทำนายความเข้มของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศของเครื่องส่งถึง สายอากาศของโทรศัพท์ตามการลดทอนสัญญาณและความเปลี่ยนแปลงในลักษณะภูมิประเทศหุบ เขาและภูเขา เป็นต้น ส่งผลให้สัญญาณที่รับได้อ่อนและเข้ม ขึ้นอยู่กับเกณฑ์ของสายอากาศหรือการ ลดทอนสำหรับกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง และขึ้นอยู่กับการแตกกระจายของคลื่นที่ผ่านวัตถุที่ขวางหน้า สำหรับกรณีมีสิ่งกีดขวาง

Torrico (2007) ศึกษาแบบจำลองต้นไม้ (Tree Model) สำหรับการคำนวณการ ลดทอน(Path Loss)ระหว่างเครื่องส่งกับ โทรศัพท์ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นต้นไม้และที่พักอาศัย โดยมีต้นไม้อยู่หนาแน่น การทำนายการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องความลึกของผิว ใบไม้ลักษณะการลดทอนจากร่มใบของต้นไม้สำหรับความแตกต่างของการส่งและรับ ทาง ภายภาพจำนวนของใบ ขนาด ความหนา และการวางของก้านใบ (กิ่งก้านหลักและรอง) พิจารณา จากความสูงต่ำของต้นไม้ที่ปกคลุมวางเรียงตัวกันไป

Yihuai และคณะ (2009) ได้ศึกษาแบบจำลองแบบจำลองวอล์ฟฟิลด์-ไอเคกามี (WI Model) ใช้กับการคำนวณการลดทอน (Path Loss) กับสิ่งแวดล้อมตัวเมือง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ โมเดลทางเรขาคณิต การวิเคราะห์องค์ประกอบของสถานที่ นิยมใช้สำหรับพื้นที่ในเขตตัวเมือง และชานเมือง โดยแบบจำลองชนิดนี้ จะใช้ข้อมูลบางอย่างของสภาพแวดล้อม มาใช้ในการคำนวณ โดยเป็น โมเดลที่รวมในแหล่งชุมชนจากสิ่งปลูกสร้างและนำมาประยุกต์ใช้กับพื้นที่ที่ทดลอง

Roslee และคณะ (2010) ศึกษาในแหล่งชุมชนจากสิ่งปลูกสร้าง นำมาประยุกต์ใช้ กับพื้นที่ทดลอง การลดทอนของสัญญาณระหว่างสถานีฐานและ โทรศัพท์เคลื่อนที่จากสภาพภูมิ ประเทศที่แตกต่างกันนั้นเป็นอุปสรรคที่สำคัญในการใช้งานของลูกค้าโดยการทำให้ความแรงและ

คุณภาพของสัญญาณสูงส่งผลให้สามารถใช้งานเครือข่ายได้เต็มประสิทธิภาพถึงแม้ว่าแบบจำลองข้างต้นจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะกับพื้นที่ดังกล่าว อย่างไรก็ตามในพื้นที่จริงนั้นมีลักษณะเฉพาะที่จะต้องปรับปรุงแบบจำลองก่อนนำมาใช้งาน

Faruque (1996) ได้ศึกษาแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) จัดเป็นแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสมกับพื้นที่ไม่เกิน 1 กิโลเมตรที่ประกอบไปด้วยสิ่งก่อสร้าง บ้านเรือน เป็นต้น เป็นโมเดลที่ใช้งานกับสิ่งแวดล้อมที่หนาแน่นและเหมาะสมกับเซลล์ที่มีพื้นที่ไม่เกิน 1 กิโลเมตร โดยมีความสูงของสายอากาศต่ำกว่าสิ่งก่อสร้างเสมือนมีหุบเขาอยู่กลางเมืองจุดประสงค์ของการทดลองเพื่อเผยแพร่โมเดลมาวิเคราะห์กับสิ่งแวดล้อมในหลายแบบ ซึ่งสิ่งกีดขวางที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นมีมากมายจากสิ่งก่อสร้างหนึ่งไปอีกสิ่งก่อสร้างหนึ่ง เครื่องมือและโปรแกรมที่ใช้งานนั้นที่ใช้ทำนายที่อยู่ยากที่ผู้ใช้กำหนดค่าตัวแปรพารามิเตอร์ ผลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์และทำนายภายในออฟฟิศได้โดยสามารถบริหารจัดการเงินทุนได้ดี

Piazzi และคณะ (1998) ศึกษาพบว่าสิ่งก่อสร้างมีการวางเรียงเป็นคลื่นและเนินเขาจากการแพร่กระจายคลื่นในเวลาเดียวกันส่งผลกระทบต่อทั้งตึก อาคารสิ่งก่อสร้างและลักษณะภูมิประเทศ สำหรับความผันแปรของภูมิประเทศโดยใช้อัตราส่วนความแรงของสัญญาณ (Field Strength Factor) และผลกระทบของความสูงของสายอากาศกับลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างเมื่อสายอากาศจาก เครื่องส่งที่ใช้งานอยู่ต่ำ แม้เนินเขาที่เป็นคลื่นเพิ่มขึ้นในบางสถานที่

Xia (1997) ศึกษาความก้าวหน้าของระบบสื่อสาร โทรคมนาคมที่เพิ่มสูงขึ้นในระบบสื่อสาร โทรคมนาคมที่มีความแตกต่างกันทั้งเซลล์ภายในอาคาร (Pico Cell) และภายนอกอาคารที่มีทั้งเซลล์ขนาดเล็ก (Micro Cell) และเซลล์ขนาดใหญ่ (Macro Cell)

Phai boon (2008) ได้ศึกษาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเพื่อทำนายค่าการสูญเสียตามวิธีที่ให้ความถูกต้องและง่ายต่อการใช้งาน โดยพิจารณาโครงสร้างของอาคารและผลกระทบจากวัตถุที่แปรเปลี่ยนตามเวลาหรือวัตถุที่เคลื่อนไหวกว้างในอาคารประเภทสำนักงานและอาคารที่จอดรถ โดยการศึกษาแบบจำลองการสูญเสียตามวิธีเดิมที่ใช้กับกรณีมีวัตถุเคลื่อนที่ภายในอาคาร เช่น มีการใช้งานอาคารในชั่วโมงเร่ง และกรณีที่ไม่มีการใช้งานอาคาร จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อนำเสนอแบบจำลองใหม่ที่สามารถทำนายการลดทอนของสัญญาณได้แม่นยำ และสามารถรวมผลกระทบจากวัตถุเคลื่อนที่โดยใช้แบบจำลองแบบมีขอบเขตด้านบนและขอบเขตด้านล่าง (Upper and Lower Bounds Model) โดยใช้วิธีการแบบนิวโร-ฟัซซี และการถดถอยเชิงเส้นแบบฟัซซี ซึ่งช่วยให้สามารถทำนายการแพร่กระจายคลื่นได้ดีขึ้น

Blaunstein, Nathan. (2000) ได้ศึกษาแบบจำลองลี (Lee Model) ที่ถูกสร้างขึ้นมาใช้กับลักษณะภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบใน 2 ลักษณะ คือ วิธีการพื้นที่ถึงพื้นที่ (Area-to-Area

Algorithm) และวิธีการจุดต่อจุด (Point-to-Point) โดยวิธีการพื้นที่ถึงพื้นที่จะพิจารณาจากพารามิเตอร์ ค่าเฉลี่ยการลดทอนที่ระยะ 1 กิโลเมตร ค่าความลาดเอียงของกำลังงานสูญเสียตามสภาพของพื้นผิวโลก และปรับค่าแฟคเตอร์ สำหรับวิธีการจุดต่อจุดจะมีความละเอียดในการเข้าถึงมากกว่าแบบแรกโดยมีความเป็นไปได้ใน 2 รูปแบบ คือ การสะท้อนจากพื้นผิวของเนินเขาเพราะว่า 2 ตัวแปรของเครื่องส่ง (สถานีฐาน) และการสะท้อนจากตำแหน่งสายอากาศของยานพาหนะ

ด้วยประเด็นปัญหาของการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันไปและหลากหลายของตัวแปรพารามิเตอร์ เช่น กำลังส่งของสถานีฐาน มุมสายอากาศ ขนาดของใบไม้ ลำต้น และความหนาของกิ่งก้าน เป็นต้น ทำให้การวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณเพื่อการประเมินจุดบกพร่องของเครือข่ายจะมี 3 แบบจำลองที่ทำให้สามารถปรับปรุงระดับความแรงของสัญญาณที่รับและแก้ไขปัญหาการลดทอนของสัญญาณจากสภาพภูมิประเทศที่เป็นสวนยางพาราสลับเนินเขาได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว และเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

ในการสื่อสารระบบเซลลูลาร์ โดยอาศัยคลื่นวิทยุเป็นสื่อกลางในการรับส่งข่าวสาร มีปัจจัยต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนช่องสัญญาณที่มีผลต่อคุณภาพของระบบ สภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น เนินเขา อาคาร สิ่งปลูกสร้างฯ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ การเคลื่อนที่ของเครือข่ายในระหว่างการสื่อสาร เป็นต้น คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น เป็นสิ่งหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดข้อจำกัดสมรรถนะของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ วิธีการส่งคลื่นระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับนั้น อาจเป็นไปลักษณะแนวสายตา หรือมีสิ่งกีดขวางก็ได้ ทำให้การวิเคราะห์วิธีการส่งคลื่นบางครั้งทำได้ยาก นอกจากนี้ ความเร็วของโทรศัพท์เคลื่อนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของระดับสัญญาณ คลื่นที่รับได้ ดังนั้น แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นจึงเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญของการออกแบบระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยทั่วไปจะใช้แบบจำลองทางสถิติจากการวัดสัญญาณคลื่น สำหรับระบบสื่อสารที่ต้องการใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ นอกจากนี้ยังนิยมใช้แบบจำลองที่ได้จากการคำนวณแนวทางเดินของคลื่นผ่านภูมิประเทศนั้นๆ อีกด้วย (สุภชัย ไพบูลย์, 2551)

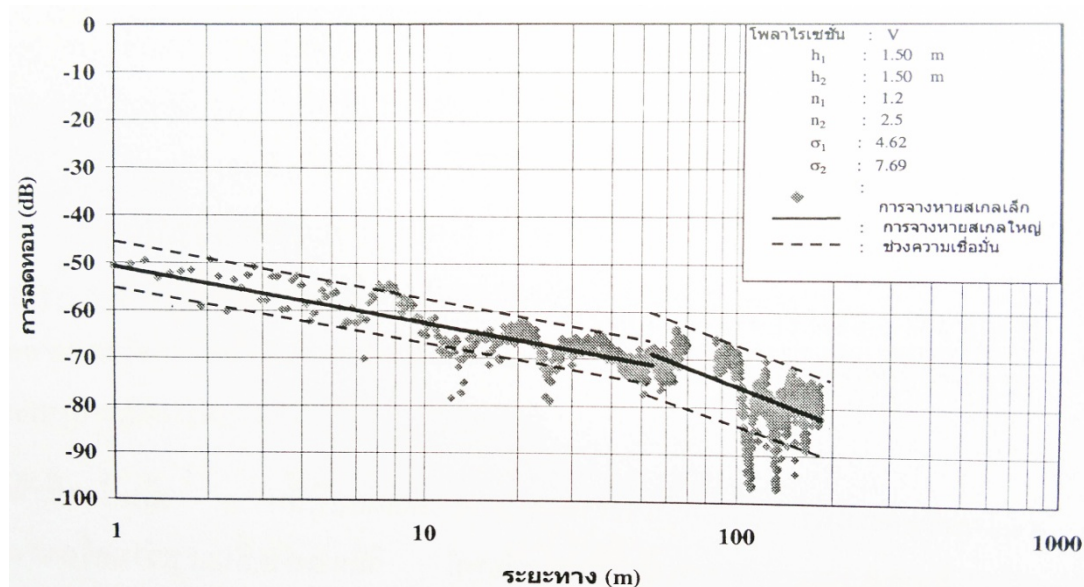
#### 2.1. ความรู้เบื้องต้นของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

กลไกการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยทั่วไปมี 3 แบบคือ 1) การสะท้อนของคลื่น (Reflection) 2) การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction) และ 3) การกระจัดกระจายของคลื่น (Scattering) ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้งานในตัวเมือง ซึ่งมีสิ่งปลูกสร้าง หรือวัตถุกีดขวาง วิธีการส่งคลื่นระหว่างสถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังจากการหักเหของคลื่น และเกิดการจางหายหลายวิถี จากการที่คลื่นที่สะท้อนวัตถุ ที่ตำแหน่งต่างๆ แล้วมารวมกันที่จุดๆ หนึ่ง การจางหายหลายวิถี จากการที่คลื่นที่สะท้อนวัตถุ ที่ตำแหน่งต่างๆ แล้วมารวมกันที่จุดๆ หนึ่ง นอกจากนี้กำลังของสัญญาณคลื่นจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งเพิ่มขึ้น

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ นั้น ใช้ทำนายค่าเฉลี่ยของกำลังสัญญาณที่รับได้ที่ระยะห่างจากเครื่องส่งเพื่อหาพื้นที่เขตบริการของสถานีฐาน แบบจำลองแบบนี้เรียกว่าแบบจำลองสเกลใหญ่ (Large-Scale Model) เนื่องจากแบบจำลองนี้ใช้ทำนายกำลังของสัญญาณที่ระยะทางไกล จากสถานีฐานมากๆ (หลายร้อยหรือหลายพันเมตร) ส่วนแบบจำลองการแพร่กระจาย

คลื่นที่ใช้หาการแกว่งอย่างรวดเร็วของกำลังสัญญาณที่รับได้ เมื่อเครื่องรับเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางสั้นๆ (ไม่ก็เท่าของความยาวคลื่น) หรือในช่วงเวลาสั้นๆ (ในช่วงวินาที) เราเรียกแบบจำลองประเภทนี้ว่า แบบจำลองสเกลเล็ก (Small-Scale Model) หรือ แบบจำลองการจางหาย (Fading Model)

ในขณะที่เครื่องรับเคลื่อนที่เป็นระยะทางสั้นๆ ค่าช่วงของกำลังของสัญญาณอาจแกว่งอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการจางหายสเกลเล็ก (Small-Scale Fading) เหตุผลที่ทำให้เกิดการจางหายแบบนี้ก็คือการรวมกันของสัญญาณคลื่นที่มาจากหลายทิศทาง เนื่องจากเฟสของสัญญาณที่รวมกันนี้เป็นแบบสุ่ม ดังนั้นผลรวมของสัญญาณทำให้เกิดการสวิตช์ของสัญญาณอย่างมากได้ ยกตัวอย่างกำลังของสัญญาณที่รับได้ อาจแปรเปลี่ยนสูงขึ้น 3 หรือ 4 เท่า ของขนาด (30 dB หรือ 40 dB) เมื่อเครื่องรับเคลื่อนที่เพียงสัดส่วนของความยาวคลื่น ในขณะที่เครื่องรับเคลื่อนที่ห่างจากเครื่องส่งเป็นระยะทางไกล ค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้จะลดลง ซึ่งเราสามารถทำนายค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้นี้ จากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นสเกลใหญ่ โดยทั่วไปกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่รับได้ถูกคำนวณ โดยการเฉลี่ยสัญญาณที่วัดได้ในช่วงระยะทาง  $5\lambda$  ถึง  $40\lambda$  สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ และโทรศัพท์พกพาส่วนบุคคลที่ใช้ความถี่ในย่าน 1 GHz ถึง 2 GHz นั้น การวัดค่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณจะอยู่ที่ระยะทาง 1 เมตร ถึง 10 เมตร จากเครื่องส่ง เป็นต้น ภาพที่ 2.1 แสดงลักษณะการจางหายสเกลเล็กและการจางหายสเกลใหญ่ ที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารภายในอาคารจากรูปกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่า สัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเครื่องรับเคลื่อนที่ แต่ค่าเฉลี่ยของสัญญาณจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงลดลง เมื่อเครื่องรับเคลื่อนที่ห่างจากเครื่องส่ง (ศุภชัย ไพบุญย์, 2551)



ภาพที่ 2.1 การจางหายสเกลเล็กและสเกลใหญ่

ที่มา : ศุภชัย ไพบุญย์ (2551)

## 2.2. แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในอวกาศว่าง

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นนี้ ใช้สำหรับทำนายความแรงของสัญญาณที่รับได้ เมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้นระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ เช่น ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม และระบบไมโครเวฟในแนวสายตา แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นจะเป็นการหาค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้ ที่ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ  $d$  โดยใช้สมการช่องว่างอวกาศของฟรีอิส (Fris Free Space Equation) (ศุภชัย ไพบูลย์, 2551)

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

โดยที่

$P_r(d)$  = กำลังรับสัญญาณซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ หน่วย เดซิเบล (dBm)

$d$  = ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ หน่วย กิโลเมตร (km)

$P_t$  = กำลังส่งสัญญาณ หน่วยเดซิเบล (dBm)

$G_t$  = อัตราขยายของสายอากาศส่ง หน่วย เดซิเบล (dBi)

$G_r$  = อัตราขยายของสายอากาศรับ หน่วย เดซิเบล (dBi)

$L$  = แฟคเตอร์การสูญเสียของระบบที่ไม่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่น ( $L < 1$ )

$\lambda$  = ความยาวคลื่น หน่วยเป็นเมตร

อัตราขยายของสายอากาศจะสัมพันธ์กับค่าประสิทธิภาพอะเปอร์เจอร์ หรือ  $A_e$  ดังนี้

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

โดยที่

$A_e$  = ค่าประสิทธิภาพอะเปอร์เจอร์

ค่าประสิทธิภาพอะเปอร์เจอร์  $A_e$  จะสัมพันธ์กับขนาดทางกายภาพของสายอากาศ ส่วนความยาวคลื่นจะสัมพันธ์กับความถี่คลื่นพาห์ ดังนี้

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega} \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

โดยที่

$f$  = ความถี่คลื่นพาห์ หน่วยเป็นเฮิรตซ์

$\omega$  = ความถี่เชิงมุมของคลื่นพาห์ หน่วยเรเดียนต่อวินาที

$c$  = ความเร็วของแสง หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

ค่าการสูญเสียกำลังของระบบเกิดเนื่องจากการลดทอนของสายส่งสัญญาณ การสูญเสียจากการกรองความถี่ และการสูญเสียจากสายอากาศ ถ้าค่า  $L=1$  แสดงว่าไม่มีการสูญเสียในระบบฮาร์ดแวร์เลย

สมการช่องว่างอวกาศของฟรีดริส (สมการที่ 2.1) แสดงให้เห็นว่ากำลังสัญญาณที่รับได้ จะลดลงเป็นกำลังสอง ของระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ นั่นคือ กำลังสัญญาณที่รับได้จะลดลงตามระยะทางในอัตรา 20 dB/dec

สายอากาศในทางอุดมคติ นั้น เป็นตัวกระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก ซึ่งกระจายกำลังด้วยอัตราหนึ่งหน่วยที่สม่ำเสมอในทุกทิศทาง สายอากาศแบบนี้มักใช้เป็นสายอากาศอ้างอิง ในการกำหนดอัตราขยายของสายอากาศในระบบสื่อสารเคลื่อนที่ ค่ากำลังกระจายคลื่นไอโซทรอปิก ประสิทธิภาพ (EIRP : Effective Isotropic Radiated Power) แสดงดังสมการที่ 2.4

$$\text{EIRP} = P_t G_t \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

ค่า EIRP นี้ จะแสดงกำลังกระจายคลื่นสูงสุด จากเครื่องส่งในทิศทางของอัตราขยายของสายอากาศสูงสุด เพื่อเปรียบเทียบกับตัวกระจายคลื่นไอโซทรอปิก ในทางปฏิบัติ กำลังกระจายคลื่นประสิทธิภาพ (ERP : Effective Radiated Power) ใช้แทนค่า EIRP เพื่อกำหนดกำลังกระจายคลื่นสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น (แทนที่สายอากาศไอโซทรอปิก) ค่า ERP มีค่าน้อยกว่าค่า EIRP อยู่ 2.15 dB สำหรับระบบส่งเดียวกัน ในทางปฏิบัติ อัตราขยายสายอากาศมีหน่วยเป็น dBi (อัตราขยาย dB เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก) หรือ dBd (อัตราขยาย dB เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น)

ค่ากำลังสูญเสียตามวิถี (Path Loss) เป็นค่าที่แสดงการลดทอนของสัญญาณ มีหน่วยเป็น dB ค่ากำลังสูญเสียตามวิถีที่มีหน่วยเป็น dB นั่นก็คือผลต่างของกำลังเครื่องส่งกับกำลังของเครื่องรับในหน่วย dB ซึ่งอาจรวมหรือไม่รวมอัตราขยายของสายอากาศก็ได้ ค่ากำลังสูญเสียตามวิถีสำหรับการสื่อสารแบบช่องว่างอวกาศเมื่อรวมอัตราขยายของสายอากาศ คือ

$$\text{PL(dB)} = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[ \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

ถ้าอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับหนึ่ง ค่ากำลังสูญเสียตามวิถีจะเป็น

$$\text{PL(dB)} = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[ \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

แบบจำลองช่องว่างอวกาศฟรีดริสใช้กำหนดเฉพาะค่า  $P_r$  ที่ระยะทาง  $d$  ซึ่งอยู่ในสนามระยะไกลของสายอากาศส่ง ซึ่งก็คือ สนามคลื่นที่ระยะทาง  $d_f$  หาได้จากสมการ

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดทางกายภาพที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ โดยระยะทางของสนามระยะไกลนี้ ควรมีค่ามากกว่า  $D$  หรือความยาวคลื่นมากๆ เขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$d_f \gg D \quad \text{สมการที่ 2.8}$$

และ

$$d_f \gg \lambda \quad \text{สมการที่ 2.9}$$

ดังนั้น สมการที่ 2.1 จึงไม่ต้องใช้ค่า  $d = 0$  โดยทั่วไปนั้น แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นสเกลใหญ่ จะใช้ระยะทาง  $d_0$  ซึ่งอยู่ใกล้กับสายอากาศ เป็นระยะทางที่ทราบค่ากำลังสัญญาณที่รับได้เป็นค่าอ้างอิง กำลังสัญญาณที่รับได้ที่ระยะทาง  $d > d_0$  นั้นมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ ที่ระยะทาง  $d_0$  ซึ่งค่า  $P_t(d_0)$  นี้อาจหาได้จากสมการที่ 2.1 หรืออาจหาค่าได้จากการวัดกำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่ระยะรัศมี  $d_0$  จากเครื่องส่ง ระยะทางอ้างอิง  $d_0$  นี้จะต้องกำหนดให้อยู่ในสนามคลื่นระยะไกล นั่นคือ  $d_0 > d_f$  และ  $d_0$  ต้องเป็นระยะทางที่สั้นกว่าระยะทางใช้งานจริงในทางปฏิบัติในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ดังนั้นเราจะใช้สมการที่ 2.1 ในการหาค่ากำลังสัญญาณที่รับได้ในช่องว่างอากาศที่ระยะทางมากกว่า  $d_0$  จากสมการ

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad \text{สมการที่ 2.10}$$

ในระบบสื่อสารเคลื่อนที่การวัดกำลังสัญญาณที่รับได้นิยมใช้หน่วย dBm ดังนั้นสมการที่ 2.10 เมื่อใส่ค่า  $10 \log$  เข้าไปจะกลายเป็น

$$P_r(d)\text{dBm} = 10 \log \left[ \frac{P_r(d_0)}{0.001\text{w}} \right] + 20 \log \left[ \frac{d_0}{d} \right] \quad d \geq d_0 \geq d_f \quad \text{สมการที่ 2.11}$$

โดยที่

$P_r(d_0)$  มีหน่วยเป็นวัตต์ สำหรับระยะทางอ้างอิง  $d_0$  นั้น หากระบบสื่อสารใช้สายอากาศอัตราขยายต่ำในย่านความถี่ 1 – 2 GHz แล้วโดยทั่วไป จะเป็นระยะทาง 1 เมตร จากเครื่องส่งในพื้นที่ภายในอาคาร และใช้ระยะทาง 100 เมตร หรือ 1 กิโลเมตร สำหรับพื้นที่ภายนอกอาคาร (ศุภชัย ไพบูลย์, 2551)

### 2.3. กลไกพื้นฐานการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

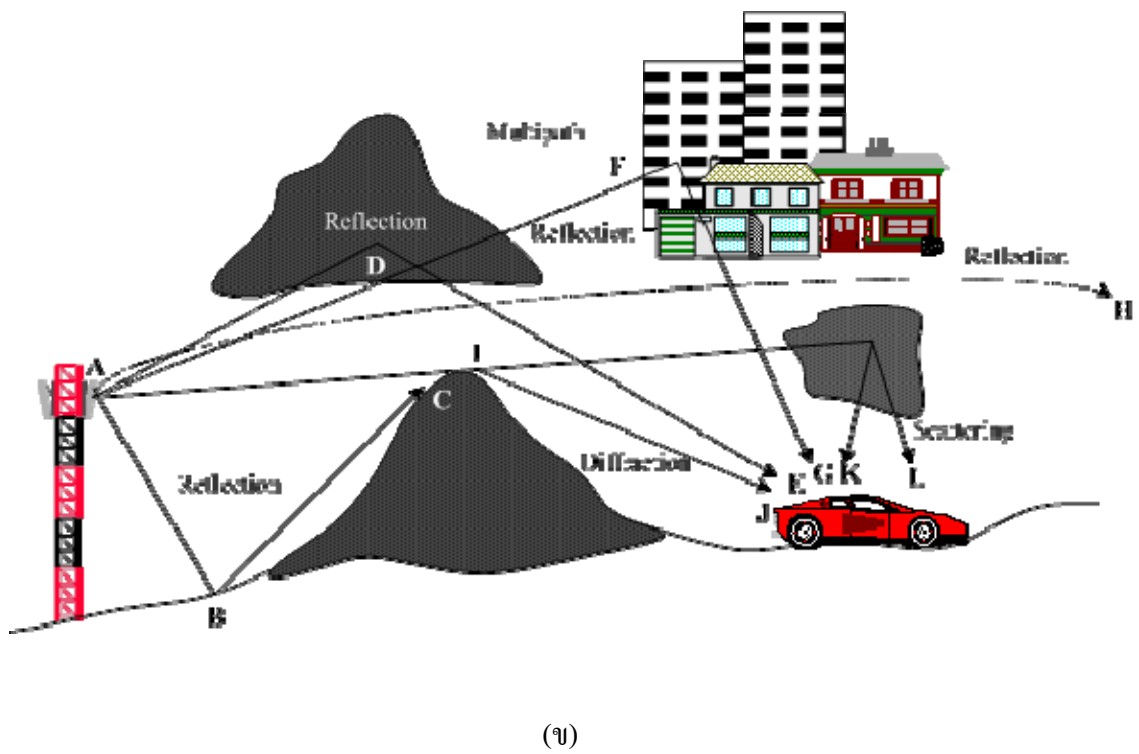
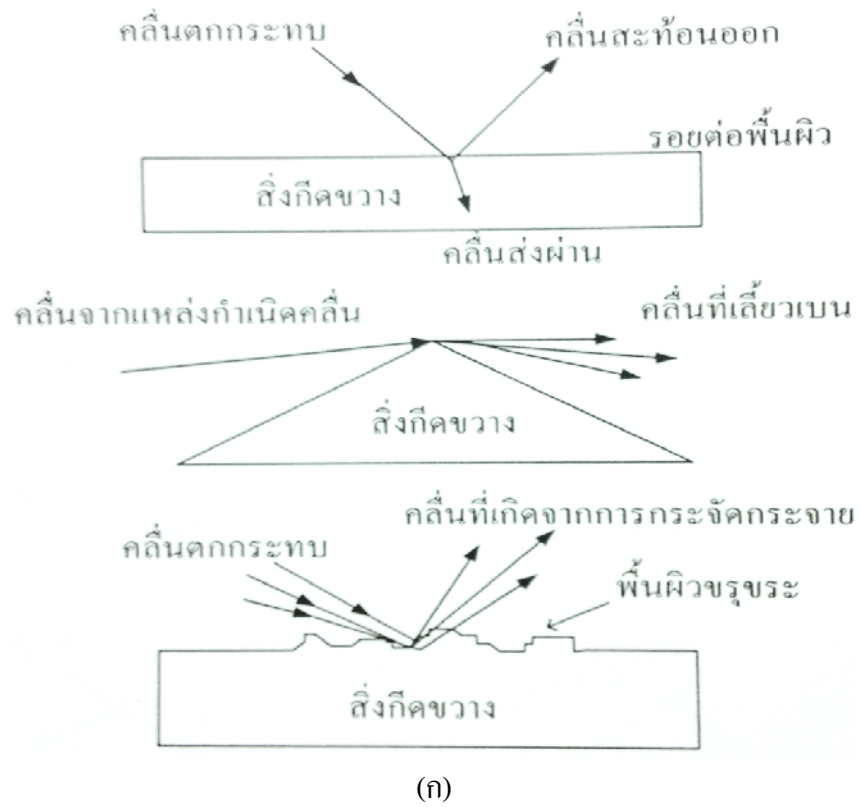
ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้งานในตัวเมือง ซึ่งมีสิ่งปลูกสร้าง หรือวัตถุกีดขวาง วิธีการส่งคลื่นระหว่างสถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังจากการหักเหของคลื่น และเกิดการจางหายหลายวิธี จากการที่คลื่นที่สะท้อนวัตถุ ที่ตำแหน่งต่างๆ แล้วมารวมกันที่จุดๆ หนึ่ง นอกจากนี้กำลังของสัญญาณคลื่นจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งเพิ่มขึ้น สำหรับกลไกพื้นฐานในการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วย 3 องค์ประกอบคือ 1) การสะท้อน (Reflection) 2) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และ 3) การกระจัดกระจาย (Scattering) กลไกพื้นฐานทั้ง 3 องค์ประกอบนี้มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นในระบบสื่อสารเคลื่อนที่ดังภาพที่ 2.2

การสะท้อน (Reflection) ของคลื่นสัญญาณเกิดขึ้นเมื่อคลื่นมีการเคลื่อนที่จากสื่อกลางประเภทหนึ่งไปสู่สื่อกลางอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สื่อกลางชนิดที่สองจะต้องมีพื้นผิวที่ใหญ่มากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ คลื่นบางส่วนจะมีการสะท้อนออกและส่วนที่เหลือก็เคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่สื่อกลางชนิดที่สอง ตัวอย่างของการสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งในระบบ

โทรศัพท์เคลื่อนที่ก็เช่น การที่คลื่นเคลื่อนที่เข้ากระทบกำแพง หรือพื้นผิวของโลก โดยทั่วไปการสะท้อนคลื่นเกิดจากผิวของดิน ดึก และผนังต่างๆ ภายในอาคาร เป็นต้น สามารถแสดงด้วยตำแหน่ง A-B-C A-D-E A-F-G และ A-H ตามภาพที่ 2.2

การเลี้ยวเบน (Diffraction) ของคลื่นเกิดขึ้นในกรณีที่มีวัตถุบางอย่างที่มีขอบกีดขวางอยู่ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งสัญญาณ เช่น ขอบตึก ขอบหลังคา เป็นต้น ทำให้ไม่มีเส้นทางตรงแบบแนวสายตา (Line of Sight) ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองที่คลื่นสัญญาณสามารถส่งผ่านได้ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นก็คือ คลื่นสัญญาณจะเลี้ยวอ้อมวัตถุต่างๆ การเลี้ยวเบนของสัญญาณนี้เองที่ทำให้เรายังสามารถรับสัญญาณได้บางส่วน ถึงแม้ว่าเครื่องรับสัญญาณจะถูกบดบังด้วยสิ่งกีดขวาง ด้วยเหตุนี้การเลี้ยวเบนของคลื่นสัญญาณจึงมีประโยชน์ต่อการส่งผ่านสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทำให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้ การเลี้ยวเบนขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุกีดขวาง นอกจากนี้ขนาดเฟส และการโพลาไรซ์ของคลื่นตกกระทบก็มีผลต่อคลื่นหักเหด้วย โดยจากภาพที่ 2.2 สามารถแสดงด้วยตำแหน่ง A-I-J

การกระจัดกระจาย (Scattering) เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่กระทบวัตถุหรือพื้นผิวที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ ทำให้คลื่นสัญญาณเกิดการกระเจิงไปในทุกทิศทาง การกระจัดกระจายอาจเกิดจากพื้นที่ผิวที่ขรุขระ วัตถุขนาดเล็กๆ หรือสิ่งผิดปกติอื่นๆ ในช่องสัญญาณสื่อสาร ในทางปฏิบัติการกระจัดกระจายในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เกิดจากใบไม้ ป้ายจราจร รวมถึงเสาโคมไฟตามถนน และพื้นผิวที่ขรุขระ เป็นต้น พิจารณาจากภาพที่ 2.2 สามารถแสดงด้วยตำแหน่ง A-L และ A-K



ภาพที่ 2.2 กลไกของการแพร่กระจายคลื่น  
 ที่มา : Technical Competency Department (2554 )

## 2.4. การสะท้อน (Reflection)

เมื่อคลื่นวิทยุแพร่กระจายในตัวกลางหนึ่ง แล้วไปกระทบกับอีกตัวกลางหนึ่ง ซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แล้วคลื่นวิทยุบางส่วน จะสะท้อน และมีบางส่วนจะแพร่กระจายผ่านตัวกลางที่สอง ถ้าคลื่นตกกระทบบนวัตถุที่มีค่าไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ (Perfect Dielectric) แล้วพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่านตัวกลางที่สอง และพลังงานอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางแรก และไม่มีการสูญเสียพลังงานจากการดูดกลืน แต่ถ้าตัวกลางที่สองเป็นตัวนำสมบูรณ์ (Perfect Conductor) แล้ว พลังงานที่ตกกระทบทั้งหมด จะสะท้อนกลับไปยังตัวกลางแรก โดยปราศจากการสูญเสียพลังงาน ความเข้มสนามไฟฟ้าของคลื่นสะท้อน และคลื่นส่งผ่าน สัมพันธ์กับคลื่นตกกระทบในตัวกลางแรก ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเฟรเนล (Fresnel Reflection Coefficient : $\Gamma$ )  $\Gamma$  นี้ขึ้นกับคุณสมบัติสาร การโพลาไรซ์คลื่น มุมมองของการตกกระทบ และความถี่ของคลื่น

### 2.4.1. การสะท้อนจากไดอิเล็กตริก (Reflection from Dielectrics)

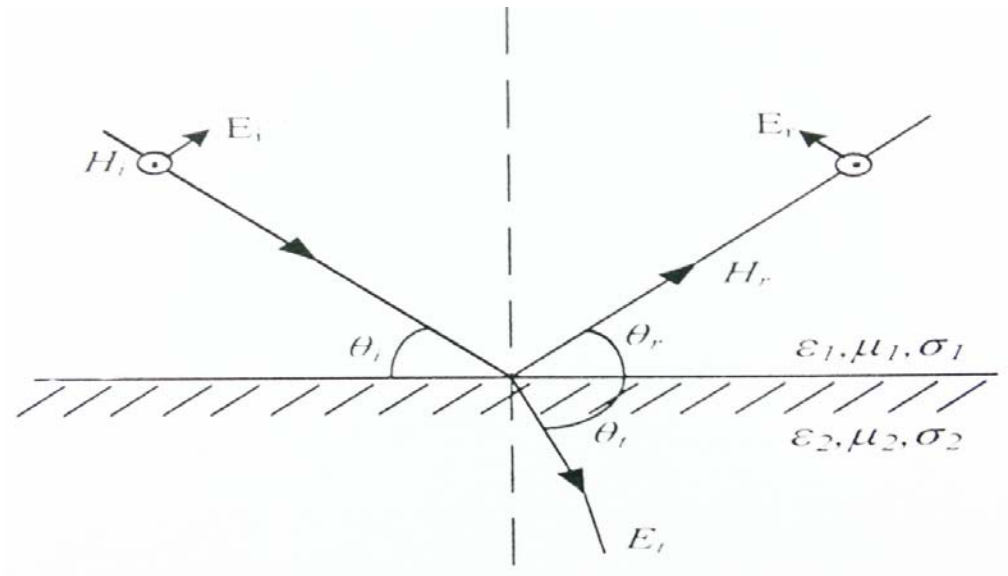
พิจารณาภาพที่ 2.3 คลื่นตกกระทบที่มุม  $\theta_i$  กับระนาบของเขตที่กั้นระหว่างตัวกลางทั้งสอง ไดอิเล็กตริก จากรูปจะเห็นว่าพลังงานส่วนหนึ่งสะท้อนกลับไปยังตัวกลางแรกที่มุม  $\theta_r$  และพลังงานอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่าน (หักเห) ไปยังตัวกลางที่สองที่มุม  $\theta_t$  ธรรมชาติของการหักเห นั้น แปรเปลี่ยนตามทิศทางของการโพลาไรซ์ของสนาม E คุณสมบัติสำหรับทิศทางของการโพลาไรซ์ สามารถศึกษาได้โดยการพิจารณาจากสองกรณี ในภาพที่ 2.3 ระนาบของการตกกระทบคือ ระนาบที่ประกอบด้วย คลื่นตกกระทบ คลื่นหักเห และคลื่นส่งผ่าน พิจารณาภาพที่ 2.3 ก) การโพลาไรซ์ สนาม E ขนานกับระนาบของการตกกระทบ (นั่นคือสนาม E เป็นการโพลาไรซ์แนวตั้ง หรือ ส่วนประกอบตั้งฉาก เมื่อเทียบกับพื้นผิวการสะท้อน) และในภาพที่ 2.3 ข) การโพลาไรซ์ สนาม E ตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบ (นั่นคือ สนาม E ตกกระทบมีทิศทางพุ่งออกจากกระดาษ ตั้งฉากกับแผ่นกระดาษและขนานกับพื้นผิวการสะท้อน)

ในภาพที่ 2.3 ตัวห้อย  $i, r, t$  หมายถึง สนามคลื่นตกกระทบ สนามคลื่นสะท้อน และสนามคลื่นส่งผ่าน (หักเห) พารามิเตอร์  $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$  และ  $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$  แสดงค่าสภาพยอม (Permittivity) ค่าความซึมซาบได้ (Permeability) และค่าความนำของตัวกลางทั้งสองตามลำดับ โดยมากค่าคงที่ ไดอิเล็กตริก ของไดอิเล็กตริกสมบูรณ์ (ไม่มีการสูญเสีย) มีความสัมพันธ์กับค่าสภาพยอมสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  ดังนี้  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  เมื่อ  $\epsilon_0$  มีค่าเท่ากับ  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m ถ้าวัตถุไดอิเล็กตริก มีการสูญเสียพลังงานจะถูกดูดกลืน และค่าสภาพยอมจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนโดย

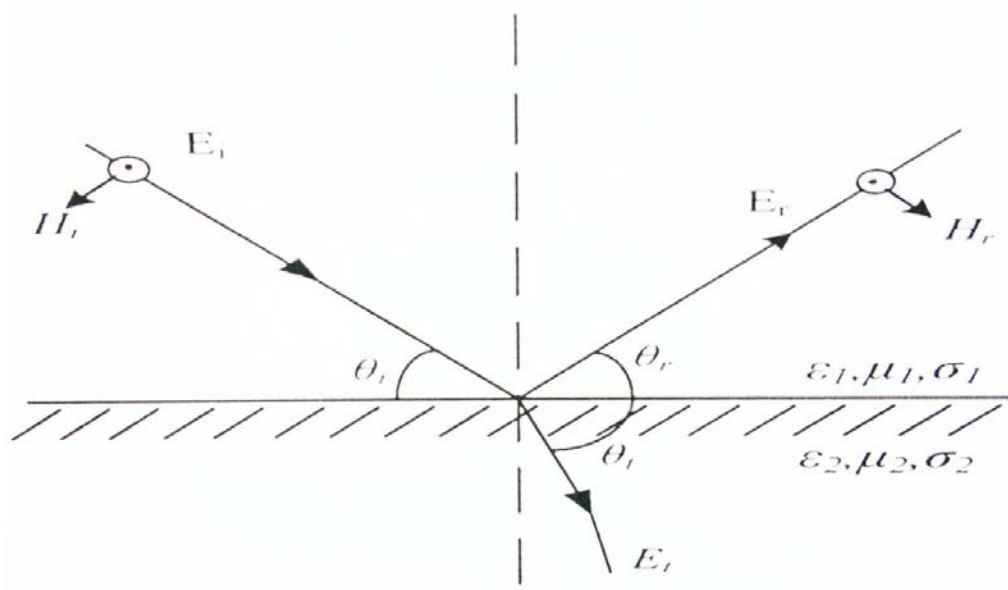
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r - j\epsilon' \quad \text{สมการที่ 2.12}$$



และ  $\sigma$  คือ ค่าความนำของวัสดุมีหน่วยเป็นซีเมน / เมตร



ก) สนามไฟฟ้าอยู่ในระนาบการตกกระทบ



ข) สนามไฟฟ้าตั้งฉากระนาบการตกกระทบ

ภาพที่ 2.3 แนวทางเดินของคลื่นสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างไดอิเล็กทริกทั้ง

สอง

ที่มา : ศุภชัย ไพบูลย์ (2551)

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ ของวัสดุที่ความถี่ต่างๆ

วัสดุ	ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์	ค่าความนำ $\sigma$ (s/m)	ความถี่ (MHZ)
พื้นดินที่ไม่ดี	4	0.001	100
พื้นดินทั่วไป	15	0.005	100
พื้นดินที่ดี	25	0.02	100
น้ำทะเล	81	5.0	100
น้ำสะอาด	81	0.001	100
อิฐ	4.44	0.001	4000
หิน	7.51	0.028	4000
แก้ว (Corning 707)	4	0.00000018	1
แก้ว (Corning 707)	4	0.000027	100
แก้ว (Corning 707)	4	0.005	10000

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้กล่าวมาของวัสดุที่ความถี่ต่างๆ จะเห็นได้ว่า ค่า  $\epsilon_r$  และ  $\sigma$  จะไม่ไวต่อความถี่การทำงานเมื่อวัตถุเป็นตัวนำชั้นดี ( $f < \sigma/(\epsilon_0\epsilon_r)$ ) และสำหรับวัตถุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียต่างๆ ค่า  $\epsilon_0$  และ  $\epsilon_r$  โดยทั่วไปมีค่าคงที่เมื่อความถี่ทำงานเปลี่ยนแปลงไป แต่  $\sigma$  อาจไวต่อความถี่การทำงาน (ศุภชัย ไพบูลย์, 2551)

## 2.5. แบบจำลองการสะท้อนพื้นดิน 2 แนวคลื่น (Ground Reflection Two-Ray Model)

การแพร่กระจายคลื่นวิทยุของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น คลื่นจะเดินทางมายังเครื่องรับมากกว่า 1 แนวคลื่นเสมอ เช่น ภาพที่ 2.4 คลื่นวิทยุที่เครื่องรับรับได้มาจาก 2 แนวคลื่นคือ 1) คลื่นในแนวสายตา ( $E_{LOS}$ ) และ 2) คลื่นที่สะท้อนมาจากพื้นดิน ( $E_g$ ) ดังนั้นการทำการรับสัญญาณจากคลื่นในแนวสายตาเพียงอย่างเดียว จึงขาดความแม่นยำ ดังนั้นเราจึงต้องหาค่าคลื่นรวมสุทธิ ( $E_{TOT}$ ) จากผลรวมของสนามคลื่น ( $E_{LOS}$ ) และ ( $E_g$ ) (Theodore S. Rappaport, 2002)

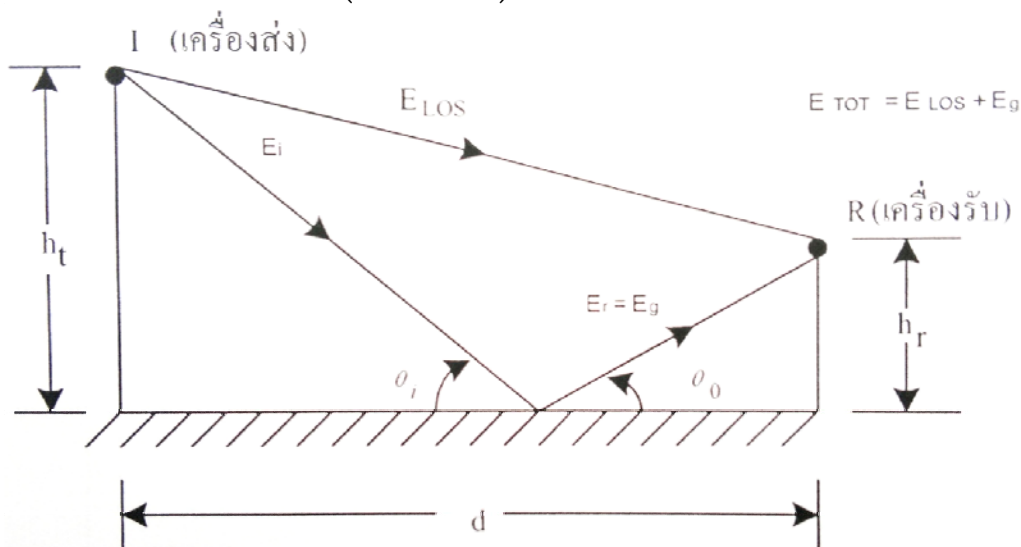
พิจารณาภาพที่ 2.5  $h_t$  คือความสูงของเครื่องส่ง และ  $h_r$  คือความสูงของเครื่องรับ ถ้าให้  $E_0$  คือสนามคลื่นอวกาศว่าง (ในหน่วย V/m) ที่ระยะทางอ้างอิง  $d_0$  จากเครื่องส่ง และ  $d$  คือระยะทางใดๆ จากเครื่องส่ง ( $d > d_0$ ) แล้ว การแพร่กระจายคลื่นอวกาศว่างของสนาม  $E$  กำหนดโดย

$$E(d, t) = \frac{E_0 d_0}{d} \cos\left(\omega_c \left(t - \frac{d}{c}\right)\right) \quad \text{สมการที่ 2.13}$$

โดยที่

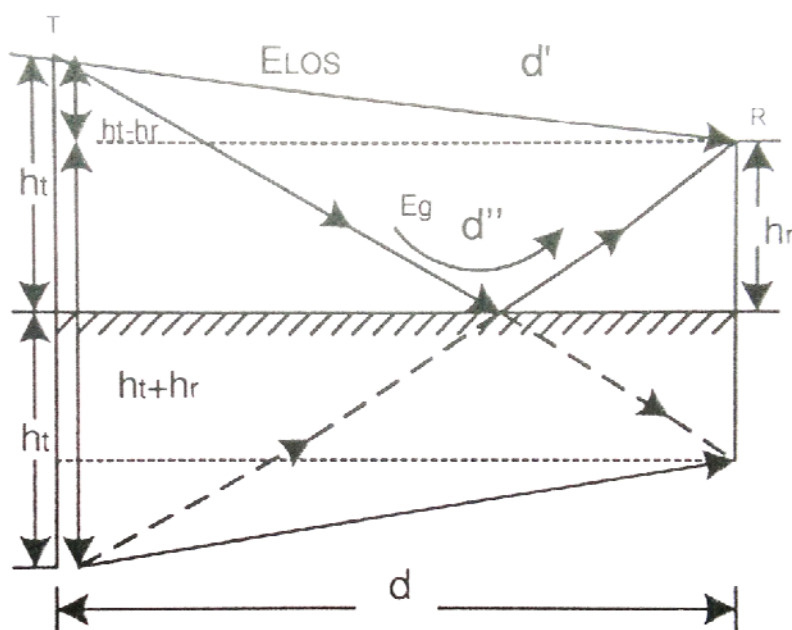
$|E(d, t)| = E_0 d_0 / d$  แสดงขอบสัญญาณของสนาม E ที่ระยะ d เมตร จากเครื่องส่งเมื่อสนามคลื่นทั้งสองแนวเดินทางมาถึงเครื่องรับโดยที่คลื่นตรง ( $E_{LOS}$ ) เดินทางด้วยระยะทาง  $d'$  และคลื่นสะท้อนเดินทางด้วยระยะทาง  $d''$  สนามคลื่นตรง ( $E_{LOS}$ ) หาได้จากสมการ

$$E_{LOS}(d', t) = \frac{E_0 d_0}{d'} \cos\left(\omega_c \left(t - \frac{d'}{c}\right)\right) \quad \text{สมการที่ 2.14}$$



ภาพที่ 2.4 แบบจำลองการสะท้อนพื้นดินสองแนวคลื่น

ที่มา : Theodore S.Rappaport (2002)



ภาพที่ 2.5 วิธีเชิงเงาใช้ในการหาผลต่างของระยะทางเดินของคลื่นทั้งสองแนว

ที่มา : Theodore S.Rappaport (2002)

ส่วนสนามคลื่นจากการสะท้อนหาได้จากสมการ

$$E_g(d'', t) = \Gamma \frac{E_0 d_0}{d''} \cos\left(\omega_c \left(t - \frac{d''}{c}\right)\right) \quad \text{สมการที่ 2.15}$$

จากหลักการการสะท้อนคลื่นของไดอิเล็กทริกในหัวข้อ 2.4.1 ทำให้เราทราบว่า

$$\theta_i = \theta_0 \quad \text{สมการที่ 2.16}$$

และ

$$E_g = \Gamma E_i \quad \text{สมการที่ 2.17}$$

$$E_t = (1 + \Gamma) E_i \quad \text{สมการที่ 2.18}$$

เมื่อ  $\Gamma$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน และถ้ามุม  $\theta_i$  มีค่าน้อยๆ คลื่นสะท้อน จะมีขนาดเท่ากับคลื่นตกกระทบแต่ต่างเฟสกัน  $180^\circ$  ดังนั้นผลลัพธ์ของสนามคลื่น  $E$  (สมมติให้การสะท้อนพื้นดินสมบูรณ์แบบ หรือ  $\Gamma = -1$ ) และ  $E_t = 0$  คือ ผลรวมทางเวกเตอร์ของ ( $E_{LOS}$ ) และ ( $E_g$ ) หรือ

$$|E_{TOT}| = |E_{LOS} + E_g| \quad \text{สมการที่ 2.19}$$

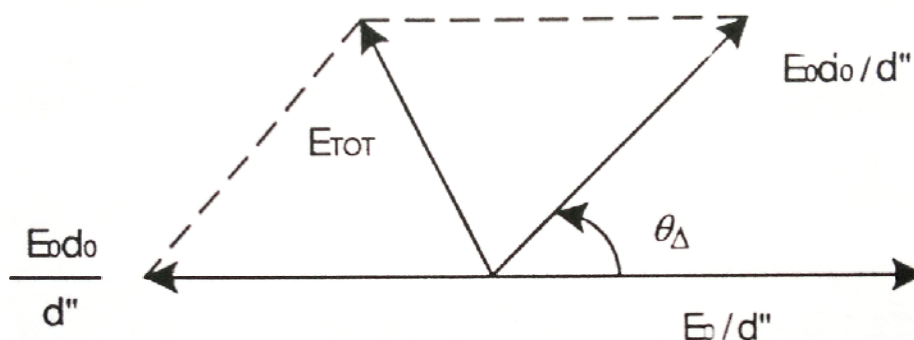
สนามไฟฟ้า  $E_{TOT}(d, t)$  สามารถถูกแสดงอยู่ในรูปของผลรวมของสมการที่ (2.13) และ (2.14) ดังนี้

$$E_{TOT}(d, t) = \frac{E_0 d_0}{d'} \cos\left(\omega_c \left(t - \frac{d'}{c}\right)\right) + \frac{E_0 d_0}{d''} \cos\left(\omega_c \left(t - \frac{d''}{c}\right)\right) \quad \text{สมการที่ 2.20}$$

พิจารณาวิธีเงา (Image) ดังภาพที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า ส่วนต่างวิถีระหว่าง  $d''$  หรือ  $d'$  มีค่าเท่ากับ  $\Delta$  สามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta = d'' - d' = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \quad \text{สมการที่ 2.21}$$

ถ้าระยะทางระหว่างเครื่องส่ง และเครื่องรับ  $d$  มากกว่าความสูงของ  $h_t$  รวมกับ  $h_r$  แล้ว สมการที่ 2.21 สามารถย่อลงได้โดยวิธีการประมาณอนุกรมเทย์เลอร์ ดังนี้



ภาพที่ 2.6 เฟสเซอร์ไดอะแกรมแสดงการรวมกันขององค์ประกอบสนามคลื่นทั้งสอง

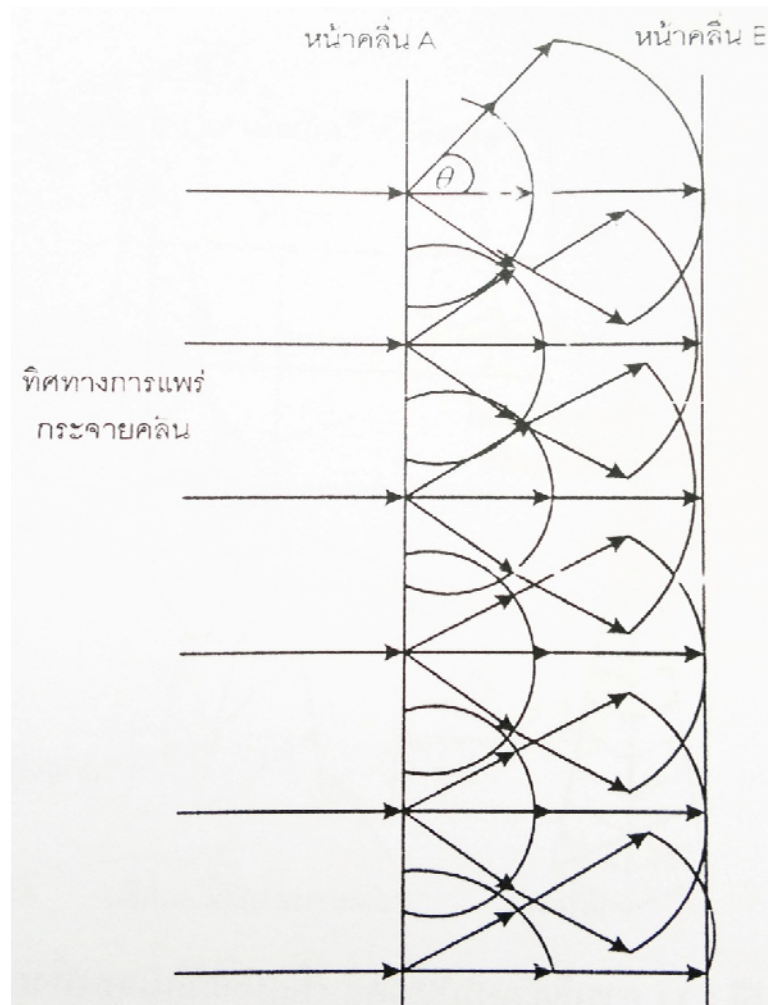
ที่มา : Theodore S.Rappaport (2002)

$$\Delta = d'' - d' \approx \frac{h\lambda r}{d}$$

สมการที่ 2.22

## 2.6. การเลี้ยวเบน (Diffraction)

การเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุนั้น ทำให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้ แม้ว่าวิถีคลื่นจะถูกกีดขวางก็ตาม ปรัชญาการเลี้ยวเบนของคลื่นสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของฮอยเกนส์ (Huygen) ซึ่งกล่าวได้ว่า “ทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นจะเป็นจุดกำเนิดคลื่นสำหรับผลิตคลื่นใหม่ และคลื่นใหม่เหล่านี้จะรวมกันเพื่อผลิตหน้าคลื่นใหม่ ในทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น” หลักการของฮอยเกนส์ สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.7 คลื่นวิทยุแพร่กระจายโดยมีหน้าคลื่น A เป็นระนาบเส้นตรงตั้งฉาก กับทิศทางการแพร่กระจายคลื่นจุดทุกๆ จุดบนหน้าคลื่น A จะเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งแพร่กระจายไปรอบๆ จุดกำเนิด โดยมีทิศทางทำมุม  $\theta$  ดังภาพที่ 2.7 (Parsons, J.D.2000)

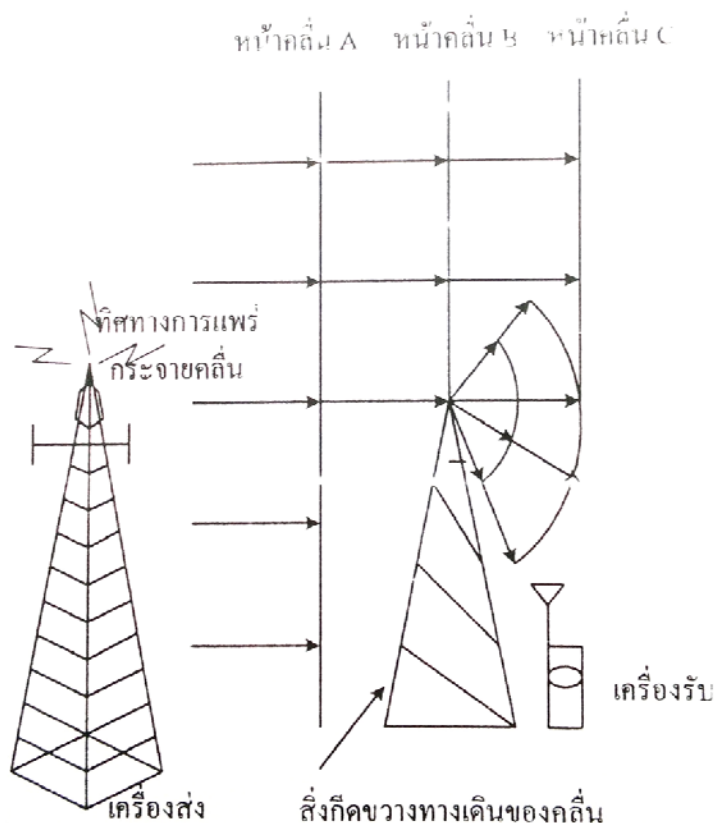


ภาพที่ 2.7 หลักการของฮอยเกนส์

ที่มา : Parsons J.D.(2000)

ค่าแอมพลิจูดของคลื่นในทิศทางต่างๆ จะไม่เท่ากัน โดยมีค่าเป็น  $(1 + \cos \theta)$  ตัวอย่างเช่น ถ้าคลื่นที่แพร่กระจายออกไปทำมุม  $\theta = 0$  จะมีแอมพลิจูดสูงสุด คือ มีค่าเท่ากับ 2 และหากคลื่นแพร่กระจายในทิศทางตรงกันข้าม ( $\theta = 180^\circ$ ) แอมพลิจูดจะมีค่าเท่ากับ 1 เป็นต้น ผลรวมของคลื่นเหล่านี้ที่จุดกำเนิดต่างๆ บนหน้าคลื่น A จะเกิดเป็นหน้าคลื่นใหม่ (หน้าคลื่น B) ซึ่งมีทิศตั้งฉากกับทางเดินของระนาบคลื่น จากซ้ายไปขวามือ ในภาพที่ 2.7 และทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่น B ก็จะเป็นจุดกำเนิดคลื่น เช่นเดียวกับหน้าคลื่น A และจะกำเนิดหน้าคลื่นใหม่ ซึ่งเกิดทางด้านขวามือของหน้าคลื่น B ไปเรื่อยๆ ทำให้เกิดหน้าคลื่นใหม่เคลื่อนที่จากซ้ายไปขวามือไปเรื่อยๆ

หากมีสิ่งกีดขวางทางเดินของคลื่นดังแสดงในภาพที่ 2.8 ในขณะที่หน้าคลื่นอยู่ในตำแหน่ง B (หน้าคลื่น B) จุดที่ปลายของสิ่งกีดขวางบนหน้าคลื่น B จะเป็นจุดกำเนิดคลื่น ซึ่งแพร่กระจายไปรอบๆ จุดกำเนิด และสามารถแพร่กระจายมายังเครื่องรับได้ ดังนั้นแม้ว่าจะมีสิ่งกีดขวางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ แต่จากการเลี้ยวเบนของคลื่นวิทยุ ทำให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้

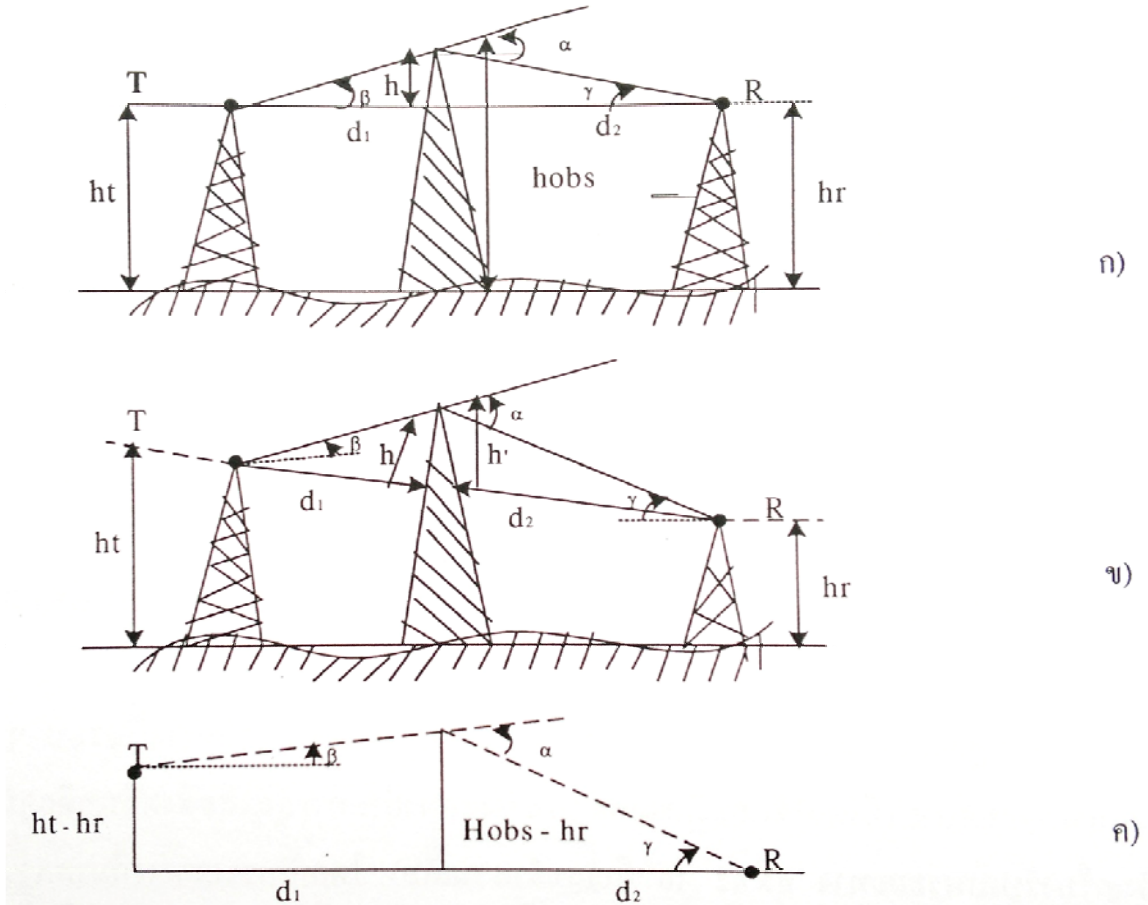


ภาพที่ 2.8 การเลี้ยวเบนของคลื่นที่เหลี่ยมคมของสิ่งกีดขวาง

ที่มา : Parsons J.D.(2000)

**2.6.1 เรขาคณิตเขตเฟรเนล (Fresnel Zone Geometry)**

การสูญเสียกำลังจากการเลี้ยวเบนจะพิจารณาจากเครื่องส่งและเครื่องรับที่มีสิ่งกีดขวางกั้น อยู่ตรงกลางดังภาพที่ 2.9 ถ้ากำหนดให้ความสูงของสิ่งกีดขวางเท่ากับ  $h$  วางอยู่ที่ระยะทาง  $d_1$  จากเครื่องส่ง และ  $d_2$  จากเครื่องรับ โดยที่  $h \ll d_1, d_2$  และ  $h \gg \lambda$  แล้ว ผลต่างระหว่างแนววิถีตรง และแนววิถีการเลี้ยวเบน  $\Delta$  หาได้จาก



ภาพที่ 2.9 ไดอะแกรมของเรขาคณิต การเลี้ยวเบนผ่านเหลี่ยมคม

ที่มา : Parsons J.D.(2000)

$$\Delta \approx \frac{h^2}{2} \left( \frac{d_1+d_2}{d_1d_2} \right)$$

สมการที่ 2.23

มุมต่างเฟสของสัญญาณ จากวิถีคลื่นทั้งสองแนวหาได้จาก

$$\phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{h^2}{2} \right) \frac{d_1+d_2}{d_1d_2}$$

สมการที่ 2.24

และเมื่อ  $\tan x \approx x$  แล้ว  $\alpha = \beta + \gamma$  จากภาพที่ 2.9 ก) และ

$$\alpha \approx h \left( \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right) \quad \text{สมการที่ 2.25}$$

โดยกำหนดให้พารามิเตอร์การเลี้ยวเบน เฟรเนลคอร์ซอพฟ์  $v$  (ไม่มีหน่วย) คือ

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = \alpha \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}} \quad \text{สมการที่ 2.26}$$

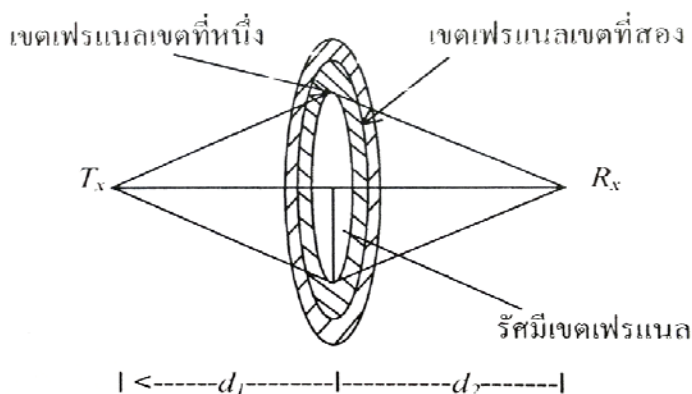
ซึ่ง  $\alpha$  มีหน่วยเป็นเรเดียน ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ข) และ 2.9 ค)) จากสมการที่ 2.26

ค่า  $\phi$  หาได้จาก

$$\phi = \frac{\pi}{2} v^2 = \frac{\pi \alpha^2}{\lambda} \left( \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right) \quad \text{สมการที่ 2.27}$$

จะเห็นว่า ความต่างเฟสระหว่างคลื่นวิถีตรง และคลื่นเลี้ยวเบนเป็นฟังก์ชันของความสูง และตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง รวมถึงตำแหน่งของเครื่องส่งและเครื่องรับด้วย อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ความสูงของเครื่องส่ง และสิ่งกีดขวาง จะถูกลบด้วยความสูงของเครื่องรับดังภาพที่ 2.9 ค) ทำให้การหาค่ามุมต่างๆ ทำได้ง่ายขึ้น

แต่ละเขตเฟรเนลห่างกันครึ่งความยาวคลื่น



ภาพที่ 2.10 วงกลมที่มีจุดศูนย์กลางรวมกัน ซึ่งใช้นิยามขอบเขตสำหรับเขตเฟรเนล

ที่มา : ศุภชัย ไพบุญย์ (2551)

การสูญเสียกำลังจากการเลี้ยวเบนที่เป็นฟังก์ชัน ของผลต่างวิถีที่เกิดขึ้นรอบๆ สิ่งกีดขวาง นั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีเขตเฟรเนล ซึ่งแสดงย่านการสูญเสียซึ่งคลื่นทุกขุมิเดินทางไปยังเครื่องรับเป็นระยะทาง  $n\lambda/2$  ( $n$  คือเลขจำนวนเต็ม) โดยเป็นระยะทางที่มากกว่าระยะทางในแนวสายตาจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ เรามาพิจารณาภาพที่ 2.10 ซึ่งแสดงระนาบตั้งฉากที่วางอยู่ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ และวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันบนระนาบแสดงตำแหน่งของคลื่นทุกขุมิ ซึ่งแพร่กระจายไปยังเครื่องรับโดยมีความยาววิถีเพิ่มขึ้น  $\lambda/2$  จาก วงกลม

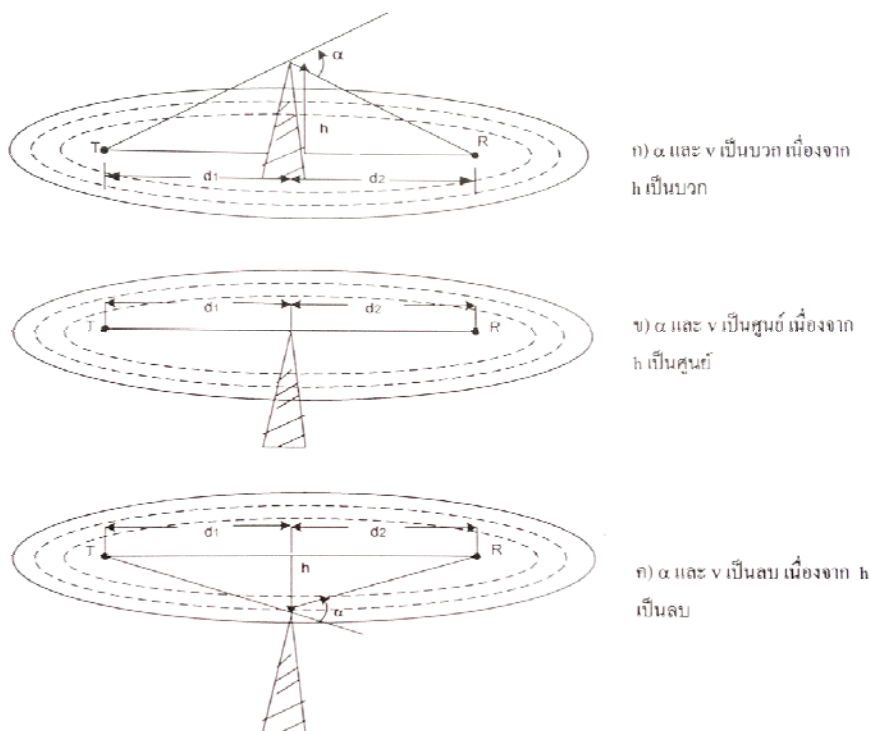


ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เราเรียกวงกลมเหล่านี้ว่า “เขตเฟรเนล” โดยเขตเฟรเนลนี้มีผลกระทบต่อ การเสริมกันและหักกลับกันของสัญญาณรวมที่เครื่องรับ ถ้าให้  $r_n$  เป็นรัศมีที่  $n$  ของวงกลมในเขตเฟรเนลนี้แล้ว  $r_n$  สามารถแสดงอยู่ในเทอมของ  $n, \lambda, d$  และ  $d_2$  ได้ดังนี้

$$h = r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad \text{สมการที่ 2.28}$$

โดยมีเงื่อนไขว่า  $d_1, d_2 \gg r_n$

ความยาวคลื่นเดี่ยวเบนส่วนที่เกินความยาวคลื่นในแนวสายตา มีค่า  $n\lambda/2$  สำหรับในแต่ละวงกลม โดยที่ค่า  $n$  เป็น เลขจำนวนเต็มซึ่ง  $n = 1$  คือวงกลมที่เล็กที่สุด ดังในภาพที่ 2.10 ดังนั้น ความยาววิถีคลื่นเดี่ยวเบนจะมีค่ามากกว่า ความยาวคลื่นในแนวสายตา ( $d_1 + d_2$ ) อยู่  $\lambda/2$  ส่วนวงกลมถัดไปคือที่  $n = 2, 3$  นั้น ความยาวส่วนเกินนี้จะมีค่า  $\lambda, 3\lambda/2, \dots$  ตามลำดับ เป็นต้น และรัศมีของวงกลมเหล่านี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของระนาบเขตเฟรเนล ในภาพที่ 2.10 จะมีรัศมีค่าสูงสุด ถ้าระนาบนี้อยู่กึ่งกลางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ สำหรับค่า  $v$  คือ การเดี่ยวเบนเฟรเนลเคอร์ซอพฟ์



ภาพที่ 2.11 เขตเฟรเนลสำหรับการเดี่ยวเบนจากเหลี่ยมคมในลักษณะต่างๆ มีผลกระทบต่อ สัญญาณที่รับได้เมื่อมีสิ่งกีดขวางทางเดินของคลื่น (Shadowing)

ที่มา : Theodore S.Rappaport (2002)

ในระบบสื่อสารเคลื่อนที่นั้น การสูญเสียกำลังจากการเลี้ยวเบน เกิดขึ้นจากการบังคลื่นทุติยภูมิ ทำให้มีเพียงพลังงานบางส่วนเท่านั้นที่เลี้ยวเบนไปรอบๆ สิ่งกีดขวางนั้น นั่นคือ สิ่งกีดขวางให้เกิดการบังของพลังงาน บางส่วนของเขตเฟรเนล ดังนั้นจึงมีพลังงานบางส่วนเท่านั้นที่สามารถเดินทางไปถึงเครื่องรับได้ นอกจากนี้ความสูงและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางมีผลต่อการสูญเสียกำลังการเลี้ยวเบนอีกด้วย พิจารณาภาพที่ 2.11 ขอบเขตของเขตเฟรเนลที่เป็นไปได้ จะอยู่ในเขตวงรี โดยมีจุดโฟกัส อยู่ที่ตำแหน่ง สายอากาศเครื่องส่ง และสายอากาศเครื่องรับ ภาพที่ 2.11 ก ถึง ค แสดงการเลี้ยวเบนจากเหลี่ยมคมของสิ่งกีดขวาง เมื่อสิ่งกีดขวางมีความสูงเทียบกับเส้นแนวสายตา จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ ทำให้ค่า  $\alpha$  และ  $\nu$  เปลี่ยนไป โดยค่าเหล่านี้หาได้จากสมการที่ 2.26

## 2.6.2 แบบจำลองการเลี้ยวเบนบริเวณขอบเหลี่ยมคม (Knife-Edge Diffraction Model)

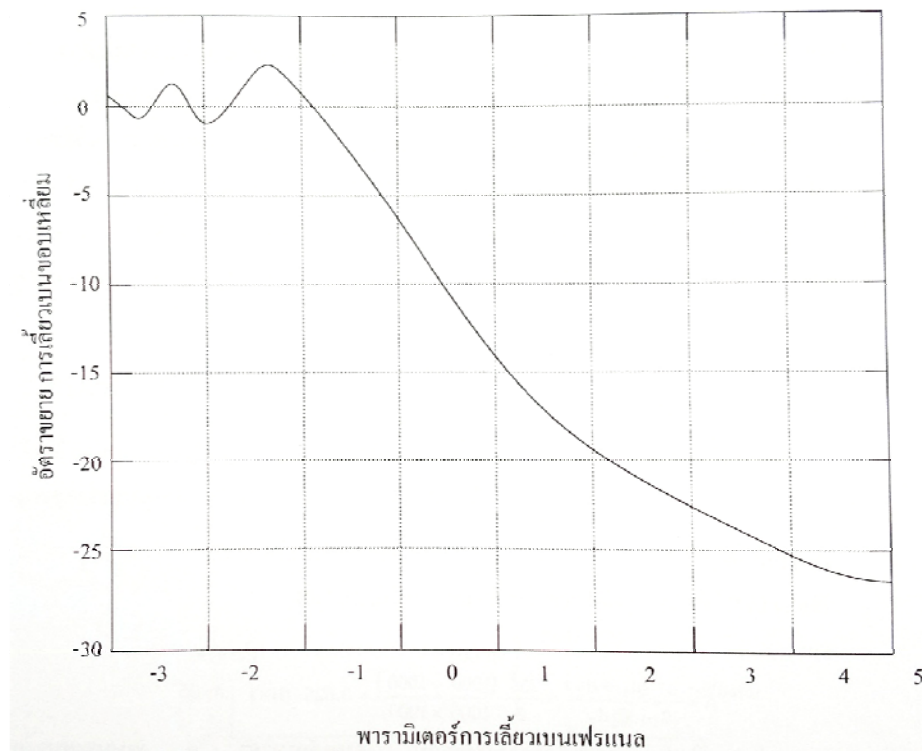
การหาค่ากำลังของสัญญาณที่รับได้เมื่อคลื่นเดินทางเลี้ยวเบนผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น ภูเขา หรือ ตึก นั้นเป็นสิ่งสำคัญในการทำนายพื้นที่เขตบริการเป็นอย่างดี โดยทั่วไปการหาค่ากำลังสูญเสียจากการเลี้ยวเบนที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงเป็นสิ่งที่สามารถทำได้ ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำให้ทฤษฎีการประมาณการโดยใช้แฟคเตอร์ที่จำเป็นบางอย่างเพื่อให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องสูง แม้ว่าการคำนวณการสูญเสียจากการเลี้ยวเบนผ่านภูมิประเทศที่ซับซ้อนจะทำได้ยาก แต่สำหรับการหาค่ากำลังสูญเสียในกรณีที่สิ่งกีดขวางที่รูปร่างไม่ซับซ้อน และมีเพียงสิ่งเดียวนั้น สามารถทำได้ง่ายโดยใช้การหาค่าตอบคลาสิกคอลลเฟรเนล ดังนี้

พิจารณาภาพที่ 2.11 เครื่องรับวางอยู่ที่ตำแหน่ง R บริเวณสิ่งกีดขวาง (อาจเรียกว่า บริเวณการเลี้ยวเบน ความเข้มสนามคลื่นที่จุด R คือ ผลรวมทางเวกเตอร์ของสนามคลื่นที่เกิดจากจุดกำเนิดทุติยภูมิฮอยเกนส์ในระนาบเหนือขอบเหลี่ยมคม ความเข้มสนามไฟฟ้า  $E_d$  ของคลื่นเลี้ยวเบนกำหนดโดย

$$\frac{E_d}{E_0} = F(\nu) = \frac{(1+j)}{2} \int_0^\infty \exp(-j\frac{\pi}{2}t^2) dt \quad \text{สมการที่ 2.29}$$

เมื่อ  $E_0$  คือ ความเข้มสนามไฟฟ้าช่องว่างอากาศ โดยไม่มีส่วนของคลื่นที่สะท้อนมาจากพื้นดินหรือ ขอบเหลี่ยมคม และ  $F(\nu)$  คือ อินทิเกรลเฟรเนลเชิงซ้อน (Complex Fresnel Integral) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรเนล-เคอร์ชอฟฟ์  $\nu$  ที่หาได้จากสมการที่ 2.26 ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยใช้ตาราง หรือ กราฟสำหรับ เมื่อกำหนดค่า  $\nu$  สำหรับอัตราขยายการเลี้ยวเบนเนื่องจากการเลี้ยวเบนที่ขอบเหลี่ยมคม เมื่อเปรียบเทียบกับสนามคลื่น E แบบช่องว่างอากาศ หาได้จากสมการ

$$G_d(\text{dB}) = 20 \log|F(\nu)| \quad \text{สมการที่ 2.30}$$



ภาพที่ 2.12 อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมที่ค่า  $v$  ต่างๆ

ที่มา : Theodore S.Rappaport (2002)

จากกราฟภาพที่ 2.12 การหาค่าอัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมที่ค่า  $v$  ต่างๆ และจากวิธีการของแบบจำลองลิ้นสามารถหาค่าอัตราขยายดังกล่าวโดยประมาณได้ดังนี้

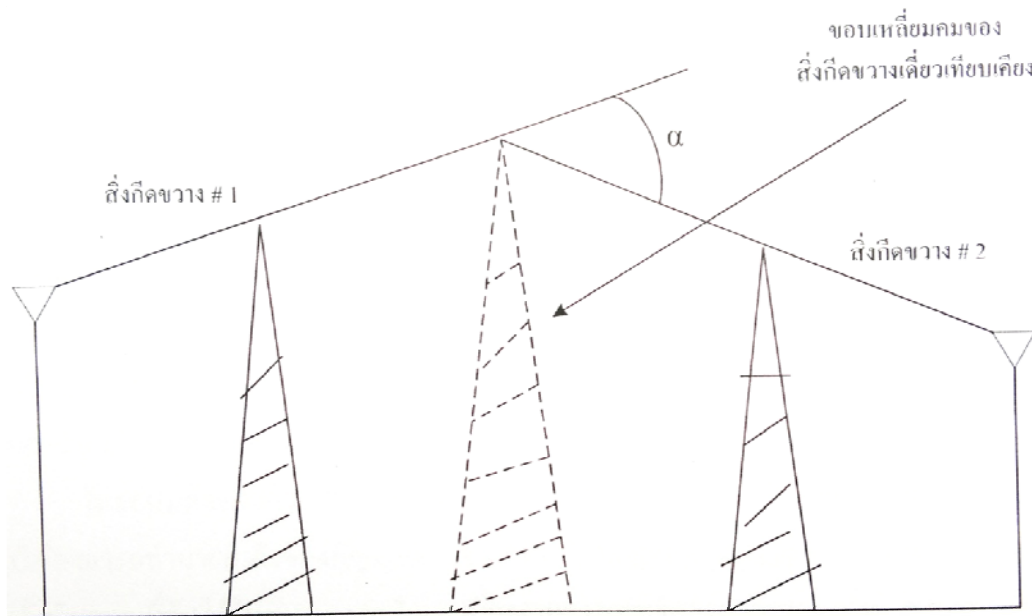
$$\begin{aligned}
 G_d(\text{dB}) &= 0 & v &\leq -1 \\
 G_d(\text{dB}) &= 20 \log(0.5 - 0.62v) & -1 &\leq v \leq 0 \\
 G_d(\text{dB}) &= 20 \log(0.5 \exp(-0.95v)) & 0 &\leq v \leq 1 \\
 G_d(\text{dB}) &= 20 \log\left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2}\right) & 1 &\leq v \leq 2.4 \\
 G_d(\text{dB}) &= 20 \log\left(\frac{0.225}{v}\right) & v &> 2.4
 \end{aligned}$$

สมการที่ 2.31

### 2.6.3 แบบจำลองการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมแบบหลายทาง (Multiple Knife-Edge Diffraction)

การเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมของคลื่นนั้น ในทางปฏิบัติการเลี้ยวเบน อาจเกิดจาก สิ่งกีดขวางมากกว่าหนึ่งก็ได้ ดังนั้น การสูญเสียกำลังจากการเลี้ยวเบนจึงต้องคิดรวมทั้งหมด วิธีหนึ่งที่อาจนำมาใช้ก็คือ วิธีของ บัลลิงตัน (Bullington) กล่าวว่า “สิ่งกีดขวางที่อนุกรมกันอยู่ สามารถแทนได้ด้วยสิ่งกีดขวางเดี่ยวเทียบเคียง” เพื่อให้การหาค่าการสูญเสียกำลังจากวิธีสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองการสูญเสียกำลังจากการเลี้ยวเบน ขอบเหลี่ยมของสิ่งกีดขวางเดี่ยว ตัวอย่าง

การเลี้ยวเบนขอบคมของสิ่งกีดขวาง 2 สิ่ง สามารถแทนได้ด้วยขอบคมของสิ่งกีดขวางเดียว ดังภาพที่ 2.13



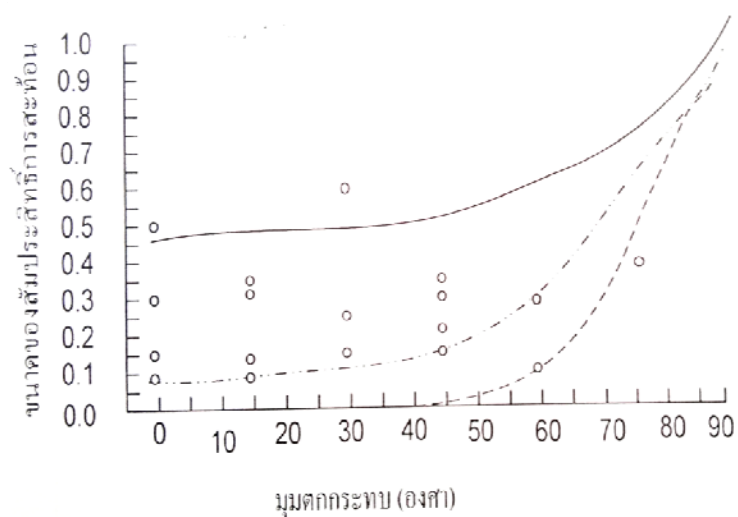
ภาพที่ 2.13 หลักการของขอบเหลี่ยมคมของสิ่งกีดขวางเทียบเคียง  
ที่มา : Theodore S.Rappaport (2002)

## 2.7. การกระจัดกระจาย (Scattering)

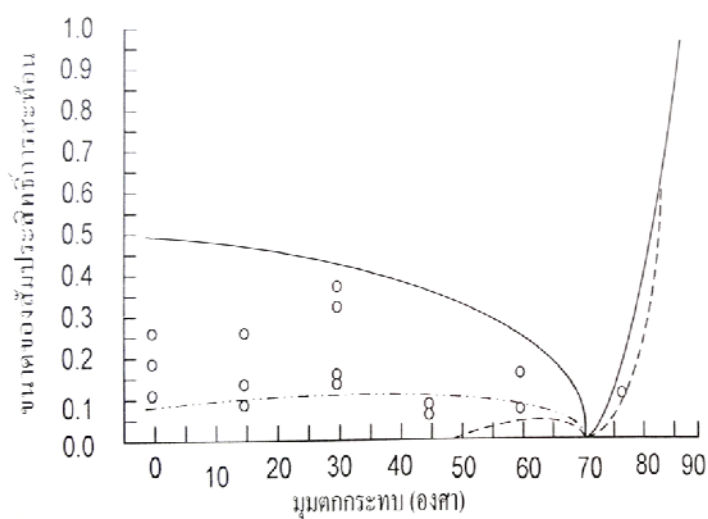
การรับสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยทั่วไปจะมีความแรงของสัญญาณมากกว่าค่าสัญญาณที่ทำนายจากแบบจำลองการสะท้อนและการเลี้ยวเบนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เป็นเพราะว่าคลื่นตกกระทบผิววัตถุที่ขรุขระ พลังงานจะถูกแผ่ออกในทุกทิศทาง เนื่องจากการจัดกระจายนี้เอง วัตถุต่างๆ เช่น โคมไฟบนท้องถนนและต้นไม้ ก็เป็นสิ่งที่สามารถกระจายพลังงานคลื่นได้ทุกทิศทาง เช่นเดียวกัน คลื่นกระจัดกระจายเหล่านี้เอง ทำให้กำลังที่เครื่องรับมีความแรงขึ้นได้วัตถุผิวเรียบที่มีขนาดใหญ่กว่า ความยาวคลื่นนั้น ก็คือ ผิวสะท้อนคลื่น แต่หากเป็นพื้นผิวที่ขรุขระ (พื้นผิวเรียบมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น) จะทำให้การสะท้อนคลื่นแตกต่างไปจากผิวสะท้อน คลื่นจากวัตถุพื้นผิวเรียบ การทดสอบความขรุขระของพื้นผิวมักใช้วิธีเกณฑ์แบบเรย์ลี (Rayleigh Criterion) ซึ่งกำหนดเกณฑ์ความสูง ( $h_c$ ) ของปมที่ผิว สำหรับมุมตกกระทบที่กำหนด

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i} \quad \text{สมการที่ 2.32}$$

พื้นผิวจะเป็นแบบราบเรียบถ้าความสูงของปมที่ผิวต่ำสุดถึงสูงสุด  $h$  มีค่าน้อยกว่า  $h_c$  และพื้นผิวเป็นผิวขรุขระ ถ้าความสูงของปมที่ผิวมีค่ามากกว่า  $h_c$  การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถหาได้จากการกำหนดค่าแฟคเตอร์การสูญเสียจากการกระจัดกระจาย  $P_s$  จากสมการของเอเมนต์ (Ament)



ก) การโพลาไรซ์แนวตั้ง



ข) การโพลาไรซ์แนวนอน

ภาพที่ 2.14 สัมประสิทธิ์การสะท้อนกับมุมตกกระทบของผนังหินขรุขระ

ที่มา : Theodore S.Rappaport (2002)

$$\rho_s = \exp \left[ -8 \left( \frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad \text{สมการที่ 2.33}$$

เมื่อ  $\sigma_h$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงของผิว ของค่าเฉลี่ยความสูงของผิว ค่าแฟคเตอร์การสูญเสียจากการกระจัดกระจายให้ถูกพัฒนาให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดย บอยเทียส (Boithius) ดังนี้

$$\rho_s = \exp \left[ -8 \left( \frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] I_0 \left[ 8 \left( \frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad \text{สมการที่ 2.34}$$

เมื่อ  $I_0$  คือ ฟังก์ชัน เบสเวลของจำพวกแรกและลำดับศูนย์ สนามคลื่นสะท้อน  $E$  สำหรับ  $h > h_c$  สำหรับผิวสะท้อนขรุขระหาได้จาก

$$\Gamma_{\text{rough}} = \rho_s \Gamma \quad \text{สมการที่ 2.35}$$

ภาพที่ 2.14 ก) และ ข) แสดงผลการทดสอบโดยเลนดรอน (Landron) โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน เปรียบเทียบกับสมการที่ 2.33 และ 2.34 ของผนังหินขรุขระ ซึ่งพิสูจน์ว่าสมการทั้งสองสามารถหาค่าได้อย่างถูกต้อง

ในระบบสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุนี้ หากทราบตำแหน่งวัตถุที่ทำให้คลื่นกระจัดกระจาย ก็จะทำให้สามารถทำนายกำลังของสัญญาณ จากคลื่นที่กระจัดกระจายนี้ได้อย่างแม่นยำ การคำนวณกำลังสัญญาณที่รับได้ในระยะไกล เนื่องจากการกระจัดกระจายของคลื่น สามารถหาได้จากสมการ

$$P_R(\text{dBm}) = P_T(\text{dBm}) + G_T(\text{dBi}) + 20 \log(\lambda) + \text{RCS}[\text{dBm}^2] - 30 \log(4\pi) - 20 \log d_T - 20 \log d_R \quad \text{สมการที่ 2.36}$$

เมื่อ  $d_T$  และ  $d_R$  เป็นระยะทางจากวัตถุกระจัดกระจายคลื่น ถึงเครื่องส่งและเครื่องรับตามลำดับในสมการที่ 2.36 นั้นวัตถุกระจัดกระจายถูกกำหนดให้อยู่ในเขตสนามระยะไกล และได้กำหนดค่าภาคตัดขวางเป้าเรดาร์ (Radar Cross Section, RCS) ของวัตถุกระจัดกระจายให้เท่ากับ อัตราส่วนความหนาแน่นกำลังของสัญญาณ กระจัดกระจายในทิศทางของเครื่องรับ ต่อความหนาแน่นกำลังของคลื่นวิทยุที่ตกกระทบบนวัตถุกระจัดกระจายคลื่น มีหน่วยเป็น ( $\text{m}^2$ ) ได้มีผู้หาค่า RCS สำหรับอาคารขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ที่ตั้งอยู่ที่ระยะห่าง 5-10 กิโลเมตร มีค่าในช่วง 14.1 dB.  $\text{m}^2$  ถึง 55.7 dB.  $\text{m}^2$

สรุปกลไกพื้นฐานการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วย การสะท้อน การหักเห และการกระจัดกระจาย เมื่อคลื่นเดินทางไปตามกระทบตัวกลางอื่น คลื่นจะเกิดการสะท้อนโดยขึ้นกับมุมตกกระทบชนิดของตัวกลาง ตลอดจน โพลาริเซชัน การหักเหเกิดเมื่อคลื่นพบกับสิ่งกีดขวาง คลื่นจะสูญเสียกำลังไปส่วนหนึ่ง ขึ้นอยู่กับมุมหักเห หรือความสูงของสิ่งกีดขวาง และสุดท้ายการกระจัดกระจายเกิดเมื่อผิวของวัตถุที่คลื่นตกกระทบเป็นผิวที่เป็นปมขรุขระ โดยพื้นที่ผิวเรียบมีขนาดน้อยกว่าความยาวคลื่น

## 2.8. การทำนายการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

การทำนายการแพร่กระจายคลื่นวิทยุนี้ ถูกแบ่งออกตามชนิดของสถานีฐานที่ติดตั้งในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ กล่าวคือ สถานีฐานขนาดใหญ่ (Macrocell) การทำนายการแพร่กระจายคลื่นนิยมใช้แบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical Models) เป็นแบบจำลองที่ได้จากการ

วิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลจากการตรวจวัดสัญญาณคลื่นในภูมิภาคต่างๆ เช่น พื้นที่เขตตัวเมือง ชานเมือง ที่ราบ เป็นต้น บางครั้งเรียกแบบจำลองนี้ว่า แบบจำลองทางสถิติ (Statistical Model) แบบจำลองชนิดนี้ได้แก่ แบบจำลองของ โอคุมุระ (Okumura) และ ฮาตะ (Hata) แบบจำลองนี้ใช้ประโยชน์ในการหาพื้นที่เขตบริการและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานขนาดใหญ่ที่เหมาะสมเพื่อให้พื้นที่เขตบริการครอบคลุมมากที่สุด สำหรับการทำนายการแพร่กระจายคลื่นของสถานีฐานขนาดเล็ก (Microcell) ซึ่งใช้สำหรับพื้นที่ขนาดเล็กนิยมใช้แบบจำลองวอล์ฟสซ์ – ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami) แบบจำลองชนิดนี้จำเป็นต้องใช้ข้อมูลแผนที่ภูมิศาสตร์ของสภาพแวดล้อมการแพร่กระจายคลื่นและข้อมูลจากการสำรวจพื้นที่ เพื่อใช้ในการคำนวณ ทำให้ต้องใช้เวลาอย่างมาก อย่างไรก็ตาม การทำนายการแพร่กระจายคลื่นแบบจำลองข้างต้น อาจไม่สามารถทำนายค่าได้ถูกต้องนัก เนื่องจากธรรมชาติของการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมที่ คลื่นสามารถเดินทางได้หลายทิศทางนั้นมีความซับซ้อนและคลุมเครือ (Fuzzy) มาก เนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่มีความไม่สม่ำเสมอ จำนวนของสิ่งกีดขวางทางเดินคลื่นที่ และการจัดกระจายของคลื่นในทิศทางต่างๆ นอกจากนี้โครงสร้างของอาคารที่ทำมาจากวัสดุต่างๆ ก็มีความแตกต่างกันในแต่ละแห่งภายในสภาพแวดล้อมของการแพร่กระจายคลื่นนั้น รวมถึง ต้นไม้ แผ่นป้ายโฆษณา โคมไฟตามท้องถนน เสาไฟฟ้า ฯลฯ สิ่งต่างๆ เหล่านี้ล้วนมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นทั้งสิ้น และเป็นเรื่องยากที่จะหาผลกระทบของสิ่งเหล่านี้ ต่อการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์ ดังนั้น แนวคิดของแบบจำลองเชิงปัญญาจึงเกิดขึ้น โดยอาศัยการแยกแยะสภาพแวดล้อมของการแพร่กระจายคลื่นและข้อมูลการตรวจวัดสัญญาณเพื่อการเรียนรู้และทดสอบแบบจำลองดังกล่าว

### 2.8.1 แบบจำลองเชิงประจักษ์

แบบจำลองชนิดนี้ใช้ข้อมูลจากการสำรวจการแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น ในตัวเมืองที่มีความหนาแน่นของตัวอาคารสูง , พื้นที่เขตชานเมืองที่มีบ้านพักอาศัย และพื้นที่โล่งแจ้ง เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาทำเป็นกราฟ และสมการของการแพร่กระจายคลื่นเพื่อนำมาใช้เป็นแบบจำลองสำหรับพื้นที่อื่นๆ ที่มีสภาพแวดล้อมที่คล้ายคลึงกัน แบบจำลองนี้จึงเป็นที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ใช้งานง่าย มีความรวดเร็วในการทำนาย เช่น แบบจำลองของ โอคุมุระ และฮาตะ นิยมใช้สำหรับพื้นที่ในเขตตัวเมืองและชานเมือง และแบบจำลองของ วอล์ฟสซ์-ไอเคกามิ นิยมใช้สำหรับสภาพแวดล้อมในตัวเมืองที่มีความหนาแน่นของตัวอาคารสูงจำนวนมาก และยังเหมาะสมกับการแพร่กระจายคลื่นของสถานีฐานขนาดเล็ก ซึ่งต้องการความแม่นยำในการทำนายสูงอีกด้วย

## 2.8.2 แบบจำลองกำลังสูญเสียตามวิถีขึ้นกับระยะทาง (Log – Distance Path Loss Model)

การหาแบบจำลองกำลังสูญเสียตามวิถีที่แปรตามระยะทางเพียงอย่างเดียว เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากเป็นแบบจำลองอย่างง่าย สามารถทำนายการแพร่กระจายคลื่นได้ดี ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวางทางเดินของคลื่นมากนัก ใช้ได้ทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร แบบจำลองกำลังสูญเสียตามวิถีที่ขึ้นกับระยะทางดังกล่าว หาได้จาก

$$PL(d)[dB] = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad \text{สมการที่ 2.37}$$

เมื่อ  $d_0$  คือระยะทางอ้างอิง ซึ่งอยู่ใกล้กับเครื่องส่ง  $d$  คือระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ และค่า  $n$  คือ เลขกำลังการสูญเสียตามวิถี กำลังสูญเสียตามวิถีในสมการที่ 2.37 เป็นค่าเฉลี่ยจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดสัญญาณที่ระยะทาง  $d$  เลขกำลังการสูญเสียตามวิถี  $n$  มีค่าขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คลื่นวิทยุเคลื่อนที่ผ่าน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 5 ดังตารางที่ 1.2 และจะมีค่าเปลี่ยนไป เมื่อสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลง (ศุภชัย ไพบูลย์, 2551)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างเลขกำลังการสูญเสียตามวิถีที่สภาพแวดล้อมต่างๆ

สภาพแวดล้อมของพื้นที่	เลขกำลังการสูญเสียตามวิถี (n)
ช่องว่างอวกาศ	2
ในเขตตัวเมือง	3.6
มีสิ่งกีดขวางในเขตตัวเมือง	5.0
ในเขตชนเมือง	2.16
ในเขตต้นไม้หนาแน่น	4.6
ภายในอาคารปฏิบัติการในชั้นเดียวกัน	4.5

กำลังสูญเสียตามวิถีในสมการที่ 2.37 เป็นค่าเฉลี่ยที่ระยะทาง  $d$  หากต้องการหาค่ากำลังสูญเสียตามวิถีที่ระยะทางใดๆ เราสามารถหาค่าได้จาก

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d) + X_\sigma = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad \text{สมการที่ 2.38}$$

เมื่อ  $X_\sigma$  คือ ตัวแปรสุ่มกระจายเกาส์เซียนเฉลี่ยศูนย์ (Zero – Mean Gaussian Distributed Random Variable) ในหน่วย dB ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma$  ซึ่งมีหน่วยเป็น dB เช่นเดียวกัน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานนี้ เป็นตัวบ่งชี้การบดบังวิถีคลื่น (Shadowing) กล่าวคือ หากมีการบดบังวิถีคลื่นมาก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่ามากตามด้วย ในทำนองเดียวกันหากมีการบดบังวิถีคลื่นน้อย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าต่ำ เป็นต้น



ในทางปฏิบัติค่า  $n$  และ  $\sigma$  สามารถคำนวณได้จากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดกำลังของสัญญาณ โดยใช้การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) เพื่อให้ค่าผิดพลาดกำลังสอยน้อยที่สุด มีผลทำให้ค่ากำลังสูญเสียตามวิธีจากการวัดและการทำงานมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุด ค่า  $PL(d_0)$  สามารถหาได้จากการวัด ค่ากำลังสูญเสียที่ระยะทาง  $d_0$  หรืออาจหาค่าจาก สมการการแพร่กระจายคลื่นผ่านช่องว่างอากาศ (สุภชัย ไพบุญย์, 2551)

### 2.8.3 แบบจำลองโอคุมูระ (Okumura Model)

เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เหมาะสำหรับการแพร่กระจายคลื่นในเขตตัวเมือง ใช้งานในย่านความถี่ 100 MHz ถึง 3000 MHz ที่ระยะทางห่างจากสถานีฐาน 1 กิโลเมตร ถึง 100 กิโลเมตร และใช้กับสถานีฐานที่มีสายอากาศสูงตั้งแต่ 30 ถึง 1000 เมตร

แบบจำลองของโอคุมูระได้มาจาก การสำรวจสัญญาณคลื่นในสภาพแวดล้อมต่างๆ โดยกำหนดให้สายอากาศของสถานีฐานสูง 200 เมตร ( $h_{te}$ ) และความสูงของสายอากาศเครื่องรับอยู่ที่ 3 เมตร ( $h_{re}$ ) สายอากาศทั้งสองเป็นแบบแนวตั้ง มีรูปแบบการกระจายคลื่นรอนทิศทาง (Vertical Omni-Directional) การวัดสัญญาณทำในย่านความถี่ 100 MHz ถึง 1920 MHz ที่ระยะทาง 1 กิโลเมตร ถึง 100 กิโลเมตร จากนั้นนำข้อมูลการสำรวจที่ได้มาพล็อตเป็นกราฟ ใช้งานแบบจำลองจะพิจารณาจากกราฟ และตัวแปรประกอบอื่นๆ ดังในสมการ

$$L_{50}(\text{dB}) = L_F + A_{\text{mu}}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{\text{AREA}} \quad \text{สมการที่ 2.39}$$

เมื่อ  $L_{50}$  คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ไคล์ที่ 50 ของกำลังสูญเสียตามวิธีการแพร่กระจายคลื่น

$L_F$  คือ การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นในอวกาศว่าง

$A_{\text{mu}}$  คือ ค่ากลางการลดทอน เทียบกับอวกาศว่าง

$G(h_{te})$  คือ แฟคเตอร์อัตราขยายความสูงของสายอากาศสถานีฐาน

$G(h_{re})$  คือ แฟคเตอร์อัตราขยายความสูงของสายอากาศเครื่องรับ

$G_{\text{AREA}}$  คือ อัตราขยายเนื่องจากลักษณะของสภาพแวดล้อม

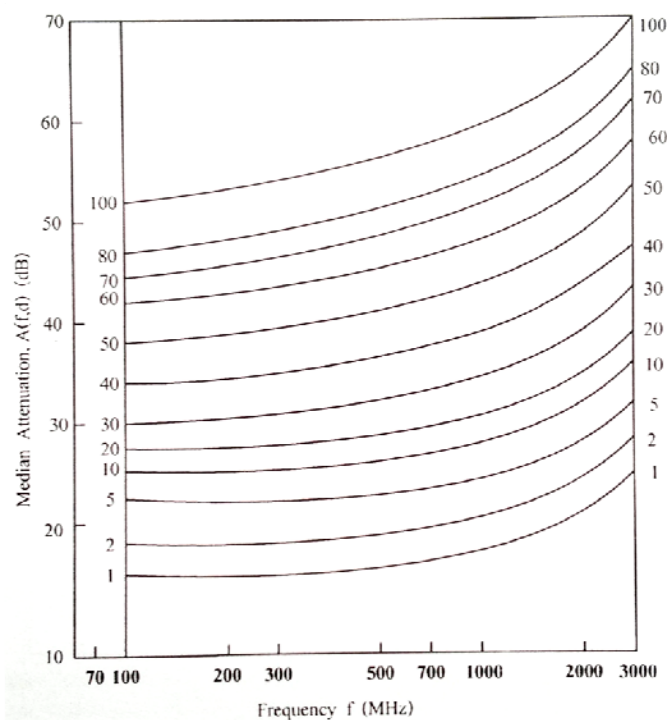
ค่า  $A_{\text{mu}}(f, d)$  และ  $G_{\text{AREA}}$  หาได้จากกราฟในภาพที่ 2.15 และ 2.16 ค่าอัตราขยายความสูงของสายอากาศข้างต้น แสดงในหน่วย [dB] ได้ดังนี้

$$G(h_{te}) = 20 \log \left( \frac{h_{te}}{200} \right) \quad 1000 \text{ m} > h_{te} > 30 \text{ m}$$

$$G(h_{re}) = 20 \log \left( \frac{h_{re}}{3} \right) \quad h_{re} \leq 3 \text{ m}$$

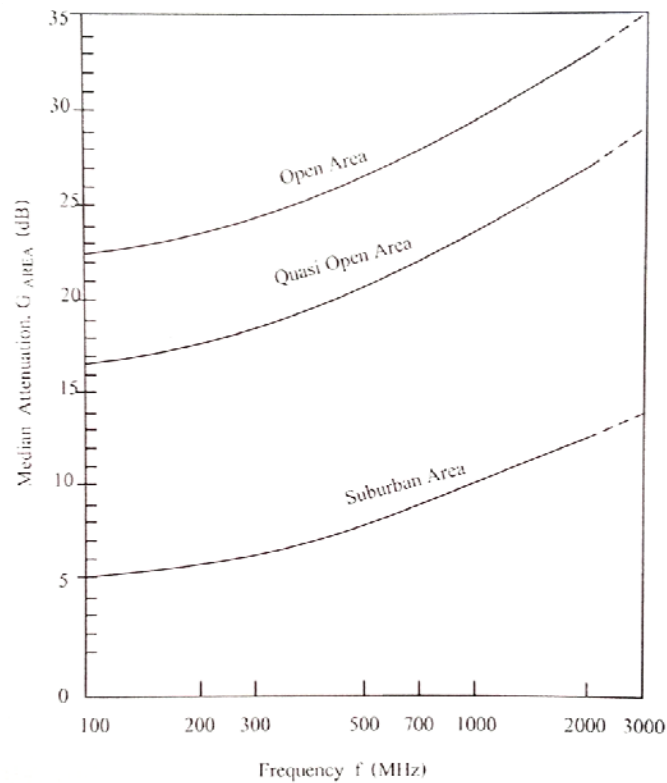
$$G(h_{re}) = 20 \log \left( \frac{h_{re}}{3} \right) \quad 10 \text{ m} > h_{re} > 3 \text{ m} \quad \text{สมการที่ 2.40}$$

แบบจำลองไอคูมูระนี้ ได้มาจากข้อมูลการตรวจวัดเพียงอย่างเดียว ดังนั้น หากสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปค่าที่ทำงานได้อาจมีความผิดพลาดสูง อย่างไรก็ตามแบบจำลองดังกล่าวยังเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีความง่ายในการใช้งาน และจะทำนายค่าได้ถูกต้องมากในสภาพแวดล้อมที่เป็นที่โล่งแจ้ง



ภาพที่ 2.15 การลดทอนสัญญาณในสภาพแวดล้อมต่างๆ ของแบบจำลองไอคูมูระ

ที่มา : ลัญจนกร วุฒิสัทธาภิบาล (2542)



ภาพที่ 2.16 แพลตฟอร์มการแพร่กระจายเนื่องจากลักษณะของสภาพแวดล้อม  
ที่มา : ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ (2542)

#### 2.8.4 แบบจำลองฮาทะ(Hata Model)

แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุที่ต้นคิดโดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่น ชื่อ ฮาทะ นี้ เป็นแบบจำลองที่กำหนดขึ้นจากการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลการแพร่กระจายคลื่นที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ จากแบบจำลองโอคูมูระ ซึ่งแบบจำลองฮาทะอยู่ในรูปของสมการทำให้ง่ายในการใช้งาน โดยอยู่ในรูปของกำลังสูญเสียตามวิธีดังนี้ (ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ , 2542)

$$PL(\text{dB}) = C_1 + C_2 \log(f) - 13.82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + [44.9 - 6.55 \log(h_{te})] \log(d) + C_0 \quad \text{สมการที่ 2.41}$$

โดยที่

$$PL(\text{dB}) = \text{กำลังสูญเสียตามวิธี (dB)}$$

$$f = \text{ความถี่ (MHz)}$$

$$d = \text{ระยะทางระหว่างสถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่ (km) ซึ่งมีระยะทางอยู่ในช่วง 1 km ถึง 20 km}$$

$h_{te}$ =ความสูงประสิทธิภาพของสถานีฐาน (m) และมีความสูงอยู่ในช่วง 30m ถึง 300m

$$a(h_{re}) = (1.1 \log(f) - 0.7)h_{re} - (1.56 \log(f) - 0.8) \text{ สำหรับพื้นที่เขตตัวเมือง}$$

$$= 3.2 \log(11.75h_{re})^2 - 4.97 \quad \text{สำหรับพื้นที่เขตตัวเมืองหนาแน่น}$$

$h_{re}$ =ความสูงสายอากาศโทรศัพท์เคลื่อนที่ ( $1m < h_m < 10m$ )

$C1=69.55$  สำหรับความถี่ในช่วง 150 MHz ถึง 1000 MHz

$=46.3$  สำหรับความถี่ในช่วง 1500 MHz ถึง 2000 MHz

$C2=26.16$  สำหรับความถี่ในช่วง 150 MHz ถึง 1000 MHz

$=33.9$  สำหรับความถี่ในช่วง 1500 MHz ถึง 2000 MHz

$C0=0$  สำหรับพื้นที่เขตตัวเมือง

$=3$  dB สำหรับพื้นที่เขตตัวเมืองหนาแน่น

สมการที่ 2.41 อาจถูกแสดงในรูปที่สะดวกขึ้นไป

$$PL(dB) = L_0(dB) + [44.9 - 6.55 \log(h_{te})] \log(d) \quad \text{สมการที่ 2.42}$$

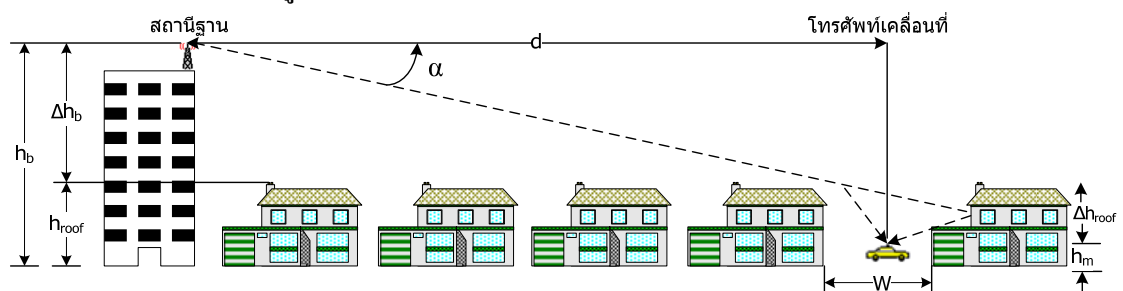
สำหรับแบบจำลองฮาดะที่ใช้กับพื้นที่ภูมิประเทศอื่นๆ นั้น มีความสัมพันธ์กับแบบจำลองที่ใช้ในเขตตัวเมืองดังนี้

$$PL(\text{เขตชานเมือง}) = PL(\text{เขตตัวเมือง}) - 2[\log(f/28)]^2 - 5.4 \quad \text{สมการที่ 2.43}$$

$$PL(\text{เขตชนบท}) = PL(\text{เขตตัวเมือง}) - 4.78[\log(f)]^2 + 18.33 \log(f) - 40.94 \quad \text{สมการที่ 2.44}$$

### 2.8.5 แบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)

แบบจำลองชนิดนี้ นิยมใช้สำหรับพื้นที่ในเขตตัวเมืองที่มีความหนาแน่นสูง โดยแบบจำลองชนิดนี้ จะใช้ข้อมูลบางอย่างของสภาพแวดล้อม มาใช้ในการคำนวณ ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 สภาพแวดล้อมของแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)

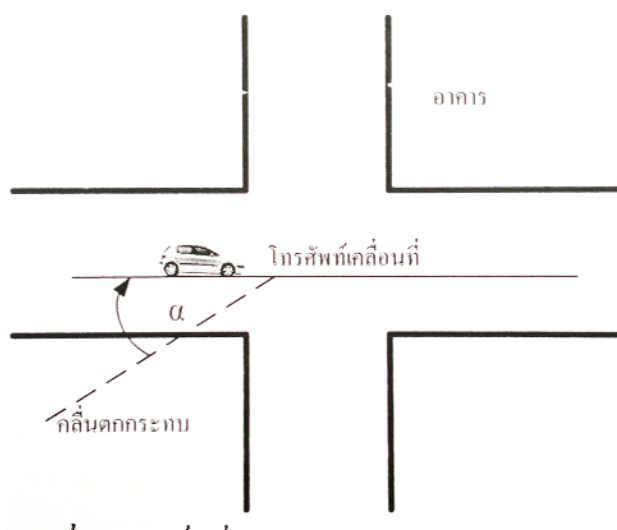
ที่มา : ศุภชัย ไพบูลย์ (2551)

พิจารณาตามภาพที่ 2.17 ค่าพารามิเตอร์ความกว้างของถนน ( $w$ ) ความสูงของสถานีฐาน ( $h_b$ ) และความสูงของอาคารขนาดเล็กรอบข้าง ( $h_{roof}$ ) โดยทั่วไปแบบจำลองนี้จะใช้ในกรณีที่สายอากาศ

สถานีฐานสูงกว่าอาคาร หรือความยาวของวิธีการแพร่กระจายคลื่นเหนืออาคาร เกินระยะทางสนามเข้าที่ (Settled Field),  $d_s$  ซึ่งหาได้จาก

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{(h_b - h_{\text{roof}})^2} \quad \text{สมการที่ 2.45}$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น และ  $h_{\text{roof}}$  คือ ความสูงเฉลี่ยของอาคารในแนวการแพร่กระจายคลื่นระหว่างสถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่ นอกจากนี้ถ้าความสูงเฉลี่ยของอาคารเกินกว่าความสูงของสายอากาศสถานีฐานแล้ว การทำนายสัญญาณคลื่น โดยใช้แบบจำลองวอลต์ฟิซซ์-ไอเคกามีจะให้ความผิดพลาดที่สูงกว่าปกติ



ภาพที่ 2.18 มุมที่คลื่นตกกระทบทำมุมกับแนวถนน  
ที่มา : สุภชัย ไพบูลย์ (2551)

แบบจำลองวอลต์ฟิซซ์-ไอเคกามี แบ่งเป็นแบบจำลองในแนวสายตา (LOS) และในแนวสิ่งกีดขวาง (NLOS)

$$PL(LOS) = 42.6 + 20 \log(f) + 26 \log(d) \quad \text{สมการที่ 2.46}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ว่า

$$PL(LOS) = L_0 + 10\gamma \log(d) \quad \text{สมการที่ 2.47}$$

โดยที่  $L_0$  คือ จุดตัดแกน และ  $\gamma$  คือความชันการลดทอนสัญญาณ มีค่าดังนี้

$$L_0 = 42.6 + 20 \log(f)$$

$$\gamma = 2.6$$

เราจะเห็นว่าค่าความชันการลดทอนสัญญาณที่มีค่าค่อนข้างต่ำนั้น เป็นไปได้เนื่องจากความสูงของสายอากาศที่ต่ำกว่าความสูงของอาคารนั้น เป็นผลทำให้เกิดท่อนำคลื่นตาม

แนวถนน ค่าความชันการลดทอนสัญญาณ จึงมีค่าใกล้เคียงกับการแพร่กระจายคลื่น ผ่านช่องว่าง  
 อวกาศสำหรับการแพร่กระจายคลื่นผ่านสิ่งกีดขวาง แบบจำลองหาได้จาก

$$PL(NLOS) = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) + L(\text{diff}) + L(\text{mult}) \quad \text{สมการที่ 2.48}$$

โดยที่

$f$  = ความถี่ หน่วย เมกะเฮิรตซ์ (MHz)

$d$  = ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ หน่วย กิโลเมตร (km)

$L(\text{diff})$  = ค่าสูญเสียจากการเลี้ยวเบนที่ยอดหลังคา

$L(\text{mult})$  = ค่าสูญเสียจากการเลี้ยวเบนหลายทางเนื่องจากอาคารรอบข้าง

$$L(\text{diff}) = -16.9 - 10 \log(\Delta w) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_m) + L(0) \quad \text{สมการที่ 2.49}$$

โดยที่

$W$  = ความกว้างของถนน หน่วยเป็นเมตร

$h_m$  = ความสูงสายอากาศโทรศัพท์เคลื่อนที่ หน่วยเป็นเมตร

$$\Delta h_m = h_{\text{roof}} - h_m$$

$L(0)$  = ค่าสูญเสียเนื่องจากมุมตกกระทบทำมุมกับแนวถนน ภาพที่ 2.18 กำหนด

โดย

$$L(0) = \begin{cases} -10 + 0.354\alpha & \text{สำหรับ } 0^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\alpha - 35) & \text{สำหรับ } 35^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ \\ 4 - 0.114(\alpha - 55) & \text{สำหรับ } 55^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases}$$

โดยที่

$\alpha$  = มุมเงยที่เกิดจากคลื่นตกกระทบทำมุมกับแนวถนน หน่วยเป็นองศา

$L(\text{mult})$  = ค่าสูญเสียจากการเลี้ยวเบน หลายทางเนื่องจากอาคารรอบข้างหาได้จาก

จาก

$$L(\text{mult}) = C_0 + C_a + C_d \log(d) + C_f \log(f) - 9 \log(b) \quad \text{สมการที่ 2.50}$$

โดยที่

$$C_0 = -18 \log(1 + \Delta h_{te}) \quad \text{กรณี } h_b > h_{\text{roof}} \quad (\text{เท่ากับ } 0 \text{ สำหรับ } h_b \leq h_{\text{roof}})$$

$$C_a = 54 - 0.8(\Delta h_{te}) \quad \text{กรณี } d \geq 0.5 \text{ km} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{สำหรับกรณี } h_b \leq h_{\text{roof}} \quad (\text{ถ้า } h_b > h_{\text{roof}})$$

$$= 54 - 1.3(\Delta h_{te}) \quad \text{กรณี } d < 0.5 \text{ km} \quad \text{แล้ว } C_a = 54$$

$C_d = 18 - 15(\Delta h_{te}/h_{roof})$  สำหรับ  $h_b \leq h_{roof}$  (เท่ากับ 18 สำหรับกรณี  $h_b > h_{roof}$ )

$$C_f = -4 + 0.7[(f/925) - 1] \text{ สำหรับเขตชานเมือง}$$

$$= -4 + 1.5[(f/925) - 1] \text{ สำหรับเขตตัวเมือง}$$

$h_b$  = ความสูงสายอากาศสถานีฐาน (m)

$h_{roof}$  = ความสูงเฉลี่ยของอาคารขนาดเล็กรอบข้าง มีค่าประมาณ 3 x จำนวนชั้นของอาคาร + ความสูงของโครงหลังคา (โดยทั่วไปมีค่า 3 เมตร หรือ 0 เมตร ในกรณีเป็นพื้นราบ)

$$\Delta h_b = h_b - h_{roof}$$

รวมสมการ (2.48)(2.49) และ (2.50) เราจะได้

$$PL(NLOS) = L_0 + (20 + C_d) \log(d) \quad \text{สมการที่ 2.51}$$

$$= L_0 + 10\gamma \log(d)$$

โดยที่

$$L_0 = 32.4 + (20 + C_f) \log(f) - 16.9 - 10 \log(w) + 20 \log(\Delta h_m) + L(0) + C_o + C_a - 9 \log(w)$$

$$\gamma = (20 + C_d)/10 \quad \text{สมการที่ 2.52}$$

ค่าคงที่การเลี้ยวเบน  $C_d$  นั้น ขึ้นอยู่กับความสูงอาคารรอบข้าง ซึ่งแปรเปลี่ยนจากสถานีหนึ่งไปยังสถานีอื่น ๆ ส่วนค่าความชันการลดทอนสัญญาณ  $\gamma$  แปรเปลี่ยนตามค่า  $C_d$  ด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงสายอากาศส่งและความสูงของอาคารอีกด้วย

### 2.8.6 แบบจำลองลี (Lee Model)

แบบจำลองชนิดนี้จะใช้กับภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบใน 2 รูปแบบ คือ แบบพื้นที่ต่อพื้นที่ (Area-to-Area Mode) และ แบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) สำหรับแบบพื้นที่ต่อพื้นที่จะได้ตามสมการที่ 2.53 (Parsons J.D , 2000)

$$PL(dB) = L_0 + \gamma \log(d) + F_0 \quad \text{สมการที่ 2.53}$$

โดยที่

$L_0$  = ค่าเฉลี่ยการสูญเสียที่ระยะ 1 กิโลเมตร

$\gamma$  = ความชันการสูญเสียของสัญญาณ

$F_0$  = ค่าปรับเปลี่ยนเฟลคเตอร์

สำหรับค่าของ  $L_0$  และ  $\gamma$  ให้พิจารณาตามตารางที่ 2.3

สำหรับค่าการปรับเปลี่ยนเฟคเตอร์  $F_0$  ที่ถูกชดเชยใช้ความแตกต่างของพารามิเตอร์แสดงตามสมการ

$$F_0 = F_1 F_2 F_3 F_4 \quad \text{สมการที่ 2.54}$$

โดยที่

$$F_1 = \left( \frac{\text{ความสูงสายอากาศสถานีฐานที่แท้จริง}}{\text{ความสูงสายอากาศสถานีฐานอ้างอิง}} \right)^2$$

$$F_2 = \left( \frac{\text{กำลังส่งสถานีฐานที่แท้จริง}}{\text{กำลังส่งสถานีฐานอ้างอิง}} \right)^2$$

$$F_3 = \left( \frac{\text{อัตราขยายสายอากาศสถานีฐานที่แท้จริง}}{\text{อัตราขยายสายอากาศสถานีฐานอ้างอิง}} \right)^2$$

$$F_4 = \left( \frac{\text{ความสูงสายอากาศรับที่แท้จริง}}{\text{ความสูงสายอากาศรับอ้างอิง}} \right)^2$$

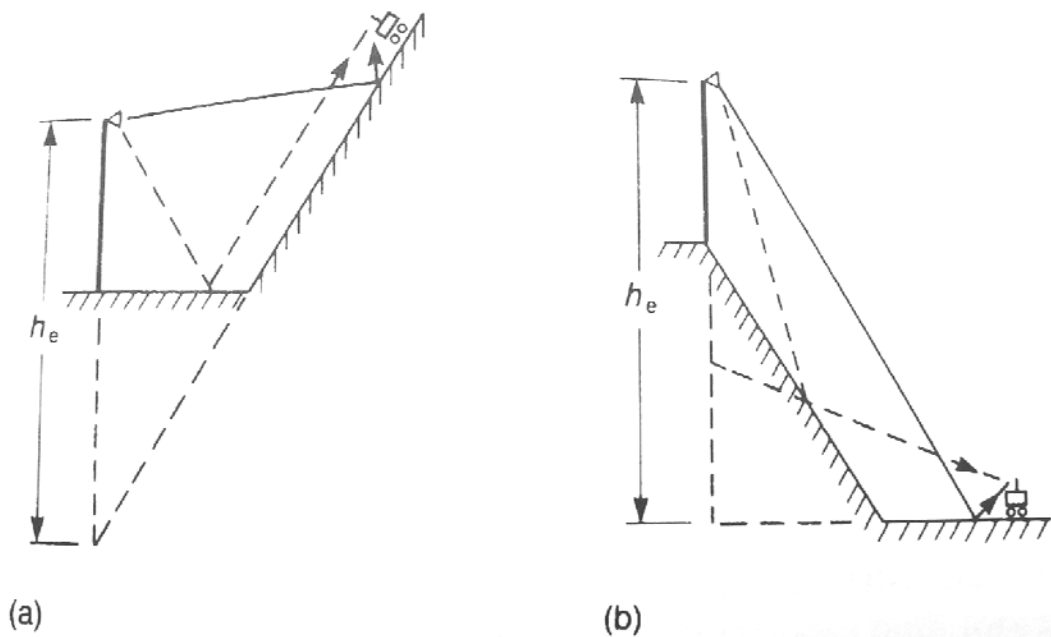
ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์แพร่กระจายคลื่นแบบจำลองลิย

สิ่งแวดล้อม	$L_0$ (dB)	$\gamma$
ช่องว่างอากาศ (Free Space)	91.3	20
พื้นที่เปิด (Rural Area)	91.3	43.5
พื้นที่เขตชานเมือง (Suburban Area)	104.0	38.5

ที่มา : Parsons J.D (2000)

สำหรับ  $F_3$  เป็นการวัดอัตราขยายที่พิจารณาถึง  $\lambda/2$  ไดโพล และการอ้างอิงจากอัตราขยายสายอากาศ ที่ 6 dBm (=4)  $F_4$  ชดเชยกับการเปลี่ยนแปลงในความสูงของสายอากาศรับ สามารถกำหนดให้เหมือนกันกับรูปแบบของ  $F_1$  สำหรับ ความสูงมากกว่า 10 เมตร แต่ในความสูงที่ต่ำกว่า 10 เมตร อัตราส่วนของความสูงที่ใช้มากกว่ากำลังสองของอัตราส่วนความสูงเปรียบเทียบกับ แบบจำลอง โอคูมูระ แบบจำลองลิยแนะนำให้มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบสื่อสารที่สามารถใช้ปัจจัยที่ประกอบจากรูปแบบ  $(f/f_0)^n$  แต่ไม่ระบุค่าของ  $n$  โดยแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) ของแบบจำลองลิยสามารถอธิบายในสภาพภูมิประเทศเส้นทางที่ไม่มีสิ่งกีดขวางได้จำกัดค่าที่เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพในความสูงสายอากาศสถานีฐานกับสภาพแวดล้อมที่เป็นเนินเขา มี 2 จุดสะท้อนที่สามารถเกิดขึ้นได้





ภาพที่ 2.19 ความสูงสายอากาศสถานีฐานที่มีผลต่อการคำนวณ

ที่มา : Parsons J.D (2000)

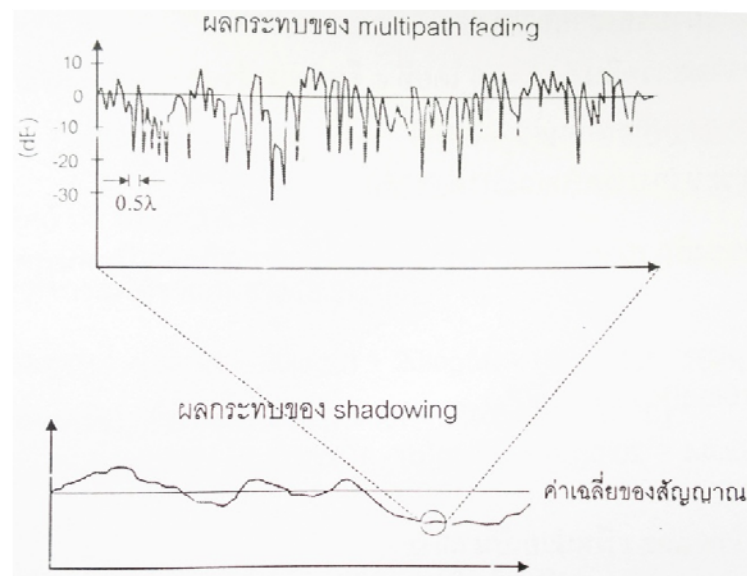
## 2.9. คุณลักษณะการลดทอนของสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

ในระบบการสื่อสารแบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ คลื่นจะอาศัยการเดินทางจากจุดหนึ่งผ่านช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นไปยังอีกจุดหนึ่งซึ่งพลังงานของคลื่นที่ส่งไปจะถูกลดทอน และเปลี่ยนแปลงตามระยะทางและคุณลักษณะของช่องสัญญาณ การแพร่กระจายคลื่นที่คลื่นเดินทางผ่านซึ่งคุณลักษณะของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่คลื่นแพร่กระจายผ่านเช่น โครงสร้างของอาคาร ต้นไม้ สิ่งกีดขวาง และลักษณะการติดตั้งสายอากาศ เป็นต้น สำหรับลักษณะการแพร่กระจายคลื่นสามารถพิจารณาค่าการสูญเสียจากลักษณะเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นได้ 3 ลักษณะ คือ 1) การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) เป็นการลดทอนของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับสัญญาณ โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณจะลดลงตามค่า  $d^{-n}$  โดย  $d$  คือ ระยะทางระหว่างภาครับและภาคส่ง ส่วน  $n$  เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งมีขนาดแตกต่างกันไปตามสภาพของบริเวณที่สัญญาณส่งผ่าน ตัวอย่างค่า  $n$  สำหรับการคำนวณค่าการลดทอน (Path Loss) ในบริเวณต่างๆ ตามรางที่ 2.4 สังเกตว่าค่าอัตราการลดทอนของสัญญาณมีขนาดที่สูงบริเวณเมืองใหญ่ เมื่อเทียบกับบริเวณที่ว่างเปล่า เพราะมีปัญหาการปิดบังของสัญญาณเนื่องมาจากตึก อาคาร และสถานที่ (ลัญจกร วุฒิสัทธาภักดิ์, 2542)

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่า  $n$  ที่ใช้ในการคำนวณการลดทอน (Path Loss) ในบริเวณต่างๆ

สภาพแวดล้อม	ค่า $n$ ที่ตามสภาพที่สัญญาณส่งผ่าน (n)
ช่องว่างอากาศ	2
คลื่นเซลล์ลาร์ในพื้นที่ตัวเมือง	2.7 – 3.5
สิ่งบดบังคลื่นเซลล์ลาร์ในตัวเมือง	3 - 5
ภายในอาคาร	1.6 – 1.8
สิ่งกีดขวางในอาคาร	4 - 6
สิ่งกีดขวางในโรงงาน	2 - 3

2) การสูญเสียเนื่องจากสัญญาณถูกบดบัง ซาโดว์อิง (Shadowing) หรือ Large-Scale Fading เกิดจากการที่สัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปชั่วขณะจากสิ่งแวดล้อมรอบข้าง เช่น อาคาร และเนินเขา เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้นสัญญาณที่รับได้ก็จะมีกำลังแรงคั้งเดิม ดังนั้น ระดับของสัญญาณที่รับได้มักจะเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะต่างๆ กับขนาดของสิ่งกีดขวาง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ประมาณหลายสิบลเมตร ดูตัวอย่างลักษณะของสัญญาณที่ได้รับผลกระทบจากซาโดว์อิงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 ตัวอย่างแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณที่รับได้เนื่องจากผลกระทบของมัลติพาทเฟดดิ้งและซาโดว์อิง (Shadowing)

ที่มา : สัญกรณ์ วุฒิสัทธาภิบาล (2542)

3) การสูญเสียจากการจางหายหลายเส้นทาง มัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath Fading หรือ Small-Scale Fading) เกิดจากการที่สายอากาศของเครื่องรับสัญญาณอยู่ใกล้กับพื้นผิวมาก ดังนั้นสิ่งกีดขวางต่างๆ รอบข้างจึงส่งผลให้เกิดการสะท้อนและการหักเหของสัญญาณในหลายทิศทาง ส่งผลทำให้สัญญาณที่รับได้ประกอบด้วยจำนวนสัญญาณหลายๆ สัญญาณที่เดินทางมาจากทิศทางที่แตกต่างกัน โดยมีทั้งขนาดและเฟสที่แตกต่างกัน ผลกระทบของมัลติพาทเฟดดิ้ง ทำให้ระดับของสัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างบ่อยครั้งมาก และการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงระยะเดียวกันกับขนาดของความยาวคลื่น การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอาจจะเกิดขึ้นได้มากถึง 30-40 dB เพียงผู้ใช้โทรศัพท์ที่มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะเพียงเศษส่วนของความยาวคลื่นคุณภาพที่ 2.20 ประกอบ

## 2.10 การสูญเสียกำลัง (Path Loss)

การสูญเสียกำลังของสัญญาณในอวกาศว่าง (Free Space Path Loss) ซึ่งเกิดจากการที่คลื่นแพร่กระจายออกไปด้วยมุมที่กว้างทำให้ความเข้มของกำลังคลื่นสัญญาณอ่อนตัวลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นแบบยกกำลังสอง คำว่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณในอวกาศว่างนี้ได้นำมาให้เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่รับได้ต่อกำลังของสัญญาณที่ถูกส่งออกมา โดยที่คลื่นมีการแพร่กระจายในบริเวณที่ว่างเปล่า (Free Space Propagation) อัตราส่วนนี้มีความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad \text{สมการที่ 2.55}$$

โดยที่

$P_R$  คือ กำลังของสัญญาณที่รับได้ หน่วยเดซิเบล (dBm)

$P_T$  คือ กำลังของสัญญาณที่ส่งออก หน่วยเดซิเบล (dBm)

$G_R$  คือ อัตราขยายของสายอากาศรับ หน่วย เดซิเบล (dBi)

$G_T$  คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง หน่วย เดซิเบล (dBi)

$\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่น ซึ่ง  $\lambda = c/f$  โดยที่  $c$  คือ ความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/s)

และ

$f$  คือ ความถี่ของสัญญาณ หน่วยเป็นเฮิรตซ์

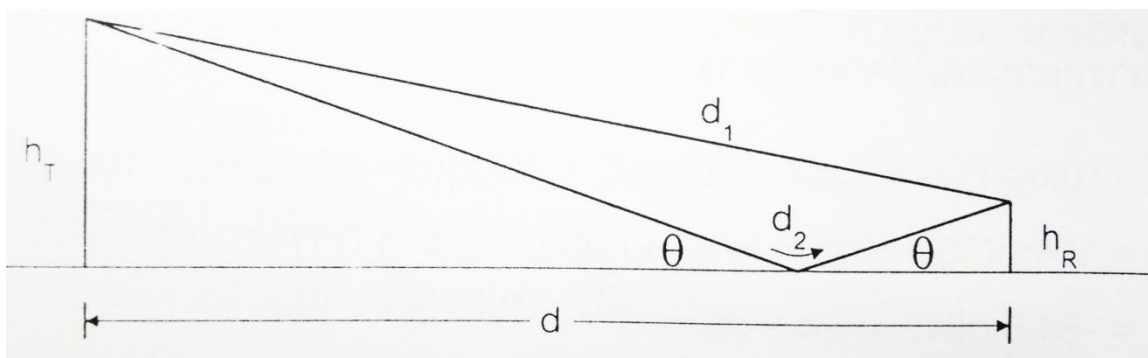
$d$  คือ ระยะห่างภาครับและภาคส่ง หน่วยเป็นเมตร

ค่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณ ในอวกาศว่าง โดยทั่วไปแล้วจะคิดค่าเป็นหน่วยของเดซิเบล (dB) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$L_{dB} = 10 \log(P_T) - 10 \log(P_R)$$

$$= 32.44 + 20 \log(f) + 20 \log(d) - 10 \log(G_T) - 10 \log(G_R) \quad \text{สมการที่ 2.56}$$
 โดยที่  $d$  มีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km) และ  $f$  มีหน่วยเป็น เมกะเฮิรตซ์ (MHz)  
 จากสมการนี้จะเห็นว่าค่าการสูญเสียของสัญญาณจะเพิ่มตามระยะทางและค่าความถี่ของคลื่นสัญญาณ

การสูญเสียกำลังเนื่องจากพื้นผิวเรียบ (Plane Path Loss) ในส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของพื้นผิวต่อการส่งผ่านสัญญาณโดยเปรียบเทียบกับ การส่งผ่านสัญญาณในอวกาศว่าง ทั้งนี้สมมติให้การส่งผ่านสัญญาณนี้เกิดขึ้นในบริเวณที่มีพื้นผิวที่ราบเรียบไม่มีสิ่งก่อสร้างใดๆ หรือเนินเขาในบริเวณนั้นเลย ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จะประกอบด้วยสัญญาณเพียง 2 ส่วนคือ ส่วนที่แพร่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยตรงและส่วนที่สะท้อนจากพื้นผิวดังที่แสดงในภาพที่ 2.21 ซึ่งจะเห็นว่ามีความแตกต่างจากในกรณีของการส่งผ่านสัญญาณในอวกาศว่างตรงที่ ได้รับสัญญาณเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งสัญญาณจากส่วนที่สะท้อนกับพื้นผิว



ภาพที่ 2.21 ผลกระทบของคลื่นที่สะท้อนกับพื้นผิวเรียบต่อสัญญาณที่รับได้

ที่มา : ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ (2542)

เนื่องจากคลื่นทั้งสองเดินทางในเส้นทางที่ต่างกัน ซึ่งมีระยะทางที่ต่างกัน ดังนั้นสัญญาณทั้งสองส่วนเมื่อเดินทางถึงสายอากาศที่ภาครับอาจจะมีเฟสที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการคำนวณกำลังของสัญญาณรวมจึงต้องคำนึงถึงค่าความต่างเฟสนี้ด้วย ในการคำนวณค่าความต่างเฟสนี้ จำเป็นต้องคำนวณหาความแตกต่างระหว่างระยะทางทั้งสองก่อนซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\Delta d = d_2 - d_1 = \sqrt{(h_T + h_R)^2 + d^2} - \sqrt{(h_T - h_R)^2 + d^2} \quad \text{สมการที่ 2.57}$$

เนื่องจากค่า  $h_T + h_R \ll dh$  เราสามารถใช้ Binomial Series มาช่วยในการประมาณค่า  $\Delta d$

$$(1 + X)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 + \dots + \frac{n(n-1)\dots(n-r+1)}{r!}x^r + [n \in \mathbb{Q}, |X| < 1] \quad \text{สมการที่ 2.58}$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นเราประมาณค่า  $\Delta d$  ได้เป็น

$$\Delta d \approx d \left[ 1 + \frac{(h_T - h_R)^2}{2d^2} - 1 - \frac{(h_T - h_R)^2}{2d^2} \right] = \frac{2h_T h_R}{d} \quad \text{สมการที่ 2.59}$$

ดังนั้นเมื่อคลื่นทั้งสองพบกันที่สายอากาศรับจะมีเฟสต่างกันเท่ากับ

$$\delta - \pi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d - \pi \quad \text{สมการที่ 2.60}$$

เมื่อนำสัญญาณคลื่นสองคลื่นที่มีความต่างเฟสเท่ากับ  $\delta - \pi$  มารวมกันแบบเวกเตอร์จะได้คลื่นที่มีกำลังเป็น  $2(1 - \cos \delta)$  หรือ  $4 \sin^2(\delta/2)$  เท่าของกำลังคลื่นจากหนึ่งแหล่ง และถ้าหาก  $\delta$  มีขนาดเล็กมากเราสามารถประมาณค่า  $4 \sin^2(\delta/2)$  ให้เป็นค่า  $\delta^2$  ได้

ค่า path loss ของการแพร่กระจายคลื่นบนพื้นผิวดินแบบนี้จึงมีค่าเท่ากับ

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \delta^2 = G_T G_R \left[ \frac{h_T h_R}{d^2} \right]^2 \quad \text{สมการที่ 2.61}$$

เมื่อคิดในหน่วยของเดซิเบลจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} L_{dB} &= 10 \log(P_T) - 10 \log(P_R) \\ &= 40 \log(d) - 20 \log(h_T) - 20 \log(h_R) - 10 \log(G_T) - 20 \log(G_R) \quad \text{สมการที่ 2.62} \end{aligned}$$

การคำนวณนี้มีประโยชน์เพราะสามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างคร่าวๆ ได้ 2 เรื่องคือ 1) อัตราการลดทอนของสัญญาณเนื่องจาก path loss ในการส่งผ่านคลื่นที่คิดถึงผลกระทบของพื้นผิวมีค่าที่สูงกว่าการส่งผ่านคลื่นในอวกาศว่าง (Free Space) 2) ขนาดความสูงของสายอากาศส่งมีผลกระทบต่อค่า path loss โดยที่ถ้าเพิ่มความสูงของสายอากาศของสถานีฐานขึ้นเท่าตัว เราจะสามารถลดค่า path loss ลงประมาณ 6 dB ซึ่งค่านี้ใกล้เคียงกับผลที่วัดได้ในทางปฏิบัติ หากแต่ว่าการเพิ่มความสูงของสายอากาศโทรศัพท์เคลื่อนที่ขึ้นเท่าตัวมิได้ให้ผลในลักษณะเดียวกับการเพิ่มความสูงสายอากาศของสถานีฐาน เพราะผลการวัดจริงในทางปฏิบัติพบว่าค่า path loss จะลดลงเพียงประมาณ 3 dB ทั้งนี้สาเหตุก็เนื่องมาจากการที่แบบจำลองที่ใช้ยังเป็นแบบง่ายๆ ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาใช้จำลองผลกระทบของความสูงของสายอากาศโทรศัพท์ต่อค่า path loss ในสภาพแวดล้อมจริงได้

การสูญเสียตามระยะทาง (Path loss) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการรับสัญญาณเข้ามาต่ำและระยะทางระหว่างเครื่องรับ(Mobile)และเครื่องส่ง(Base Station) เพิ่มขึ้น ถ้าไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างสายอากาศ เครื่องรับ และเครื่องส่ง จะมีเพียงการลดทอนของสัญญาณในช่องว่าง(Free Space Loss) สัญญาณที่รับได้จะแปรผันกับระยะทาง (d) และความถี่กำลังสอง ถ้าความถี่สูง Path Loss จะยิ่งมาก ตามสมการที่ 2.63

$$L_p \sim d^2 f^2 \quad \text{สมการที่ 2.63}$$

โดยที่

$L_p$  = การลดทอน (Path Loss) หน่วย เดซิเบล (dB)

$d$  = ระยะทาง หน่วย เมตร (m)

$f$  = ความถี่ หน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จะใช้การสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุในการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปในอากาศ ตามสมการที่ 2.2

$$P_{fs} = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad \text{สมการที่ 2.64}$$

โดยที่

$P_t$  = กำลังงานของเครื่องส่งที่ป้อนไปยังสายอากาศ หน่วย วัตต์

$G_t$  = อัตราขยายกำลังของสายอากาศ

$d$  = ระยะห่างจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ หน่วย เมตร

$P_{fs}$  = ค่าความหนาแน่นของกำลังงานในทิศทางการแพร่กระจายคลื่นต่อหน่วย

พื้นที่ในอากาศว่าง หน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร

ผลกระทบของสัญญาณเมื่อตกกระทบลงบนพื้นผิวโลกจะพิจารณาความเข้มสนามไฟฟ้าในรูปอาร์เอ็มเอส (RMS : Root Mean Square) กำหนดโดย

$$E_{fs} = \sqrt{Z_{fs} P_{fs}} \quad \text{สมการที่ 2.65}$$

โดยที่

$Z_{fs}$  = อิมพีแดนซ์ของอากาศว่าง มีค่า  $120\pi$

$E_{fs}$  = ความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง

สมการที่ 2.64 นำไปแทนค่าลงในสมการที่ 2.65 จะได้ความเข้มสนามไฟฟ้าในอากาศว่าง

$$\begin{aligned} E_{fs} &= \sqrt{120\pi \frac{P_t G_t}{4\pi d^2}} \\ &= \sqrt{\frac{30P_t G_t}{d}} \end{aligned} \quad \text{สมการที่ 2.66}$$

ส่วนทางด้านรับสัญญาณ พิจารณาเป็นสายอากาศแบบมีทิศทาง (Nonisotropic Antenna) ที่มีแกนกำลังสายอากาศเท่ากับ  $G_r$  และมีความเข้มสนามไฟฟ้าทางด้านรับกำหนดโดย

$$E_{rec} = \sqrt{Z_{fs} P_{rec}} \quad \text{สมการที่ 2.67}$$

โดยที่

$E_{rec}$  = ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สายอากาศตัวรับ

$P_{rec}$  = กำลังที่สายอากาศตัวรับ

และกำลังงานที่รับได้ทางด้านรับ คือ

$$P_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} P_{rec} G_r = \frac{\lambda^2 E_{rec}^2}{4\pi Z_{fs}}$$

$$= \left(\frac{E_{rec}\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{G_r}{120} \quad \text{สมการที่ 2.68}$$

จากสมการที่ 2.67 และ 2.68 สามารถหาอัตราส่วนกำลังงานที่รับได้ต่อกำลังงานที่ส่ง คือ

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{\left(\frac{E_{rec}\lambda}{2\pi}\right)^2 \frac{G_r}{120}}{\frac{(E_{fs}d)^2}{30G_t}}$$

$$= \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_t G_r \left(\frac{E_{rec}}{E_{fs}}\right)^2 \quad \text{สมการที่ 2.69}$$

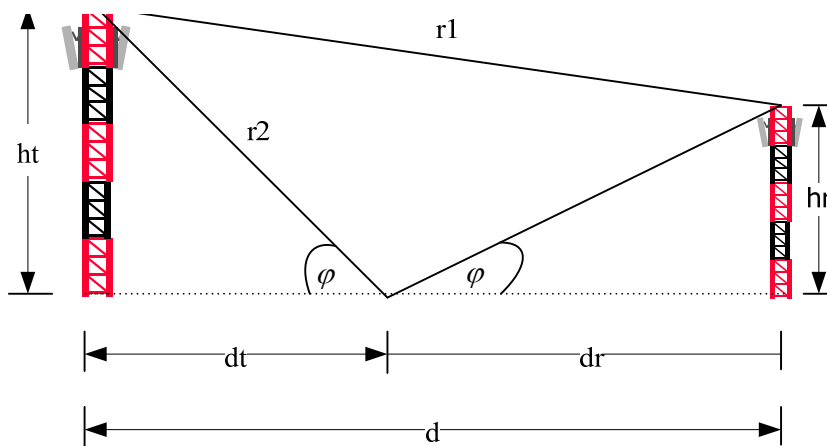
จากสมการที่ 2.69 เป็นสมการการสูญเสียของสัญญาณในรูปแบบทั่วไป อัตราส่วนกำลังงานที่รับได้ต่อกำลังงานที่ส่งในอากาศว่าง หรือ สมการการสูญเสียของสัญญาณในอากาศว่าง คือ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_t G_r \left(\frac{P_{rec}}{P_{fs}}\right) \quad \text{สมการที่ 2.70}$$

แทนสมการที่ 2.65 และ 2.67 ลงในสมการ 2.8 จะได้สมการในรูปความเข้มสนามไฟฟ้า

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_t G_r \left(\frac{E_{rec}}{E_{fs}}\right) \quad \text{สมการที่ 2.71}$$

ในกรณีที่พิจารณาการแพร่กระจายของคลื่นในสภาพภูมิประเทศที่ราบเรียบของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่มีรัศมีเซลล์เป็นระยะทางไม่กี่กิโลเมตร สัญญาณของเครื่องส่งที่อากาศของเครื่องรับสามารถรับได้ประกอบด้วย คลื่นที่รับได้โดยตรง (Direct Wave) และคลื่นที่สะท้อนกับพื้นดิน (Reflection Wave) ดังนั้นสัญญาณที่ได้รับจึงเป็นผลรวมของสัญญาณทั้งสอง การสูญเสียสัญญาณจากคลื่นตรงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.71 ส่วนของสัญญาณจากคลื่นสะท้อนจะมีแฟกเตอร์ที่เพิ่มเข้ามา คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน พิจารณาภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 แสดงการเดินทางของคลื่นตรงและคลื่นสะท้อน

ที่มา : Technical Competency Department (2554 )

โดยที่

$h_t$  = ความสูงสายอากาศของสถานีฐาน

$h_r$  = ความสูงสายอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่

$r_1$  = สัญญาณที่รับได้โดยตรง

$r_2$  = สัญญาณที่ตกกระทบที่รับได้

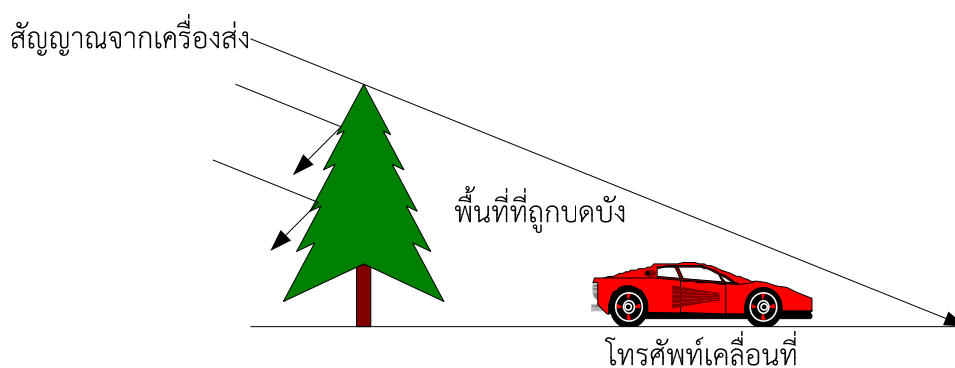
$\rho$  = มุมตกกระทบและมุมสะท้อนกลับ

$d_t$  = ระยะทางระยะระหว่างสถานีฐานกับมุมตกกระทบ

$d_r$  = ระยะทางระยะระหว่างมุมตกกระทบกับโทรศัพท์เคลื่อนที่

$d$  = ระยะทางระยะระหว่างสถานีฐานกับโทรศัพท์เคลื่อนที่

การสูญเสียเนื่องจากการบดบัง (Shadowing) เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการถูกบดบังคือสภาพแวดล้อมที่ทำการสื่อสารอยู่ในขณะนั้นมีสิ่งกีดขวาง เช่น เนินเขา ต้นไม้ สิ่งปลูกสร้างต่างๆ ที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมาบังเส้นทางการแพร่กระจายของคลื่นที่ทำให้เงาด้านหลังสิ่งกีดขวางนั้นขึ้น ดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 แสดงสัญญาณถูกบดบังจากสิ่งกีดขวาง

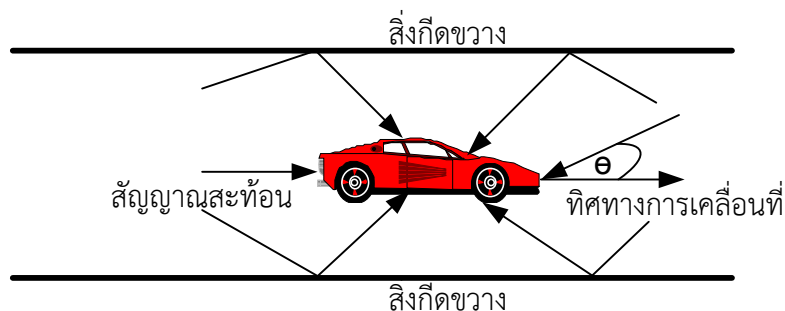
ที่มา : Technical Competency Department (2554 )

เมื่อโทรศัพท์เคลื่อนที่เดินทางผ่านสิ่งกีดขวางเหล่านี้ สัญญาณที่รับได้จะหักเหไปจากสัญญาณเดิม ทำให้ระดับกำลังของสัญญาณลดลง เมื่อโทรศัพท์เคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้นแล้วระดับของสัญญาณที่รับได้จะเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับกำลังสัญญาณในลักษณะนี้ สมมุติให้เป็นฟังก์ชันการแจกแจงแบบล็อกนอมอล (Lognormal Distribution) แต่สัญญาณที่วัดได้เมื่อพิจารณาในหน่วยเดซิเบล (dB) มีการกระจายแบบล็อกนอมอล จะได้การสูญเสียเนื่องจากการถูกบดบัง

การสูญเสียจากการจางหายหลายเส้นทาง (Mutipath Fading) เป็นระบบการสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่ผ่านทางคลื่นวิทยุ ในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางมาบดบังจำนวนมาก เช่น ในพื้นที่เขตเมืองเป็นสิ่งปลูกสร้างจำนวนมาก ซึ่งทำให้บังเส้นทางคลื่นระดับสายตา (Line of sight) และทำให้สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณแตกกระจายหลายเส้นทาง (Mutipath) ซึ่งมีขนาด



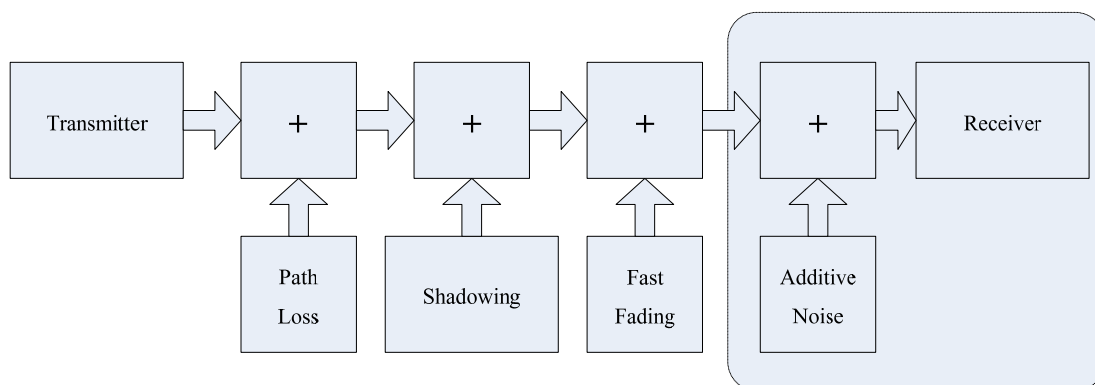
(Amplitude) เฟส (Phase) และเวลาประวิง (Delay) แตกต่างกัน สัญญาณที่โทรศัพท์เคลื่อนที่รับได้อาจจะมีการเสริม หรือหักล้างกัน ทำให้สัญญาณเกิดการแกว่งไม่แน่นอน ตามภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 แสดงเส้นทางการแพร่กระจายของคลื่นหลายเส้นทาง

ที่มา : Technical Competency Department (2554)

จากภาพที่ 2.25 จะเห็นได้ว่ากำลังจากเครื่องส่งจะถูกลดทอนไปด้วยหลายตัวแปร พารามิเตอร์เริ่มตั้งแต่การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) โดยกำลังส่งของสัญญาณจะลดลงอย่างคงที่ตามระยะทางในการส่งสัญญาณ (Shadowing) การลดทอนของสัญญาณเนื่องมาจากสิ่งกีดขวาง เช่น ตึก ต้นไม้ เป็นต้น สำหรับเครื่องรับก็จะมี การลดทอนส่วนหนึ่งมาจากสัญญาณรบกวนที่เข้ามาด้วย



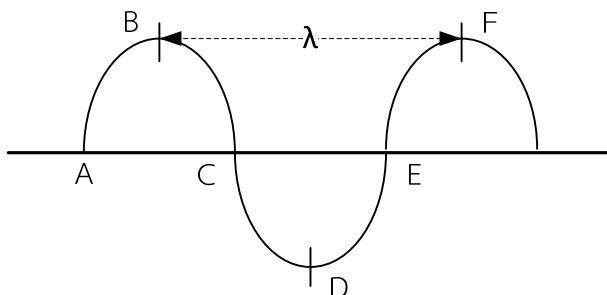
ภาพที่ 2.25 แสดงคุณลักษณะแพร่กระจายคลื่นโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Propagation Characteristics)

ที่มา : Technical Competency Department (2554)

## 2.11 คลื่นวิทยุ

ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นวิทยุนั้นได้กล่าวไว้ว่าในปี ค.ศ. 1864 เจมส์ เคล็ค แม็ก เวลล์ (James Clerk Maxwell) ได้กล่าวเกี่ยวกับทฤษฎีของคลื่นวิทยุว่า คลื่นวิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความเร็วในการเดินทางเท่ากับความเร็วแสง คือ 300,000,000 เมตรต่อวินาที และต่อมาในปี

ค.ศ. 1887 ไฮริช เฮอร์ตซ์ (Heinrich Hertz) ได้ทำการทดลองพบว่าคลื่นวิทยุมีจริงหลังจากนั้นก็ได้รับการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับคลื่นวิทยุและการกระจายคลื่นวิทยุ พบว่าคลื่นวิทยุมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine Wave) ดังแสดงในภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 แสดงภาพตัดขวางของลูกคลื่น

ที่มา : Technical Competency Department (2554)

จากภาพที่ 2.26 จุด B และ F ซึ่งเป็นจุดสูงสุดของคลื่นเรียกว่า ยอดคลื่น และจุด D ซึ่งเป็นจุดต่ำสุดของคลื่น เรียกว่า ท้องคลื่น ลูกคลื่นแต่ละลูกจะเปลี่ยนแปลงครบ 1 รอบโดยเปลี่ยนแปลงจากจุด A,B,C,D และ E เรียกว่า 1 ลูกคลื่น ความถี่ของลูกคลื่นหมายถึง จำนวนลูกคลื่นต่อวินาที (Cycles Per Second : CPS) หรือ เฮอร์ตซ์ (Hertz) ความยาวคลื่น เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ แลมด้า( $\lambda$ ) คือ ระยะห่างระหว่างยอดคลื่นของคลื่นแต่ละลูก และระยะเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทางเป็นระยะทาง 1 คาบ ความยาวคลื่น เรียกว่า คาบ (Period) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ T มีหน่วยเป็นวินาที ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆ ของคลื่นวิทยุ (ทงง โชติสรยุทธ์ 2537) คือ

$$T = 1/f \quad \text{สมการที่ 2.72}$$

$$\lambda = c/f \quad \text{สมการที่ 2.73}$$

โดยที่

T= คาบเวลา หน่วยเป็นวินาที

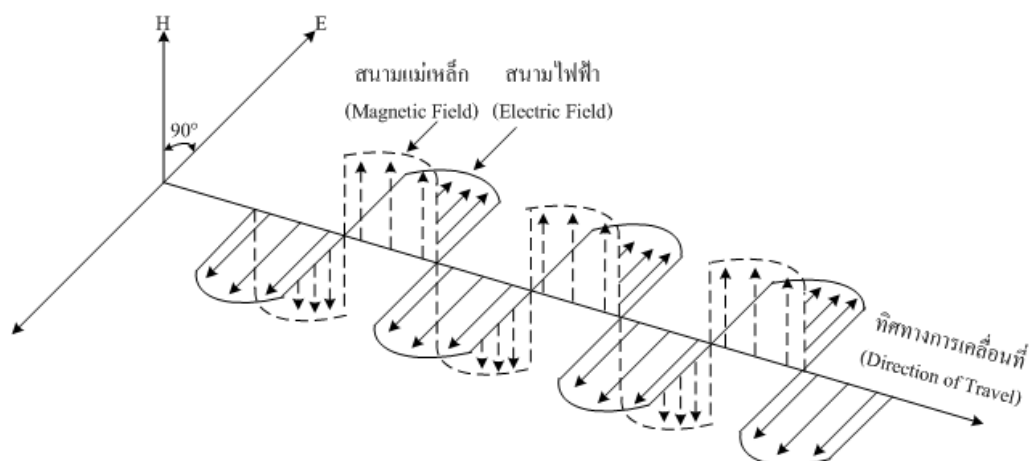
f= ความถี่คลื่นพาห้ หน่วยเป็นเฮอร์ตซ์

$\lambda$ = ความยาวคลื่น หน่วยเป็นเมตร

C= ความเร็วแสง ( $3 \times 10^8$  m/s)

คลื่นสัญญาณวิทยุ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้า (Electric Field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) เหนี่ยวนำกันไปในทิศทางของการเคลื่อนที่ (Direction of Travel) และสนามทั้ง 2 ก็ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ตามภาพที่ 2.26 การ

เรียกชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแบ่งตามแนวของสนามไฟฟ้า คือ ถ้าสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวนอน จะเรียก ฮอริซอนทอล โพลาริเซชัน (Horizontal Polarization) หรือถ้าสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวแกนตั้งจะเรียกว่า เวก์ติคอล โพลาริเซชัน (Vertical Polarization) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะที่สายอากาศปล่อยคลื่นออกมา โดยทั่วไปแล้วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะวัดเป็นหน่วย  $dB_{\mu V/m}$



ภาพที่ 2.27 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( An Electromagnetic Plan Wave “Frozen” in Time )

ที่มา : Technical Competency Department (2554)

สเปกตรัมความถี่วิทยุ คลื่นวิทยุที่ครอบคลุมความถี่ที่นำมาใช้สำหรับการติดต่อสื่อสาร เรียกว่า สเปกตรัมความถี่อยู่ในช่วง 30 Hz – 300 GHz สำหรับความถี่ที่ใช้สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์จะอยู่ในช่วงความถี่สูงสุด (UHF) ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การแบ่งย่านความถี่วิทยุ (Radio Frequency Spectrum)

ลำดับที่	ย่านความถี่	ชื่อย่านความถี่	อักษรย่อ (Sybol)
1	30-300 Hz	ช่วงความถี่ต่ำสุด (Extremely Low Frequency)	ELF
2	300-3000 Hz	ช่วงความถี่เสียง (Voice Frequency)	VF
3	3-30 kHz	ช่วงความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency)	VLF
4	30-300 kHz	ช่วงความถี่ต่ำ (Low Frequency)	LF

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) การแบ่งย่านความถี่วิทยุ (Radio Frequency Spectrum)

ลำดับที่	ย่านความถี่	ชื่อย่านความถี่	อักษรย่อ (Symbol)
5	300-3000 kHz	ช่วงความถี่กลาง (Medium Frequency)	MF
6	3-30 MHz	ช่วงความถี่สูง (High Frequency)	HF
7	30-300 MHz	ช่วงความถี่สูงมาก (Very High Frequency)	VHF
8	300-3000 MHz	ช่วงความถี่อัลตราไฮส (Ultra High Frequency)	UHF
9	3-30 GHz	ช่วงความถี่ซูเปอร์ไฮส (Super High Frequency)	SHF
10	30-300 GHz	ช่วงความถี่สูงสุด (Extremely High Frequency)	EHF

ที่มา : วิวัฒน์ กิรานนท์ (2539)

สำหรับการจำแนกการใช้งานคลื่นวิทยุในช่วงต่างๆ ดังนี้ (กมล เขมะรังสี และ ไพโรจน์ ไหววานิชกิจ 2539)

ความถี่ช่วงความถี่ต่ำสุด (Extremely Low Frequency) เป็นช่วงสัญญาณเสียงความถี่ต่ำที่สุดที่มนุษย์สามารถได้ยิน

ความถี่ช่วงความถี่เสียง (Voice Frequency) เป็นช่วงสัญญาณเสียงพูดปกติของมนุษย์

ความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency) เป็นความถี่ที่ใช้สำหรับวิทยุโทรเลข และเนื่องจากความยาวคลื่นของความถี่ย่านนี้มีความยาวมากเป็นกิโลเมตร (km) จึงทำให้ในปัจจุบันจะใช้สำหรับงานพิเศษโดยเฉพาะเท่านั้น เช่นการสื่อสารทางทหาร

ความถี่ต่ำ (Low Frequency) เป็นช่วงความถี่ที่ใช้ในระบบนำร่องการบิน และการเดินเรือ

ความถี่กลาง (Medium Frequency) เป็นช่วงความถี่ที่ใช้ในการส่งกระจายเสียง AM และการสื่อสารในระบบการบินและการเดินเรือ

ความถี่สูง (High Frequency) เป็นช่วงความถี่ที่ใช้ในการส่งกระจายเสียง AM ในระบบคลื่นสั้น วิทยุสมัครเล่น และวิทยุสื่อสารทางทหาร

ความถี่สูงมาก (Very High Frequency) เป็นช่วงความถี่ที่มีการใช้งานหนาแน่นมาก เช่น การส่งสัญญาณโทรทัศน์ การส่งกระจายเสียงวิทยุ (FM) การสื่อสารของการบินและการเดินเรือ วิทยุสื่อสารเคลื่อนที่ (Mobile Communication) เป็นต้น

ความถี่อัลตราไฮ (Ultra High Frequency) เป็นความถี่ที่ใช้งานทางด้านการส่งสัญญาณโทรทัศน์ ระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ การสื่อสารของการบินและการเดินเรือ และระบบนำร่อง

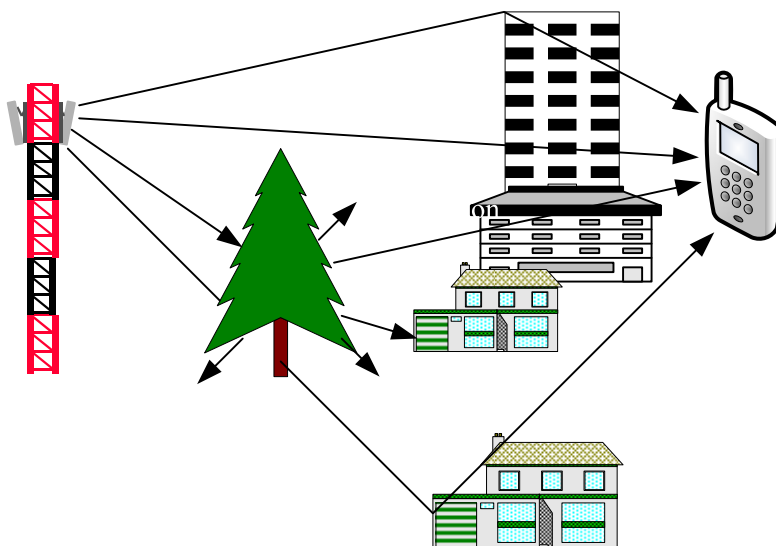
ความถี่ซูเปอร์ไฮ (Super High Frequency) เป็นความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งนำมาใช้งานในระบบสื่อสารดาวเทียม และระบบเรดาร์

ความถี่สูงสุด (Extremely High Frequency) ใช้สำหรับระบบสื่อสารดาวเทียม และระบบเรดาร์ชนิดพิเศษ

## 2.12 การจางหาย (Fading)

ในการสื่อสารไร้สาย สัญญาณที่มาจากเครื่องส่งจะมาถึงสายอากาศที่เครื่องรับได้นั้นจะมีหลายทิศทาง โดยที่การแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อน กระจายเบน หักเห หรือกระจายได้ ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมในขณะนั้น (Ezio Biglieri, John Proakis and Sholmo Shamai, 1998) เช่น บริเวณในเมือง นอกเมือง ในกรณีเป็นการสื่อสารระยะไกลก็จะมีผลกระทบจากชั้นบรรยากาศ ไออน่าและความชื้น ผลที่ได้ คือสัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศจะประกอบไปด้วย องค์ประกอบของสัญญาณหลายสัญญาณ บางครั้งเรียกว่า สัญญาณหลายเส้นทาง (Multipath Signal) ในบางครั้งมีสัญญาณหลักแบบแนวสายตา (Line of Sight) รวมอยู่ สัญญาณหลายเส้นทางจะมีค่าเวลาหน่วงและขนาดที่แตกต่างกัน เวลาหน่วงที่ต่างกันนี้ส่งผลให้เกิดเฟสที่แตกต่างกัน ดังนั้นผลของสัญญาณที่มีองค์ประกอบต่างกันนี้จะเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและเฟส ทำให้สัญญาณที่รับได้มีขนาดที่เปลี่ยนแปลงปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การจางหาย (Fading) อย่างไรก็ตามการจางหายจะมีทั้งแบบระยะยาว (Long Term Fading) และระยะสั้น (Short Term Fading) การเกิดการจางหายหลายเส้นทาง (Multipath Fading) เป็นการจางหายระยะสั้น ทำให้เกิดการรบกวนกันระหว่างสัญลักษณ์ (Inter Symbol Interference ISI) สำหรับสัญญาณดิจิทัล ซึ่งในกรณีช่องสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะเกิดการเลื่อนความถี่ดอปเปลอร์ (Doppler Shift) เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ การเลื่อนของความถี่ดอปเปลอร์เป็นสาเหตุให้เกิดความถี่พาหะเปลี่ยนแปลง (Carrier Frequency Shift) และแถบความกว้างของความถี่จะกระจายออก (Bandwidth Spread) เป็นสาเหตุ

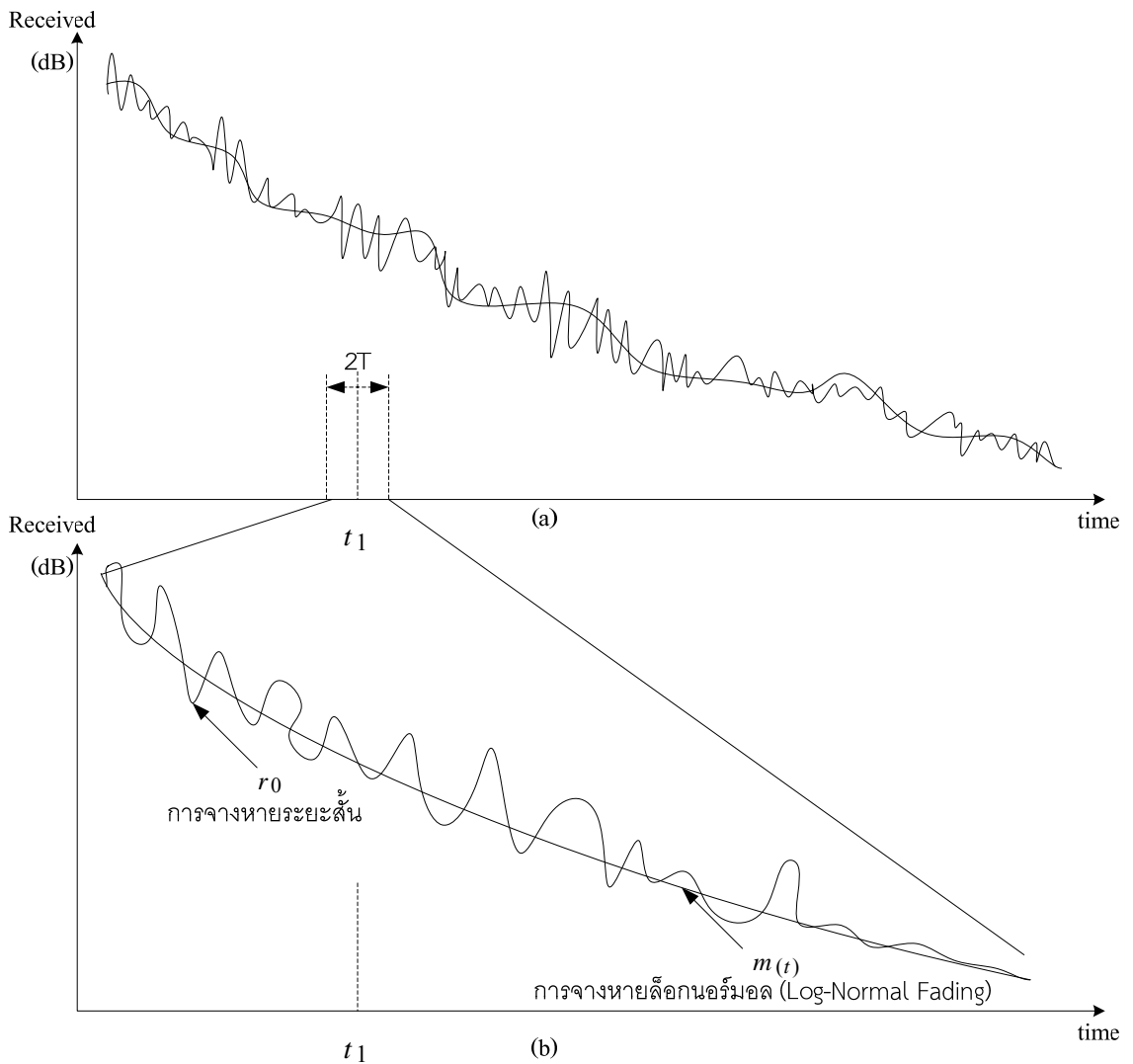
ให้ประสิทธิภาพของมอดูเลชัน (Modulation) ลดลงเมื่อเทียบกับช่องสัญญาณที่มีการรบกวนเกาส์เซียนขาว (Additive White Gaussian Noise : AWGN)



ภาพที่ 2.28 การจางหายแบบหลายเส้นทาง  
ที่มา : Technical Competency Department (2554)

การจางหายเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณอย่างรวดเร็ว และธรรมชาติของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นนั้นจะถูกกำหนดด้วยความยาวของคลื่นพาหะที่ใช้ในการสื่อสาร ถ้าคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายจากสายอากาศแล้วไปกระทบกับวัตถุรอบข้างที่มีขนาดเท่ากับความยาวของคลื่นพาหะ จะทำให้คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายเปลี่ยนแปลง โดยเกิดการสะท้อนและหักเห ทำให้ที่ภาครับสัญญาณได้เป็นจำนวนมากซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ คลื่นตรงและคลื่นสะท้อน ดังนั้นภาครับจะรับสัญญาณหลายองค์ประกอบบางครั้งคลื่นจะมีส่วนเสริมกันหรือเฟสตรงกันทำให้พลังงานมีค่าสูง บางครั้งคลื่นจะหักล้างหรือเฟสต่างกันทำให้พลังงานมีค่าต่ำ ผลลัพธ์ที่ได้คือสัญญาณที่รับได้นั้นจะเกิดการแกว่งมากบ้างน้อยบ้าง ซึ่งเราเรียกว่า เกิดการจางหายของสัญญาณ

ลักษณะการจางหายที่พบนั้นแบ่งออกได้หลายรูปแบบ ในที่นี้จะพิจารณาว่า การจางหาย ประกอบไปด้วยการจางหายระยะสั้น (Short Term Fading)  $r_0(t)$  และการจางหายระยะยาว (Long Term Fading)  $m(t)$  ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 สัญญาณที่ได้รับได้เมื่อเกิดการจางหาย

(a) สัญญาณที่รับได้เมื่อเกิดการจางหาย

(b) สัญญาณการจางหายระยะสั้น

ที่มา : Technical Competency Department. (2554)

จากภาพที่ 2.29 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่า  $m(t)$  และ  $r_0(t)$  ถ้าพิจารณาให้  $r(t)$  เป็นสัญญาณที่รับได้จากเครื่องรับ สัญญาณที่รับได้จะประกอบด้วยสัญญาณ 2 ส่วน คือ  $m(t)$  และ  $r_0(t)$  ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$r(t) = m(t)r_0(t)$$

สมการที่ 2.74

โดยที่

$m(t)$  = ค่าเฉลี่ยของการจางหายระยะยาว เรียกว่า โลกคอลมีน (Local Mean) หรือ การจางหายลอการิทึม (Log-Normal Fading)

$r_0(t)$  = การจางหายระยะสั้น

โดยทั่วไปแล้วการจางหายระยะยาวนั้นขึ้นกับระยะทาง และการจางหายระยะสั้นนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณและการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งปัญหาของการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันพบว่า การจางหายระยะสั้นนั้นมีผลกระทบต่อระบบสื่อสารที่มีการเคลื่อนที่ เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

การจางหายสามารถแยกออกเป็น 2 เทอม คือ การจางหายอย่างยาว (Long-Term Fading) และการจางหายอย่างสั้น (Short-Term Fading) โดยถ้าเฟสผลต่างของสัญญาณที่สถานีฐานได้รับการแปรค่าทั้งหมดในช่วง 0 ถึง 180 องศา เมื่อโทรศัพท์เคลื่อนที่ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว อาจจะทำให้ความแรงสัญญาณที่ได้รับเป็นศูนย์เนื่องจากเกิดการหักล้างกันหมด หรืออาจจะเพิ่มเป็น 2 เท่า เมื่อผลต่างของเฟสเป็นศูนย์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดความแรงสัญญาณที่ได้รับ (Fluctuation) และเกิดปรากฏการณ์ดอปเพลอร์เอฟเฟค (Doppler Effect) เกิดขึ้นเมื่อโทรศัพท์เคลื่อนที่ มีการเคลื่อนที่ได้รับความถี่ที่แตกต่างจากความถี่ที่สถานีฐานส่งมา ซึ่งส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า การจางหายอย่างสั้น (Short-Term Fading) ส่วนค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเรียกว่า การจางหายอย่างยาว (Long-Term Fading)

เนื่องจากค่าการจางหายที่แท้จริงยากต่อการทราบค่าที่เป็นจริง เนื่องจากมีจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ที่จะเกิดจางหายได้ไม่จำกัดในสภาวะแวดล้อมหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งก่อสร้างเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงใช้วิธีการทางสถิติในการหาค่าการจางหาย

การจางหายอย่างยาว (Long-Term Fading) จะเกิดจากสภาพพื้นที่ และสิ่งก่อสร้างต่างๆ ระหว่างสถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่

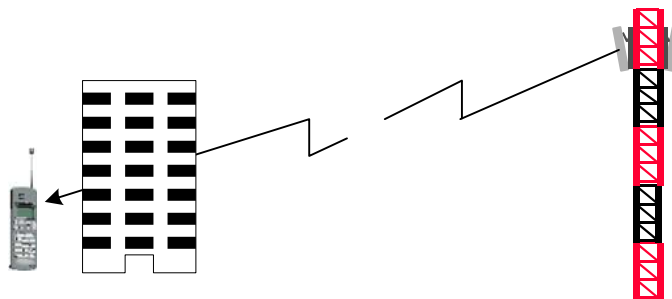
การจางหายอย่างสั้น (Short-Term Fading) เกิดจากการสะท้อนของสัญญาณที่มาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณหลายๆ สัญญาณมารวมกัน

### 2.12.1 ล็อกนอร์มอลเฟดดิ้ง (Log –Normal Fading)

คือ การลดทอนและการจางหายของสัญญาณเนื่องมาจากสิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้, เนินเขา ตึกหรืออาคาร ระหว่างสายอากาศเครื่องส่ง (Base Station) และเครื่องรับ (Mobile Station) โดยสิ่งกีดขวางนี้จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “สัญญาณบางส่วนถูกบดบัง” (Shadowing Effect) ทำให้เกิดการลดระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้ในขณะที่โทรศัพท์มีการเคลื่อนที่ไป



นั่น ระดับความแรงของสัญญาณจึงขึ้นอยู่กับสิ่งกีดขวางระหว่างสายอากาศส่ง(Tx) และรับ(Rx) โดยระยะทางที่ทำให้เกิดลือกนอร์มอลเฟดดิ้ง ได้ จะอยู่ระหว่าง 10-20 เมตร



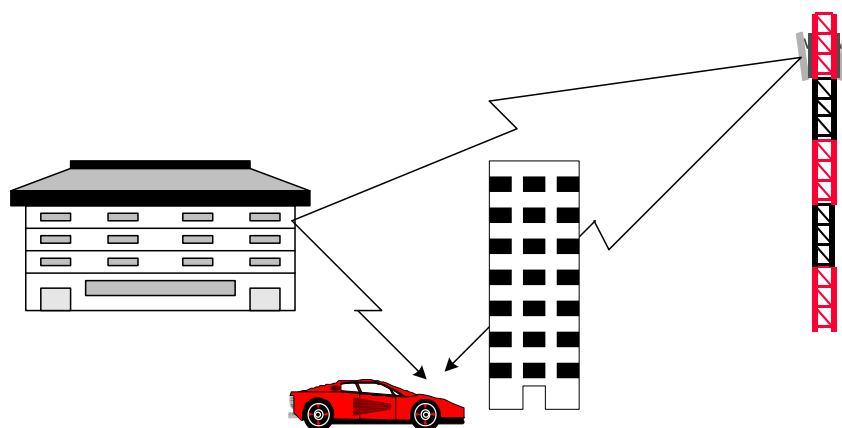
ภาพที่ 2.30 ลือกนอร์มอลเฟดดิ้ง (Log-Normal Fading)

ที่มา : Technical Competency Department (2554)

### 2.12.2 เฟดดิ้งแบบเรย์ลี (Rayleigh Fading)

การที่มีปริมาณจำนวนโทรศัพท์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากและมีการใช้งานอยู่ในบริเวณเดียวกันจะทำให้เกิดปัญหา ที่เรียกว่า มัลติพาท (Multipath) หรือเฟดดิ้งแบบเรย์ลี (Rayleigh Fading) ซึ่งเกิดขึ้นจากการรับสัญญาณมากกว่า 1 เส้นทาง ระหว่างสายอากาศส่ง(Tx) และรับ(Rx) ในกรณีนี้สัญญาณจะไม่ได้ถูกรับโดยตรงจากสายอากาศส่ง (Tx) อย่างเดียว แต่จะมาจากหลายๆทาง รวมทั้งการลดหรือเพิ่มขึ้นของระดับสัญญาณอย่างทันทีทันใดเนื่องจากการแทรกสอดระหว่างคลื่นตรง และคลื่นสะท้อน ที่มายังโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับระยะทาง เวลา และ ความถี่ของสัญญาณ ด้วย พิจารณาตามภาพที่ 2.31 ซึ่งเราสามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้ diversity

โดยทั้งลือกนอร์มอลเฟดดิ้ง (Log -Normal Fading) และ เฟดดิ้งแบบเรย์ลี (Rayleigh Fading)สามารถจะเกิดขึ้นได้ในระบบเซลลูลาร์ทุกระบบ



ภาพที่ 2.31 เฟดดิ้งแบบเรย์ลี (Raylight Fading)

ที่มา : Technical Competency Department (2554)

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นสำหรับพื้นที่ที่ไม่ราบเรียบเป็นเนินเขา พื้นที่ที่เป็นเนินเขามีต้นยางพาราปกคลุม และพื้นที่ในเขตเมืองที่มีความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้างอาคารบ้านเรือน ตลอดจนรายละเอียดของสภาพแวดล้อมที่นำมาศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยภาพถ่ายทางอากาศของตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเครื่องส่งและเครื่องรับ พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ขนาดของใบไม้ กิ่งก้าน และความหนาแน่นของใบไม้ เป็นต้น โดยข้อมูลเหล่านี้จะนำมาใช้ในแบบจำลองเพื่อให้เห็นถึงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้น ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนและรายละเอียดการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

#### 3.1. ระบบการวัดสัญญาณ

พื้นที่ที่ครอบคลุมสัญญาณที่ต้องการจะถูกกำหนดจากความแรงของสัญญาณที่รับได้ผ่านทางโทรศัพท์เคลื่อนที่ใน 95 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ที่จะสูงกว่าบางค่าการออกแบบ (โดยประมาณ -90 dBm) สำหรับความสมดุลของกำลังงาน แสดงให้เห็นว่ากำลังงานจากสถานีฐานจะตั้งค่าให้ทั้งภาครับ (Uplink) และภาคส่ง (Downlink) มีพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณเหมือนกัน โดยความแตกต่างของพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณภาครับหรือภาคส่งเป็นสาเหตุของความสั่นเปลี่ยนกำลังงานในระบบ ซึ่งจะส่งผลให้มีค่าสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นและเพิ่มค่าใช้จ่าย ปกติแล้วกำลังงานจากสถานีฐานจะมีค่าสูงประมาณ 2-3 dB กว่าค่าการคำนวณจากสมการความสมดุลของกำลังงาน (Power Balance) ตามภาพที่ 3.1

การหาค่า กำลังงานสมดุล (Power Balance) หาได้จากสมการที่ 3.1

$$P_{out_{BTS}} = P_{out_{MS}} + L_{C_{BTS}} + G_{d_{BTS}} + (P_{in_{MS}} - P_{in_{BTS}}) \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

โดยที่

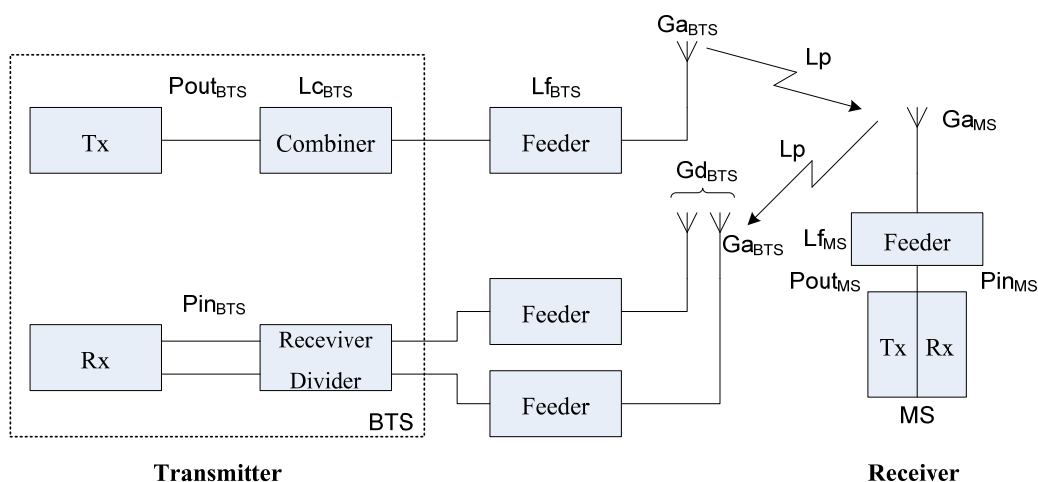
$P_{out_{BTS}}$  = กำลังส่งของเครื่องส่ง (Power Output Base Station) หน่วยเดซิเบล (dBm)

$P_{out_{MS}}$  = กำลังส่งของ โทรศัพท์ (Power Output Mobile) หน่วยเดซิเบล (dBm)

$LC_{BTS}$ =การลดทอนของสาย (Combiner Loss)	หน่วย เดซิเบล (dB)
$Gd_{BTS}$ = อัตราการขยายความแตกต่าง (Diversity Gain)	หน่วย เดซิเบล (dBi)
$Pin_{MS}$ =ความไวของโทรศัพท์ (Mobile Sensitivity)	หน่วย เดซิเบล (dBm)
$Pin_{BTS}$ =ความไวของเครื่องส่ง(Base Station Sensitivity)	หน่วย เดซิเบล (dBm)

สำหรับค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง ( $P_{out_{BTS}}$ ) จะต้องสูงกว่ากำลังส่งของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ( $P_{out_{MS}}$ ) ส่วนอัตราการขยายความแตกต่าง ( $Gd_{BTS}$ ) วัดจากผลรวมของความแตกต่าง โดยค่าความแตกต่างของความไวในการรับสัญญาณเกิดจาก  $Pin_{MS} - Pin_{BTS}$

ปกติแล้วกำลังงานจากสถานีฐานจะต้องมากกว่ากำลังงานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพราะไม่เพียงแต่สถานีฐานจะมีความไว (Sensitivity) มากกว่าคือ สามารถรับสัญญาณที่มีความแรงต่ำๆ ได้ สถานีฐานยังมีการสูญเสียอย่างมากขณะที่มีการส่งคลื่น เช่น การสูญเสียจากอุปกรณ์รวมสัญญาณ (Combiner) และอัตราการขยาย ขณะที่มีการรับคลื่นมาก อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนสัญญาณครอบคลุมสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราการขยายสายอากาศแต่ไม่ใช่เป็นการเพิ่มกำลังส่งของสถานีฐาน สำหรับการลดพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณสามารถลดกำลังส่งของสถานีฐานได้



ภาพที่ 3.1 ระบบการวัดสัญญาณ

ที่มา : Technical Knowledge Management Dept. (2554)

### 3.2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระดับความแรงของสัญญาณ คุณภาพของสัญญาณ ระดับของกำลังส่ง ความถี่ที่ใช้งาน เป็นต้น ประกอบด้วยเครื่องมือทดสอบดังนี้

1. โทรศัพท์เคลื่อนที่ทดสอบ (Test Mobile System : TEMS) เป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่ยี่ห้อ โซนี่ อิริคสัน รุ่น K790i ที่มีซอฟต์แวร์ที่เขียนขึ้นโดยเฉพาะบรรจุอยู่ ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการอ่าน และควบคุมข้อมูลที่ส่งระหว่างเครื่องส่ง (สถานีฐาน) และเครื่องรับ (โทรศัพท์) ในระบบจีเอสเอ็ม ผ่านทางอากาศ (Air Interface) ตามภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 โทรศัพท์เคลื่อนที่ยี่ห้อ โซนี่ อิริคสัน รุ่น K790i

2. เครื่องมือระบุตำแหน่งละติจูดและลองจิจูด หรือที่เรียกว่า “GPS” ทำหน้าที่โดยบอกว่าในการวัดค่าต่างๆ แต่ครั้งนั้น กระทำที่ตำแหน่งใดบนโลก สำหรับที่นำมาใช้งานเป็นจีพีเอส ยี่ห้อ GARMIN รุ่น GPS 18 USB ตามภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 จีพีเอส ยี่ห้อ GARMIN รุ่น GPS 18 USB

3.คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก สำหรับใช้งานโปรแกรมทดสอบร่วมกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ทดสอบ และจีพีเอส โดยค่าต่างๆ ที่ได้จากการวัดจะเก็บไว้เป็นไฟล์ นอกจากนั้นแล้วยังทำหน้าที่แสดงที่ผล และควบคุมการทำงานอีกด้วย

### 3.3. ขั้นตอนการวัดสัญญาณ

การวัดสัญญาณคลื่นวิทยุ หรือที่นิยมเรียกว่า การทดสอบสัญญาณ (DriveTest) นั้นเป็นกระบวนการที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการติดตั้งและการให้บริการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยปกติการสำรวจคลื่นวิทยุจะทำงานร่วมกับการใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการสำรวจคลื่นวิทยุนอกจากต้องใช้เครื่องรับส่งคลื่นวิทยุแล้ว ยังต้องใช้เครื่องมือในการบอกพิกัดหรือตำแหน่งจุดวัดสัญญาณอีกด้วย โดยอาจใช้เครื่องรับจีพีเอส เนื่องจากคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศ รูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศ การแพร่กระจายคลื่นในแนวสายตา การถูกสิ่งกีดขวางบัง และการที่มีคลื่นหลายวิถี ดังนั้นการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลจึงต้องคำนึงถึงสิ่งเหล่านี้ด้วย การวัดสัญญาณจะต้องอาศัยยานพาหนะบรรทุกเครื่องมือทดสอบ (TEMS) แล่นไปตามท้องถนนหรือบริเวณที่รถยนต์สามารถเข้าไปถึงได้ ซึ่งเรียกการวัดแบบนี้ว่า ทดสอบสัญญาณ (Drive Test)

สำหรับการแยกประเภทของพื้นที่นิยมแบ่งพื้นที่ออกเป็น 5 ประเภท คือ พื้นที่ป่า (Forest Area) พื้นที่เปิด (Rural Area) จะมีที่อยู่อาศัยหรือต้นไม้้น้อยมาก พื้นที่ราบโล่งแจ้ง (Plain Area) พื้นที่เขตชานเมือง (Suburban Area) ประกอบด้วยหมู่บ้านเป็นส่วนใหญ่ และพื้นที่เขตเมือง (Dense Urban Area) เป็นพื้นที่ที่ประกอบด้วยอาคารที่มีความสูงเฉลี่ย 40 เมตรอยู่หนาแน่นหรือพื้นที่เขตเมือง (Urban Area) ประกอบด้วยอาคารพาณิชย์และอาคารสำนักงานที่มีความสูงเฉลี่ยไม่เกิน 12 เมตร

การวัดสัญญาณแบ่งเป็นการวัดสัญญาณสเกลใหญ่และสเกลเล็ก การวัดสัญญาณสเกลใหญ่นิยมวัดที่ทุกๆ ระยะทาง 50 – 200 เมตร จากเครื่องส่ง (สถานีฐาน) โดยแต่ละจุดวัดจะหาค่าเฉลี่ยของคลื่นหลายวิถีในช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อได้ค่าระดับสัญญาณแล้วจึงนำค่าเหล่านั้นมาพล็อตลงในภาพถ่ายทางอากาศของพื้นที่นั้นๆ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความแรงของสัญญาณที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง ในกรณีที่ภูมิประเทศประกอบด้วยพื้นที่หลายประเภท อาจใช้การแบ่งพื้นที่จากภาพถ่ายทางอากาศออกเป็นส่วนย่อยๆ แล้วจึงกำหนดประเภทของพื้นที่เพื่อหาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่ย่อยเหล่านั้น จากนั้นจึงสำรวจพื้นที่จริงและตรวจวัดสัญญาณ

### 3.3.1 แบบจำลองลี (Lee Model)

แบบจำลองลี (Lee Model) ใช้กับพื้นที่เนินเขาในการทำนายและแก้ปัญหาจุดบดพร่องของสัญญาณที่รับได้ ผลจากสิ่งกีดขวางกับความสูงของบริเวณขอบเหลี่ยมคม (Knife-Edge) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยเครื่องส่ง (สถานีฐาน) ที่ติดตั้งอยู่บนช่องเขาส่วนหนึ่งของเทือกเขานครศรีธรรมราช ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช มีกำลังส่ง 46 dBm สายอากาศมีอัตราขยาย 16.5 dBi และใช้ความถี่ 108 MHz ที่ความถี่ขาขึ้น(Uplink) เท่ากับ 911.6 MHz ความถี่ขาลง (Downlink) เท่ากับ 956.6MHz สำหรับเครื่องรับเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่มีอัตราขยาย 0 dBi ในการหาค่าของสัญญาณที่รับได้เมื่อคลื่นเดินทางเลี้ยวเบนผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น ภูเขา นั้นเป็นสิ่งสำคัญในการทำนายพื้นที่เขตบริการเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปการหาค่าสูญเสียจากการเลี้ยวเบนที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงเป็นสิ่งที่สามารถทำได้ ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำให้ทฤษฎีการประมาณการโดยใช้แฟคเตอร์ที่จำเป็นบางอย่างเพื่อทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องสูง สำหรับการหาค่าอัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคมที่ค่า  $V$  ต่างๆเป็นตามสมการที่ 3.2

$$v = h_p \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

$$\begin{aligned} G_d(\text{dB}) &= 0 \text{ dB} & v &\leq -1 \\ G_d(\text{dB}) &= 20 \log(0.5 - 0.62v) & -1 &\leq v \leq 0 \\ G_d(\text{dB}) &= 20 \log(0.5e^{-0.95v}) & 0 &\leq v \leq 1 \\ G_d(\text{dB}) &= 20 \log\left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 + 0.1v)^2}\right) & 1 &\leq v \leq 2.4 \\ G_d(\text{dB}) &= 20 \log\left(\frac{0.225}{v}\right) & v &> 2.4 \end{aligned}$$

โดยที่

$v$	= พารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรเนลเคอร์ซอพฟ์	
$h_p$	= ความสูงสิ่งกีดขวาง	หน่วย เมตร (m)
$d_1$	= ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและสิ่งกีดขวาง	หน่วย เมตร (m)
$d_2$	= ระยะทางระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่และสิ่งกีดขวาง	หน่วย เมตร (m)
$\lambda$	= ความยาวคลื่นในสุญญากาศ	หน่วย เมตร (m)
$G_d$	= อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม	หน่วยเดซิเบล (dB)
$f$	= ความถี่	หน่วยเมกะเฮิรตซ์ (MHz)

และสามารถเขียนเป็นสมการแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบผสม (Hybrid Model) ตามสมการที่ 3.3

$$\text{EIRP} = P_{\text{outBTS}} - L_{\text{CBTS}} - G_d + G_{\text{ABTS}} + \alpha(f) \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

โดยที่

$EIRP$	= กำลังการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผล	
$P_{out_{BTS}}$	= ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง	หน่วยเดซิเบล (dBm)
$G_{a_{BTS}}$	= อัตราขยายสายอากาศส่ง	หน่วย เดซิเบล (dBi)
$L_{c_{BTS}}$	= ค่าลดทอนอุปกรณ์รวมสัญญาณเครื่องส่ง	หน่วย เดซิเบล (dB)
$G_d$	= อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม	หน่วย เดซิเบล (dB)
$\alpha(f)$	= ค่าลดทอนจากต้นไม้และใบไม้	หน่วยเดซิเบล (dB)

### 3.3.2 แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest)

แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) เป็นการปรับปรุงระดับความแรงของสัญญาณสำหรับเนินเขาที่มีต้นไม้ยางพาราปกคลุม พิจารณาจากลักษณะเฉพาะของการลดทอนจากความหนาแน่นของใบไม้ต่อหน่วยลูกบาศก์เมตรและการประยุกต์พารามิเตอร์ต้นไม้ เช่น ขนาดของใบไม้ ลำต้น กิ่งก้าน ความหนาแน่นของใบไม้ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น ความสูงของพุ่มไม้จากพื้นดิน ขนาดกว้าง-ยาว ของพุ่ม เป็นต้น นอกจากนี้การหาปริมาตรของกลุ่มใบไม้และขนาดของใบไม้ก็มีความสำคัญและมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นที่ผ่านใบไม้เหล่านั้น สามารถนับได้ตามสถานการณ์การแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นจากต้นไม้มากกว่าการกระจายความสูงของต้นไม้ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของใบไม้และก้าน ผลของความสูงของสิ่งกีดขวางบริเวณขอบเหลี่ยมคม และลักษณะลดทอนจากใบไม้ทั้งหมดที่อยู่บนต้นไม้ รวมทั้งสายอากาศที่อยู่ใกล้กับต้นไม้ สำหรับอิทธิพลของเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณผ่านต้นไม้ พิจารณาตามภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 การแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณผ่านต้นไม้และใบไม้

สำหรับลักษณะภูมิประเทศประกอบด้วยภูเขาและสวนยางพาราตลอดเส้นทาง สวนยางพารา ไม้ที่มีใบสีเขียว และมีความสูงเฉลี่ยประมาณ 20 เมตรและเกือบทั้งหมดมีระยะ สม่ำเสมอเป็นระยะทาง 10 เมตร ค่าเฉลี่ยของลำต้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยประมาณ 0.5 เมตร ใบไม้มีขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 6 เซนติเมตร กับความหนาแน่น 679 ใบต่อลูกบาศก์ เมตร พุ่มไม้ประกอบด้วยหลายๆ กิ่งก้านสาขา แต่ละอันทำมุมเฉลี่ยอยู่ที่ 30 องศา จนถึงพื้นดิน ใบไม้จะมีความลึกมากกว่า 10 กิโลเมตร โดยความลึกของใบไม้สังเกตจากภาพถ่ายทางอากาศ ใน ระหว่างที่วัดใบไม้จะขึ้นและแข็งด้วยแรงลมเพราะสวนยางพาราประกอบด้วยใบไม้ขนาดใหญ่และ มีความหนาแน่นการแพร่กระจายคลื่นตามใบไม้จึงทำให้การลดทอนสูง สำหรับเครื่องมือที่ใช้ใน การวัดการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยเครื่องส่งที่ติดตั้งอยู่บนช่องเขา ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่มีกำลังส่ง 40 dBm สายอากาศมีอัตราขยาย 16.5 dBi และใช้ ความถี่ 66 MHz ที่ความถี่ขาขึ้น(Uplink) เท่ากับ 903.2 MHz ความถี่ขาลง (Downlink) เท่ากับ 948.2 MHz ส่วนที่เครื่องรับเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่อัตราขยาย 0 dBi และใบยางพารามีขนาด กว้าง 4 เซนติเมตรยาว 8 เซนติเมตร ในพื้นที่ขนาดกว้าง 300 เมตรและยาวขนาด 300 เมตร สามารถเขียนเป็นสมการที่ 3.4 ดังนี้

$$\text{EIRP} = \text{Pout}_{\text{BTS}} - \text{Lc}_{\text{BTS}} - \text{L} + \text{Ga}_{\text{BTS}} \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

โดยที่

EIRP = กำลังการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผล

$\text{Pout}_{\text{BTS}}$  = ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง หน่วยเดซิเบล (dBm)

$\text{Ga}_{\text{BTS}}$  = อัตราขยายสายอากาศส่ง หน่วย เดซิเบล (dBi)

$\text{Lc}_{\text{BTS}}$  = ค่าลดทอนอุปกรณ์รวมสัญญาณเครื่องส่ง หน่วย เดซิเบล (dB)

L = ค่าลดทอนใบไม้และต้นไม้ หน่วย เดซิเบล (dB)

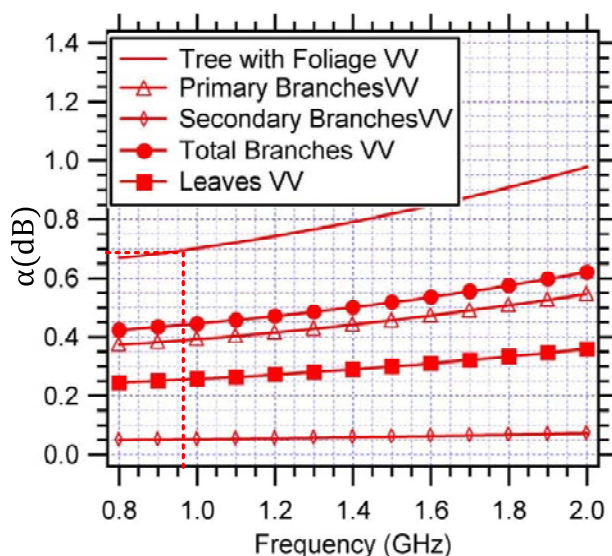
สำหรับพารามิเตอร์ของใบไม้พิจารณาตามตารางที่ 3.1 โดยจำนวนความหนาแน่นของใบไม้ต่อหนึ่ง หน่วยลูกบาศก์เมตร จะต้องมีจำนวน 679 ใบโดยประมาณเพื่อให้สามารถสอดคล้องกับการใช้ งานกราฟค่ากำลังสูญเสียตามวิธีของปริมาตรกลุ่มใบไม้และความถี่ตามภาพที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของใบไม้

พารามิเตอร์ใบไม้	ค่าที่วัดได้
รัศมีของใบไม้	6 เซนติเมตร
ความหนาของใบไม้	0.5 มิลลิเมตร
จำนวนความหนาแน่นของใบไม้	679 ใบ



ค่ากำลังสูญเสียตามวิถี (Path Loss) ของปริมาตรกลุ่มใบไม้และความถี่จะพิจารณาทั้งต้นไม้และใบไม้ (Tree with Foliage) ร่วมกัน โดยตามภาพที่ 3.5 จะพิจารณาจากเส้นทึบสีแดงที่ไม่มีสัญลักษณ์อื่นใด สำหรับความถี่ที่นำมาใช้ทดสอบเป็นความถี่ขาลง (Downlink) เท่ากับ 956.6 MHz



ภาพที่ 3.5 ค่ากำลังสูญเสียตามวิถีของปริมาตรกลุ่มใบไม้และความถี่  
ที่มา : Torrico,S.A.Lang R.H. (2007)

### 3.3.3แบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)

เนื่องจากพื้นที่ในตัวเมืองประกอบด้วยสิ่งแวดล้อมที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (ในช่วงเวลาสั้นๆ) เช่นสิ่งก่อสร้างต่างๆ และสิ่งแวดล้อมที่แปรเปลี่ยนตามเวลา เช่น รถที่แล่นบนท้องถนนหรือผู้คนที่เดินภายนอกอาคาร เป็นต้น อย่างไรก็ตามสิ่งแวดล้อมที่แปรเปลี่ยนตามเวลาส่วนมากจะมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับสิ่งแวดล้อมที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา เช่น อาคารต่างๆ ดังนั้นผลกระทบที่เกิดกับการแพร่กระจายคลื่นของสิ่งแวดล้อมที่แปรเปลี่ยนตามเวลานั้นมีผลกระทบน้อยมาก ผลกระทบที่เกิดขึ้นมีเพียงกรณีการแพร่กระจายคลื่นในแนวสายตาท้องถนนที่มีการจราจรหนาแน่น โดยแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) เป็นแบบจำลองชนิดที่ นิยมใช้สำหรับพื้นที่ในเขตตัวเมืองที่มีความหนาแน่นสูง โดยแบบจำลองชนิดนี้จะใช้ข้อมูลบางอย่างของสภาพแวดล้อม มาใช้ในการคำนวณ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยเครื่องส่งที่ติดตั้งอยู่บนตึกใกล้กับวัดพระมหาธาตุ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่มีกำลังส่ง 46 dBm สายอากาศมีอัตราขยาย 16.5 dBi และใช้ความถี่ 107 MHz ที่ความถี่ขาขึ้น(Uplink) เท่ากับ 911.4 MHz ความถี่ขาลง (Downlink)

เท่ากับ 956.4 MHz ส่วนที่เครื่องรับเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่อัตราขยาย 0 dBi สามารถเขียนเป็นสมการที่ 3.5 ดังนี้

$$EIRP = P_{out_{BTS}} - L_{CBTS} - L_{f_{BTS}} + G_{a_{BTS}} \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

โดยที่

EIRP = กำลังการแผ่กระจายคลื่นประสิทธิผล

$P_{out_{BTS}}$  = ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง หน่วยเดซิเบล (dBm)

$G_{a_{BTS}}$  = อัตราขยายสายอากาศส่ง หน่วย เดซิเบล (dBi)

$L_{CBTS}$  = ค่าลดทอนอุปกรณ์รวมสัญญาณเครื่องส่ง หน่วย เดซิเบล (dB)

$L_{f_{BTS}}$  = ค่าลดทอนสายนำสัญญาณเครื่องส่ง หน่วย เดซิเบล (dB)

$$PL(NLOS) = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) + L(\text{diff}) + L(\text{mult}) \quad \text{สมการที่ 3.6}$$

โดยที่

f = ความถี่ หน่วย เมกะเฮิรตซ์ (MHz)

d = ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ หน่วย กิโลเมตร (km)

$L(\text{diff})$  = กำลังสูญเสียจากการเลี้ยวเบนที่ขอบหลังคา

$L(\text{mult})$  = กำลังสูญเสียจากการเลี้ยวเบนหลายทางเนื่องจากอาคารรอบข้าง

$$L(\text{diff}) = -16.9 - 10 \log(\Delta w) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta h_m) + L(0) \quad \text{สมการที่ 3.7}$$

โดยที่

W = ความกว้างของถนน หน่วยเป็นเมตร

$h_m$  = ความสูงสายอากาศโทรศัพท์เคลื่อนที่

$$\Delta h_m = h_{\text{roof}} - h_m$$

$L(0)$  = กำลังสูญเสียเนื่องจากมุมตกกระทบทำมุมกับแนวถนน ภาพที่ 2.18 กำหนด

โดย

$$L(0) = \begin{cases} -10 + 0.354\alpha & \text{สำหรับ } 0 \leq \alpha \leq 35 \\ 2.5 + 0.075(\alpha - 35) & \text{สำหรับ } 35 \leq \alpha \leq 55 \\ 4 - 0.114(\alpha - 55) & \text{สำหรับ } 55 \leq \alpha \leq 90 \end{cases}$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ มุมเงยที่เกิดจากคลื่นตกกระทบกับพื้นถนน

$$L(\text{mult}) = C_0 + C_a + C_d \log(d) + C_f \log(f) - 9 \log(w) \quad \text{สมการที่ 3.8}$$

โดยที่

$C_0 = -18 \log(1 + \Delta h_{te})$  กรณี  $h_b > h_{\text{roof}}$  (เท่ากับ 0 สำหรับ  $h_b \leq h_{\text{roof}}$ )

$C_a = 54 - 0.8(\Delta h_{te})$  กรณี  $d \geq 0.5 \text{ km}$  } สำหรับกรณี  $h_b \leq h_{\text{roof}}$  (ถ้า  $h_b > h_{\text{roof}}$ )

$$= 54 - 1.6(\Delta h_{te}) \text{ กรณี } d < 0.5 \text{ km} \quad \text{แล้ว } C_a = 54$$

$$C_d = 18 - 15(\Delta h_{te})/h \text{ หลังคา) สำหรับ } h_b \leq h_{\text{roof}} \text{ (เท่ากับ 18 สำหรับ}$$

$$\text{กรณี } h_b > h_{\text{roof}})$$

$$C_f = -4 + 0.7[(f/925) - 1] \text{ สำหรับเขตชานเมือง}$$

$$= -4 + 1.5[(f/925) - 1] \text{ สำหรับเขตตัวเมือง}$$

$$h_b = \text{ความสูงสายอากาศสถานีฐาน (m)}$$

$h_{\text{roof}}$  = ความสูงเฉลี่ยของอาคารขนาดเล็กกรอบข้าง มีค่าประมาณ 3 x จำนวนชั้นของอาคาร + ความสูงของโครงหลังคา (โดยทั่วไปมีค่า 3 เมตร หรือ 0 เมตร ในกรณีเป็นพื้นราบ)

$$\Delta h_b = h_b - h_{\text{roof}}$$

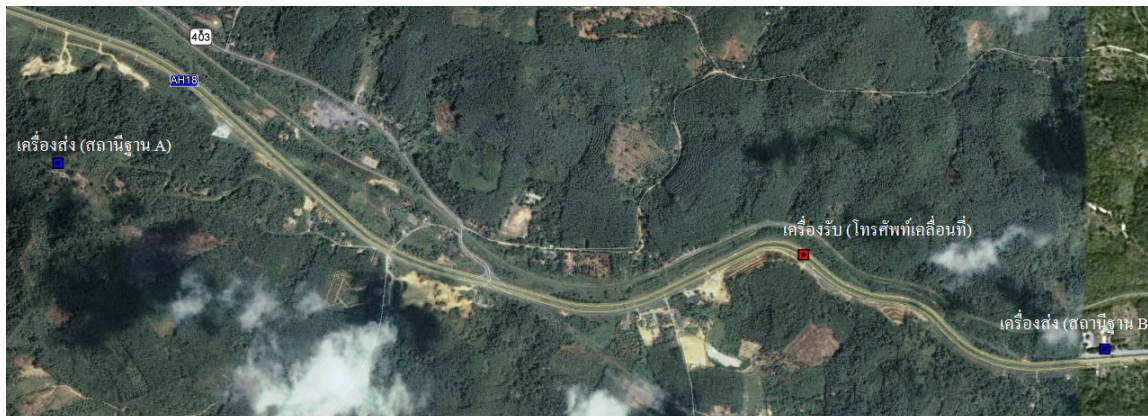
### 3.4. สถานที่วัดสัญญาณ

การทดสอบสัญญาณได้ดำเนินการในเส้นทางถนนหมายเลข 41 ในช่วงระหว่าง ป่าพาทองและแยกสวนผัก ตำบลอ้าใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยลักษณะภูมิประเทศประกอบด้วยช่องเขาที่เป็นส่วนหนึ่งของเทือกเขานครศรีธรรมราช และสวนยางพาราตลอดเส้นทาง สวนยางพาราเป็นต้นไม้ที่มีใบสีเขียว และมีความสูงเฉลี่ยประมาณ 20 เมตรและเกือบทั้งหมดมีระยะสม่ำเสมอเป็นระยะทาง 10 เมตร ค่าเฉลี่ยของลำต้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยประมาณ 0.5 เมตร ใบไม้มีขนาดกว้าง 6 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร กับความหนาแน่น 679 ใบต่อลูกบาศก์เมตร พุ่มไม้ประกอบด้วยหลายๆ กิ่งก้านสาขา แต่ละอันทำมุมเฉลี่ยอยู่ที่ 30 องศา โดยจุดที่พบปัญหาจะมีระดับความแรงของสัญญาณอยู่ที่ -93 dBm สำหรับสถานที่ทดสอบสัญญาณ พิจารณาตามภาพที่ 3.6



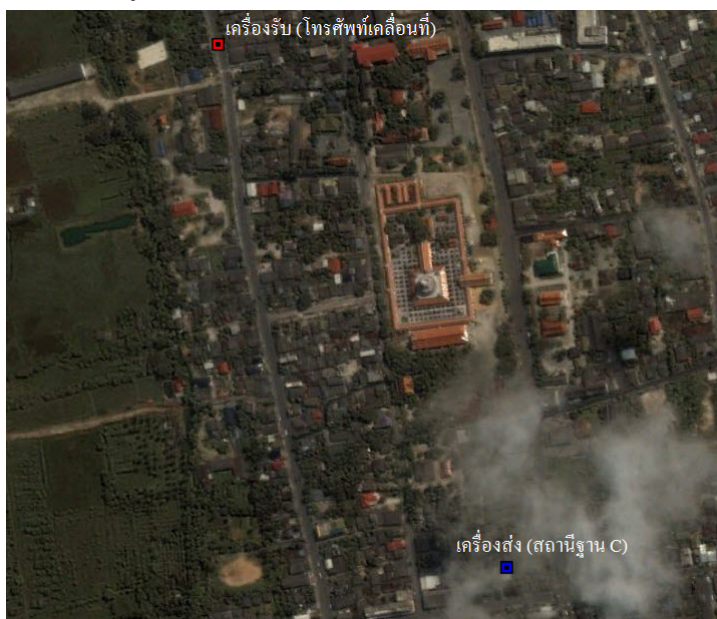
ภาพที่ 3.6 สถานที่ทดสอบสัญญาณ

สำหรับภาพถ่ายทางอากาศของสถานที่ทดสอบสัญญาณแบบจำลองลี (Lee Model) และแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) พิจารณาตามภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ภาพถ่ายทางอากาศของสถานที่ทดสอบสัญญาณแบบจำลองลี (Lee Model) และแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest)

ภาพถ่ายทางอากาศของสถานที่ทดสอบสัญญาณแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) ดูตามภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายทางอากาศของสถานที่ทดสอบสัญญาณแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)

สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต่อการคำนวณ เช่น ค่าความสูงของสายอากาศเครื่องส่ง (สถานีฐาน) และเครื่องรับ (โทรศัพท์เคลื่อนที่) ความถี่ที่ใช้งาน กำลังส่งของเครื่องส่ง เป็นต้น มีรายละเอียดตามตารางที่ 3.1 สำหรับที่มาของพารามิเตอร์จะอาศัยข้อมูลจากภาพ

ที่ 1.1 มาเป็นตัวกำหนดเครื่องส่ง (สถานีฐาน) ที่จะใช้ในการทดสอบ โดยสถานีฐาน A และ B จะใช้กับแบบจำลองลี (Lee Model) ร่วมกับแบบจำลองต้นไม้ยางพารา(Tree Model Rubber Forest) ส่วนสถานีฐาน C ได้นำมาใช้กับแบบจำลองวอลฟ์-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องส่ง (สถานีฐาน) เพื่อใช้ในการทดสอบ

เครื่องส่ง (สถานี ฐาน)	ทิศทาง สายอากาศ	ความถี่ (Mhz)	ความถี่(MHz)		กำลังส่ง สถานีฐาน (dBm)	อัตราขยาย สายอากาศ dBi	แพทเทิน สายอากาศ (Deg.)
			ขาขึ้น	ขาลง			
A	A1	108	911.6	956.6	46	16.5	120
	A2	96	909.2	954.2	46	16.5	120
	A3	111	912.2	957.2	46	16.5	120
B	B1	93	908.6	953.6	40	16.5	90
	B2	66	903.2	948.2	40	16.5	90
C	C1	107	911.4	956.4	46	16.5	88
	C2	109	911.8	956.8	46	16.5	88
	C3	105	911	956	46	16.5	88

### 3.5. วิธีการทดสอบ

1. จัดสร้างชุดกล่องลูกบาศก์เมตรด้วยท่อพีวีซีสีเหลืองขนาด (3/8") เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ในการจัดเก็บ ขนาดของใบไม้ จำนวนใบไม้ และมุมของกิ่งไม้ ในพื้นที่ทดสอบสวนยางพาราตามเส้นทางถนนหมายเลข 41 ในช่วงระหว่างป้อมผาทองและแยกสวนผัก ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช ตามภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ชุดกล่องลูกบาศก์เมตร

2. ใช้ชุดกล่องลูกบาศก์เมตร มาเป็นอุปกรณ์ในการทดสอบโดยวางกรอบชุดกิ่งไม้ กลุ่มตัวอย่างพร้อมทั้งนับจำนวนและมุมของกิ่งไม้



ภาพที่ 3.10 ชุดกล้องลูกบาศก์เมตรวางครอบชุดกึ่งไม้กลุ่มตัวอย่าง

3.ทำการตรวจสอบและเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของพื้นที่ทดสอบ เช่น ความสูงของสายอากาศส่ง ความสูงของสายอากาศตัวรับ ค้นหาความถี่ สังเกตการหันของสายอากาศหรือทิศทางสายอากาศ เป็นต้น

4.คำนวณตามแบบจำลองต่างๆ ได้แก่ แบบจำลองลี (Lee Model) แบบจำลองต้นไม้อย่างพารา (Tree Model Rubber Forest) และแบบจำลองแบบจำลองวอล์ฟลิช-ไอเคกามิ ให้เหมาะสมกับลักษณะของพื้นที่ทดสอบเพื่อทำนายค่าการสูญเสียตามวิธี

5.ทดสอบคุณภาพสัญญาณในเส้นทางถนนหมายเลข 41 ในช่วงระหว่างป้อมผาทองและแยกสวนผัก ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช ด้วยชุดโทรศัพท์เคลื่อนที่ทดสอบ (Test Mobile System : TEMS) ร่วมกับจีพีเอสที่ใช้ทราบค่าเส้นรุ้งเส้นแวงของตำแหน่ง

6.แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายและค่าจากการวัดของบริเวณพื้นที่ทดสอบ

7.การเก็บข้อมูลกับการทดสอบคุณภาพสัญญาณทั้งก่อนและหลังดำเนินการจะเป็นข้อมูลแบบเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา แนบไว้ในภาคผนวก

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับทำนายนการแพร่กระจายคลื่นด้วยค่ากำลังสูญเสียตามวิถี (Path Loss) โดยใช้แบบจำลองลิ้งกับพื้นที่เนินเขา แบบจำลองต้นไม้สำหรับพื้นที่ป่าไม้ และแบบจำลองแบบจำลองวอลท์ฟิลซ์-ไอเคกามีใช้กับพื้นที่ตัวเมือง โดยเซลขนาดเล็กรวมพื้นที่เขตชานเมืองที่เต็มไปด้วยเนินเขา สามารถเลือกสถานที่ที่มีปัญหาคุณภาพของสัญญาณแล้วนำมาวิเคราะห์และปรับปรุงโดยใช้แบบจำลองแบบผสม (Hybrid Model) ที่มีทั้งแบบจำลองลิ้งและแบบจำลองต้นไม้ แบบจำลองเหล่านี้จะประเมินเทียบกับพารามิเตอร์จริง โดยการเลือกสถานที่วัดสัญญาณในการทำวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยพื้นที่ที่เป็นเนินเขาและสวนยางพารา สำหรับความแรงของสัญญาณที่รับได้สามารถปรับปรุงโดยปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์สถานีฐาน ได้แก่ ความสูงของสายอากาศส่ง (สถานีฐาน) และตัวรับ (โทรศัพท์เคลื่อนที่) กำลังส่งของสถานีฐาน มุมสายอากาศครอบคลุมถึงการทดสอบสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบค่าแบบจำลองกำลังสูญเสียตามวิถีกับผลที่ได้จากการวัดสัญญาณตามสถานที่จริง

#### 4.1 แบบจำลองลิ้ง (Lee Model)

แบบจำลองลิ้ง (Lee Model) ใช้กับพื้นที่เนินเขาในการทำนายนและแก้ปัญหาจุดบกพร่องของสัญญาณที่รับได้ผลจากสิ่งกีดขวางกับความสูงของบริเวณขอบเหลี่ยมคม (Knife-Edge) โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยเครื่องส่ง (สถานีฐาน) ที่ติดตั้งอยู่บนช่องเขาส่วนหนึ่งของเทือกเขานครศรีธรรมราช ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช มีกำลังส่ง 46 dBm สายอากาศมีอัตราขยาย 16.5 dBi และใช้ช่องความถี่ 66 ที่มีความถี่ขาขึ้น (Uplink) เท่ากับ 903.2 MHz ความถี่ขาลง (Downlink) เท่ากับ 948.2 MHz สำหรับเครื่องรับเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่มีอัตราขยาย 0 dBi โดยมีสภาพภูมิประเทศตามภาพที่



ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายทางอากาศของสภาพภูมิประเทศที่ทดสอบ

สำหรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองลิ้นี่ประกอบด้วย ค่าความสูงสิ่งกีดขวาง ( $h_p$ ) ค่าพารามิเตอร์การเลี้ยวเบนเฟรเนลเคอร์ซอฟฟ์ ( $v$ ) ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและสิ่งกีดขวาง ( $d_1$ ) ระยะทางระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่และสิ่งกีดขวาง ( $d_2$ ) อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยม ( $G_d$ ) ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง ( $P_{out_{BTS}}$ ) อัตราขยายสายอากาศส่ง ( $G_{a_{BTS}}$ ) และความถี่ขาลง ( $f$ ) จากนั้นแทนค่าในสมการที่ 4.1 และ 4.2 สำหรับค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถี ก่อนและหลังดำเนินการ แบบจำลองลิ้นี่ (Lee Model) พิจารณาตามตารางที่ 4.1

$$v = h_p \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

$$\begin{aligned} G_d(\text{dB}) &= 0 \text{ dB} & v &\leq -1 \\ G_d(\text{dB}) &= 20 \log(0.5 - 0.62v) & -1 &\leq v \leq 0 \\ G_d(\text{dB}) &= 20 \log(0.5e^{-0.95v}) & 0 &\leq v \leq 1 \\ G_d(\text{dB}) &= 20 \log\left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 + 0.1v)^2}\right) & 1 &\leq v \leq 2.4 \\ G_d(\text{dB}) &= 20 \log\left(\frac{0.225}{v}\right) & v &> 2.4 \end{aligned}$$

โดยที่

$v$	= การเลี้ยวเบนเฟรเนลเคอร์ซอฟฟ์	
$h_p$	= ความสูงสิ่งกีดขวาง	หน่วย เมตร (m)
$d_1$	= ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและสิ่งกีดขวาง	หน่วย เมตร (m)
$d_2$	= ระยะทางระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่และสิ่งกีดขวาง	หน่วย เมตร (m)
$\lambda$	= ความยาวคลื่นในสุญญากาศ	หน่วย เมตร (m)
$G_d$	= อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยม	หน่วย เดซิเบล (dB)
$f$	= ความถี่	หน่วย เมกะเฮิรตซ์ (MHz)



$$EIRP = P_{out_{BTS}} - L_{c_{BTS}} - G_d + G_{a_{BTS}} \quad \text{สมการที่ 4.2}$$

โดยที่

$EIRP$  = กำลังการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผล

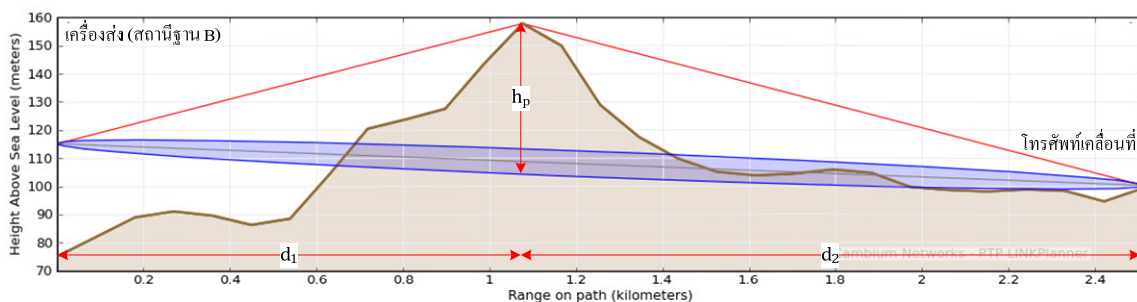
$P_{out_{BTS}}$  = ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง หน่วยเดซิเบล (dBm)

$G_{a_{BTS}}$  = อัตราขยายสายอากาศส่ง หน่วย เดซิเบล (dBi)

$L_{c_{BTS}}$  = ค่าลดทอนอุปกรณ์ร่วมสัญญาณเครื่องส่ง หน่วย เดซิเบล (dB)

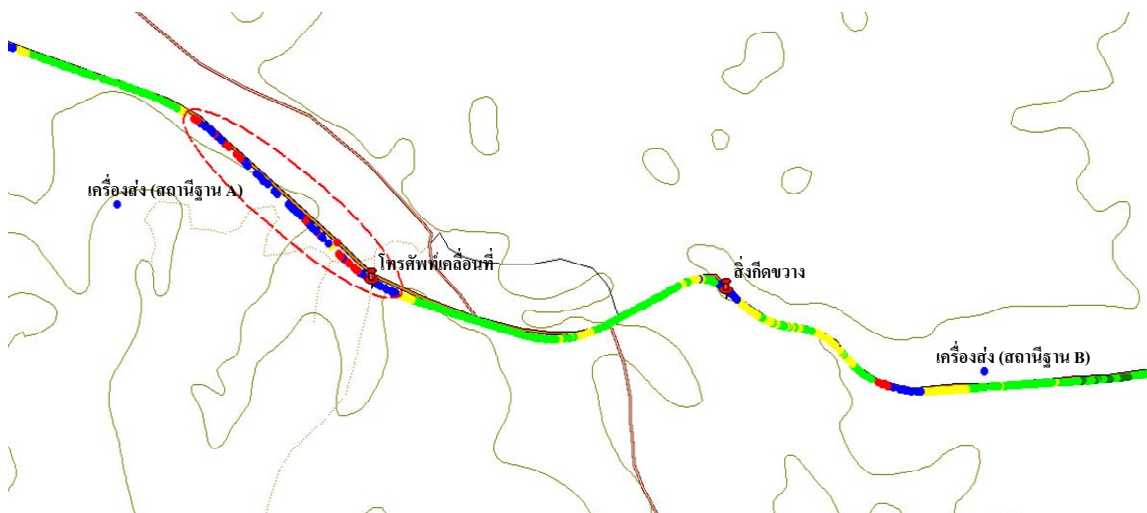
$G_d$  = อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม หน่วย เดซิเบล (dB)

การสูญเสียกำลังจากการเลี้ยวเบนพิจารณาจากเครื่องส่ง (สถานีฐาน B) และเครื่องรับ (โทรศัพท์เคลื่อนที่) ที่มีสิ่งกีดขวางกั้นอยู่ตรงกลาง พิจารณาตามภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นที่เหลี่ยมคมของสิ่งกีดขวาง

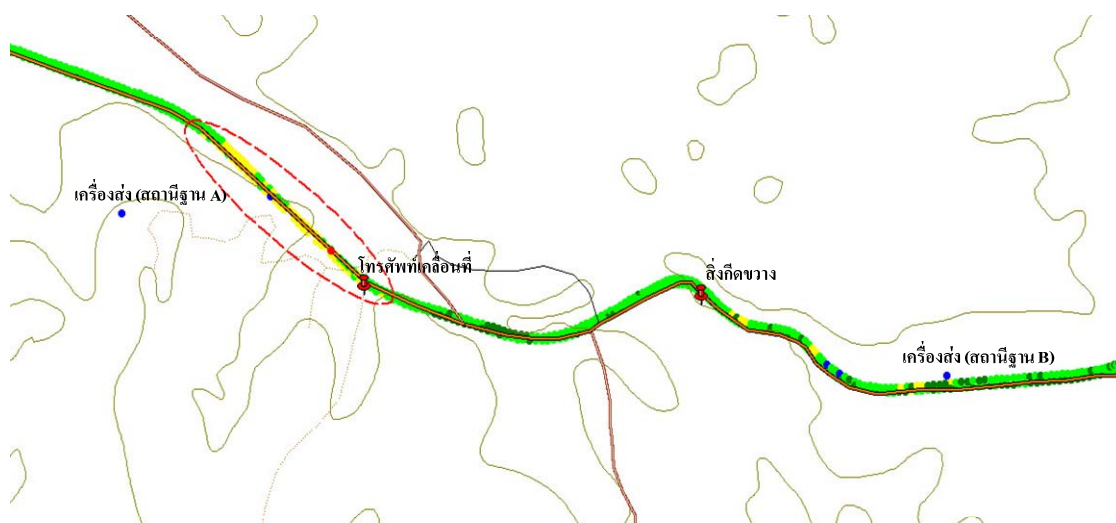
สำหรับผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถี ก่อนและหลังดำเนินการ แบบจำลองลี นั่นพิจารณาตามภาพที่ 4.3 และภาพที่ 4.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถี ก่อนดำเนินการแบบจำลองลี (Lee Model)

ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถี ก่อนและหลังดำเนินการ แบบจำลองลิย (Lee Model)

พารามิเตอร์แบบจำลองลิย (Lee Model)		ค่ากำลังสูญเสียตามวิถี (dBm)			
ก่อนดำเนินการ	หลังดำเนินการ	ก่อนดำเนินการ		หลังดำเนินการ	
		แบบจำลอง	ทดสอบจริง	แบบจำลอง	ทดสอบจริง
<p>ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง 40 วัตต์ (46dBm)</p> <p>อัตราขยายสายอากาศส่ง 16.5 dBi</p> <p>มุมทิศทางสายอากาศ 290 องศา</p> <p>ความสูงสิ่งกีดขวาง 53.9 เมตร</p> <p>ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและสิ่งกีดขวาง 1,074 เมตร</p> <p>ระยะทางระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่และสิ่งกีดขวาง 1,431 เมตร</p> <p>การเลี้ยวเบนเฟรเนลเคอร์ซอฟฟ์ 5.74</p> <p>อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม 27.72 dB</p> <p>ความถี่ขาลง 948.2 เมกะเฮิรตซ์ (MHz)</p>	<p>ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง 40 วัตต์ (46dBm)</p> <p>อัตราขยายสายอากาศส่ง 16.5 dBi</p> <p>มุมทิศทางสายอากาศ 290 องศา</p> <p>ความสูงสิ่งกีดขวาง 40 เมตร</p> <p>ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและสิ่งกีดขวาง 1,074 เมตร</p> <p>ระยะทางระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่และสิ่งกีดขวาง 1,431 เมตร</p> <p>การเลี้ยวเบนเฟรเนลเคอร์ซอฟฟ์ 3.95</p> <p>อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม 24.88 dB</p> <p>ความถี่ขาลง 948.2 เมกะเฮิรตซ์ (MHz)</p>	-93.22	-93	-87.38	-87



ภาพที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิธีหลังดำเนินการแบบจำลองลิย (Lee Model)

ในส่วนของแถบสีแสดงระดับความแรงของสัญญาณสามารถพิจารณาตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้

	RxLev $\geq$ -55 And RxLev $<$ -10	ระดับสัญญาณดีมาก
	RxLev $\geq$ -74 And RxLev $<$ -55	ระดับสัญญาณดี
	RxLev $\geq$ -84 And RxLev $<$ -74	ระดับสัญญาณปานกลาง
	RxLev $\geq$ -94 And RxLev $<$ -84	ระดับสัญญาณอ่อน
	RxLev $\geq$ -120 And RxLev $<$ -94	ระดับสัญญาณแย่มาก

สำหรับผลทำนายแบบจำลองลิย (Lee Model) จำเป็นต้องลดความสูงของสิ่งกีดขวาง ( $h_p$ ) ส่งผลให้ต้องดำเนินการเพิ่มความสูงเสาเครื่องส่ง (สถานีฐาน) สำหรับติดตั้งสายอากาศเพื่อการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จากความสูง 22 เมตรเปลี่ยนเป็น 45 เมตร

#### 4.2 แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest)

แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) เป็นการปรับปรุงระดับความแรงของสัญญาณสำหรับสวนยางพาราในเนินเขาจากผลทดสอบสัญญาณ สำหรับเครื่องมือที่ใช้

ในการวัดการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยเครื่องส่งที่ติดตั้งอยู่บนช่องเขา ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่มีกำลังส่ง 40 dBm สายอากาศมีอัตราขยาย 16.5 dBi และใช้ช่องความถี่ 66 ที่มีความถี่ขาขึ้น(Uplink) เท่ากับ 903.2 MHz ความถี่ขาลง (Downlink) เท่ากับ 948.2 MHz ส่วนที่เครื่องรับเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่อัตราขยาย 0 dBi

สำหรับพารามิเตอร์ของสวนยางพาราจะประกอบด้วยต้นยางพาราที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้นประมาณ 50 เซนติเมตร มีความสูงเฉลี่ย 20 เมตร และมีระยะห่างระหว่างต้นประมาณ 10 เมตร ในส่วนของใบยางพาราจะมีขนาดกว้าง 6 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และมีความหนาแน่นประมาณ 679 ใบ (คิดต่อหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เมตร) พิจารณาตามตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการทดลองแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest )

กิ่ง	มุม (องศา)	จำนวนใบ
กิ่งที่ 1	55	679
กิ่งที่ 2	30	
กิ่งที่ 3	45	
กิ่งที่ 4	47	
กิ่งที่ 5	28	
กิ่งที่ 6	12	
กิ่งที่ 7	13	
กิ่งที่ 8	12	

พิจารณาตามพุ่มใบของแต่ละกิ่งก้านนั้นจะทำมุมเฉลี่ยอยู่ที่ 30 องศา โดยใบไม้เหล่านี้เมื่อสังเกตตามภาพถ่ายทางอากาศจะมีความลึกครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 10 กิโลเมตร ในขณะที่ดำเนินการทดสอบพบว่าใบไม้จะมีลักษณะขึ้นและใบแข็งตามแรงลม โดยสามารถสรุปเป็นค่ากำลังงานสูญเสียตามวิธีก่อนและหลังดำเนินการ แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลี (Lee Model) ตามตารางที่ 4.4 สำหรับการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ความสูงเครื่องส่ง (สถานีฐาน) อัตราขยายสายอากาศ มุมสายอากาศ จะอ้างอิงการดำเนินการในลักษณะเดียวกันกับพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมคล้ายคลึงกันและปัญหาในรูปแบบเดียวกัน

สำหรับสมการแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลี (Lee Model) หรือแบบจำลองผสม (Hybrid Model) พิจารณาตามสมการที่ 3.3

$$\text{EIRP} = \text{Pout}_{\text{BTS}} - \text{LC}_{\text{BTS}} - G_d + G_{\text{BTS}} + \alpha(f) \quad \text{สมการที่ 4.3}$$

โดยที่

EIRP = กำลังการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผล

$\text{Pout}_{\text{BTS}}$  = ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง หน่วยเดซิเบล (dBm)

$G_{\text{BTS}}$  = อัตราขยายสายอากาศส่ง หน่วย เดซิเบล (dBi)

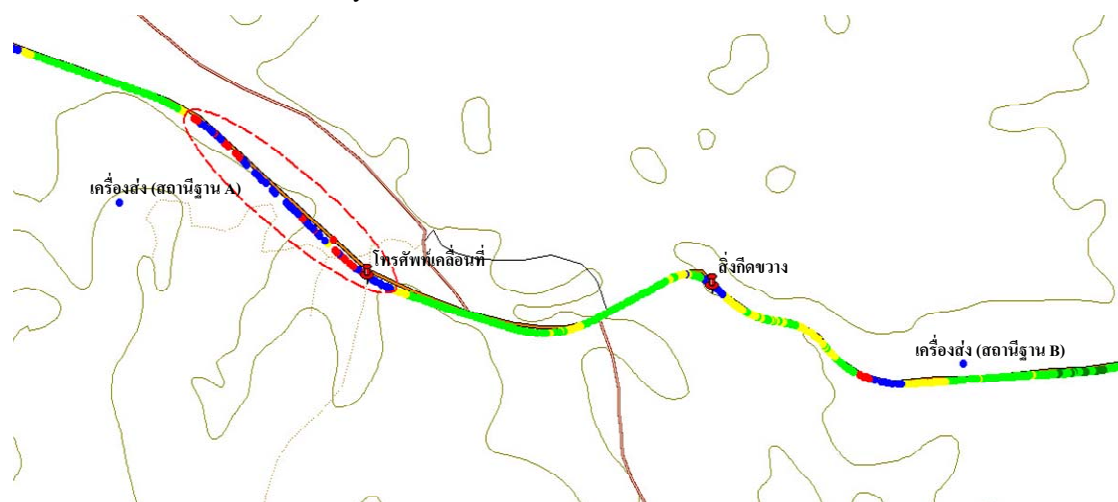
$\text{LC}_{\text{BTS}}$  = ค่าลดทอนอุปกรณ์รวมสัญญาณเครื่องส่ง หน่วย เดซิเบล (dB)

$G_d$  = อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม หน่วย เดซิเบล (dB)

$\alpha(f)$  = ค่าลดทอนจากต้นไม้และใบไม้ หน่วยเดซิเบล (dB)

การสูญเสียกำลังจากการเลี้ยวเบนพิจารณาจากเครื่องส่ง (สถานีฐาน B) และเครื่องรับ (โทรศัพท์เคลื่อนที่) ที่มีสิ่งกีดขวางกันอยู่ตรงกลาง พิจารณาตามภาพที่ 4.2

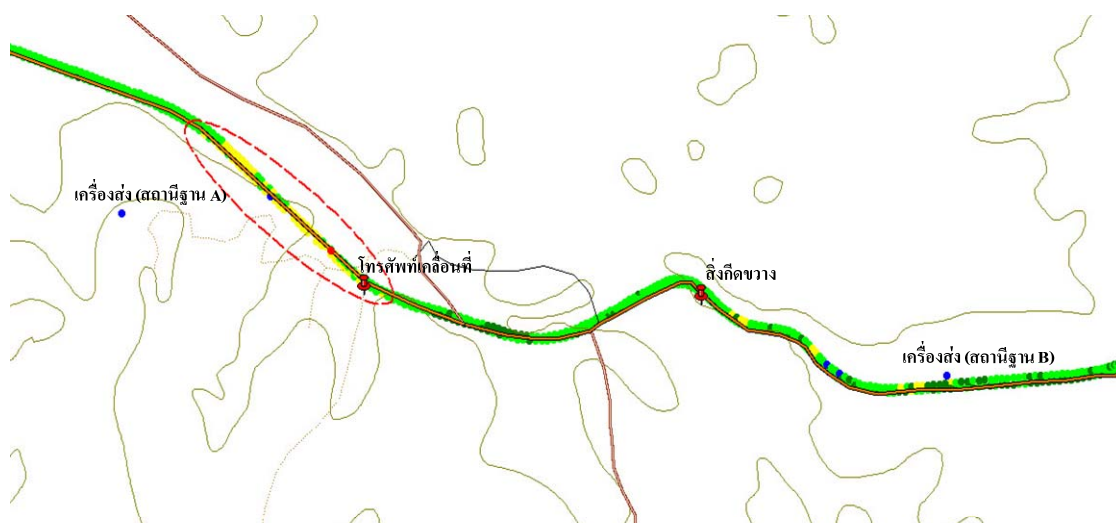
สำหรับผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถี ก่อนและหลังดำเนินการ แบบจำลองผสม (Hybrid Model) พิจารณาตามภาพที่ 4.5 และ ภาพที่ 4.6 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถี ก่อนดำเนินการ แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลี (Lee Model)

ตารางที่ 4.4 ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถีก่อนและหลังดำเนินการแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลี (Lee Model)

พารามิเตอร์แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลี (Lee Model)		ค่ากำลังสูญเสียตามวิถี (dBm)			
ก่อนดำเนินการ	หลังดำเนินการ	ก่อนดำเนินการ		หลังดำเนินการ	
		แบบจำลอง	ทดสอบจริง	แบบจำลอง	ทดสอบจริง
<p>ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง 40 วัตต์ (46dBm)</p> <p>อัตราขยายสายอากาศส่ง 16.5 dBi</p> <p>มุมทิศทางสายอากาศ 290 องศา</p> <p>ความสูงสิ่งกีดขวาง 53.9 เมตร</p> <p>ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและสิ่งกีดขวาง 1,074 เมตร</p> <p>ระยะทางระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่และสิ่งกีดขวาง 1,431 เมตร</p> <p>การเลี้ยวเบนเฟรเนลเคอร์ซอพฟ์ 5.74</p> <p>อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม 27.72 dB</p> <p>ความถี่ขาลง 948.2 เมกะเฮิรตซ์ (MHz)</p> <p>ค่ากำลังสูญเสียตามวิถีของปริมาตรกลุ่มใบไม้ 7.5 dB</p>	<p>ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง 40 วัตต์ (46dBm)</p> <p>อัตราขยายสายอากาศส่ง 17.5 dBi</p> <p>มุมทิศทางสายอากาศ 300 องศา</p> <p>ความสูงสิ่งกีดขวาง 40 เมตร</p> <p>ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและสิ่งกีดขวาง 1,074 เมตร</p> <p>ระยะทางระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่และสิ่งกีดขวาง 1,431 เมตร</p> <p>การเลี้ยวเบนเฟรเนลเคอร์ซอพฟ์ 3.95</p> <p>อัตราขยายการเลี้ยวเบนขอบเหลี่ยมคม 24.88 dB</p> <p>ความถี่ขาลง 948.2 เมกะเฮิรตซ์ (MHz)</p> <p>ค่ากำลังสูญเสียตามวิถีของปริมาตรกลุ่มใบไม้ 7.5 dB</p>	-99.87	-98.9	-94.88	-94.5



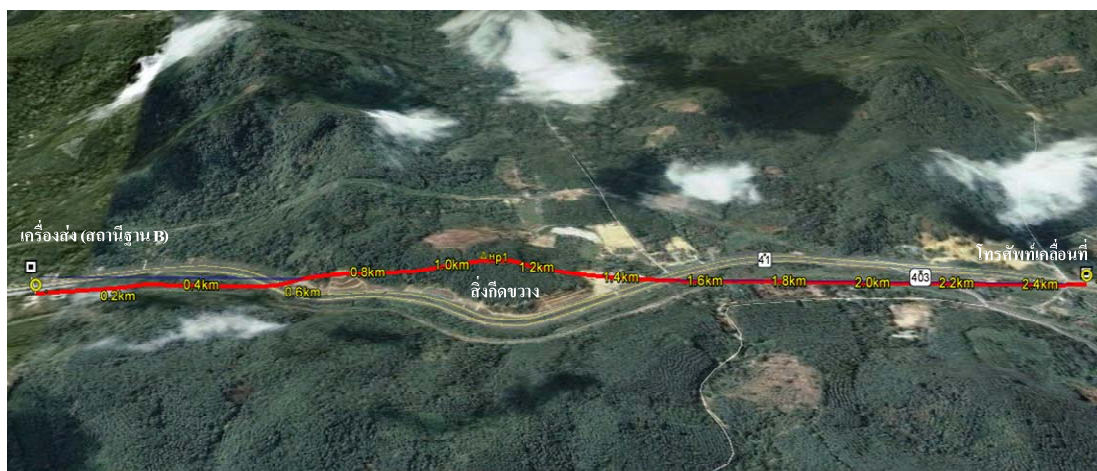
ภาพที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิธี หลังดำเนินการแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลิซ (Lee Model)

ในส่วนของแถบสีแสดงระดับความแรงของสัญญาณสามารถพิจารณาตามตารางที่ 4.5 ที่ได้แบ่งช่วงระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้เป็น 5 ระดับ

ตารางที่ 4.5 แสดงระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้

	$RxLev \geq -55$ And $RxLev < -10$	ระดับสัญญาณดีมาก
	$RxLev \geq -74$ And $RxLev < -55$	ระดับสัญญาณดี
	$RxLev \geq -84$ And $RxLev < -74$	ระดับสัญญาณปานกลาง
	$RxLev \geq -94$ And $RxLev < -84$	ระดับสัญญาณอ่อน
	$RxLev \geq -120$ And $RxLev < -94$	ระดับสัญญาณแย่มาก

การวิเคราะห์เส้นทางเดินทางของคลื่น (Path Profile) ผ่านภาพถ่ายทางอากาศเพื่อตรวจสอบความสูงและตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง สำหรับการทำนายการแพร่กระจายคลื่นในแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลิซ (Lee Model) สามารถพิจารณาตามภาพที่ 4.7 โดยแต่ละจุดจะมีความสูงจากระดับน้ำทะเลที่แตกต่างกันไปอ้างอิงตามตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.7 ภาพถ่ายทางอากาศของสภาพภูมิประเทศที่ทดสอบ แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลิย (Lee Model)

ตารางที่ 4.6 แสดงความสูงระดับน้ำทะเลของแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest)

ระยะทาง (กิโลเมตร)	ความสูงระดับน้ำทะเล(เมตร)	ความสูงสังกัดขวาง (เมตร)
0	75.3	0
0.0896	82.2	0
0.1793	89.2	0
0.2689	91.2	0
0.3585	89.7	0
0.4482	86.4	0
0.5378	88.6	0
0.6275	104.1	0
0.7171	120.5	0
0.8067	123.9	0
0.8964	127.6	0
0.986	143.5	0
1.0756	157.9	0
1.1653	150	0
1.2549	129	0



ตารางที่ 4.6 แสดงความสูงระดับน้ำทะเลของแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) (ต่อ)

ระยะทาง (กิโลเมตร)	ความสูงระดับน้ำทะเล(เมตร)	ความสูงสิ่งกีดขวาง (เมตร)
1.3446	117.6	0
1.4342	110	0
1.5238	105.3	0
1.6135	104	0
1.7031	104.6	0
1.7927	106.1	0
1.8824	104.9	0
1.972	99.9	0
2.0617	98.8	0
2.1513	98.3	0
2.2409	99	0
2.3306	98.5	0
2.4202	94.8	0
2.5098	99.5	0

สำหรับผลทำนายแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลี (Lee Model) จำเป็นต้องดำเนินการลดความสูงของสิ่งกีดขวาง ( $h_p$ ) ส่งผลให้ต้องเพิ่มความสูงเสาเครื่องส่ง (สถานีฐาน) สำหรับติดตั้งสายอากาศเพื่อการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จากความสูง 22 เมตรเปลี่ยนเป็น 45 เมตร เพิ่มอัตราขยายสายอากาศส่งจาก 16.5 dBi เป็น 17.5 dBi และทำการปรับมุมทิศทางสายอากาศจาก 290 องศา เป็น 300 องศา โดยผลทดสอบคุณภาพสัญญาณจริงที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับการทำนายแบบแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลี (Lee Model) มีค่าใกล้เคียงกันพิจารณาตามตารางที่ 4.4

#### 4.2.1 แบบจำลองคอส 235 (COST 235)

แบบจำลองคอส 235 (COST 235) เป็นแบบจำลองที่แสดงการวัดใน 2 ช่วงเวลา ประการแรกขณะที่ต้นไม้มิมีใบไม้ปกคลุม และประการที่สองเมื่อต้นไม้มิมีใบไม้ โดยแบบจำลองนี้ สามารถใช้งานได้ระหว่างความถี่ 200 MHz ถึง 95 GHz สำหรับการตรวจสอบการสูญเสียตามวิถีในพื้นที่จริงจะดำเนินการวัดระดับความแรงสัญญาณ โทรศัพท์เคลื่อนที่เทียบกับการคำนวณ ในการทดสอบจะใช้พื้นที่สวนยางพาราตลอดแนวเส้นทางถนนหมายเลข 41 ในช่วงระหว่างป้อมพิฆาตทองและแยกสวนผัก ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่มีเครื่องส่งอยู่บนช่องเขา ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมีกำลังส่ง 40 dBm และสายอากาศมีอัตราขยาย 16.5 dBi พิจารณาตามสมการที่ 4.3

$$L(\text{dB}) = Af^Bd^C \quad \text{สมการที่ 4.4}$$

โดยที่

$L(\text{dB})$  = ค่ากำลังงานการสูญเสียตามวิถี หน่วย เดซิเบล (dB)

$f$  = ความถี่ หน่วย เฮิรตซ์ (Hz)

$d$  = ความลึกของต้นไม้ออกจากภาพถ่ายทางอากาศ หน่วย เมตร (m)

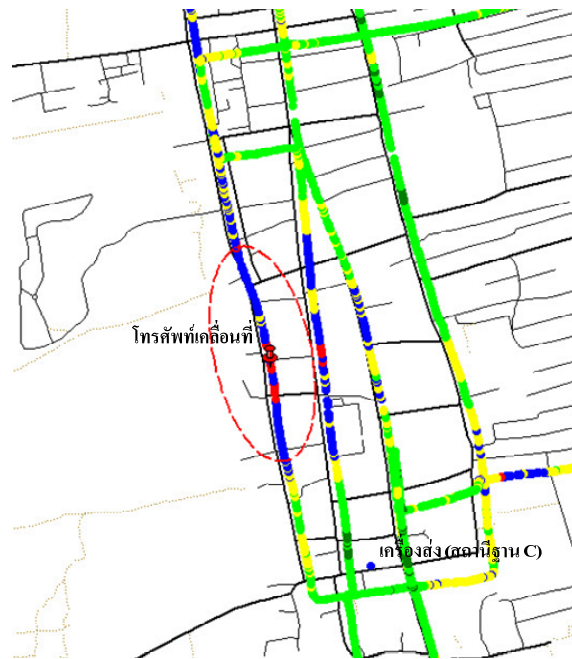
$A B C$  = ค่าตัวเลขจากการคำนวณ

จากการประมาณค่าโดยใช้ค่าต่ำจากการวัด ได้แก่ 30.2 0.5 และ 0.3 ตามลำดับ สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 4.4

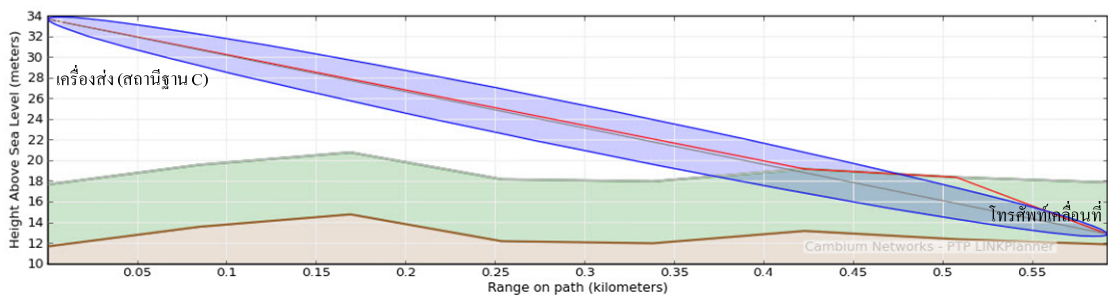
$$L(\text{dB}) = 30.2f^{0.5}d^{0.3} \quad \text{สมการที่ 4.5}$$

#### 4.3 แบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)

แบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) เป็นแบบจำลองชนิดที่นิยมใช้สำหรับพื้นที่ในเขตตัวเมืองที่มีความหนาแน่นสูง โดยแบบจำลองชนิดนี้ จะใช้ข้อมูลบางอย่างของสภาพแวดล้อม มาใช้ในการคำนวณ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการแพร่กระจายคลื่น ประกอบด้วยเครื่องส่งที่ติดตั้งอยู่บนตึกใกล้กับวัดพระมหาธาตุ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่มีกำลังส่ง 46 dBm สายอากาศมีอัตราขยาย 16.5 dBi และใช้ช่องความถี่ 107 ที่มีความถี่ขาขึ้น(Uplink) เท่ากับ 911.4 MHz ความถี่ขาลง (Downlink) เท่ากับ 956.4 MHz ส่วนที่เครื่องรับเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่อัตราขยาย 0 dBi โดยผลทดสอบคุณภาพสัญญาณก่อนดำเนินการแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) พิจารณาตามภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถี ก่อนดำเนินการแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) การสูญเสียกำลังจากการเลี้ยวเบนพิจารณาจากเครื่องส่ง (สถานีฐาน C) และเครื่องรับ (โทรศัพท์เคลื่อนที่) ที่มีสิ่งกีดขวาง สามารถพิจารณาตามภาพที่ 4.9



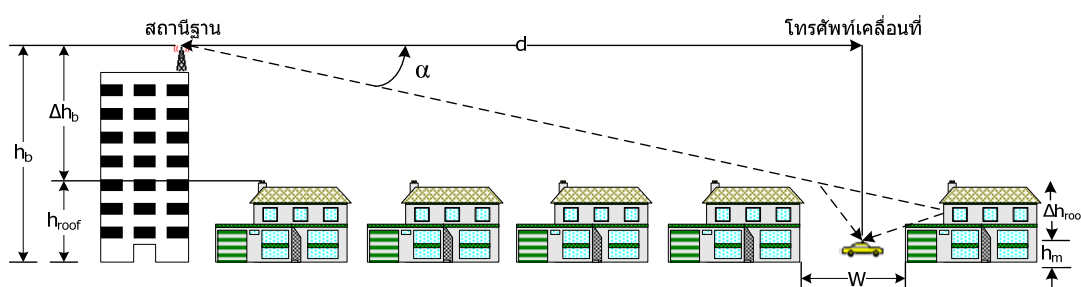
ภาพที่ 4.9 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นที่สิ่งกีดขวาง

การวิเคราะห์เส้นทางเดินทางของคลื่น (Path Profile) ผ่านภาพถ่ายทางอากาศเพื่อการตรวจดูความสูงและตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง สำหรับการทำนายการแพร่กระจายคลื่นในแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) สามารถพิจารณาตามภาพที่ 4.7 โดยแต่ละจุดจะมีความสูงจากระดับน้ำทะเลที่แตกต่างกันไปอ้างอิงตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงความสูงระดับน้ำทะเลของแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ

ระยะทาง (กิโลเมตร)	ความสูงระดับน้ำทะเล(เมตร)	ความสูงสิ่งกีดขวาง (เมตร)
0	11.7	6
0.0845	13.6	6
0.1691	14.8	6
0.2536	12.2	6
0.3382	12	6
0.4227	13.2	6
0.5073	12.4	6
0.5918	11.9	6

พิจารณาตามภาพที่ 4.10 เป็นการแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ประกอบการทำนายการแพร่กระจายคลื่นของแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) เช่น ความกว้างของถนน ( $w$ ) ความสูงของสถานีฐาน ( $h_b$ ) และความสูงของอาคารขนาดเล็กรอบข้าง ( $h_{\text{roof}}$ ) เป็นต้น

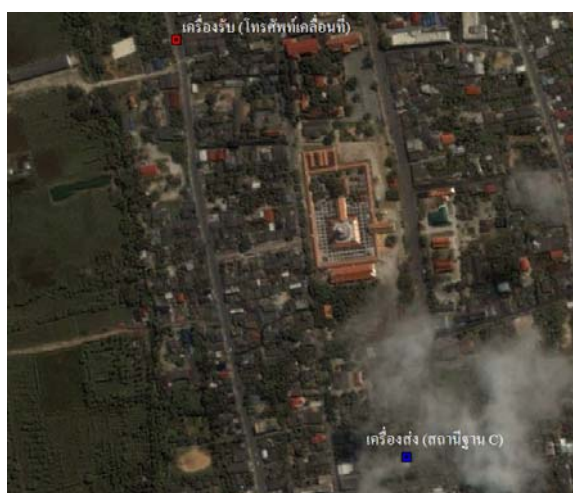


ภาพที่ 4.10 แสดงการประกอบสูตรแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)

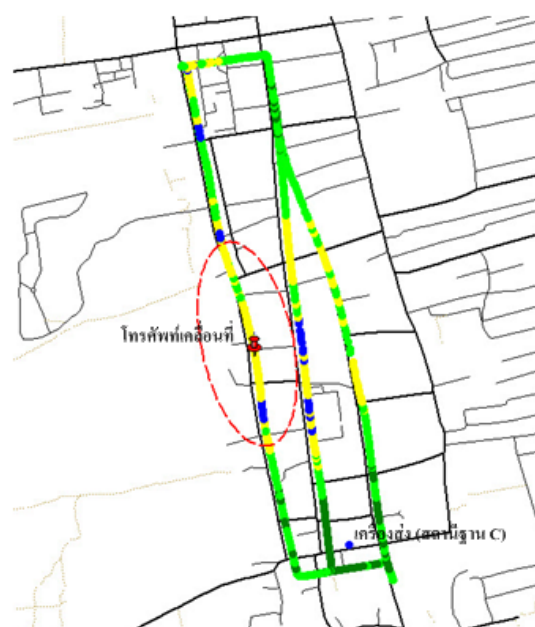
ตารางที่ 4.8 ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถีก่อนและหลังดำเนินการ แบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)

พารามิเตอร์แบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)		ค่ากำลังสูญเสียตามวิถี (dBm)			
ก่อนดำเนินการ	หลังดำเนินการ	ก่อนดำเนินการ		หลังดำเนินการ	
		แบบจำลอง	ทดสอบจริง	แบบจำลอง	ทดสอบจริง
<p>ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง 40 วัตต์ (46dBm)</p> <p>อัตราขยายสายอากาศส่ง 16.5 เดซิเบล</p> <p>มุมทิศทางสายอากาศ 0 องศา</p> <p>กำลังสูญเสียจากการเลี้ยวเบนหลายทางเนื่องจากอาคารรอบข้าง (L(mult)) -86.14 เดซิเบล</p> <p>ความกว้างของถนน (W) 10 เมตร</p> <p>ความสูงสายอากาศสถานีฐาน (<math>h_b</math>) 32 เมตร</p> <p>ความถี่ขาลง (f) 956.4 เมกะเฮิร์ตซ์</p> <p>ความสูงสายอากาศโทรศัพท์เคลื่อนที่ (<math>h_m</math>) 1 เมตร</p> <p>มุมเงยที่เกิดจากคลื่นตกกระทบกับพื้นถนน (<math>\alpha</math>) 64 องศา</p> <p>ความสูงเฉลี่ยของอาคารขนาดเล็กรอบข้าง (<math>h_{roof}</math>) 8 เมตร</p> <p>ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ (d) 600 เมตร</p> <p>กำลังสูญเสียจากการเลี้ยวเบนที่ยอดหลังคา L(diff) 33.48 เดซิเบล</p>	<p>ค่ากำลังส่งของเครื่องส่ง 40 วัตต์ (46dBm)</p> <p>อัตราขยายสายอากาศส่ง 17.5 เดซิเบล</p> <p>มุมทิศทางสายอากาศ 330 องศา</p> <p>กำลังสูญเสียจากการเลี้ยวเบนหลายทางเนื่องจากอาคารรอบข้าง (L(mult)) -96.93 เดซิเบล</p> <p>ความกว้างของถนน (W) 10 เมตร</p> <p>ความสูงสายอากาศสถานีฐาน (<math>h_b</math>) 30 เมตร</p> <p>ความถี่ขาลง (f) 956.4 เมกะเฮิร์ตซ์</p> <p>ความสูงสายอากาศโทรศัพท์เคลื่อนที่ (<math>h_m</math>) 1 เมตร</p> <p>มุมเงยที่เกิดจากคลื่นตกกระทบกับพื้นถนน (<math>\alpha</math>) 70 องศา</p> <p>ความสูงเฉลี่ยของอาคารขนาดเล็กรอบข้าง (<math>h_{roof}</math>) 7 เมตร</p> <p>ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ (d) 600 เมตร</p> <p>กำลังสูญเสียจากการเลี้ยวเบนที่ยอดหลังคา L(diff) 32.43 เดซิเบล</p>	-94.92	-94	83.08	-83

สำหรับภาพถ่ายทางอากาศเพื่อการตรวจดูความสูงและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางในการ  
 ทำนายการแพร่กระจายคลื่นในแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) สามารถ  
 พิจารณาตามภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ภาพถ่ายทางอากาศของสภาพภูมิประเทศที่ทดสอบ  
 โดยผลทดสอบคุณภาพสัญญาณหลังดำเนินการแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ  
 (Walfisch-Ikegami Model) พิจารณาตามภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ (DriveTest) ค่ากำลังงานสูญเสียตามวิถี หลังดำเนินการ  
 แบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model)

ในส่วนของแถบสีแสดงระดับความแรงของสัญญาณสามารถพิจารณาตามตารางที่ 4.9 ที่ได้แบ่งช่วงระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้เป็น 5 ระดับ

ตารางที่ 4.9 แสดงระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้

	RxLev $\geq$ -55 And RxLev $<$ -10	ระดับสัญญาณดีมาก
	RxLev $\geq$ -74 And RxLev $<$ -55	ระดับสัญญาณดี
	RxLev $\geq$ -84 And RxLev $<$ -74	ระดับสัญญาณปานกลาง
	RxLev $\geq$ -94 And RxLev $<$ -84	ระดับสัญญาณอ่อน
	RxLev $\geq$ -120 And RxLev $<$ -94	ระดับสัญญาณแย่

สำหรับผลทำนายแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) จำเป็นจำเป็นต้องดำเนินการเพิ่มความสูงของสายอากาศสถานีฐาน ( $h_b$ ) เพื่อการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จากความสูง 22 เมตรเปลี่ยนเป็น 35 เมตร เพิ่มอัตราขยายสายอากาศส่งจาก 16.5 dBi เป็น 17.5 dBi และทำการปรับมุมทิศทางสายอากาศจาก 0 องศา เป็น 330 องศา โดยผลทดสอบคุณภาพสัญญาณจริงที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับการทำนายแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) มีค่าใกล้เคียงกันพิจารณาตามตารางที่ 4.8

สำหรับสภาพภูมิอากาศ เช่น ฝนตก เมฆหนา เป็นต้น จะไม่มีผลต่อการกระจายสัญญาณคลื่นสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่เนื่องจากความถี่ที่ใช้สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่จะอยู่ในช่วงความถี่สูงที่สุด (UHF) พิจารณาตามตารางที่ 2.5

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การออกแบบเครือข่ายระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ โดยการกำหนดตำแหน่งและจำนวนสถานีฐานที่เหมาะสมนั้นเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ทราบถึงพื้นที่ให้บริการครอบคลุมสัญญาณ และมีจำนวนสถานีฐานที่น้อยที่สุดเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย ดังนั้นการหาแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นเพื่อหาค่าการสูญเสียตามวิถีของสัญญาณ (Path Loss) ที่ให้ความถูกต้องและง่ายต่อการใช้งานจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์

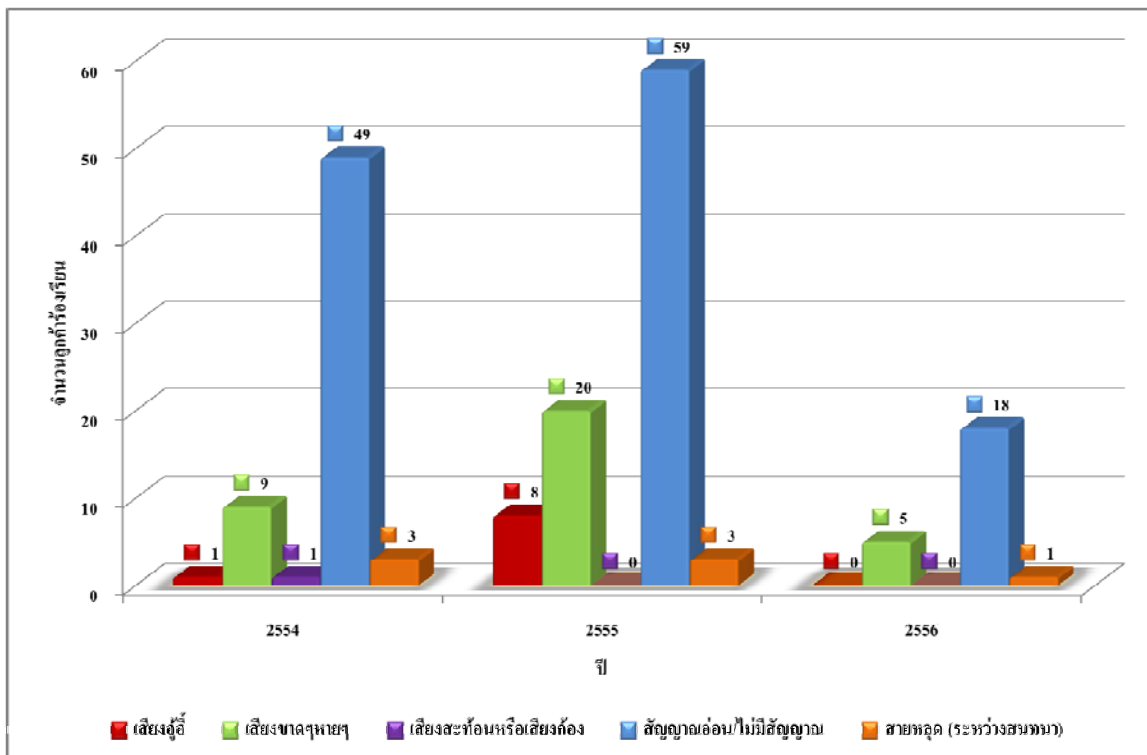
แบบจำลองการสูญเสียตามวิถีของสัญญาณ (Path Loss) สำหรับการแพร่กระจายคลื่นมีทั้งแบบการสื่อสารเส้นทางตรงแบบแนวสายตา (Line of sight) และ การสื่อสารทิศทางอ้อม (Non-Line of Sight) ซึ่งใช้หลักการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยแบบจำลองลี (Lee Model) แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber forest) และแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำนายการแพร่กระจายคลื่นด้วยค่ากำลังสูญเสียตามวิถี (Path Loss) เพื่อปรับปรุงคุณภาพสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยใช้แบบจำลองเนินเขาและต้นไม้ (Hilly-Forest) สำหรับเขตขนาดเล็กบริเวณชานเมืองที่เต็มไปด้วยเนินเขาและป่าไม้ ด้วยวิธีการเลือกพื้นที่ที่มีปัญหาคุณภาพของสัญญาณอ่อนและไม่มีสัญญาณ โดยอ้างอิงจากข้อมูลการเรียนของลูกค้านำมาวิเคราะห์และปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของสถานีฐาน ได้แก่ ความสูงสถานีฐาน อัตราขยายสายอากาศ และมุมสายอากาศ ให้สามารถอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นแบบผสม (Hybrid Model) ที่มีทั้ง แบบจำลองลี (Lee Model) แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) และแบบจำลองวอลฟ์ฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) สำหรับการเลือกพื้นที่ทดสอบในการทำวิทยานิพนธ์จะประกอบด้วยพื้นที่ที่เป็นเนินเขาและสวนยางพาราโดยใช้เส้นทางถนนหมายเลข 41 ในช่วงระหว่างบึงผาทองและแยกสวนผัก ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช และพื้นที่ชุมชนเมืองตำบลในเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยอาศัยแบบจำลองแบบผสมมาวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ได้รับผ่านลักษณะภูมิประเทศจริง และการวิเคราะห์เส้นทางเดินทางของคลื่น (Path Profile) ผ่านภาพถ่ายทางอากาศเพื่อการตรวจดูความสูงและตำแหน่งของสิ่งกีดขวางสำหรับผลการทำนายการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละแบบจำลองจะนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบคุณภาพสัญญาณจริง โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจะสามารถทำนายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณเพื่อเป็นแนวทางแก้ปัญหาสัญญาณบกพร่องของระบบ โทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์และสามารถ



วางแผนเครือข่ายให้มีพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่ต้องการมากที่สุดด้วยระดับสัญญาณที่เพียงพอและตำแหน่งที่เหมาะสม วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการแก้ปัญหาคุณภาพสัญญาณจากการรบกวนของลูกค้าโดยทำการวิเคราะห์การรับสัญญาณของโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยใช้แบบจำลองผสมผสาน (Hybrid Model) กับสภาพพื้นที่เป็นเนินเขา ต้นไม้ และตัวเมือง เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการปรับพารามิเตอร์ของสถานีฐานเพื่อให้ได้คุณภาพของสัญญาณในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยใช้จุดรับสัญญาณทั้งหมด 3 จุด ได้แก่ พื้นที่เส้นทางถนนหมายเลข 41 ในช่วงระหว่างป้อมผาทองและแยกสวนผัก จุดช่องเขาส่วนหนึ่งของเทือกเขานครศรีธรรมราช ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช และจุดอาคารพาณิชย์ใกล้กับวัดพระมหาธาตุ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยแต่ละจุดมีระดับความแรงของสัญญาณที่ต่ำกว่า จากนั้นนำผลทดสอบสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานทั้ง 3 จุด พบว่ามีความใกล้เคียงกัน

การปรับปรุงความแรงของสัญญาณที่รับได้และการปรับปรุงกำลังสูญเสียตามวิถีของต้นไม้ยางพาราในพื้นที่เนินเขาด้วยการวัดคุณภาพสัญญาณจากผลทดสอบสัญญาณตามเส้นทางถนนหมายเลข 41 โดยแบบจำลองคอส 235 (COST 235) ได้ปรับค่าตัวเลขของ A B C ด้วยการประมาณค่าโดยใช้ค่าค่าของการวัด 30.2 0.5 และ 0.3 ตามลำดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบแบบจำลองก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณเพื่อยืนยันแบบจำลอง

จากการดำเนินการทำนายการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศของเครื่องรับ(โทรศัพท์เคลื่อนที่) โดยใช้แบบจำลองลี (Lee Model) แบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลี (Lee Model) และแบบจำลองวอล์ฟฟิช-ไอเคกามิ (Walfisch-Ikegami Model) เพื่อนำมาปรับค่าพารามิเตอร์ของสถานีฐาน ได้แก่ ความสูงสถานีฐาน อัตราขยายสายอากาศ และมุมสายอากาศ ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ทำให้ปัญหาสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่รับได้ในหลากหลายปัญหา เช่น เสียงอู้อี้ เสียงขาด ๆ หาย ๆ เสียงสะท้อนหรือเสียงก้อง สัญญาณอ่อนไม่มีสัญญาณ และสายหลุด (ระหว่างสนทนา) ในพื้นที่ทดสอบสัญญาณบริเวณถนนทางหลวงหมายเลข 41 ระหว่างอำเภอทุ่งสง-จุฬาภรณ์ ที่มีสภาพภูมิประเทศหลายแบบ และ ชุมชนเมืองตำบลในเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช มีปริมาณการรบกวนของลูกค้าลดลง พิจารณาตามภาพที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าในปี 2556 มีจำนวนลดลงในทุกปัญหา



ภาพที่ 5.1 แสดงปัญหาการใช้งานของลูกค้ที่ใช้บริการอ้เภอท้งสงหลังค้เนินการ

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ยังคงมีข้อผิดพลาดบ้างจากการหาเส้นทางเดินทางของคลื่น (Path Profile) และตัวแปรที่ใส่ในพารามิเตอร์จริงของสภาพพื้นที่ เช่น ระดับน้ำทะเลของ ความสูงของสิ่งกีดขวาง พารามิเตอร์ของต้นไม้ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น ความสูงเฉลี่ย ระยะห่างระหว่างต้น ขนาดกว้างยาวของใบยางพารา ความหนาแน่นของใบไม้ (คิดต่อหนึ่งหน่วยลูกบาศก์เมตร) และความหนาแน่นของต้นไม้ในแนวสิ่งกีดขวาง เป็นต้น

## บรรณานุกรม

- กมล เขมะรังสี , ไพโรจน์ ไววานิชกิจ . 2539 . เปิดโลกการสื่อสารไร้สาย . กรุงเทพมหานคร : ห้าง  
หุ้นส่วนจำกัด เอช - เอน การพิมพ์
- ทะนง โชติสรยุทธ์ . 2537 . รวมบทความและโครงการวิทยุสมัครเล่นเล่ม 1 . กรุงเทพมหานคร :  
เม็ดทรายพรินติ้ง
- พิชัย ภัคดีพาณิชย์เจริญ.2536.ทฤษฎีและการใช้งานความถี่ย่านไมโครเวฟ.กรุงเทพฯ.:ฟิสิกส์เซ็นเตอร์  
ดีัญญกร วุฒิสถิตกุลกิจ . 2542 . หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ . พิมพ์ครั้งที่ 1 . กรุงเทพมหานคร  
: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วิวัฒน์ กิรานนท์ . 2539 . พื้นฐานการสื่อสาร . กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศุภชัย ไพบูลย์.2550.แบบจำลองการลดทอนสัญญาณคลื่นวิทยุสำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่  
ความถี่ 1800 MHz โดยวิธีนิวโรฟิชซี.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ศุภชัย ไพบูลย์.2551.วิศวกรรมโทรศัพท์เคลื่อนที่หลักการสื่อสารการแพร่กระจายคลื่น.พิมพ์ครั้งที่  
2 .บริษัท มิสเตอร์ก๊อบบี้ (ประเทศไทย) จำกัด.กรุงเทพฯ
- สุรเชษฐ กอศิริขจร.2545.แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นวิทยุสำหรับการวางแผนระบบสื่อสาร  
เคลื่อนที่ในเขตเมือง.วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชา  
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Abeta, S., M. Sawahashi , F. Adachi 1999. Adaptive Channel Estimationfor Coherent DSCDMA  
Mobile Radio Using Time-Multiplexed Pilot and Parallel Pilot Structure,  
pp.1505-15013, IEICE Transactions on Communication.
- Blaunstein,Nathan.2000.Radio Propagation in Cellular Networks.ARTECH HOUSE,INC.
- Ezio Biglieri , John Proakis , Sholmo Shamai.1998.Fading Channels Information-Theoretic and  
Communication Aspect.IEEE Trans. Information Theory.Vol.44.No.6.pp 2619-  
2691
- Faruque. S. 1996. Propagation prediction based on environmental classification and fuzzy logic  
approximation. Communications 1996. ICC 96 Conference Record Converging  
Technologies for Tomorrow's Applications. 1996 IEEE International Conference  
on. Vol.1.272-276

- Lee,W.C.Y.1998.Mobile Communications Engineering.141-154
- Lee,W.C.Y.2010. Enhanced Lee Model from Rough Terrain Sampling Data Aspect. IEEE Trans. Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010. IEEE 72nd.1-5
- Lee,W.C.Y. 1992. Lee's model [cellular radio path loss prediction]. IEEE Trans. Vehicular Technology Conference, 1992. IEEE 42nd. Vol.1.343-348
- M. B. Roslee K. F. Kwan. 2010.Optimization of hata propagation prediction model in suburban.
- Parsons,J.D.2000.The Mobile Radio Propagation Channel.95-101.John Wiley & Sons,Ltd
- Piazzzi, L.Bertoni, H. L. 1998. Effect of terrain on path loss in urban environments for wireless environments. Vehicular Technology IEEE Transactions on. Vol.46. 1040-1046
- applications. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on. Vol.46. 1138-1147
- S. Phaiboon P. Phokharatkul , S. Somkuarnpanit. 2008. New upper and lower bounds line of sight path loss model for mobile propagation in buildings. AEU - International Journal of Electronics and Communications. Vol.62. 207-215
- Constantine A. Balanis.1938.Antenna Theory : analysis and design .28-101
- Technical Knowledge Management Dept.2554.AIS Telecom Platform รุ่นที่ 46 .1-124
- Theodore S.Rappaport.2002.Wireless Communications.Second Edition. Prentice Hall
- Torrice,S.A.Lang R.H. 2007.A Simplified Analytical Model to Predict the Specific Attenuation of a Tree Canopy. IEEE Trans. Vehicular Technology, IEEE Transactions on.Vol.5. 696-703
- Xia H. H. 1997. A simplified analytical model for predicting path loss in urban and suburban
- Yihuai ,Yang.,YongGang, Xie.,Dongya ,Shen. 2009. An improved COST - WI model in metropolitan Areas. Microwave Technology and Computational Electromagnetics, 2009. ICMTCE. International Conference on. 284-287

ภาคผนวก

## ข้อมูลลูกค้าร้องเรียนประจำปี 2550 (ตัวอย่าง)

CP_ID	SUBCAT DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-000193	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/1/2007 4:32:40 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-000934	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/2/2007 12:02:29 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-002792	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	1/4/2007 7:06:21 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-004252	เสียงขาดๆ หายๆ	1/5/2007 3:42:14 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-004356	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/5/2007 5:08:10 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-005028	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/6/2007 3:03:53 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-006443	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/8/2007 2:47:43 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-008203	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/10/2007 1:05:43 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-008446	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	1/10/2007 4:18:54 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-010355	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	1/12/2007 5:31:00 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-011000	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	1/13/2007 2:59:18 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-011465	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	1/14/2007 12:30:41 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-011901	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/14/2007 5:45:53 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-012545	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/15/2007 3:44:55 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-012963	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/15/2007 10:22:22 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-013816	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/17/2007 1:50:31 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-016992	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/20/2007 10:16:57 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-017224	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/20/2007 3:14:08 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-017246	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/20/2007 3:33:12 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-018166	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/21/2007 6:23:58 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-018359	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/21/2007 11:06:45 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-018934	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	1/22/2007 5:45:39 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-019385	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	1/23/2007 8:51:51 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-020870	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/24/2007 5:50:43 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-022819	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/26/2007 5:00:43 PM	นครศรีธรรมราช

CP_ID	SUBCAT DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-023620	เสียงขาดๆ หาย ๆ	1/27/2007 4:38:27 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-024844	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/29/2007 8:01:19 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-025579	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/29/2007 9:55:42 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-025617	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	1/29/2007 10:32:29 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-025982	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	1/30/2007 1:21:43 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-028362	เสียงขาดๆ หาย ๆ	2/1/2007 9:23:50 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-030750	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/4/2007 9:58:39 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-030767	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	2/4/2007 10:26:25 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-031571	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	2/5/2007 9:09:31 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-031605	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	2/5/2007 9:47:30 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-033040	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/7/2007 6:13:09 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-035325	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/10/2007 2:50:31 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-037321	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	2/13/2007 10:00:03 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-038893	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	2/15/2007 12:20:11 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-038941	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	2/15/2007 2:02:07 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-041567	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/18/2007 6:51:59 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-042134	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	2/19/2007 3:14:16 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-042139	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/19/2007 3:20:18 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-042504	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	2/19/2007 9:25:42 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-042638	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/20/2007 1:18:44 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-042938	เสียงขาดๆ หาย ๆ	2/20/2007 2:15:36 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-043410	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/20/2007 9:37:09 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-043432	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	2/20/2007 9:54:29 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-043696	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/21/2007 10:30:30 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-046223	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/24/2007 3:42:20 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-047345	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/26/2007 10:00:12 AM	นครศรีธรรมราช

CP_ID	SUBCAT DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-047539	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/26/2007 2:14:48 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-047754	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/26/2007 5:52:29 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-049191	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	2/28/2007 7:00:49 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-050106	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	3/1/2007 11:30:15 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-050515	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/2/2007 3:43:52 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-051473	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	3/3/2007 9:29:15 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-051781	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	3/4/2007 3:07:19 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-052458	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	3/5/2007 4:02:36 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-052651	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	3/5/2007 7:27:23 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-052816	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/6/2007 12:34:12 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-052999	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/6/2007 12:16:57 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-053316	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	3/6/2007 6:08:53 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-053371	เสียงขาดๆ หายๆ	3/6/2007 6:50:58 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-053460	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/6/2007 8:44:43 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-055196	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/9/2007 8:57:13 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-056035	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/10/2007 1:20:01 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-056638	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/11/2007 12:01:59 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-057849	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	3/13/2007 2:13:50 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-060673	เสียงขาดๆ หายๆ	3/17/2007 9:37:45 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-065435	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/23/2007 10:44:23 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-067556	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/26/2007 2:58:20 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-067740	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/26/2007 6:08:16 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-070065	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/30/2007 1:21:19 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-070136	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/30/2007 3:23:12 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-070280	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	3/30/2007 4:12:07 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-072034	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	4/2/2007 3:16:19 PM	นครศรีธรรมราช



CP_ID	SUBCAT DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-072804	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/3/2007 5:36:58 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-074281	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/5/2007 7:52:52 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-074870	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/6/2007 7:59:37 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-075089	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/7/2007 12:23:59 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-075123	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	4/7/2007 1:48:56 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-078060	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/11/2007 6:02:33 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-079227	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/13/2007 3:18:09 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-080474	เสียงขาดๆ หายๆ	4/16/2007 9:42:11 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-081268	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/17/2007 2:11:59 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-081365	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/17/2007 4:12:14 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-082254	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/18/2007 5:02:47 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-083131	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/19/2007 5:10:06 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-083492	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	4/20/2007 1:00:48 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-084967	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/22/2007 11:14:08 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-085172	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/22/2007 3:33:12 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-088926	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	4/28/2007 10:20:16 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-090834	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/30/2007 11:02:45 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-091345	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	4/30/2007 4:16:02 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-091397	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	4/30/2007 4:55:48 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-092527	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	5/2/2007 12:09:10 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-092634	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	5/2/2007 9:19:50 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-092751	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	5/2/2007 11:55:54 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-094903	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	5/4/2007 2:54:16 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-098238	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	5/8/2007 9:39:12 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-099672	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	5/10/2007 5:52:29 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-101867	เสียงขาดๆ หายๆ	5/13/2007 5:57:07 PM	นครศรีธรรมราช

CP_ID	SUBCAT_DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-101902	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	5/13/2007 6:30:40 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-103304	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	5/15/2007 4:39:33 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-107270	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	5/20/2007 4:39:03 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-110003	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	5/23/2007 6:44:58 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-111671	เสียงขาดๆ หายๆ	5/25/2007 2:37:48 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-116883	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	5/31/2007 7:20:03 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-118010	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	6/2/2007 11:32:20 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-118567	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	6/2/2007 11:17:02 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-120932	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/5/2007 10:03:54 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-121708	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	6/6/2007 8:03:36 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-123035	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	6/8/2007 12:56:16 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-123495	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/8/2007 7:23:21 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-124022	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/9/2007 3:05:15 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-124026	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/9/2007 3:11:26 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-125749	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/11/2007 6:40:10 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-126460	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	6/12/2007 3:01:33 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-126517	เสียงขาดๆ หายๆ	6/12/2007 3:43:27 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-130799	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/16/2007 7:40:40 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-131787	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/18/2007 9:26:50 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-133878	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/20/2007 8:36:06 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-136102	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	6/22/2007 2:20:05 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-136999	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/23/2007 3:13:02 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-137400	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/24/2007 1:14:01 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-139670	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	6/26/2007 10:21:26 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-141017	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/28/2007 2:49:59 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-141259	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/28/2007 6:19:29 PM	นครศรีธรรมราช

CP_ID	SUBCAT DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-141854	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	6/29/2007 3:38:03 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-142797	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	6/30/2007 6:57:18 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-146466	เสียงขาดๆ หายๆ	7/4/2007 9:10:24 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-148468	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/7/2007 10:24:44 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-149281	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/8/2007 9:49:05 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-149956	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/8/2007 6:48:20 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-150327	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/9/2007 9:17:59 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-150577	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	7/9/2007 1:50:17 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-151637	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/10/2007 2:12:04 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-152217	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/10/2007 10:01:07 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-155034	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/13/2007 5:58:01 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-160543	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	7/19/2007 2:16:21 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-160842	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/19/2007 5:52:49 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-163621	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	7/22/2007 4:23:28 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-165964	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/24/2007 10:01:52 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-166266	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/25/2007 11:32:14 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-166540	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/25/2007 3:44:30 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-167060	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	7/26/2007 4:48:03 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-168220	เสียงขาดๆ หายๆ	7/27/2007 12:14:27 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-173245	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	8/1/2007 11:39:24 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-176056	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/4/2007 7:14:43 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-176565	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/5/2007 1:50:45 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-178572	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/7/2007 2:10:36 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-180938	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/9/2007 4:36:34 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-182701	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	8/11/2007 2:45:47 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-183560	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/12/2007 2:11:16 PM	นครศรีธรรมราช

CP_ID	SUBCAT DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-184595	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/13/2007 5:17:46 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-184647	เสียงขาดๆ หายๆ	8/13/2007 6:04:14 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-184703	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	8/13/2007 7:13:52 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-185057	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	8/14/2007 10:09:44 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-185219	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/14/2007 12:47:42 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-185832	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/14/2007 9:50:39 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-187160	เสียงขาดๆ หายๆ	8/16/2007 11:09:34 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-188563	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	8/17/2007 4:43:01 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-190549	เสียงขาดๆ หายๆ	8/19/2007 5:28:20 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-191900	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	8/21/2007 12:31:23 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-192701	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/21/2007 6:17:46 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-193498	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/22/2007 3:09:38 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-193930	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/22/2007 8:47:59 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-194754	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/23/2007 5:37:00 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-200342	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/29/2007 12:52:20 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-200400	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/29/2007 8:04:54 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-202670	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	8/31/2007 11:46:25 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-202691	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	8/31/2007 12:02:13 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-203684	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/1/2007 1:14:36 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-204751	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/2/2007 5:51:25 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-205053	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/3/2007 8:30:38 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-205602	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/3/2007 6:24:52 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-207616	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	9/6/2007 9:36:58 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-208571	เสียงขาดๆ หายๆ	9/7/2007 10:41:02 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-208671	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/7/2007 12:40:32 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-209225	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/7/2007 10:12:50 PM	นครศรีธรรมราช

CP_ID	SUBCAT DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-212220	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/11/2007 6:05:24 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-214121	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	9/13/2007 4:10:08 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-215501	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/14/2007 5:04:35 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-217013	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	9/16/2007 5:58:42 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-218495	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/17/2007 6:13:16 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-219585	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	9/18/2007 6:52:30 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-219764	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/18/2007 10:10:25 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-219882	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	9/19/2007 12:46:43 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-220216	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/19/2007 12:59:34 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-220371	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/19/2007 3:13:53 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-220616	เสียงขาดๆ หาย ๆ	9/19/2007 6:22:29 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-220625	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/19/2007 6:27:29 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-220630	เสียงขาดๆ หาย ๆ	9/19/2007 6:31:52 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-222057	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/21/2007 10:17:41 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-222200	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/21/2007 12:52:06 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-222459	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/21/2007 4:31:36 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-223229	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	9/22/2007 11:36:28 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-223550	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/22/2007 5:15:35 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-224110	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/23/2007 12:37:38 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-224299	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	9/23/2007 4:02:47 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-225310	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	9/24/2007 4:41:10 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-226675	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/25/2007 10:09:21 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-227530	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/26/2007 6:18:27 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-227541	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	9/26/2007 6:27:45 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-230078	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	9/29/2007 1:03:03 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-230784	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	9/29/2007 7:27:35 PM	นครศรีธรรมราช

CP_ID	SUBCAT DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-231774	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	9/30/2007 9:42:30 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-232122	เสียงขาดๆ หายๆ	10/1/2007 11:08:00 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-232503	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	10/1/2007 4:31:14 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-232712	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/1/2007 6:26:06 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-232830	เสียงขาดๆ หายๆ	10/1/2007 7:52:33 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-232864	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/1/2007 8:20:21 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-233143	เสียงขาดๆ หายๆ	10/2/2007 9:10:47 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-236849	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/5/2007 1:37:02 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-237022	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/5/2007 3:46:38 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-237038	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/5/2007 3:56:09 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-238526	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/7/2007 9:20:36 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-239224	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	10/8/2007 7:54:18 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-242692	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	10/11/2007 12:46:06 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-244560	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/12/2007 9:24:51 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-245274	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/13/2007 5:37:08 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-245447	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/13/2007 8:05:07 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-246362	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	10/14/2007 7:43:58 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-247055	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/15/2007 4:26:32 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-247612	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/15/2007 11:58:40 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-248268	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/16/2007 4:16:13 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-249697	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/17/2007 6:23:16 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-251765	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/19/2007 3:50:38 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-252929	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	10/20/2007 5:47:41 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-253415	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/21/2007 11:31:40 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-254586	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	10/22/2007 4:56:05 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-258132	เสียงขาดๆ หายๆ	10/26/2007 2:33:23 PM	นครศรีธรรมราช

CP_ID	SUBCAT DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-258523	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	10/26/2007 7:50:02 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-258543	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	10/26/2007 8:05:36 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-259142	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	10/27/2007 5:31:00 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-259436	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	10/28/2007 12:24:16 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-260566	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	10/29/2007 4:25:23 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-260797	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	10/29/2007 7:26:46 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-262456	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	10/31/2007 4:13:32 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-264426	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/2/2007 3:48:54 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-265456	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/3/2007 10:22:13 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-265946	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/4/2007 6:22:20 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-266511	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/5/2007 1:36:08 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-266604	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/5/2007 3:03:01 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-266976	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/5/2007 8:14:35 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-266981	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/5/2007 8:17:05 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-267711	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/6/2007 5:10:01 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-267712	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/6/2007 5:11:49 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-268644	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/7/2007 5:02:55 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-268840	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/7/2007 7:11:41 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-270162	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/9/2007 11:19:44 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-270664	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/9/2007 7:25:16 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-270942	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	11/9/2007 11:57:45 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-271252	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/10/2007 2:53:09 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-274051	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	11/13/2007 5:34:08 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-275726	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/15/2007 3:17:15 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-275788	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	11/15/2007 4:26:33 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-276413	สัญญาอ่อน / ไม่มีสัญญา	11/16/2007 1:06:29 PM	นครศรีธรรมราช

CP_ID	SUBCAT_DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-276668	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	11/16/2007 4:41:00 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-278069	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	11/18/2007 2:27:21 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-279863	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	11/20/2007 5:06:09 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-279947	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	11/20/2007 6:14:38 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-280870	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	11/21/2007 6:50:14 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-283281	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	11/24/2007 7:59:47 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-283295	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	11/24/2007 8:36:03 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-283960	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	11/26/2007 12:42:51 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-284651	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	11/26/2007 10:32:11 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-286051	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	11/28/2007 3:28:55 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-286060	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	11/28/2007 3:38:19 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-286338	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	11/28/2007 8:18:43 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-286587	เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	11/29/2007 7:50:03 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-290002	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/3/2007 8:15:05 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-290303	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/3/2007 3:24:23 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-293572	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/7/2007 8:48:52 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-293836	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	12/7/2007 2:55:41 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-294374	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	12/7/2007 11:50:55 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-295859	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/9/2007 9:29:56 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-296935	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/11/2007 11:12:44 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-296956	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/11/2007 11:33:57 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-297163	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/11/2007 3:18:06 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-297416	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/11/2007 6:14:58 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-297472	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/11/2007 6:57:58 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-297633	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	12/11/2007 10:05:49 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-298032	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/12/2007 1:09:31 PM	นครศรีธรรมราช



CP_ID	SUBCAT DESC	CREATE DATE	PROVINCE
CP07-298033	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/12/2007 1:09:34 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-300264	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/14/2007 12:29:44 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-300446	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/14/2007 3:15:47 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-300855	เสียงขาดๆ หายๆ	12/14/2007 8:45:31 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-301677	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/15/2007 8:44:59 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-302657	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/17/2007 8:57:09 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-302753	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/17/2007 11:29:47 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-303275	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/17/2007 7:56:46 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-304357	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/18/2007 10:17:58 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-305363	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/20/2007 8:56:06 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-305541	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/20/2007 1:27:33 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-306577	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/21/2007 3:01:00 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-306836	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/21/2007 6:50:47 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-307360	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/22/2007 2:26:54 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-309206	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/24/2007 5:57:55 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-311098	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/26/2007 6:14:11 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-311507	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/27/2007 10:27:42 AM	นครศรีธรรมราช
CP07-311733	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/27/2007 2:50:37 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-314078	สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	12/30/2007 2:16:48 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-314122	สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	12/30/2007 3:16:08 PM	นครศรีธรรมราช
CP07-314356	เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	12/30/2007 8:09:34 PM	นครศรีธรรมราช

## สรุปข้อมูลลูกค้าร้องเรียนประจำปี 2551 – 2555

SUBCAT DESC	YEARS					
	2550	2551	2552	2553	2554	2555
เสียง Metallic หรือ เสียงอู้อี้	11	15	8	13	105	107
เสียงขาดๆ หาย ๆ	23	27	40	29	397	658
เสียงสะท้อน หรือ เสียงก้อง	13	12	4	2	77	146
สัญญาณอ่อน / ไม่มีสัญญาณ	203	230	182	169	2352	3067
สายหลุด (ระหว่างการสนทนา)	56	57	52	25	293	513

ผลทดสอบคุณภาพสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ก่อนดำเนินการแบบจำลองต้นไม้ยางพารา  
(Tree Model Rubber Forest ) ร่วมกับแบบจำลองลิย (Lee Model) (ตัวอย่าง)

Message	Time	Distance	Longitude	Latitude	ServRxLevSub
0	0:26:11	5,414	99.78836	8.13956	
1	0:26:11		99.78836	8.13956	
2	0:26:11		99.78836	8.13956	-63
3	0:26:11		99.78836	8.13956	-62
4	0:26:11	5,414	99.78832	8.13956	
5	0:26:12	5,443	99.78823	8.13953	
6	0:26:12		99.78823	8.13953	
7	0:26:12		99.78823	8.13953	-65
8	0:26:12		99.78823	8.13953	-64
9	0:26:12	5,443	99.78882	8.13952	
10	0:26:12	5,443	99.78813	8.13951	
11	0:26:12		99.78811	8.1395	
12	0:26:12		99.78811	8.1395	
13	0:26:12		99.7881	8.1395	-68
14	0:26:12		99.7881	8.1395	-67
15	0:26:12	5,443	99.78807	8.13949	
16	0:26:13	5,471	99.78798	8.13947	
17	0:26:13		99.78798	8.13947	
18	0:26:13		99.78798	8.13947	-62
19	0:26:13		99.78798	8.13947	-61
20	0:26:13	5,471	99.78794	8.13946	
21	0:26:13	5,471	99.78785	8.13944	
22	0:26:13		99.78785	8.13944	

<b>Message</b>	<b>Time</b>	<b>Distance</b>	<b>Longitude</b>	<b>Latitude</b>	<b>ServRxLevSub</b>
23	0:26:13		99.78785	8.13944	-75
24	0:26:13		99.78785	8.13944	-74
25	0:26:13	5,471	99.78781	8.13943	
26	0:26:14	5,500	99.78773	8.13941	
27	0:26:14		99.78773	8.13941	
28	0:26:14		99.78773	8.13941	-69
29	0:26:14		99.78773	8.13941	-68
30	0:26:14	5,500	99.78769	8.13941	
31	0:26:14		99.78763	8.1394	
32	0:26:14		99.78762	8.13939	
33	0:26:14		99.78762	8.13939	-69
34	0:26:14		99.78762	8.13939	-68
35	0:26:14	5,500	99.78758	8.13939	
36	0:26:15		99.78752	8.13938	
37	0:26:15		99.78752	8.13938	
38	0:26:15		99.78752	8.13937	-62
39	0:26:15		99.78752	8.13937	-61
40	0:26:15	5,529	99.78747	8.13937	
41	0:26:15		99.78738	8.13935	
42	0:26:15		99.78738	8.13935	
43	0:26:15		99.78738	8.13935	-67
44	0:26:15		99.78738	8.13935	-66
45	0:26:15	5,529	99.7873	8.13933	
46	0:26:16	5,557	99.78722	8.13932	
47	0:26:16		99.78722	8.13932	
48	0:26:16	5,557	99.78719	8.13931	-64

Message	Time	Distance	Longitude	Latitude	ServRxLevSub
49	0:26:16		99.78719	8.13931	-63
50	0:26:16	5,557	99.78715	8.13931	
51	0:26:16		99.78715	8.13931	
52	0:26:16		99.78709	8.1393	
53	0:26:16		99.78709	8.1393	
54	0:26:16		99.78709	8.1393	-60
55	0:26:16		99.78709	8.1393	-59
56	0:26:16	5,557	99.78708	8.1393	
57	0:26:16	5,557	99.78702	8.13929	
58	0:26:17	5,586	99.78696	8.13928	
59	0:26:17		99.78696	8.13928	
60	0:26:17		99.78696	8.13928	
61	0:26:17		99.78696	8.13928	-62

สรุปผลทดสอบคุณภาพสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ก่อนดำเนินการแบบจำลองต้นไม้  
 ยางพารา (Tree Model Rubber Forest ) ร่วมกับแบบจำลองลีอี้ (Lee Model)

แถบสี	ย่านความแรงสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่	ความหมายแถบสี	ค่าที่วัดได้ (ครั้ง)
	RxLev >= -55 And RxLev <-10	ระดับสัญญาณดีมาก	0
	RxLev >= -74 And RxLev <-55	ระดับสัญญาณดี	445
	RxLev >=-84 And RxLev <-74	ระดับสัญญาณปานกลาง	230
	RxLev >=-94 And RxLev <-84	ระดับสัญญาณอ่อน	135
	RxLev >=-120 And RxLev <-94	ระดับสัญญาณแย่มาก	26

ผลทดสอบคุณภาพสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่หลังดำเนินการแบบจำลองต้นไม้ยางพารา  
(Tree Model Rubber Forest ) ร่วมกับแบบจำลองลิย (Lee Model) (ตัวอย่าง)

Message	Time	Distance	Longitude	Latitude	ServRxLevSub
0	3:21:02		99.74976	8.14938	
1	3:21:02		99.74976	8.14938	
2	3:21:02		99.74976	8.14938	
3	3:21:02		99.74978	8.14938	-72
4	3:21:02		99.74978	8.14938	-71
5	3:21:02		99.74978	8.14938	
6	3:21:02		99.74978	8.14938	
7	3:21:03	12,955	99.74984	8.14936	
8	3:21:03		99.74984	8.14936	
9	3:21:03		99.74985	8.14936	-73
10	3:21:03		99.74985	8.14936	-72
11	3:21:03		99.74985	8.14936	
12	3:21:03		99.74988	8.14935	
13	3:21:03		99.74992	8.14933	
14	3:21:03		99.74992	8.14933	
15	3:21:03		99.74992	8.14933	-77
16	3:21:03		99.74992	8.14933	-76
17	3:21:03		99.74992	8.14933	
18	3:21:03		99.74992	8.14933	
19	3:21:04		99.74997	8.14931	
20	3:21:04		99.74999	8.14931	
21	3:21:04		99.74999	8.14931	
22	3:21:04		99.74999	8.14931	

<b>Message</b>	<b>Time</b>	<b>Distance</b>	<b>Longitude</b>	<b>Latitude</b>	<b>ServRxLevSub</b>
23	3:21:04	12,955	99.75001	8.1493	-78
24	3:21:04		99.75001	8.1493	-77
25	3:21:04		99.75001	8.1493	
26	3:21:04		99.75007	8.14928	
27	3:21:04		99.75007	8.14928	
28	3:21:04		99.75009	8.14928	-81
29	3:21:04		99.75009	8.14928	-80
30	3:21:04		99.75009	8.14928	
31	3:21:05	12,992	99.75015	8.14926	
32	3:21:05		99.75015	8.14926	
33	3:21:05		99.75017	8.14925	-82
34	3:21:05		99.75017	8.14925	-81
35	3:21:05		99.75017	8.14925	
36	3:21:05		99.75023	8.14923	
37	3:21:05		99.75023	8.14923	
38	3:21:05		99.75026	8.14922	-84
39	3:21:05		99.75026	8.14922	-83
40	3:21:05		99.75026	8.14922	
41	3:21:05		99.75026	8.14922	
42	3:21:06		99.7503	8.14921	
43	3:21:06		99.7503	8.14921	
44	3:21:06		99.75031	8.1492	-81
45	3:21:06		99.75031	8.1492	-80
46	3:21:06		99.75031	8.1492	
47	3:21:06	12,992	99.75035	8.14919	
48	3:21:06		99.75037	8.14918	

Message	Time	Distance	Longitude	Latitude	ServRxLevSub
49	3:21:06		99.75038	8.14918	
50	3:21:06		99.75039	8.14918	-78
51	3:21:06		99.75039	8.14918	-77
52	3:21:06		99.75039	8.14918	
53	3:21:07		99.75045	8.14916	
54	3:21:07		99.75045	8.14916	
55	3:21:07	13,028	99.75047	8.14915	-79
56	3:21:07		99.75047	8.14915	-78
57	3:21:07		99.75047	8.14915	
58	3:21:07		99.75052	8.14913	
59	3:21:07		99.75052	8.14913	
60	3:21:07		99.75054	8.14913	-83

สรุปผลทดสอบคุณภาพสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่หลังดำเนินการแบบจำลองต้นไม้  
 ยางพารา (Tree Model Rubber Forest ) ร่วมกับแบบจำลองสีเขียว (Lee Model)

แถบสี	ย่านความแรงสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่	ความหมายแถบสี	ค่าที่วัดได้ (ครั้ง)
	RxLev >= -55 And RxLev < -10	ระดับสัญญาณดีมาก	1
	RxLev >= -74 And RxLev < -55	ระดับสัญญาณดี	343
	RxLev >= -84 And RxLev < -74	ระดับสัญญาณปานกลาง	193
	RxLev >= -94 And RxLev < -84	ระดับสัญญาณอ่อน	121
	RxLev >= -120 And RxLev < -94	ระดับสัญญาณแย่	0



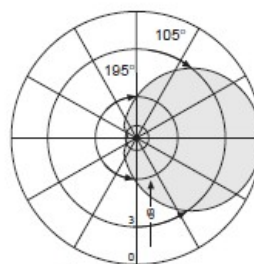
คุณสมบัติสายอากาศก่อนดำเนินการแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest ) ร่วมกับแบบจำลองลิ้น (Lee Model)

**Eurocell Panel**   
**Vertical Polarization**   
**Half-power Beam Width**

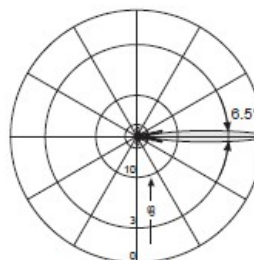
**KATHREIN**  
 Antennen · Electronic

**VPol Panel 900 105° 16.5dBi**

Type No.	<b>730 380</b>
Frequency range	870 – 960 MHz
Polarization	Vertical
Gain	16.5 dBi
Half-power beam width	H-plane: 105° E-plane: 6.5°
Front-to-back ratio	> 22 dB
Impedance	50 Ω
VSWR	< 1.3
Intermodulation IM3 (2 x 43 dBm carrier)	< -150 dBc
Max. power	500 Watt (at 50 °C ambient temperature)
Input	7-16 female
Connector position	Rearside
Weight	12 kg
Wind load	Frontal: 460 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	200 km/h
Height/width/depth	2574 / 258 / 103 mm



Horizontal Pattern



Vertical Pattern



คุณสมบัติสายอากาศหลังดำเนินการแบบจำลองต้นไม้ยางพารา (Tree Model Rubber Forest) ร่วมกับแบบจำลองลี (Lee Model)

<b>Panel</b>	790-960	<b>KATHREIN</b> Antennen · Electronic
<b>Dual Polarization</b>	X	
<b>Half-power Beam Width</b>	65°	

XPol Panel 790-960 65° 17.5dBi 0°-8°T

Type No.	800 10305		
Frequency range	790 – 862 MHz	790-960 824 – 894 MHz	880 – 960 MHz
Polarization	+45°, -45°	+45°, -45°	+45°, -45°
Average gain (dBi)	16.8 ... 17 ... 16.7	16.9 ... 17.1 ... 16.9	17.2 ... 17.4 ... 17.1
Tilt	0° ... 4° ... 8°	0° ... 4° ... 8°	0° ... 4° ... 8°
<b>Horizontal Pattern:</b>			
Half-power beam width	69°	67°	65°
Front-to-back ratio, copolar	> 25 dB	> 25 dB	> 25 dB
Cross polar ratio			
Main direction	0°	Typically: 25 dB	Typically: 25 dB
Sector	±60°	Typically: > 10 dB	Typically: > 10 dB
<b>Vertical Pattern:</b>			
Half-power beam width	9.1°	8.8°	8.5°
Electrical tilt	0°-8°, continuously adjustable		
Sidelobe suppression for first sidelobe above main beam	0° ... 2° ... 4° ... 8° T 18 ... 18 ... 18 ... 16 dB	0° ... 2° ... 4° ... 8° T 18 ... 18 ... 18 ... 16 dB	0° ... 2° ... 4° ... 8° T 20 ... 18 ... 17 ... 15 dB
Impedance	50 Ω		
Isolation, between ports	> 30 dB		
Intermodulation IM3	< -150 dBc (2 x 43 dBm carrier)		
Max. power per input	500 W (at 50 °C ambient temperature)		
Input	2 x 7-16 female		
Connector position	Rearside, pointing downwards		
Adjustment mechanism	1x, Position bottom, continuously adjustable		
Weight	12,6 kg		
Wind load (at 150 km/h)	Frontal / lateral / rearside: 400 / 260 / 890 N		
Height/width/depth	2254 / 259 / 99 mm		



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล .....นายภรตะ เพ็ชศรี.....

รหัสประจำตัวนักศึกษา.....5110121065.....

## วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
...วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต...	สถาบันเทคโนโลยีพระจอม	.....2544.....
.....	เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....	.....
.....	.....	.....

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

.....รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ประจำปีงบประมาณ 2553.....

.....

.....

.....

.....

.....

## ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน (ถ้ามี)

.....วิศวกรวางแผน.....

.....

.....

.....

.....

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน (ถ้ามี)

.....ภรตะ เพ็ชศรี.2554.Micro Cell Path Loss Prediction through Hilly-Forest Terrain: A Case Study in South of Thailand .Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.....

.....

.....