

การวัดค่าเบี่ยงเบนการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคารของการแพร่กระจายคลื่นเซลลูลาร์ในระยะสั้นบนเส้นทางไมโครเซลล์ที่สยามสแควร์

MEASUREMENT OF STANDARD DEVIATIONS AND
CORNER ATTENUATIONS OF CELLULAR WAVE
PROPAGATION LOSS FOR SHORT DISTANCE
FROM STREET MICROCELL IN
SIAM SQUARE AREA



เจษฎา เพชรประเสริฐ
JETSADA PETSPRASIRT

อว.

อ.ว.ก

๘๕

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน, เดือน, ปี..... 8 ส.ค. 2545

43258

b.....
11๑๓๗๓๗๕
i.....
๑๑๑๒๖๑๑๗

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-761-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

**MEASUREMENT OF STANDARD DEVIATIONS AND
CORNER ATTENUATIONS OF CELLULAR WAVE
PROPAGATION LOSS FOR SHORT DISTANCE
FROM STREET MICROCELL IN
SIAM SQUARE AREA**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-648-761-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวัดค่าเบี่ยงเบนการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคารของ
การแพร่กระจายคลื่นเซลลูลาร์ในระยะสั้นบนเส้นทางไมโคร
เซลล์ที่สยามสแควร์

นักศึกษา

นายเจษฎา เพชรประเสริฐ

รหัสประจำตัว

41061002

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.ถวิล พึ่งมา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการใช้สมการทางสถิติ เพื่อหาค่าเบี่ยงเบนของการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคารของการแพร่กระจายคลื่นเซลลูลาร์ในระบบ GSM ที่ย่านความถี่ 900 MHz ในพื้นที่สยามสแควร์ ซึ่งพบว่าเส้นทางในแนวระดับสายตาดจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วง 11.35 ถึง 17.26 dB และเส้นทางนอกแนวระดับสายตาดจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วง 16.36 ถึง 33.35 dB และมีค่าลดทอนจากมุมอาคารเท่ากับ 21.84 dB โดยผลที่ได้จะสามารถนำไปใช้เป็นค่าแฟคเตอร์ร่วมกับสมการ Free space loss ในการคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นเพื่อความรวดเร็วในการนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงและออกแบบการวางเซลล์ให้เหมาะสมต่อไป

Thesis Title	Measurement of Standard deviations and Corner Attenuations of Cellular wave Propagation Loss for Short distance from Street Microcell in Siam Square Area
Student	Mr.Jetsada Petsprasirt
Student ID.	41061002
Degree	Master Degree
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assc.Prof.Dr.Tawil Puangma

ABSTRACT

In this thesis, using the statistics equation to calculated propagation losses deviation and corner attenuation of cellular GSM 900 MHz band at Siam Square area. The results were found the standard deviation in line of sight (LOS) paths are 11.35 to 17.26 dB, in non line of sight (NLOS) paths are 16.36 to 33.35 dB and the corner attenuation in non line of sight paths as 21.84 dB. This results can be factor values with free space loss equation for improving and designing of cell station suitably.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถทำให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ก็เพราะได้รับความเมตตาและความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษาที่ดีจากท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.ถวิล พึ่งมา ศาสตราจารย์มณูญ สุขเกษม และ อาจารย์พิเชฐ ม่วงนวล มาโดยตลอด ซึ่งข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาของข้าพเจ้าเป็นอย่างมากที่ให้โอกาสในด้านการศึกษาและคอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนมาโดยตลอดการศึกษาระดับชั้น

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคน ในห้อง T-201 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงโดยสมบูรณ์

ท้ายสุด ความรู้และประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอบอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

เจนุภา เพชรประเสริฐ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ความรู้ทั่วไปของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์.....	7
2.1 วิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่.....	8
2.2 ระบบ PCN 1800.....	12
2.3 ระบบดิจิตอล CDMA.....	13
2.4 ระบบดิจิตอล GSM.....	16
2.4.1 ความเป็นมาของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ดิจิตอล GSM.....	16
2.4.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบ GSM.....	20
2.4.2.1 เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่.....	21
2.4.2.2 ส่วนของสถานีฐาน.....	22
2.4.2.3 ระบบเน็ตเวิร์กและสวิตชิง.....	24
2.4.2.4 ระบบปฏิบัติการ.....	25
2.4.3 การรับส่งคลื่นสัญญาณวิทยุในระบบ GSM.....	25
2.4.4 โครงสร้างเฟรมในระบบ GSM.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.5 ประเภทของเบิร์ต.....	29
2.4.6 ประเภทของสัญญาณ.....	31
2.4.6.1 ช่องสัญญาณทราฟฟิก.....	31
2.4.6.2 ช่องสัญญาณซิกแนลลิง.....	32
2.4.7 การเข้ารหัสช่องสัญญาณในระบบ GSM.....	35
2.4.7.1 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของสัญญาณเสียง TCH/FS.....	35
2.4.7.2 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของข้อมูลประเภทค้ำ.....	37
2.4.7.3 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของสัญญาณซิกแนลลิง.....	39
2.4.8 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องโทรศัพท์.....	40
2.4.8.1 การเลือกเซลล์ที่จะติดต่อ.....	40
2.4.8.2 การชิงโครไนซ์.....	41
2.4.8.3 การเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบแรนคอม.....	42
2.4.8.4 การระบุตำแหน่งพื้นที่.....	42
2.4.8.5 การแฮนด์โอเวอร์.....	43
2.4.9 หมายเลขประจำตัวต่างๆ ที่ใช้ในระบบ GSM.....	44
2.4.9.1 หมายเลข IMSI.....	44
2.4.9.2 หมายเลข MSISDN.....	44
2.4.9.3 หมายเลข TMSI.....	45
2.4.9.4 กระบวนการ Authentication และ Ciphering.....	45
2.4.10 การมอดูเลตสัญญาณ.....	46
2.4.11 เทคโนโลยีไมโครเซลล์.....	47
บทที่ 3 ทฤษฎีการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น.....	49
3.1 หลักการแพร่กระจายคลื่น.....	49
3.2 กลไกพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่น.....	52
3.2.1 การสะท้อนของคลื่น.....	52
3.2.2 การหักเหของคลื่น.....	55
3.2.3 การกระเจิงของคลื่น.....	58
3.3 รูปแบบเส้นทางบนถนนไมโครเซลล์.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	วิธีการหาค่าสูญเสียของสัญญาณ.....	60
3.4.1	วิธีการของ HATA สำหรับเซลล์ขนาดเล็ก.....	60
3.4.2	วิธีการของ COST-231/Walfish/Ikegami.....	61
3.4.3	วิธีการหาค่าการลดทอนของสัญญาณ โดยใช้หลักการ Ray tracing หลักการ อิมเมจ และหลักการ UTD.....	63
3.4.4	วิธีการของ C.Y. Lee.....	68
บทที่ 4	การหาค่าเบี่ยงเบนการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคารจากการแพร่กระจายคลื่น เซลล์ลาร์บนเส้นทางไมโครเซลล์.....	69
4.1	หลักการวัด และวิเคราะห์ข้อมูล.....	69
4.1.1	หลักการวัด.....	69
4.1.2	การวิเคราะห์ข้อมูล.....	76
4.1.2.1	การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 1.....	93
4.1.2.2	การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 2.....	94
4.1.2.3	การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 3.....	95
4.1.2.4	การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 4.....	96
4.1.2.5	การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 5.....	97
4.1.2.6	การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 6.....	98
บทที่ 5	การคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและการวางตำแหน่งสถานีฐาน ไมโครเซลล์.....	100
5.1	การคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณ.....	100
5.2	การคาดคะเนการวางตำแหน่งสถานีฐาน ไมโครเซลล์ที่สยามสแควร์.....	102
บทที่ 6	บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	105
6.1	สรุปผลค่าเบี่ยงเบนการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคาร.....	105
6.2	สรุปปัญหาที่เกิดขึ้น.....	106
6.3	ข้อเสนอแนะ.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	111



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ NMT-450.....	9
2.2 คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ AMPS.....	10
2.3 คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ TACS.....	11
2.4 คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ NMT-900.....	12
2.5 การเปรียบเทียบระบบโทรศัพท์ CDMA กับระบบอื่นๆ.....	15
2.6 รายชื่อประเทศที่มีการนำระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ไปให้บริการ.....	17
2.7 กำลังส่งของเครื่องโทรศัพท์แต่ละประเภทตามมาตรฐานของระบบ GSM.....	21
2.8 กำลังส่งของเครื่องโทรศัพท์แต่ละประเภทตามมาตรฐาน DCS 1800.....	21
2.9 ระดับกำลังส่งของสถานีฐานตามมาตรฐาน GSM 900 และ DCS 1800.....	22
2.10 ประเภทของช่องสัญญาณ TCH.....	32
2.11 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ของไมโครเซลล์และมาโครเซลล์.....	48
3.1 ความชันของสมการการลดทอนสำหรับสภาพแวดล้อมในพื้นที่ต่างๆ.....	68
4.1 ความถี่ที่ใช้ทางด้านการส่งและรับของระบบ GSM ย่าน 900 MHz.....	70
4.2 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 1.....	94
4.3 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 2.....	95
4.4 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 3.....	96
4.5 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 4.....	97
4.6 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 5.....	98
4.7 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 6.....	98
5.1 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 1.....	100
5.2 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 2.....	101
5.3 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 3.....	101
5.4 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 4.....	101
5.5 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 5.....	102
5.6 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 6.....	102

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เทคนิคการแบ่งช่องสัญญาณของระบบ FDMA, TDMA และ CDMA.....	14
2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบ GSM.....	20
2.3 ประเภทของแผ่น SIM ทั้งสองแบบ.....	22
2.4 ลักษณะและหน้าที่ของส่วน BTS และ BSC.....	23
2.5 มาตรฐานการอินเตอร์เฟซที่ใช้ระหว่างจุดต่อต่างๆ ภายในระบบ GSM.....	24
2.6 ภาพรวมของการรับส่งคลื่นสัญญาณในระบบ GSM.....	26
2.7 โครงสร้างของมัลติเฟรม เฟรมและไทม์สล็อตในระบบ GSM.....	27
2.8 โครงสร้างของไฮเปอร์เฟรม ซูเปอร์เฟรม และมัลติเฟรม ในระบบ GSM.....	28
2.9 โครงสร้างของเบิสต์แบบต่างๆ ที่ใช้ในระบบ GSM.....	29
2.10 โครงสร้างการใช้งานของมัลติเฟรมประเภท 51 เฟรมเฉพาะ TS0.....	33
2.11 การเข้ารหัสช่องสัญญาณสำหรับสัญญาณเสียงในระบบ GSM.....	36
2.12 การทำอินเตอร์ลีฟสำหรับสัญญาณเสียงในระบบ GSM.....	37
2.13 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของข้อมูลประเภทค้ำที่อัตราบิต 9.6 Kbps.....	38
2.14 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของข้อมูลประเภทค้ำที่อัตราบิต 2.4 Kbps.....	39
2.15 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของสัญญาณซิงแนลลิง SACCH, FACCH, BCCH, SDCCH, PCH และ AGCH.....	39
2.16 โครงสร้างของข้อมูลที่บรรจุใน SCH.....	42
2.17 โครงสร้างของ IMSI.....	44
2.18 โครงสร้างการเก็บข้อมูลของ AUC และ MS.....	45
2.19 กระบวนการทำ Authentication.....	46
2.20 โครงข่ายของระบบโมโครเซลล์.....	47
3.1 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดแบบไอโซโทรปิก.....	51
3.2 การสะท้อนของคลื่น.....	52
3.3 คลื่นตรงที่เดินทางผ่านอากาศและคลื่นสะท้อนจากพื้นผิวโลก.....	54
3.4 หลักการของ Huygen.....	56
3.5 การหักเหของคลื่นที่บริเวณส่วนปลายของสิ่งกีดขวาง.....	56
3.6 แหล่งกำเนิดคลื่นในอันดับที่สองตามทฤษฎีของ Huygen.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 (a) รูปแบบของถนนไมโครเซลล์ในเขตพื้นที่เมือง.....	59
(b) ลักษณะกราฟของ Path Loss บนเส้นทาง LOS.....	59
(c) ลักษณะกราฟของ Path Loss บนเส้นทาง NLOS.....	59
3.8 เส้นทางการเดินทางของคลื่น.....	68
4.1 อุปกรณ์และการติดตั้งชุดเครื่องรับและชุดเครื่องส่งที่ถนนสยามสแควร์.....	73
4.2 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 1.....	73
4.3 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 2.....	74
4.4 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 3.....	74
4.5 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 4.....	75
4.6 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 5.....	75
4.7 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 6.....	76
4.8 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง A (LOS).....	78
4.9 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง B (NLOS).....	79
4.10 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง C (NLOS).....	79
4.11 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง D (NLOS).....	80
4.12 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง E (NLOS).....	80
4.13 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง F (NLOS).....	81
4.14 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง G (NLOS).....	81
4.15 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง H (NLOS).....	82
4.16 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง I (LOS).....	82
4.17 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง J (NLOS).....	83
4.18 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง K (NLOS).....	83
4.19 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง L (NLOS).....	84
4.20 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง M (NLOS).....	84
4.21 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง N (NLOS).....	85
4.22 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง O (LOS).....	85
4.23 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง P (NLOS).....	86
4.24 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง Q (NLOS).....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง R (NLOS).....	87
4.26 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง S (LOS).....	87
4.27 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง T (NLOS).....	88
4.28 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง U (NLOS).....	88
4.29 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง V (NLOS).....	89
4.30 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง W (LOS).....	89
4.31 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง X (LOS).....	90
4.32 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง Y (NLOS).....	90
4.33 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง Z (NLOS).....	91
4.34 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง A0 (LOS).....	91
4.35 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง B0 (NLOS).....	92
4.36 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง C0 (NLOS).....	92
4.37 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง D0 (NLOS).....	93
5.1 ลักษณะการจับคู่ตำแหน่งการวางสถานีฐานไมโครเซลล์กับเส้นทางต่างๆ.....	103
5.2 การคาดคะเนวางตำแหน่งสถานีฐานจริงบนถนนไมโครเซลล์ที่สยามสแควร์.....	104

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

ทศท.	: องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย
กสท.	: การสื่อสารแห่งประเทศไทย
NMT	: Nordic Mobile Telephone
AMPS	: Advance Mobile Phone System
AIS	: Advance Info Service
TAC	: Total Access Communication
GSM	: Global System For Mobile Communication
PCN	: Personal Communication Network
CDMA	: Code Division Multiple Access
BS	: Base Station
LOS	: Line of Sight
NLOS	: Non-line of Sight
PSTN	: Public Switch Telephone Network
FCC	: Federal Communications Commission
FM	: Frequency Modulation
FSK	: Frequency Shift Keying
TDMA	: Time Division Multiple Access
FDMA	: Frequency Division Multiple Access
FFSK	: Fast Frequency Shift Keying
DCS	: Digital Communication System
SIM	: Subscriber Identification Module
BPSK	: Binary Phase Shift Keying
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying
TDM	: Time Division Multiplex
CEPT	: The European Conference of Postal and Telecommunication Administrations
ISDN	: Integrated Service Digital Network
MS	: Mobile Station
BSS	: Base Station Subsystem
NSS	: Network and Switching Subsystem

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

OSS	: Operation Support Subsystem
ME	: Mobile Equipment
BTS	: Base Transceiver Station
BSC	: Base Station Controller
MSC	: Mobile Service Switching Center
SS7	: Signaling System no.7
HLR	: Home Location Register
AUC	: Authentication Center
VLR	: Visitor Location Register
OMC	: Operation and Maintenance Center
GMSK	: Gaussian Minimum Shift Keying
BSIC	: Base Station Identity Code
TCH	: Traffic Channel
SC	: Signaling Channel
BCH	: Broadcast Channel
CCCH	: Common Control Channel
DCCH	: Dedicated Control Channel
BCCH	: Broadcast Control Channel
FCCH	: Frequency Control Channel
SCH	: Synchronization Control Channel
PCH	: Paging Control Channel
RACH	: Random Access Channel
AGCH	: Access Grant Channel
SDCCH	: Stand-alone Dedicated Control Channel
SACCH	: Slow Associated Control Channel
FACCH	: Fast Associated Control Channel
FDM	: Frequency Division Multiplex
RPE-LTP	: Regular Pulse Excitation-Long Term Prediction
SB	: Synchronization Burst

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

RFN	: Reduced TDMA Frame Number
MAHO	: Mobile Assisted Handover
IMSI	: International Mobile Subscriber Identity
MMC	: Mobile Country Code
MNC	: Mobile Network Code
MSIN	: Mobile Subscriber Identification Number
MSISDN	: Mobile Subscriber ISDN Number
CC	: Country Code
NDC	: National Destination Code
SN	: Subscriber Number
TMSI	: Temporary Mobile Subscriber Identity
SRES	: Signed Response
C/I	: Cochannel-interference
STP	: Signal Transfer Points
SCP	: Signal Control Points
STD	: Standard Deviation
AC	: Corner Attenuation
TTM	: Test and Transmitter

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันการสื่อสารโทรคมนาคมนับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ การบริการสื่อสารโทรคมนาคมสามารถทดแทนหรือลดการเดินทางลงซึ่งจะบรรเทาปัญหาการจราจรและลดต้นทุนทางเศรษฐกิจของสังคม ในส่วนของประเทศไทยมีโครงข่ายและบริการสื่อสารโทรคมนาคมที่ทันสมัย เพื่อสนับสนุนการเจริญเติบโตของภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมและการให้บริการสังคมอย่างมีประสิทธิภาพ ตลอดจนได้มีการเชื่อมโยงติดต่อสื่อสารกันกับประเทศต่างๆทั่วโลกด้วย ไม่ว่าจะเป็นระบบโทรศัพท์พื้นฐานและโดยเฉพาะระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นควบคู่กับการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ

แต่เดิมการสื่อสารของมนุษย์จะเป็นการติดต่อในระยะทางใกล้ๆ เท่านั้น โดยจะใช้คำพูดและลักษณะท่าทาง ต่อมาเริ่มมีการคิดค้นสิ่งต่างๆเพื่อใช้ในการสังเกต เช่น การสื่อสารด้วยคลื่นไฟเป็นต้น จนกระทั่งได้มีการนำเอาเทคโนโลยีมาช่วยในการสื่อสารที่เรียกว่า โทรศัพท์ โดยในส่วนของประเทศไทยนั้น การให้บริการโทรศัพท์ภายในประเทศจะมีองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย (ทศท.) เป็นผู้ให้บริการ และการสื่อสารแห่งประเทศไทย (กสท.) เป็นผู้ให้บริการระหว่างประเทศ

ส่วนการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2527 เมื่อกระทรวงคมนาคมอนุมัติให้หน่วยงานในสังกัดคือ ทศท. และ กสท. ดำเนินการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์ในเชิงแข่งขัน โดยในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2529 ทศท. ได้เริ่มให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ ระบบ Nordic Mobile Telephone ในย่านความถี่ 470 MHz (NMT-470) ต่อมาในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530 กสท. ได้เปิดให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ระบบ Advanced Mobile Phone System ในย่านความถี่ 800 MHz (AMPS-800 Band A) แต่เนื่องจากมีปริมาณความต้องการสูงมาก ประกอบกับสถานะขาดแคลนโทรศัพท์พื้นฐานที่ทาง ทศท.ต้องรีบดำเนินการจัดหาในการให้บริการ ดังนั้นในส่วนของโทรศัพท์เคลื่อนที่นี้จึงได้เปิดประมูลให้บริษัทเอกชนเข้ามาดำเนินการร่วมในรูปแบบสัมปทาน ซึ่งบริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน) (AIS) ได้รับสิทธิให้ดำเนินการในระบบ NMT-900 โดยได้ดำเนินการในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2533 ส่วนทางด้าน กสท. นั้นบริษัท โทเทิล แอ็ดเชิส คอมมูนิเคชั่น จำกัด (มหาชน) (TAC) เป็นผู้ประมูลได้และดำเนินการในระบบ AMPS-800 Band B โดยเริ่มดำเนินการในเดือนกันยายน 2534 แต่เนื่องจากการบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นระบบอนาล็อก ซึ่งมีคุณภาพและการพัฒนาระบบที่จำกัด ทำให้มีการนำเอาระบบดิจิทัลมาให้บริการ โดยที่บริษัท AIS ได้เปิดให้บริการระบบ Global System for Mobile Communication ในย่านความถี่ 900 MHz (GSM 900) และบริษัท TAC เปิดให้บริการระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Personal Communication Network ในย่านความถี่ 1800 MHz (PCN 1800) ส่วนโครงข่ายของ กสท. ได้ปรับปรุงการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยเปิดให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ Code Division Multiple Access ย่านความถี่ 800 MHz (CDMA 800) [1] และในปัจจุบันยังมีผู้ให้บริการ โทรศัพท์เคลื่อนที่ในย่านความถี่ 1800 MHz (GSM 1800) คือ บริษัท ดีพีซี (DPC) ในเครือของ บริษัท AIS และบริษัท ทีเออาร์เอ็น (TAO) ที่กำลังจะเปิดให้บริการภายในต้นปี พ.ศ. 2545 อีกด้วย โดยในส่วนของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ย่านความถี่ 1900 MHz นั้นที่มีหน่วยงานของ ทศท. เป็นผู้ลงทุนและดำเนินการในรูปของบริษัท เอเชียโมบายส์ หรือไทยโมบายส์ โดยอยู่ในระหว่างการจัดองค์กรและแผนการดำเนินงานอยู่ในขณะนี้ ซึ่งก็ต้องติดตามความคืบหน้าในโอกาสต่อไป

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความต้องการในการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ส่วนบุคคลในเขตพื้นที่เมืองได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ผู้ให้บริการต่างก็ทุ่มเทกับการลงทุนขยายเครือข่ายโดยการเพิ่มจำนวนสถานีฐาน (BS : Base Station) ซึ่งการเพิ่มหรือลดสถานีฐานเพื่อให้บริการในแต่ละพื้นที่นั้นขึ้นกับปริมาณของทราฟฟิกที่แตกต่างกัน เช่น ในเขตพื้นที่เมืองหรือชุมชนหนาแน่นจะมีปริมาณของทราฟฟิกที่สูงจึงมีการเพิ่มสถานีฐานในรูปแบบไมโครเซลล์เพื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณให้เพียงพอต่อปริมาณของทราฟฟิก รวมทั้งลดการรบกวนจากความถี่ของช่องสัญญาณจากสถานีฐานข้างเคียงที่มีอยู่ก่อนให้มีน้อยที่สุด เนื่องจากสถานีฐานไมโครเซลล์จะใช้กำลังส่งที่ต่ำและเซลล์มีขนาดเล็ก โดยสายอากาศจะติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าความสูงของอาคาร โดยรอบจึงทำให้กำลังส่งคลื่นจากสถานีฐานจะแพร่กระจายไปตามเส้นทางบนถนนทั้งในแนวระดับสายตา (LOS : Line of Sight) และแนวอนอกระดับสายตา (NLOS : Non-line of Sight) ที่มีสภาพแวดล้อมต่างๆ และผลการลดทอนที่เกิดจากมุมการสะท้อนของอาคารและการเลี้ยวเบนหรือหักเหของคลื่นสัญญาณ ดังนั้นค่าสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้บริการที่เคลื่อนที่ไปตามจุดต่างๆ [2] ซึ่งการคาดคะเนค่าสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นจะช่วยให้การติดตั้งสถานีฐานไมโครเซลล์อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมมีระดับสัญญาณที่ดีในการให้บริการรวมทั้งสามารถรองรับปริมาณของทราฟฟิกได้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้บริการ ซึ่งการคาดคะเนคลื่นสัญญาณต่างๆ ไปจะมีสองโมเดลหลักๆ คือ โมเดลทางสถิติ (Analytical Method) ด้วยการใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) จากการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณที่มีการเปรียบเทียบอย่างหยาบๆ แ่งง่ายและสะดวกต่อการนำไปใช้ และอีกประเภท คือ โมเดลที่ได้จากการสังเกต (Empirical Method) จะระบุถึงสภาพแวดล้อมนั้นๆ ซึ่งเป็นการคำนวณที่ใกล้เคียงกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นจริงด้วยการระบุ Specification ของถนน หรือ อาคาร เป็นต้น จึงจำเป็นต้องใช้เวลานานมากในการนำไปใช้แต่รายละเอียดทางด้านกายภาพ (การสะท้อน, การเลี้ยวเบนหรือการหักเห และการกระเจิงของคลื่น) เหล่านี้ก็จะมีความเที่ยงตรงสูง [3] ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แนวทางของโมเดลทางสถิติเป็นหลักและอ้างอิงถึงโมเดลที่ได้จากการสังเกตเพื่อเป็นข้อมูลเสริม ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการวัดค่าเบี่ยงเบนการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมมองอาคารของการแพร่กระจายคลื่นเซลล์ลาร์ในระยะสั้นบนเส้นทางไมโครเซลล์

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในปัจจุบันนี้ปริมาณการวางตำแหน่งของสถานีฐานไมโครเซลล์ของระบบเซลล์ลาร์ในเขตพื้นที่เมืองจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการวางตำแหน่งสถานีฐานในรูปแบบมาโครเซลล์แต่เดิมนั้นจะมีข้อจำกัดมากขึ้นในเรื่องสถานที่และความรวดเร็วในการติดตั้งรวมทั้งปัญหาที่เกิดขึ้นจากอินเตอร์เฟียร์รันท์ในการขยายช่องสัญญาณเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นจากสถานีฐานข้างเคียงรวมทั้งสภาพแวดล้อมที่เป็นอาคารสูงที่กีดขวางเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นตรงตำแหน่งให้บริการในย่านพื้นที่เมืองที่มีลักษณะเป็น ตrokerชอย หรือภูเขาอาคาร ซึ่งสถานีฐานไมโครเซลล์จะเป็นทางเลือกสำหรับให้บริการในบริเวณพื้นที่เหล่านี้ที่มีปริมาณทราฟฟิกที่สูงเมื่อสถานีฐานใช้กำลังส่งที่ต่ำกว่ารูปแบบมาโครเซลล์ซึ่งก็อาจจะยังสามารถลดกำลังส่งได้อีกถ้าระดับความแรงของสัญญาณ (Signal Strength) อยู่ในระดับที่เหมาะสมในพื้นที่ให้บริการนั้นๆ ซึ่งในการพิจารณาเลือกตำแหน่งที่ตั้งหรือการปรับลดกำลังส่งของสถานีฐานไมโครเซลล์นั้นจะต้องให้ความสำคัญกับค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นบนเส้นทางต่างๆที่เกิดขึ้นในพื้นที่ให้บริการซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้บริการที่เคลื่อนที่ไปตามจุดต่างๆทั้งในเส้นทาง LOS และ NLOS ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเห็นว่าปัญหานี้จึงเป็นปัญหาที่น่าสนใจและน่าศึกษา

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

หลักการใหม่ที่นำเสนอ คือ การพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std : Standard Deviation) ของการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นบนเส้นทาง LOS และ NLOS รวมทั้งค่าลดทอนจากมุมมองอาคารบนเส้นทาง NLOS ที่ได้จากการทดสอบและวัดค่าในพื้นที่ที่จะให้บริการจริง เพื่อนำค่าที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาใช้เป็นค่าแฟกเตอร์ร่วมกับสมการ Free space loss สำหรับการคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นให้มีความถูกต้องและลดความยุ่งยากในการคำนวณที่ต้องใช้ตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาให้มีความรวดเร็วและเหมาะสมในการนำไปใช้จริงโดยได้ทำการศึกษาลักษณะของการสูญเสียที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีรูปแบบเป็นตรอก, ซอย หรืออาคารอาคาร (Building Blocks) ในพื้นที่เมืองแล้วนำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าลดทอนจากมุมอาคารในระยะทางแต่ละช่วงที่กำหนดให้ของการแพร่กระจายคลื่นบนเส้นทางต่างๆที่ทำการศึกษา แล้วจึงนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าลดทอนจากมุมอาคารที่ได้เพื่อนำมาใช้เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับการคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นทั้งเส้นทาง LOS และ NLOS โดยจะทำให้ค่าที่ได้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นข้อมูลและการตัดสินใจในการวางตำแหน่งหรือการปรับลดกำลังส่งของสถานีฐานไมโครเซลล์ในพื้นที่เมืองได้

1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

การคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นของไมโครเซลล์ในพื้นที่เมืองจะมีหลายๆโมเดลที่ได้ทำการศึกษาด้วยหลักการสะท้อนและการหักเหของคลื่น เช่น Image Method, Knife-edge, GTD (Geometrical Theory of diffraction) และ UTD (Uniform Theory of diffraction) เป็นต้น [4] ซึ่งมีขั้นตอนและรูปแบบการคำนวณที่สลับซับซ้อนและใช้เวลามากในการนำไปใช้ซึ่งในพื้นที่ให้บริการรูปแบบไมโครเซลล์ในเขตพื้นที่เมืองของกรุงเทพมหานครนั้น ลักษณะของอาคารที่มีปริมาณทราฟฟิกสูงจะมีความสูงเฉลี่ยของอาคารเท่าๆกันและมีระยะทางไม่เกินหนึ่งกิโลเมตรโดยส่วนใหญ่จะมีการครอบคลุมของสัญญาณ (Coverage Area) จากสถานีฐานไมโครเซลล์ที่ใกล้เคียงกับพื้นที่เหล่านี้อยู่บ้างแล้ว ดังนั้นการวางตำแหน่งไมโครเซลล์จึงเป็นส่วนช่วยเสริมจำนวนช่องสัญญาณให้เพียงพอต่อทราฟฟิก ซึ่งก็อาจจะไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณร่วมกับตัวแปรหลายๆตัวที่ยุ่งยากซับซ้อนสำหรับการนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวางตำแหน่งสถานีฐานไมโครเซลล์หรือการคาดคะเนปริมาณของทราฟฟิกให้เหมาะสมกับปริมาณของจำนวนช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้จะสามารถนำไปใช้พิจารณาเลือกตำแหน่งการวางของสถานีฐานไมโครเซลล์ให้มีความเหมาะสมและรวดเร็วขึ้นได้กับการใช้งานจริง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาและวิจัยเรื่องเกี่ยวกับค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นเซลล์ในระบบไมโครเซลล์ โดยในขอบเขตการวิจัยจะศึกษาถึงค่าเบี่ยงเบนและค่าลดทอนจากมุมอาคารที่ได้จากการวัดค่าของระดับกำลังงานของสัญญาณในพื้นที่ถนนสยามสแควร์ที่มีลักษณะเป็นตรอกซอยหรือคูหาอาคารที่มีระยะทางสั้นๆ เพราะเซลล์มีขนาดเล็กกรณีการแพร่กระจายคลื่นสั้น แล้วจึงนำค่าที่ได้มาใช้เป็นค่าแฟกเตอร์ร่วมกับสมการ Free space loss เพื่อช่วยในการคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้น สำหรับนำไปใช้เป็นข้อมูลในการเลือกตำแหน่งการวางสถานีฐานไมโครเซลล์ให้มีความเหมาะสมและรวดเร็วกับการใช้งานจริง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้จัดแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงภาพรวมของการสื่อสารและระบบโทรศัพท์ต่างๆ ที่ประเทศไทยนำมาให้บริการ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลล์ วิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบดิจิทัลในประเทศไทยที่ประกอบด้วย ระบบ PCN 1800 ระบบดิจิทัลแบบ CDMA ระบบดิจิทัล GSM ที่กล่าวถึงความเป็นมาของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ดิจิทัล GSM โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบ GSM ที่ประกอบด้วย เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ส่วนของสถานีฐาน ส่วนของระบบเนตเวิร์กและสวิตซ์และระบบปฏิบัติการ การรับส่งคลื่นสัญญาณวิทยุในระบบ GSM โครงสร้างของเฟรมในระบบ GSM ประเภทของเบิร์ตส ประเภทของสัญญาณที่ประกอบด้วยช่องสัญญาณทราฟฟิก ช่องสัญญาณซิกแนลลิง การเข้ารหัสช่องสัญญาณในระบบ GSM ที่ประกอบด้วย การเข้ารหัสช่องสัญญาณของสัญญาณเสียง TCH/FS การเข้ารหัสช่องสัญญาณของข้อมูลประเภทค้ำ การเข้ารหัสช่องสัญญาณของสัญญาณซิกแนลลิง ขั้นตอนการทำงานของเครื่องโทรศัพท์ ที่ประกอบด้วย การเลือกเซลล์ที่จะติดต่อ การซิงโครไนซ์ การเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบแรนดอม การระบุตำแหน่งพื้นที่ การแฮนด์โอเวอร์ หมายเลขประจำตัวต่างๆ ที่ใช้ในระบบ GSM คือ หมายเลข IMSI หมายเลข MSISDN หมายเลข TMSI กระบวนการ Authentication และ Ciphering การมอดูเลตสัญญาณ เทคโนโลยีไมโครเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ทฤษฎีการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น โดยจะกล่าวถึงหลักการแพร่กระจายคลื่น กลไกพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นที่ประกอบด้วย การสะท้อนของคลื่น การหักเหของคลื่น การหักเหของคลื่น การกระเจิงของคลื่น รูปแบบเส้นทางบนถนนไมโครเซลล์ วิธีการหาค่าสูญเสียของสัญญาณ เช่น วิธีการของ HATA สำหรับเซลล์ขนาดเล็ก วิธีการของ COST-231/Walfish/Ikegami วิธีการหาค่าการลดทอนของสัญญาณโดยใช้หลักการ Ray tracing หลักการอิมเมจและหลักการ UTD ส่วนท้ายบทจะเป็นวิธีการของ C.Y. Lee [5]

บทที่ 4 กล่าวถึงการหาค่าเบี่ยงเบนการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคารจากการแพร่กระจายคลื่นเซลล์ดาร์บ์บนเส้นทางไมโครเซลล์ หลักการวัด และวิเคราะห์ข้อมูลที่ประกอบด้วย การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 1 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 5 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 6

บทที่ 5 การคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและการวางตำแหน่งสถานีฐานไมโครเซลล์ ซึ่งจะประกอบด้วย การคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณ การคาดคะเนการวางตำแหน่งสถานีฐานไมโครเซลล์ที่สยามสแควร์

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง โดยจะกล่าวถึง สรุปผลค่าเบี่ยงเบนการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคาร สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ความรู้ทั่วไปของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นบริการหนึ่งร่วมกับระบบชุมสายโทรศัพท์ที่จะสามารถให้บริการได้ในลักษณะเดียวกับการใช้โทรศัพท์ทางสายธรรมดา เพียงแต่ใช้ระบบสื่อสารทางคลื่นวิทยุแทนการใช้สายทองแดงที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างเครื่องโทรศัพท์กับชุมสายโทรศัพท์ ทำให้โทรศัพท์เคลื่อนที่มีความสามารถในการติดต่อสื่อสารได้สะดวกยิ่งขึ้น แม้กระทั่งอยู่ในรถยนต์บนท้องถนนหรือบางสถานที่ที่ไม่สามารถใช้ระบบโทรศัพท์ธรรมดาได้ เช่น ในบริเวณห่างไกลที่ขยับสายไปไม่ถึง บนเรือที่แล่นอยู่ในแม่น้ำหรือทะเล เป็นต้น ด้วยประสิทธิภาพและความโดดเด่นของโทรศัพท์เคลื่อนที่ จึงทำให้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เมื่อจำนวนของผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่มีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงจุดหนึ่งที่เกินขีดความสามารถของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จะรองรับได้จะทำให้เกิดการบดบังของโทรศัพท์ในการโทรไม่ออกเพิ่มมากขึ้นเกินอัตราที่ยอมรับได้ จึงต้องมีการขยายขีดความสามารถของระบบเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ด้วยการสร้างระบบเซลลูลาร์ขึ้น ซึ่งข้อดีของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์อย่างหนึ่ง ก็คือ ความสามารถที่จะปรับเปลี่ยนภายในระบบที่จะสามารถทำให้รองรับสภาพทราฟฟิกได้สูงขึ้น โดยการปรับขนาดของเซลล์และจัดตำแหน่งของเซลล์ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ดังนั้นการเรียนรู้การออกแบบและการเลือกตำแหน่งของเซลล์ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จึงมีความสำคัญมากในการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จากเดิมให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นและสามารถรองรับสภาพทราฟฟิกได้สูงขึ้น ก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในการใช้งานจริงตามสภาพปัจจุบันและอนาคต

การใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยทั่วไป จะเป็นการติดต่อระหว่างเครื่องรับส่งวิทยุปลายทางกับวิทยุอีกเครื่องหนึ่ง หรือกับโครงข่ายโทรศัพท์พื้นฐาน (PSTN : Public Switch Telephone Network) ทั้งนี้จะมีสถานีทวนสัญญาณ (Repeater Station) ทำหน้าที่ถ่ายทอดสัญญาณเพื่อให้มีรัศมีการควบคุมที่กว้างไกลยิ่งขึ้น

ทางด้านเทคนิคได้มีการพัฒนาเป็นขั้นตอน เริ่มจากต้องติดต่อผ่านพนักงานสลับสายจนเป็นระบบอัตโนมัติ ต่อมาได้พัฒนาให้สามารถใช้งานได้ในทุกๆ ช่องความถี่พร้อมๆ กัน เพื่อรองรับความต้องการของผู้ใช้บริการ แต่ปรากฏว่ายังมีข้อจำกัดของความถี่วิทยุที่ไม่สามารถขยายโครงข่ายให้เพียงพอต่อความต้องการ อันเนื่องมาจากความต้องการใช้งานที่มีปริมาณที่สูงขึ้นได้

ดังนั้นความคิดในการใช้งาน โทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์จึงเริ่มขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ใช้ความถี่ในการติดต่อสื่อสารให้มีประสิทธิภาพเพียงพอกับความต้องการใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น
2. โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถติดต่อกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ และโทรศัพท์ทั่วไปได้ภายในพื้นที่ที่อยู่ในโครงข่าย
3. สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องตลอดพื้นที่ให้บริการ
4. สามารถใช้งานได้ทั้งแบบมือถือและติดตั้งรถยนต์ หรือประจำที่
5. ราคาไม่สูงเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับระบบโทรศัพท์แบบใช้สาย
6. มีความเชื่อมั่นได้สูง

2.1 วิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้เริ่มมีขึ้นจากการที่นาย M.G.Marconi ได้ทำการทดลองติดต่อสื่อสารผ่านทางคลื่นวิทยุระหว่างสถานีภาคพื้นดินกับเครื่องรับที่อยู่บนเรือโดยที่มีระยะห่างกันประมาณ 18 ไมล์ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการใช้การสื่อสารวิทยุเคลื่อนที่ หลังจากนั้นจึงมีการพัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นี้กับการบริการด้านอื่นๆ เช่น งานด้านตำรวจ งานทางทหาร เป็นต้น หลังจากนั้นได้มีการพัฒนา โดยนำมาเชื่อมโยงกับระบบโทรศัพท์ จึงเกิดระบบโทรศัพท์ใหม่ที่เรียกว่าระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Telephone System)

การทำงานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบเดิมจะมีการติดตั้งเครื่องรับและส่งสัญญาณวิทยุกำลังส่งสูง และตั้งอยู่ในที่สูง เช่น บนเนินเขา เพื่อที่จะทำให้ขอบเขตของการให้บริการมีพื้นที่กว้าง สถานีฐานที่ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณวิทยุของโทรศัพท์เคลื่อนที่ แต่ละสถานีจะสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้โซนหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งสถานีฐานเพิ่มตามจุดต่างๆ เพื่อสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้กว้างยิ่งขึ้น แต่การใช้งานของระบบเดิม เมื่อเครื่องโทรศัพท์มีการเริ่มเรียกจากในพื้นที่ของโซนหนึ่ง และมีการเคลื่อนที่ไปยังโซนอื่น จะทำให้การเรียกนั้นขาดหายไปได้หรือเรียกกันว่าสายหลุดซึ่งจะต้องทำการเรียกใหม่อีก จึงไม่สามารถรับประกันได้ว่าการเรียกจะสามารถกระทำได้สมบูรณ์จนสิ้นสุดการใช้โทรศัพท์ทุกครั้งไป จึงได้มีการพัฒนาระบบการเปลี่ยนเซลล์ (Hand-off) ขึ้นระหว่างเซลล์ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเชื่อมโยงการติดต่อของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ขณะที่มีการเปลี่ยนจากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่งโดยอัตโนมัติ ทำให้การเรียกสามารถกระทำได้อย่างต่อเนื่อง

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้เริ่มมีการใช้ครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ. 2489 โดยมีการทดลองใช้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในย่านความถี่ 150 MHz ซึ่งมีช่องสัญญาณ 6 ช่องสัญญาณ ในส่วนของการเชื่อมโยงกับโครงข่ายโทรศัพท์ ยังต้องใช้พนักงานสลับสายเชื่อมต่อกับโครงข่ายโทรศัพท์ โดยมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 60 KHz ต่อมาความต้องการใช้งานเพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการลดช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณเหลือเพียง 30 KHz ทำให้มีช่องสัญญาณเพิ่มขึ้นเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11 ช่องสัญญาณ และทาง FCC (Federal Communications Commission) ได้อนุญาตให้ใช้ความถี่ ย่าน 450 MHz อีก 12 ช่องสัญญาณ แต่ก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้บริการของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ต่อมาในปี พ.ศ. 2518 ทาง FCC ได้อนุญาตให้ใช้ความถี่ในช่วง 800-900 MHz อย่างอิสระ โดยให้เอกชนสามารถสร้างระบบสื่อสารในย่านความถี่นี้ได้ ทางบริษัท AT&T จึงได้นำความถี่ในช่วงดังกล่าวมาใช้ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ใหม่ที่มีการใช้เทคนิคในการนำความถี่ที่ถูกใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (Frequency Reused) ในเขตพื้นที่ต่างกัน ซึ่งก็คือ ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์ (Cellular Mobile Telephone) ที่เป็นการใช้สเปกตรัมความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการทดลองใช้ที่เมืองชิคาโก ในปี พ.ศ. 2526 และต่อมาก็ได้มีการแพร่กระจายไปทั่วประเทศ นอกจากนี้ก็ยังมี การนำแนวความคิดของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์ไปพัฒนาประยุกต์ใช้ทั่วโลก โดยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและมาตรฐานให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมตลอดจนย่านความถี่ที่อนุญาตให้ใช้

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีใช้อยู่ทั่วโลกมีความแตกต่างกันอยู่หลายระบบ ซึ่งเกิดขึ้นจากการพัฒนาของแต่ละประเทศที่มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเรื่องระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานที่มีจำนวนเพิ่มสูงขึ้น และพัฒนาให้มีประสิทธิภาพของสัญญาณเสีงดีขึ้น เพื่อความเหมาะสมกับการใช้งานแต่ละพื้นที่ ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ได้รับความนิยมในการใช้งานทั่วโลกมีดังนี้

1. ระบบ NMT-450 (Nordic Mobile Telephone-450 MHz) ซึ่งเป็นระบบที่ออกแบบโดยองค์การโทรคมนาคมของกลุ่มประเทศนอร์ดิกในแถบยุโรป ซึ่งได้แก่ ประเทศเดนมาร์ก ฟินแลนด์ นอร์เวย์และสวีเดน เมื่อปี พ.ศ. 2523 ระบบนี้จะมีการทำงานในย่านความถี่ 450 MHz ในระบบนี้จะมี ความจุของช่องสัญญาณต่ำ แต่สามารถที่จะส่งสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ได้ไกล ซึ่งเหมาะที่จะใช้ ในบริเวณที่มีการใช้งานทางโทรศัพท์ไม่สูงมากนัก คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ NMT-450 จะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ NMT-450

รายละเอียด	ระบบ NMT-450
ย่านความถี่ใช้ส่ง : จากสถานีฐาน	463-467.5 MHz
จากเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่	453-457.5 MHz
ความกว้างของช่องสัญญาณ	25 KHz
จำนวนช่องสัญญาณ	180
รูปแบบการวางเซลล์	แบบ 7 เซลล์
การคอมแพนเดอร์ (Componder)	ไม่มี
การมอดูเลตสัญญาณเสีง	FM (Frequency Modulation)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

การมอดูเลทสัญญาณควบคุม	FFSK (Fast Frequency Shift Keying)
อัตราการส่งข้อมูล	1.2 Kbps.
ความจุของช่องสัญญาณควบคุม	13,000
การทำไคเวอร์ซิตี	ไม่ได้
รัศมีของเซลล์	1.8-40 Km.

2. ระบบ AMPS (Advance Mobile Phone System) ได้ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกาเมื่อปี พ.ศ. 2523 ระบบนี้จะมีการทำงานในย่านความถี่ 800 MHz การให้บริการสามารถจะครอบคลุมพื้นที่ได้กว้าง โดยการใช้เทคนิคของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ ทำให้สามารถที่จะขยายพื้นที่การให้บริการได้มากขึ้นและทำให้มีจำนวนช่องสัญญาณต่อพื้นที่สูงขึ้นด้วย ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ในเมืองที่มีความหนาแน่นของการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สูงได้ดี คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ AMPS จะแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ AMPS

รายละเอียด	ระบบ AMPS
ย่านความถี่ใช้ส่ง : จากสถานีฐาน	870-890 MHz
จากเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่	825-845 MHz
ความกว้างของช่องสัญญาณ	30 KHz
จำนวนช่องสัญญาณ	832
รูปแบบการวางเซลล์	แบบ 4, 7 และ 12 เซลล์
การคอมเพนเดอร์ (Compander)	2:1 (Syllabic)
การมอดูเลทสัญญาณเสียง	FM (Frequency Modulation)
การมอดูเลทสัญญาณควบคุม	FSK (Frequency Shift Keying)
อัตราการส่งข้อมูล	10 Kbps.
ความจุของช่องสัญญาณควบคุม	77,000
การทำไคเวอร์ซิตี	ได้
รัศมีของเซลล์	2-20 Km.

3. ระบบ TACS (Total Access Communication) เป็นระบบที่ทางประเทศอังกฤษได้ทำการพัฒนาขึ้นจากระบบ AMPS ซึ่งในระบบนี้จะสามารถรองรับการใช้งานทางโทรศัพท์ได้เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม โดยจะมีการใช้ย่านความถี่ที่สูงขึ้น คือ ย่านความถี่ที่ 900 MHz ซึ่งจะให้คุณภาพของสัญญาณที่ดีขึ้น คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ TACS จะแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ TACS

รายละเอียด	ระบบ TACS-900
ย่านความถี่ใช้ส่ง : จากสถานีฐาน	935-960 MHz
จากเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่	890-915 MHz
ความกว้างของช่องสัญญาณ	25 KHz
จำนวนช่องสัญญาณ	1320
รูปแบบการวางเซลล์	แบบ 4, 7 และ 12 เซลล์
การคอมแพนเดอร์ (Compander)	2:1 (Syllabic)
การมอดูเลตสัญญาณเสียง	FM (Frequency Modulation)
การมอดูเลตสัญญาณควบคุม	FSK (Frequency Shift Keying)
อัตราการส่งข้อมูล	8 Kbps.
ความจุของช่องสัญญาณควบคุม	62,000
การทำไคเวอร์ซิตี	ได้
รัศมีของเซลล์	2-20 Km.

4. ระบบ NMT-900 เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นจากระบบ NMT-450 โดยกลุ่มประเทศในองค์กรโทรคมนาคมของกลุ่มประเทศนอร์ดิกในแถบยุโรป โดยจะมีการใช้ย่านความถี่ที่สูงขึ้น เป็นย่านความถี่ 900 MHz ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ NMT-450 ที่ให้บริการได้ไม่เพียงพอกับความต้องการที่มีเพิ่มสูงขึ้น และนำเอาเทคนิคการคอมแพนเดอร์ของสัญญาณมาใช้ ทำให้สัญญาณรบกวนบนสัญญาณเสียงมีค่าน้อยลง คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ NMT-900 จะแสดงในตารางที่ 2.4

หลังจากนั้น ระบบดิจิทัลได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบโทรคมนาคม เนื่องจากสัญญาณดิจิทัลจะมีการสูญเสียของสัญญาณที่ต่ำ และให้คุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าสัญญาณอนาล็อก จึงได้มีการพัฒนาระบบดิจิทัล เพื่อนำมาใช้งานในระบบโทรศัพท์ รวมทั้งระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วย ทำให้คุณภาพของสัญญาณเสียงโทรศัพท์มีคุณภาพเสียงที่ดีขึ้น และสามารถนำวิธีการแบ่งช่องเวลา (TDMA :Time Division Multiple Access) หรือวิธีการแบ่งความถี่ (FDMA :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Frequency Division Multiple Access) มาใช้ ทำให้สามารถที่จะรองรับช่องสัญญาณของโทรศัพท์ได้เพิ่มขึ้นซึ่งถือว่าเป็นการใช้ความถี่ที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้สามารถเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณได้อีก แต่ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบดิจิทัลที่ใช้เทคนิคของ FDMA จำเป็นที่จะต้องมีการกรองความถี่ที่มีคุณภาพ เนื่องจากช่องสัญญาณจะมีแบนด์วิดท์ที่แคบลง แต่ถ้าใช้ระบบ TDMA จะใช้การแบ่งเวลาในการส่งสัญญาณในช่องเดียวกัน ดังนั้นในภาครับสัญญาณ หรือภาคส่งสัญญาณจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนักแต่จะต้องเพิ่มกระบวนการในการทำให้สัญญาณกลับคืนเหมือนเดิม ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำได้มีความก้าวหน้ามาก จึงทำให้เทคนิคของ TDMA สามารถกระทำได้อย่างไม่ยุ่งยากนัก ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้นำเทคนิคของ TDMA มาใช้ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบดิจิทัลเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ NMT-900

รายละเอียด	ระบบ NMT-900
ย่านความถี่ใช้ส่ง : จากสถานีฐาน จากเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่	935-959.975 MHz 890-914.975 MHz
ความกว้างของช่องสัญญาณ	25 KHz
จำนวนช่องสัญญาณ	1,000
รูปแบบการวางเซลล์	แบบ 7, 9 และ 12 เซลล์
การคอมแพนเดอร์ (Compander)	2:1 (Syllabic)
การมอดูเลตสัญญาณเสียง	FM (Frequency Modulation)
การมอดูเลตสัญญาณควบคุม	FFSK (Fast Frequency Shift Keying)
อัตราการส่งข้อมูล	1.2 Kbps.
ความจุของช่องสัญญาณควบคุม	13,000
การทำไคเวอร์ซิติ	ได้
รัศมีของเซลล์	2-25 Km.

2.2 ระบบ PCN 1800

ระบบ PCN 1800 MHz ในบ้านเรารู้จักในนามเวิลด์โฟน 1800 หรือใช้แบรนด์เนมใหม่ว่า DTAC โดย PCN นั้นย่อมาจากคำเต็มว่า Personal Communication Network โดยทางทฤษฎีแล้ว ในระบบนี้จะเป็นการใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า ไมโครเซลล์ (Microcell) ซึ่งการสร้างไมโครเซลล์นั้นจุดประสงค์ใหญ่ก็เพื่อที่จะให้ปริมาณหรือจำนวนผู้ใช้ใน 1 เซลล์นั้นมีจำนวนน้อยกว่าผู้ใช้ในระบบ GSM เมื่อเทียบกับเซลล์ต่อเซลล์ ซึ่งจะมีผลดีก็คือ การควบคุมดูแลเครื่องโทรศัพท์มือถือที่อยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

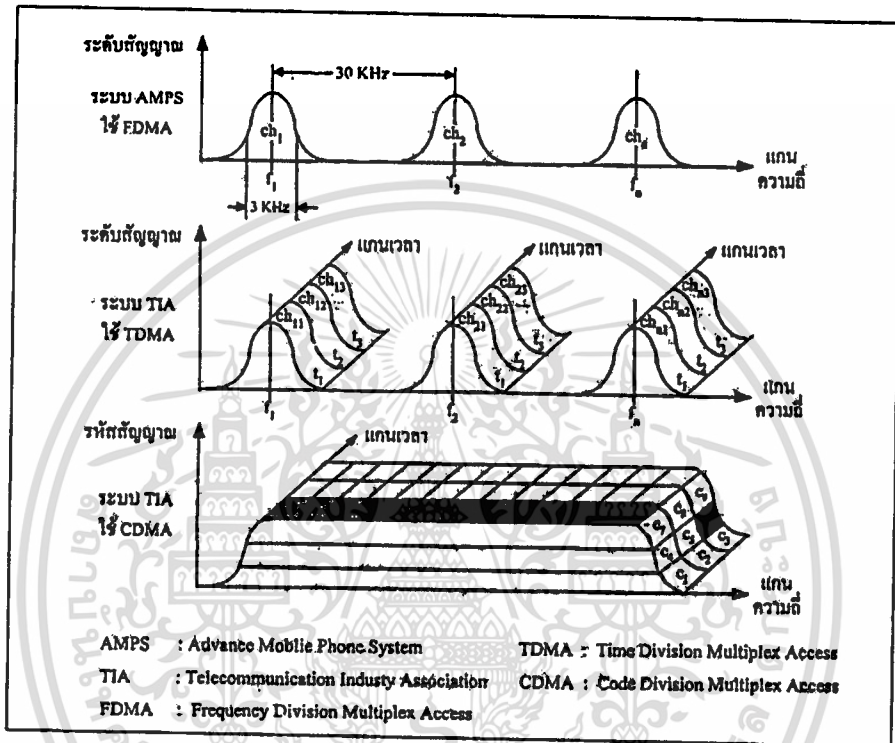
เซลล์นั้นสามารถทำได้ทั่วถึง จะทำให้ปัญหาสายหลุด เนื่องจากช่องสัญญาณควบคุมไม่พอนั้นน้อยลง การออกแบบระบบ PCN 1800 นี้จะใช้คลื่นย่าน 1,805 MHz ถึง 1,880 MHz สำหรับการส่ง และ 1,710 MHz ถึง 1,785 MHz สำหรับการรับ ซึ่งความถี่ในย่านนี้จะเป็นความถี่ในย่านไมโครเวฟ มีข้อดีอยู่ 2 ประการ คือ ประการที่ 1 ความถี่สูงๆขนาดนี้ จะทำให้อุปกรณ์ภายในเครื่องรับและเครื่องส่งนั้นมีขนาดเล็กมากกว่าในระบบ GSM หรือในระบบบอณาโลกอื่นๆ จึงทำให้ผู้ผลิตสามารถสร้างเครื่องที่มีขนาดเล็กมากๆได้ ประการที่ 2 ความกว้างของความถี่การใช้งานจะสามารถขยายได้กว้างกว่าระบบอื่น เนื่องจากธรรมชาติของการใช้ความถี่จะสามารถใช้แถบความถี่ได้กว้างถึง 5% ของความถี่หลัก ดังนั้นในมาตรฐานของระบบ PCN 1800 จึงสามารถใช้ความถี่ที่มีแบนด์วิดท์ได้กว้างถึงด้านละ 75 MHz ส่วนข้อเสียของระบบ PCN 1800 MHz ก็คือ การใช้ความถี่ย่านไมโครเวฟนี้ จะทำให้มีการลดทอนของสัญญาณสูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะสามารถติดต่อได้ดีในระดับสายตาตามองถึงกันเท่านั้น (Line of Sight) ดังนั้นเหตุนี้เองจึงทำให้ระบบ PCN 1800 นั้นจะต้องวางสถานีฐานในรูปแบบของไมโครเซลล์ นั่นก็คือ ในระบบนี้จะต้องใช้สถานีฐานเป็นจำนวนมากกว่าระบบ GSM 3 ถึง 8 เท่า แต่อย่างไรก็ตาม การวางสถานีฐานจำนวนมากนี้ จะช่วยให้ช่องสัญญาณมีมากเหลือพอที่จะใช้งานในแต่ละเซลล์ได้เป็นอย่างดี ด้วยสาเหตุนี้ในระบบ PCN 1800 จึงไม่ค่อยมีปัญหาในเรื่องช่องสัญญาณเต็ม เหมาะสมสำหรับที่จะใช้ในตัวเมืองที่มีประชากรหนาแน่น และสามารถให้บริการได้จนถึง 0.025 เออแลงก์ต่อเครื่อง (Erl/sub) ส่วนการจัดรูปแบบช่องสัญญาณนั้นจะใช้มาตรฐาน TDMA และในระบบ PCN นี้ ยังสามารถส่งข้อมูลผ่านระบบโครงข่ายได้ด้วยความเร็วถึง 15 Mb/s เมื่อใช้แถบความถี่ด้านละ 10 MHz โดยอาศัยเฟรมการส่งสัญญาณจะถูกจัดเป็นบล็อกๆ จำนวน 4 บล็อก ซึ่งแต่ละบล็อกจะถูกส่งซ้ำอีก 1 ครั้ง ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณนั้นจะไม่ตกหล่นหายไปเนื่องจากการส่งวิทยุนั้นไม่สามารถเอาความแน่นอนได้ 100% บางครั้งบางคราวอาจจะถูกดึกหรืออาคารบดบัง ทำให้สัญญาณขาดช่วงได้ เมื่อส่งซ้ำอีกครั้ง ก็จะเพิ่มความมั่นใจขึ้นอีกเท่าตัว ในแต่ละบล็อกจะประกอบไปด้วย H (Header) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงการเริ่มต้นสัญญาณข้อมูล (Data) ซึ่งเป็นสัญญาณ PCM ของเสียงนั่นเอง

จะเห็นได้ว่าจากข้อมูลของระบบ GSM และระบบ PCN สิ่งหนึ่งที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือ ความถี่ที่ใช้จะต่างกันถึง 2 เท่าตัว คือ ความถี่ 900 MHz กับความถี่ 1800 MHz ซึ่งตามทฤษฎีแล้วการสูญเสียของสัญญาณจะเป็นไปตามระยะทางกำลังสอง ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วรัศมีของการแพร่กระจายคลื่นในระบบ PCN จะสั้นกว่าระบบ GSM ประมาณ 4 เท่าตัวเมื่อใช้กำลังส่งเท่ากัน

2.3 ระบบดิจิตอล CDMA

เทคโนโลยีของระบบ CDMA (Code Division Multiple Access) นั้น เกิดขึ้นมาหลัง FDMA และ TDMA สาเหตุเพราะว่าเรามีความต้องการช่องสัญญาณมากขึ้นเรื่อยๆ ตามการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของโทรศัพท์มือถือ เทคนิคการแบ่งความถี่กันใช้จึงไม่เพียงพอต่อความต้องการ ระบบ TDMA จึงไม่ใช่วิธีที่ดีทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีข้อด้อยหลายประการ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนไปใช้

เกิดขึ้น โดยแบ่งความถี่ให้เป็นช่องเวลาอีก ดังนั้น 1 ความถี่จึงใช้ได้หลายคน (ตามการแบ่งช่องเวลา) โดยทั่วไป ระบบ TDMA จะมีความจุมากกว่า FDMA ประมาณ 3 ถึง 8 เท่า แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบ TDMA ยังมีจำนวนช่องสัญญาณไม่พอใช้ก็จะเปลี่ยนเป็นระบบ CDMA ซึ่งในระบบ CDMA ก็จะเข้ารหัสในแต่ละช่องเวลาอีกประมาณ 8 รหัส คือ ในระบบ CDMA นั้นจะมีความจุของช่องสัญญาณมากกว่า TDMA อยู่ประมาณ 8 เท่าหรือ 64 เท่าของ FDMA นั่นเอง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เทคนิคการแบ่งช่องสัญญาณของระบบ FDMA, TDMA และ CDMA

การใช้งานระบบ FDMA นั้น มีการแบ่งช่องความถี่ออกเป็นช่องความถี่ย่อยๆ หลายช่อง แต่ละช่องก็จะสื่อสารกันในแต่ละคู่สนทนา ในขณะที่ระบบ TDMA นั้น แต่ละช่องยังแบ่งเวลาออกเป็นแต่ละคู่สนทนาอีกเช่นกัน ทำให้เพิ่มจำนวนคู่สนทนาได้ตามจำนวนช่องเวลา ส่วนระบบ CDMA นั้น จะใช้ช่องความถี่ใหญ่รวมทุกคู่สนทนาไว้ภายใน โดยวิธีการจัดการด้วยระบบรหัสประจำตัว จึงทำให้สามารถใช้ความถี่ได้ทุกๆ ความถี่ที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ส่วนวิธีการจัดการกับกำลังส่งที่ใช้ส่งคลื่นออกไปของระบบ CDMA ก็มีวิธีการที่แตกต่างจากระบบ FDMA และ TDMA ตรงที่ เทคนิคของระบบ CDMA นั้น จะใช้กำลังส่งที่มีค่าต่ำมากๆ โดยกำหนดกำลังส่งนั้นให้มีความแรงของสัญญาณสูงกว่าระดับสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกซ้อน เพียงแค่ 3 dB เท่านั้น ในขณะที่ระบบ FDMA และ TDMA ถ้ากำลังส่งมีกำลังแรงสูงๆ ก็จะมีผลดีมาก ขึ้น ดังนั้นในสองระบบนี้ จึงมักต้องการกำลังส่งสูงกว่าระดับสัญญาณรบกวนและสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทรกซ้อนไม่น้อยกว่า 18 dB สัญญาณที่เป็นคิจิตอลจะถูกนำมาผสมกับสัญญาณรบกวนแบบ Pseudo แล้วส่งไปในรูปของคลื่นผ่านบรรยากาศ และสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณแทรกซ้อนแบบต่างๆ เข้ามาร่วมด้วย เครื่องรับก็จะทำการรับสัญญาณเข้ามา และถอดสัญญาณรบกวนแบบ Pseudo ทิ้ง ก็จะได้สัญญาณที่เป็นคิจิตอล (BPSK : Binary Phase Shift Keying) กลับออกมา และนำไปถอดเป็นสัญญาณเสียงต่อไป เมื่อนำเอาระบบ CDMA มาใช้งานในรูปแบบของมือถือแบบเซลลูลาร์ จะมีประโยชน์หลายประการดังนี้ คือ ประการแรก ในการสนทนาของมนุษย์นั้น จะมีช่วงของเสียงพูดอยู่ประมาณ 35% เท่านั้น ในขณะที่มีช่วงเงียบ (Pause) อยู่ประมาณ 65% ซึ่งในช่วง 65% นี้ เมื่อไม่มีการส่งสัญญาณก็จะเป็นส่วนของสัญญาณเสียงรบกวน ในระบบ CDMA นั้นจะส่งสัญญาณอยู่เหนือสัญญาณรบกวน 3 dB ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในช่วงที่ไม่มีสัญญาณเสียงของคู่สนทนาอยู่แรก คู่สนทนาอยู่ถัดๆ ไป ก็สามารถในช่วงที่ว่าง 65% นี้ในการสื่อสาร ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ในระบบ CDMA นั้นจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า ในระบบ FDMA และ TDMA นั้นจะต้องทำงานตลอดเวลา แม้ว่าจะไม่มีสัญญาณเสียงก็ตาม ประการที่สอง เนื่องจากระบบ CDMA นั้นจะใช้รหัสคิจิตอลเป็นส่วนสำคัญในการติดต่อ อัตราส่วนความแรงของแคะเรียร์ต่อการอินเตอร์เฟอรัลเ็นท์ (C/I : Carrier to Interference) สามารถลดค่น้อยลง จนกระทั่งถึง 7 dB (ประมาณ 3 ถึง 4 เท่า) ในขณะที่ระบบ FDMA และ TDMA ต้องการถึง 15 dB (ประมาณ 32 เท่ากัน) ดังนั้นจึงเห็นว่าการสื่อสารในระยะทางและเงื่อนไขที่เท่ากัน ระบบ CDMA จะใช้กำลังส่งน้อยกว่าระบบ FDMA และ TDMA ถึง 4 เท่าตัว ประการที่สาม ในระบบ CDMA ไม่ต้องใช้การเว้นช่วงเวลา (Guard Time) สำหรับการแบ่งแยกช่องสัญญาณเหมือนในระบบ TDMA ซึ่งก็เพื่อช่วงเวลาเอาไว้ในกรณีของความล่าช้าของสัญญาณที่มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องมาจากการสะท้อนจากตัวอาคารบ้านเรือนต่างๆ ดังนั้นในระบบ CDMA จึงมีความแน่นอนในการใช้งานสูงสุดเท่าที่มีในปัจจุบันนี้ ในระบบ CDMA นั้น ต้องการกว้างของแถบความถี่ต่อหนึ่งแถบมีค่าเท่ากับ 1.25 MHz เพื่อให้ได้ความจุของช่องสัญญาณทั้งหมดประมาณ 42 ช่องสัญญาณ หรือประมาณ 6 ช่องสัญญาณต่อหนึ่งเซลล์ เมื่อใช้โครงสร้างเซลล์ชนิด 7 เซลล์ต่อกลุ่มจำนวนช่องสัญญาณ 6 ช่องนี้ดูเหมือนว่ามีค่าน้อย แต่ที่ได้อธิบายไปแล้ว ถึงการแทรกช่องสัญญาณในขณะที่ไม่มีสัญญาณเสียงอีก 65% และการเข้ารหัสได้อีกประมาณ 13 รหัสต่อช่องสัญญาณ จึงทำให้จำนวนคู่สนทนาสามารถขยายได้ถึง 120 คู่สนทนาต่อช่องสัญญาณ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบโทรศัพท์ CDMA กับระบบอื่นๆ จะแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบระบบโทรศัพท์ CDMA กับระบบอื่นๆ

ระบบ	GSM	PDC	TIA	TIA
ความถี่(MHz)			(TDMA)	(CDMA)
-สถานีฐาน	869-960	810-826 (1429-1453)	869-894	869-894
-ตัวลูก	890-915	940-956 (1477-1501)	824-849	824-849

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

เทคนิคการแบ่งช่องสัญญาณ	TDMA	TDMA	TDMA	CDMA
จำนวนช่องสัญญาณต่อ1 ความถี่	8	3	3	61
อัตราเร็วข้อมูล	270.8 kb/s	42 kb/s	48.6 kb/s	614.4 kb/s
วิธีการมอดูเลตสัญญาณ	GMSK	$\pi/4$ QPSK	$\pi/4$ QPSK	QPSK/ OQPSK
ความเร็วข้อมูลต่อช่องสัญญาณ	22.8 Kb/s	11.2 Kb/s	13 Kb/s	9.6 Kb/s
ความกว้างของแถบความถี่	200 KHz	25/50 KHz	30 KHz	1,250 KHz
กำลังส่งของตัวลูกข่าย	3.7-20 W	0.3-3 W	2.2mW-6 W	0.2-6.3 W
รัศมีเซลล์	1-20 km	2-20 km	0.5-20 km	1-20 km
จำนวนช่องสัญญาณต่อเซลล์	333	288	357	750

2.4 ระบบดิจิตอล GSM

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ดิจิตอลจีเอสเอ็มเป็นระบบโทรศัพท์ชนิดหนึ่งที่ประเทศไทย [7] ได้มีการนำเอามาใช้งานควบคู่กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบอนาล็อกเดิม โดยระบบดิจิตอลนั้นจะมีความทันสมัยของเทคโนโลยีในการให้บริการและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องสำหรับการรองรับเทคโนโลยีใหม่ๆที่จะเกิดขึ้นในอนาคตควบคู่กับการเติบโตและการพัฒนาประเทศที่จำเป็นต้องมีระบบการสื่อสารที่ทันสมัย

2.4.1 ความเป็นมาของระบบดิจิตอล GSM

คำว่า GSM เดิมเป็นชื่อย่อมาจากคำว่า Group Special Mobile ซึ่งเกิดจากกลุ่มวิจัยที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของประเทศในยุโรปหลายประเทศเพื่อศึกษาและพัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Telephone System) ในราวปี ค.ศ. 1982 ภายใต้การดูแลและสนับสนุนจาก CEPT (The European Conference of Postal and Telecommunication Administrations) โดยมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อพัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบใหม่ที่สามารถรองรับความต้องการใช้งานของผู้ใช้บริการได้มากขึ้นและที่สำคัญ คือ ต้องสามารถอนุญาตให้ผู้ใช้งานโทรศัพท์มือถือในการติดต่อสื่อสารจาก ณ ที่สถานที่ใดก็ได้ภายในพื้นที่ของกลุ่มประเทศในยุโรปหรือการโรมมิ่ง (Roaming) ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM นั้นจัดว่าเป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ 2 (Second Generation Mobile Systems) ซึ่งได้รับการพัฒนาต่อมาจากระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคแรก จุดแตกต่างที่สำคัญของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่สองกับของยุคแรกก็ คือ การนำเทคโนโลยีแบบดิจิตอลมาแทนการใช้เทคโนโลยีอนาล็อกแบบเดิม เหตุผลที่กลุ่มผู้วิจัยของ GSM ได้เลือกใช้เทคโนโลยีดิจิตอลสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนา ระบบ GSM ก็เพราะระบบดิจิทัลมีข้อดีกว่าระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบอนาล็อกหลายประการดังต่อไปนี้

1. ระบบดิจิทัลซึ่งสามารถจะใช้ประโยชน์จากสเปกตรัมที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ดีกว่าระบบอนาล็อกเพราะสามารถรับส่งสัญญาณได้จำนวนช่องมากกว่าและคุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่า
2. สัญญาณจากโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบดิจิทัลยังสามารถนำมาติดต่อกับระบบโทรศัพท์ที่มีใช้งานตามบ้านปกติทั่วไป ได้โดยตรงเพราะในช่วงเวลานั้นชุมสายของระบบโทรศัพท์ PSTN เหล่านี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก คือ จากเดิมที่ใช้สัญญาณอนาล็อกมาเป็นระบบดิจิทัล
3. นอกจากนี้ในเวลานั้นได้มีการคาดการณ์กันว่าระบบไอเอสดีเอ็น (ISDN : Integrated Service Digital Network) นั้นจะมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายภายในยุโรปในอนาคตอันใกล้ ดังนั้นถ้าใช้ระบบดิจิทัลก็จะสะดวกต่อการสร้างวงจรเชื่อมต่อระหว่างกัน
4. เหตุผลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ ในระบบดิจิทัลเราสามารถสร้างระบบป้องกันสัญญาณจากการดักฟังและการแอบใช้บริการจากผู้ที่ไม่ได้เป็นสมาชิก ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าระบบอนาล็อกมาก

ด้วยเหตุนี้เองระบบ GSM จึงออกแบบเป็นระบบดิจิทัล ในปัจจุบัน GSM เป็นที่รู้จักกันในชื่อเต็มว่า Global System for Mobile Communications ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบ GSM มีการเริ่มนำมาใช้งานจริงครั้งแรกในราวปี ค.ศ. 1991 และในปัจจุบันระบบ GSM นี้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายกว่า 120 ประเทศทั่วโลกซึ่งรวมถึงประเทศไทยด้วย จากปริมาณความต้องการใช้งานที่มีมาก ทำให้มีการนำเอามาตรฐาน GSM ที่ใช้งานในย่าน 900 MHz ไปใช้กับความถี่ในย่าน 1800 MHz และมีการเรียกระบบดังกล่าวว่า ดิจีสีส (DCS 1800 : Digital Cellular System 1800) หรือบางทีก็มีชื่อเรียกว่า ฟิซีเอ็น ซึ่งสามารถดูตัวอย่างรายชื่อของประเทศและบริษัทที่ได้นำระบบ GSM ไปใช้ในการให้บริการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ใน ตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 รายชื่อประเทศที่มีการนำระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ไปให้บริการ

ประเทศ	ระบบ	บริษัทที่ให้บริการ
Andorra	GSM	STA
Australia	GSM	Optus, Telecom Australia and Vodafone
Austria	GSM	PTV Austria
Bahrain	GSM	Batelco
Belgium	GSM	Belgacom Mobile
Brunei	GSM	Jabatan Telekom
Bulgaria	GSM	Mobile TEL
Cameroon	GSM	PM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

China	GSM	Beijing Telecoms Administration and etc.
Cyprus	GSM	Cyprus Telecomm. Authority
Denmark	GSM	Densk Mobil Telefon and Tele Danmark Mobil
Egypt	GSM	Arento
Estonia	GSM	Eesti Mobiltelefon and Radiolinja Estonia
Fiji	GSM	Vodafone Fiji
Finland	GSM	Radiolinja and Telecom Finland
France	GSM	Tikiphone
Germany	GSM&DCS	DeteMobil, Mannesmann Mobilfunk and E-Plus Mobilfunk
Gibraltar	GSM	Gibtel
Greece	GSM	Panafon and STET Hellas
Guernsey	GSM	Guernsey Telecoms
Hong Kong	GSM	Hongkong Telecom CSL, Smar Tone Mobile Comms And Hutchison
Hungary	GSM	Pannon GSM and Westel 900
Iceland	GSM	Iceland PTT
India	GSM	Bharati Telecom and etc.
Indonesia	GSM	PT Telekom Indonesia and Satelindo
Iran	GSM	TCI
Ireland	GSM	Telecom Eireann Eircell
Italy	GSM	SIP Mobile and Omnitel
Jersey	GSM	Jersey Telecoms
Kuwait	GSM	Mobile Telecommunications Comp
Laos	GSM	Lao Shinawatra Telecom
Latvia	GSM	Latvian Mobile Telephone
Lebanon	GSM	Libancell
Luxembourg	GSM	Luxembourg P&T
Macau	GSM	CTM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

Malaysia	GSM&DCS	Binariang, Celcom, Berjaya, Malaysia Resources Corporation, And Sapura
Mauritius	GSM	Mauritius Telecom
Morocco	GSM	Morocco PTT
Netherlands	GSM	PTT Telecom and Second Operator
New Zealand	GSM	BellSouth New Zeland and Telstra
Nigeria	GSM	EMIS Nigeria
Norway	GSM	NetCom GSM and Tele-mobile
Oman	GSM	General Telecommunications Org.
Pakistan	GSM	Pakcom
Philippines	GSM	Globe Telecom and Isla Communications
Poland	GSM	PTK-Centertel
Portugal	GSM	Telecel and TMN
Qatar	GSM	Q-Tel
Reunion	GSM	SRR
Romania	GSM	Romania Telecoms
Russia	GSM	Mobile Tele Systems and etc.
Saudi Arabia	GSM	MoPTT and Royal Palace of Saudi Arabia
Singapore	GSM	Singapore Telecom
Slovenia	GSM	Slovenian PTT
South Africa	GSM	Mobile Telephone Network and Vodacaom
Spain	GSM	Telafonica
Sri Lanka	GSM	MTN
Sweden	GSM	Comviq GSM
Switzerland	GSM&DCS	Nordic Tel & PTT Telecom
Syria	GSM	Syrian Telecom
Taiwan	GSM	DGPT
Thailand	GSM&DCS	Advanced Info Service & Total Access Communication

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

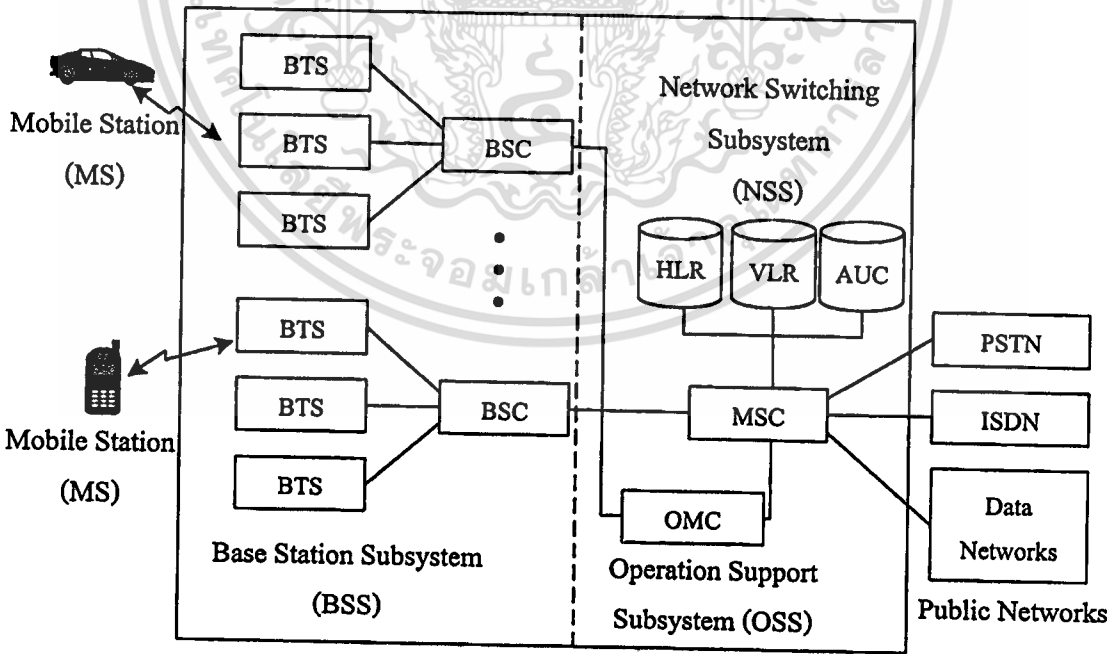
Turkey	GSM	Turkish PTT
Uganda	GSM	MTN Uganda
Uae	GSM	Etisalat
UK	GSM&DCS	Telecom Securicor Cellular Radio, Vodafone, Hutchison, Telecom and Mercury
Vietnam	GSM	Vietnam Telecom Services Co
Zaire	GSM	African Telecom Network

2.4.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบ GSM

โครงสร้างของระบบ GSM ประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้ คือ

- 1. เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (MS : Mobile Station)
- 2. ส่วนของสถานีฐาน (BSS : Base Station Subsystem)
- 3. ส่วนของระบบเน็ตเวิร์กและสวิตชิง (NSS : Network and Switching Subsystem)
- 4. ระบบปฏิบัติการ (OSS : Operation Support Subsystem)

โดยแต่ละส่วนจะมีลักษณะการเชื่อมต่อกันดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบ GSM

2.4.2.1 เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (MS : Mobile Station)

เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือ MS คือ เครื่องโทรศัพท์ที่ผู้ใช้บริการใช้ในการโทรออกหรือรับสายเรียกเข้านั่นเอง ในปัจจุบันเครื่องโทรศัพท์ที่ใช้งานกันอยู่มีหลายรูปแบบ ตั้งแต่แบบที่ติดตั้งอยู่กับยานพาหนะ (Vehicle-mounted) แบบกระเป๋าทัวร์ (Portable equipment) ไปจนถึงแบบมือถือ (Handheld station) โดยทั่วไปแล้วเครื่องแต่ละประเภทจะแตกต่างกันก็ตรงลักษณะการใช้งานและกำลังส่งของเครื่อง สำหรับระบบ GSM ได้แบ่งชนิดของเครื่องโทรศัพท์ออกเป็น 5 กลุ่มตามขนาดของกำลังส่งสูงสุดที่ใช้ ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.7 ส่วนระบบ DCS 1800 มีวิธีการแบ่งประเภทของเครื่องโทรศัพท์ที่ต่างออกไป คือ แบ่งเพียง 2 กลุ่ม ทั้งนี้เพราะที่ย่านความถี่ดังกล่าวเซลล์มักจะมีขนาดเล็กกว่าทำให้ไม่ต้องใช้กำลังในการส่งที่สูงมากนัก ซึ่งรายละเอียดของแต่ละกลุ่มจะแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.7 กำลังส่งของเครื่องโทรศัพท์แต่ละประเภทตามมาตรฐานของระบบ GSM

Power class	Maximum power of a mobile station
1	20 W
2	8 W
3	5 W
4	2 W
5	0.8 W

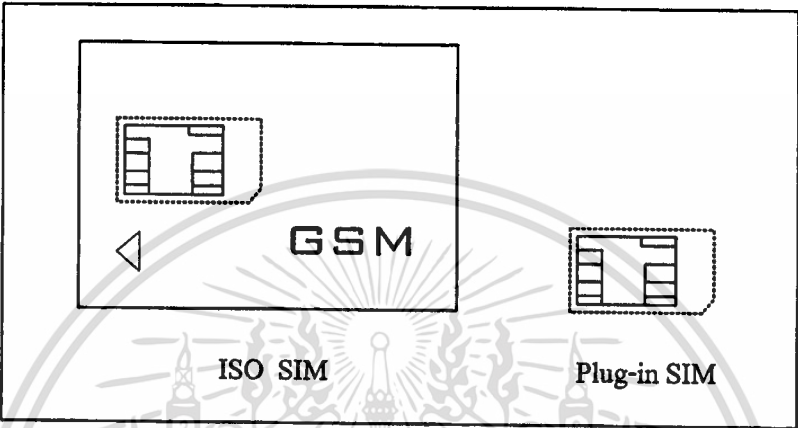
ตารางที่ 2.8 กำลังส่งของเครื่องโทรศัพท์แต่ละประเภทตามมาตรฐาน DCS 1800

Power class	Maximum power of a mobile station
1	1 W
2	0.25 W

ภายในอุปกรณ์โทรศัพท์เครื่องหนึ่งประกอบด้วยส่วนย่อย 2 ส่วน คือ ภาคอุปกรณ์โทรศัพท์ (ME : Mobile Equipment) และ ตัว SIM ส่วนของ ME ทำหน้าที่จัดการกับการรับส่งคลื่นสัญญาณวิทยุระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่กับส่วนของสถานีฐาน และรวมไปถึงอุปกรณ์สำหรับใช้ในการติดต่อกับผู้ใช้ เช่น ไมโครโฟน ลำโพง จอภาพ และปุ่มต่างๆ ขณะที่ในส่วนของ SIM คือ สมาร์ทการ์ด (Smart Card) แผ่นบางๆ ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผู้ใช้ รายการประเภทของบริการที่ผู้ใช้ได้ขอไว้และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงข่าย เช่น เลขประจำตัวของผู้ใช้ ตำแหน่งหรือบริเวณที่เครื่องโทรศัพท์มีการใช้งานอยู่ และรหัสลับที่ใช้ในการเข้ารหัสสัญญาณเพื่อป้องกันการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอปฟิง เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจจะเก็บหมายเลขโทรศัพท์ที่ผู้ใช้มีการติดต่อด้วยเป็นประจำเพื่อความสะดวกของผู้ใช้บริการ การจัดให้เครื่องโทรศัพท์ที่มีโครงสร้างในลักษณะนี้ช่วยให้เราสามารถเสียบแผ่น SIM เข้าไปในอุปกรณ์ ME ใดก็ได้ แผ่น SIM ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมี 2 รูปแบบ คือ แผ่นที่มีขนาดเท่ากับบัตรเครดิตเรียกว่า ISO SIM และแบบขนาดเล็กที่เรียกว่า Plug-in SIM ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ประเภทของแผ่น SIM ทั้งสองแบบ

2.4.2.2 ส่วนของสถานีฐาน (BSS : Base Station Subsystem)

BSS ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ สถานีฐาน (BTS : Base Transceiver Station) และ ตัวควบคุมสถานีฐาน (BSC : Base Station Controller) ส่วนของ BTS ทำหน้าที่ติดต่อกับเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ MS ทั้งหมด โดยที่ BTS หนึ่งตัวจะดูแลครอบคลุมบริเวณพื้นที่จำกัดบริเวณหนึ่งที่เรียกว่า เซลล์ โดยหลักๆ แล้ว BTS ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับส่งคลื่นสัญญาณวิทยุ คล้ายๆ กันกับส่วน ME ของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยขนาดกำลังส่งของสถานีฐานมีได้หลายระดับ ดังรายละเอียดของการแบ่งระดับในตารางที่ 2.9

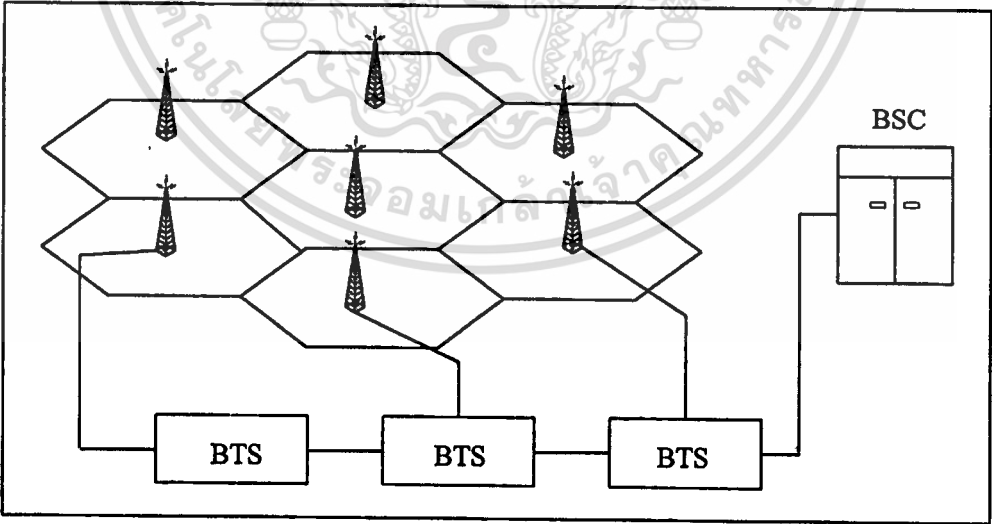
ตารางที่ 2.9 ระดับกำลังส่งของสถานีฐานตามมาตรฐาน GSM 900 และ DCS 1800

Power class	Maximum power of a GSM 900 base station	Maximum power of a DCS 1800 base station
1	320 W	20 W
2	160 W	10 W
3	80 W	5 W
4	40 W	2.5 W

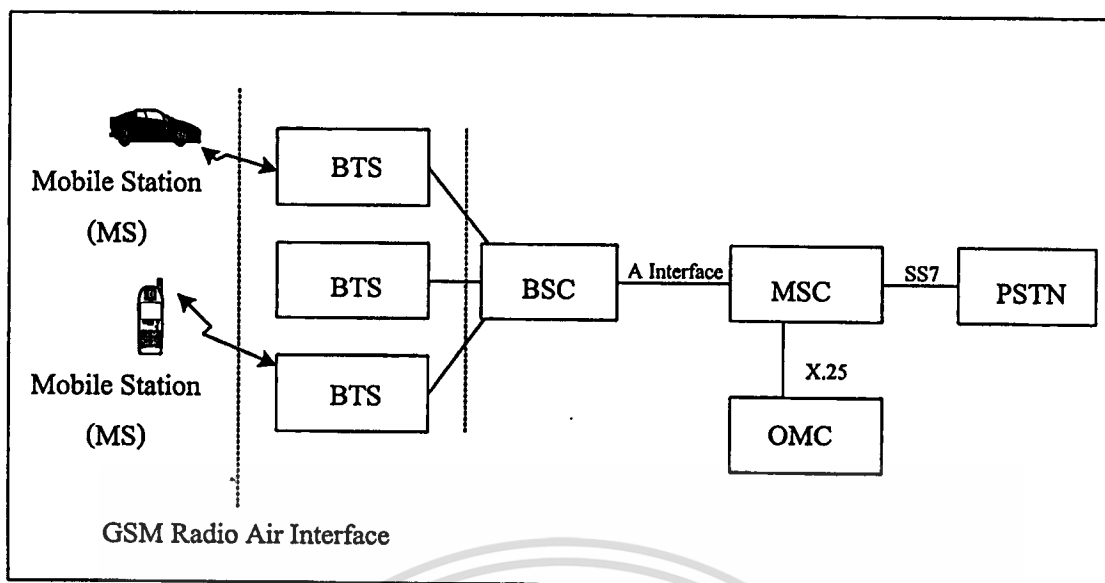
ตารางที่ 2.9 (ต่อ)

5	20 W	-
6	10 W	-
7	5 W	-
8	2.5 W	-

กลุ่มของ BTS ที่ครอบคลุมพื้นที่หลายๆ เซลล์จำนวนหนึ่งจะอยู่ภายใต้การดูแลของ BSC หนึ่งตัว ซึ่งโดยปกติแล้ว BSC หนึ่งตัวจะสามารถดูแลและควบคุม BTS ได้จำนวนมากถึงหลายสิบหรือหลายร้อยชุดดังรูปที่ 2.4 ส่วนของ BSC มีหน้าที่หลักในการควบคุมการทำงานของ BTS ทุกตัวที่อยู่ภายใต้การดูแล เช่น การจัดสรรช่องสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับการติดต่อสื่อสาร การเริ่มต้น การเชื่อมต่อและสิ้นสุดของการใช้ช่องสัญญาณแต่ละช่อง และรวมไปถึงเรื่องของการตัดสินใจและการทำแฮนด์โอเวอร์ระหว่างเซลล์ในกรณีที่โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการย้ายจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์ข้างเคียง สิ่งต่างๆ เหล่านี้เป็นหน้าที่ของ BSC ที่จะต้องจัดการทั้งหมด นอกจากนี้อีกด้านหนึ่งของ BSC ต่ออยู่กับระบบเนตเวิร์กและสวิตชิง ซึ่งมีชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (MSC : Mobile Service Switching Center) เป็นองค์ประกอบสำคัญ การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ทั้งสองนี้จะอาศัยมาตรฐานที่เรียกว่า A interface ส่วนการติดต่อระหว่าง BSC กับส่วน BTS ก็มีมาตรฐานที่แน่นอนเช่นกัน โดยมาตรฐานที่ใช้มีชื่อเรียกว่า Abis interface ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ลักษณะและหน้าที่ของส่วน BTS และ BSC



รูปที่ 2.5 มาตรฐานการอินเตอร์เฟซที่ใช้ระหว่างจุดต่อต่างๆ ภายในระบบ GSM

2.4.2.3 ระบบเน็ตเวิร์กและสวิตชิง (NSS: Network and Switching Subsystem)

NSS ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ระบบชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่และฐานข้อมูลสำหรับการจัดการกับการใช้งานของผู้ใช้บริการ ในส่วนของ MSC นั้นด้านหนึ่งต่อเชื่อมอยู่กับ BSC ซึ่งเป็นส่วนที่ดูแลการรับส่งสัญญาณระหว่างสมาชิกผู้ใช้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่กับส่วนของโครงข่าย ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อเชื่อมอยู่กับระบบโทรศัพท์อื่นๆ ดังนั้น MSC จึงเป็นส่วนที่ทำหน้าที่สวิตช์และเชื่อมต่อคู่สายทั้งระหว่างผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่สองเครื่องเข้าด้วยกันและระหว่างผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่กับผู้ใช้โทรศัพท์ธรรมดาหรือผู้ใช้บริการจากโครงข่ายประเภทอื่นๆ ด้วย ในการเชื่อมต่อระหว่าง MSC กับโครงข่ายภายนอกอาศัยมาตรฐานการเชื่อมต่อที่เรียกว่า CCITT Signaling System no. 7 (SS7) โดยปกติแล้ว MSC หนึ่งชุดสามารถใช้ควบคุมดูแล BSC ได้หลายชุด ทั้งระบบรวมกันสามารถครอบคลุมการให้บริการประชากรได้มากถึงประมาณ 1 ล้านคน สำหรับฐานข้อมูลภายใน NSS ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนหลัก คือ

1. HLR (Home Location Register) เป็นฐานข้อมูลที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับผู้ใช้บริการ เช่น สถานะของเครื่องโทรศัพท์ การเปิด ปิด การใช้งานโทรออก การรับสายเข้า บริเวณพื้นที่การใช้งานของเครื่องโทรศัพท์ครั้งสุดท้าย และรวมไปถึงประเภทของการบริการเสริมที่ผู้ใช้ต้องการ ในช่วงเวลาที่ผู้ใช้โทรศัพท์เริ่มการใช้งานเพื่อการติดต่อสื่อสาร ข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแผ่น SIM บางส่วนจะถูกส่งผ่านจากเครื่องโทรศัพท์ไปยังฐานข้อมูล HLR เพื่อใช้ในการระบุถึงหมายเลขประจำตัวของผู้ใช้และเพื่อตรวจสอบว่าผู้ใช้บริการดังกล่าวมีสิทธิหรือได้รับอนุญาตให้ใช้บริการหรือไม่ โดยที่ฐานข้อมูล HLR จะเก็บรหัสลับของผู้ใช้บริการแต่ละคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. AUC (Authentication Center) เป็นฐานข้อมูลที่เก็บข้อมูลที่เป็นความลับ ดังนั้นฐานข้อมูลประเภทนี้จึงมักจะจัดให้อยู่ในสถานที่ที่ปลอดภัย และจะอนุญาตให้เข้าได้เฉพาะบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องดูแลและรับผิดชอบกับระบบเท่านั้น การจะเข้าถึงข้อมูลเหล่านี้ได้ก็จะต้องมีการใส่รหัสลับผ่านด้วย นอกจากนี้ข้อมูลที่เก็บในฐานข้อมูลยังต้องมีการเข้ารหัสอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งฐานข้อมูล AUC นี้จะติดต่อกับส่วนของ HLR เท่านั้น

3. VLR (Visitor Location Register) เป็นฐานข้อมูลที่อยู่คู่กับ MSC เพื่อเก็บข้อมูลชั่วคราวของผู้ใช้บริการในขณะที่มีการใช้งานอยู่ เช่น เก็บตำแหน่งหรือบริเวณที่เครื่องโทรศัพท์ที่อาจมีการเปลี่ยนไปในขณะที่มีการใช้งานอยู่

โดยรวมแล้วส่วนของ NSS ที่ประกอบขึ้นจาก MSC, HLR, AUC และ VLR มีหน้าที่ในการควบคุมการเรียก (Call Control) หรือจัดการกับตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของเครื่องโทรศัพท์ (Mobility Management) และการดูแลในเรื่องของการให้บริการเสริม (Supplementary Services)

2.4.2.4 ระบบปฏิบัติการ (OSS : Operation Support Subsystem)

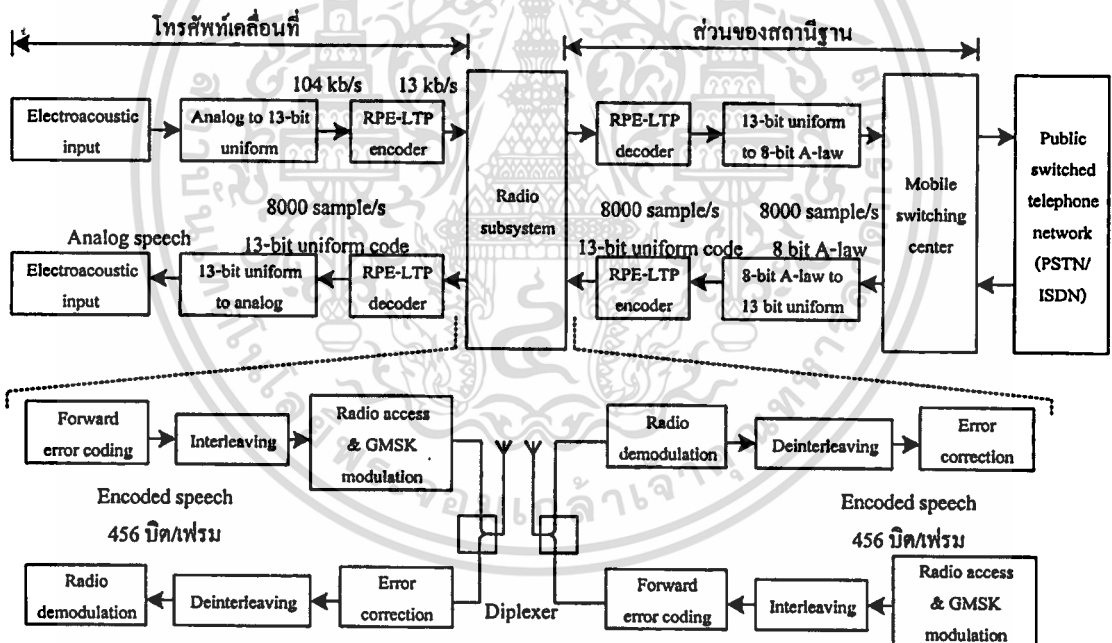
ในส่วนสุดท้ายนี้ประกอบด้วยศูนย์ปฏิบัติการและบำรุงรักษา (OMC : Operation and Maintenance Center) ซึ่งมีหน้าที่หลักในการดูแลจัดการเรื่องการปฏิบัติการของระบบโดยรวม การจัดการกับปัญหาของอุปกรณ์บางส่วนที่อาจเกิดความเสียหาย การปรับตั้งค่าต่างๆ ภายในระบบให้เหมาะสม การจัดการเรื่องสมาชิกผู้ให้บริการของระบบซึ่งรวมไปถึงการคิดค่าบริการและออกบิลเก็บค่าบริการ การทำงานของ OMC ส่วนใหญ่แล้วจำเป็นต้องมีการติดต่อกับฐานข้อมูล HLR

2.4.3 การรับส่งคลื่นสัญญาณวิทยุในระบบ GSM

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM นั้นได้มีการกำหนดช่วงความถี่สำหรับใช้งานไว้ทั้งหมด 50 MHz ในย่านความถี่ 890-915 MHz และ 935-960 MHz โดยในย่านความถี่ดังนั้นมีไว้สำหรับเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ Mobile Station (MS) ในการส่งข้อมูลไปที่สถานีฐานรับส่งสัญญาณ Base Transceiver Station (BTS) และในส่วนของย่านความถี่สูงมีไว้ส่งข้อมูลในทิศทางตรงกันข้ามภายในแบนด์วิดท์ขนาด 25 MHz ของการส่งข้อมูลแต่ละทิศทาง GSM ได้แบ่งจำนวนช่องของคลื่นพาห์ไว้ทั้งหมด 124 ช่อง โดยแต่ละช่องมีความถี่ห่างกันเท่ากับ 200 KHz ลักษณะการแบ่งช่องสัญญาณแบบนี้มีชื่อเรียกว่า FDMA และในแต่ละคลื่นพาห์ใช้ส่งสัญญาณได้ทั้งหมด 8 ช่องสัญญาณโดยวิธีที่เรียกว่า TDMA ดังนั้นจะเห็นว่า GSM อาศัยทั้งวิธี FDMA และ TDMA จากรูปที่ 2.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมการสร้างสัญญาณสำหรับการส่งผ่านข้อมูลโดยรวมของระบบ GSM ในส่วนด้านซ้ายคือส่วนของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งประกอบด้วยวงจรแปลงสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลและวงจรเข้ารหัสสัญญาณเพื่อลดขนาดของอัตราบิตที่ต้องใช้ส่งโดยที่คุณภาพของเสียงยังคงอยู่ในระดับที่ใช้งานได้ (RPE-LTP encoder) สัญญาณที่

ได้นี้จะผ่านกระบวนการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Coding) เช่น การเข้ารหัสคอนวูลูชันและการทำอินเตอร์ลีฟ ก่อนที่จะทำการส่งออก ทั้งนี้เพื่อป้องกันสัญญาณจากช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนมาก การเข้ารหัสช่องสัญญาณนี้มีข้อเสียอย่างหนึ่ง คือ ทำให้อัตราบิตของข้อมูลมีขนาดสูงขึ้นซึ่งทำให้การส่งผ่านสัญญาณจำเป็นต้องใช้แบนด์วิดท์มีขนาดกว้างขึ้น จากนั้นสัญญาณนี้จะถูกส่งออกโดยใช้วิธีการมอดูเลตแบบ GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying)

เมื่อสัญญาณนี้เดินทางถึงภาครับซึ่งคือสถานีฐาน ก็จะถูกนำไปผ่านกระบวนการที่กลับกันกับที่ภาคส่งเพื่อดึงสัญญาณที่ต้องการออกมา สัญญาณที่ได้ซึ่งจะอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิทัลก็就会被สวิตช์เพื่อเชื่อมต่อกับโทรศัพท์เครื่องนี้กับอีกเครื่องหนึ่งซึ่งอาจจะเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือเป็นโทรศัพท์แบบธรรมดาก็ได้โดยอาศัยส่วนที่เรียกว่า MSC (Mobile Switching Center) ในทางกลับกันสัญญาณที่ได้ออกจากส่วนของวงจรสวิตช์จะถูกส่งกลับไปให้เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยใช้วิธีและขั้นตอนที่คล้ายคลึงกับในทิศทาง การส่งจากเครื่องโทรศัพท์ไปที่สถานีฐานดังที่อธิบายไว้ข้างต้น

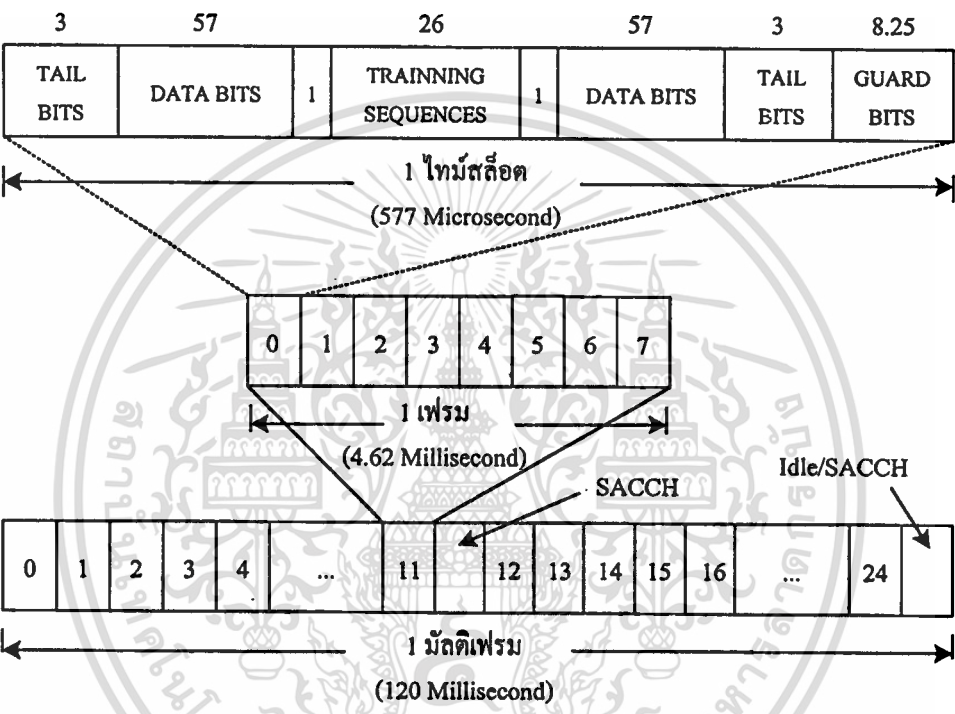


รูปที่ 2.6 ภาพรวมของการรับส่งคลื่นสัญญาณในระบบ GSM

2.4.4 โครงสร้างของเฟรมในระบบ GSM

สำหรับคลื่นพาห่หนึ่งความถี่ซึ่งมีขนาดแบนด์วิดท์เท่ากับ 200 KHz นั้นระบบ GSM ได้นำมาใช้ส่งข้อมูลดิจิทัลในอัตรา 270.833 Kbps โดยได้จัดรูปแบบของข้อมูลเป็นลักษณะของเฟรม (Frame) ซึ่งใน 1 เฟรมมีความยาวเท่ากับ 4.62 ms และแต่ละเฟรมประกอบด้วย 8 ไทม์สล็อต (TS : เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time slot) โดยที่แต่ละไทม์สล็อตมีความยาวเท่ากับ 577 μ s ซึ่งมีไว้สำหรับรับและส่งข้อมูลระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่กับสถานีรับส่งสัญญาณหนึ่งคู่ เมื่อนำเฟรมจำนวน 26 เฟรมมาประกอบกันก็จะได้เป็นหนึ่งมัลติเฟรม (Multi-frame) ที่มีความยาวเท่ากับ 120 ms ภายใน 1 มัลติเฟรมจะมีเพียง 24 เฟรมเท่านั้นที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลของผู้ใช้และที่เหลืออีก 2 เฟรม คือ เฟรมที่ 12 และ 25 โดยเฟรมที่ 12 มีไว้สำหรับส่งสัญญาณซิงเนลลิงที่เรียกว่า SACCH และเฟรมที่ 25 เป็นเฟรมแบบ Idle/SACCH ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของมัลติเฟรม เฟรมและไทม์สล็อตในระบบ GSM

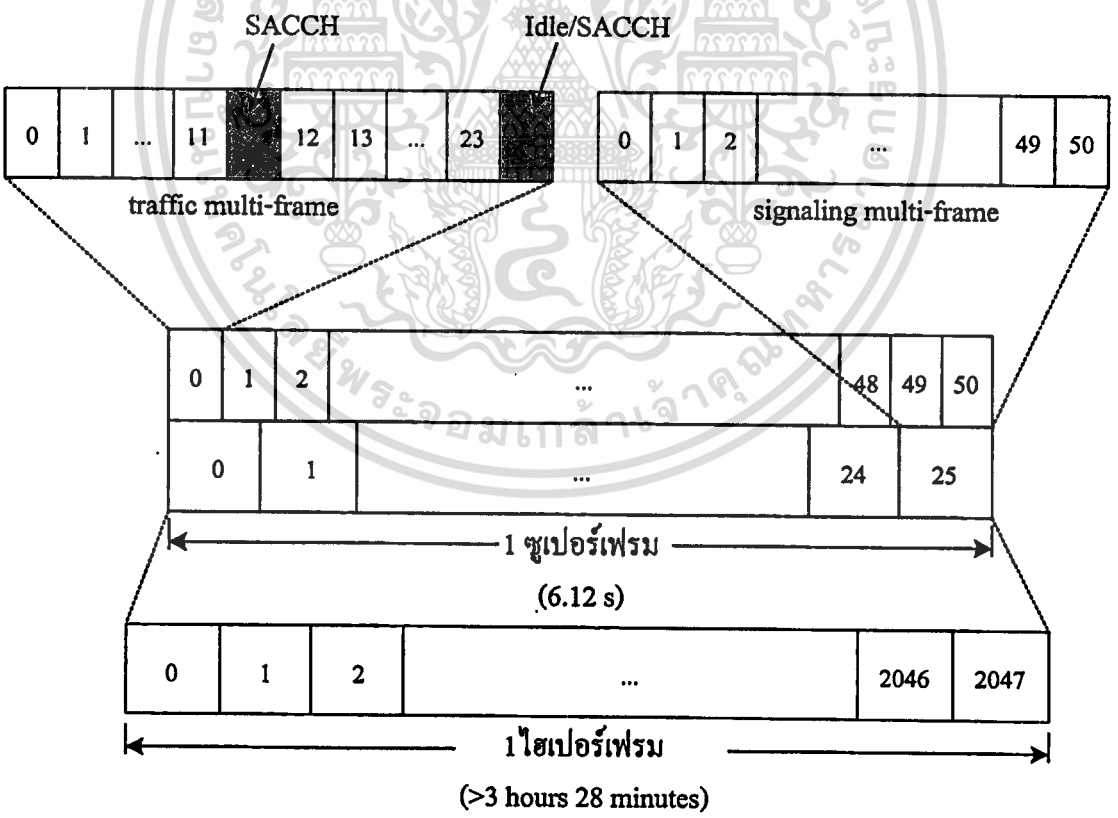
โครงสร้างของหนึ่งไทม์สล็อตประกอบด้วย

1. The tail bits จำนวน 2 ชุด โดยมีไว้สำหรับทำหน้าที่เป็นตัวกำกับจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแต่ละไทม์สล็อต tail bit แต่ละชุดมีขนาดเท่ากับ 3 บิตและมีค่าเป็น 0 ทั้งหมด
2. The encrypted bits ประกอบด้วยข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสจำนวน 57 บิต 2 ชุด และมี Stealing Flag 1 บิตอีก 2 ชุดต่ออยู่ด้วย บิตเหล่านี้มีไว้สำหรับบรรจุข้อมูลเสียง หากแต่ในบางโอกาส อาจถูกนำไปใช้ส่งสัญญาณซิงเนลลิง FACCH ชั่วคราว ดังนั้นจึงใช้ Stealing Flag เป็นตัวบอกว่าช่อง Data bit ขณะนั้นๆ กำลังถูกนำไปใช้สำหรับส่งข้อมูลเสียงหรือสัญญาณซิงเนลลิงอยู่

3. The training sequence ขนาด 26 บิตมีไว้สำหรับส่งค่าพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณสื่อสารในขณะเวลานั้นๆ เพื่อให้อุปกรณ์อีควอไลเซอร์ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาพของช่องสัญญาณสื่อสารซึ่งมักจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอๆ

4. The guard bits เป็นบริเวณว่างเปล่ามีเพื่อไว้เพื่อป้องกันการทับกันของสัญญาณในสองไทม์สล็อตที่ติดกันที่ส่งจากโทรศัพท์เคลื่อนที่สองตัว โดยสาเหตุหลักเกิดจากการที่โทรศัพท์มีการเคลื่อนที่ในระหว่างใช้งานทำให้จังหวะเวลาที่สัญญาณถูกส่งออกมีการคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น จำนวนของ Guard bits ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 8.25 บิต ซึ่งคิดเป็นช่วงเวลาเท่ากับ 30 μ s

โครงสร้างมัลติเฟรมที่กล่าวมาข้างต้นนี้ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้เป็นหลัก มัลติเฟรมประเภทนี้มีชื่อเรียกว่า Traffic multi-frame นอกจากสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้แล้ว ระบบจำเป็นต้องมีการรับส่งสัญญาณประเภทซิกแนลลิง (Signaling) ด้วยซึ่งในส่วนของการรับส่งสัญญาณซิกแนลลิงนั้นระบบ GSM ได้กำหนดมัลติเฟรมอีกประเภทหนึ่งไว้ที่เรียกว่า Signaling multi-frame โดยที่มัลติเฟรมแบบนี้ประกอบด้วยจำนวนเฟรมทั้งหมด 51 เฟรมหรือมีความยาวเท่ากับ 235.4 ms ดังรูปที่ 2.8 ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในระบบ GSM มีมัลติเฟรมอยู่ 2 ประเภท



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของไฮเปอร์เฟรม ซูเปอร์เฟรม และมัลติเฟรม ในระบบ GSM

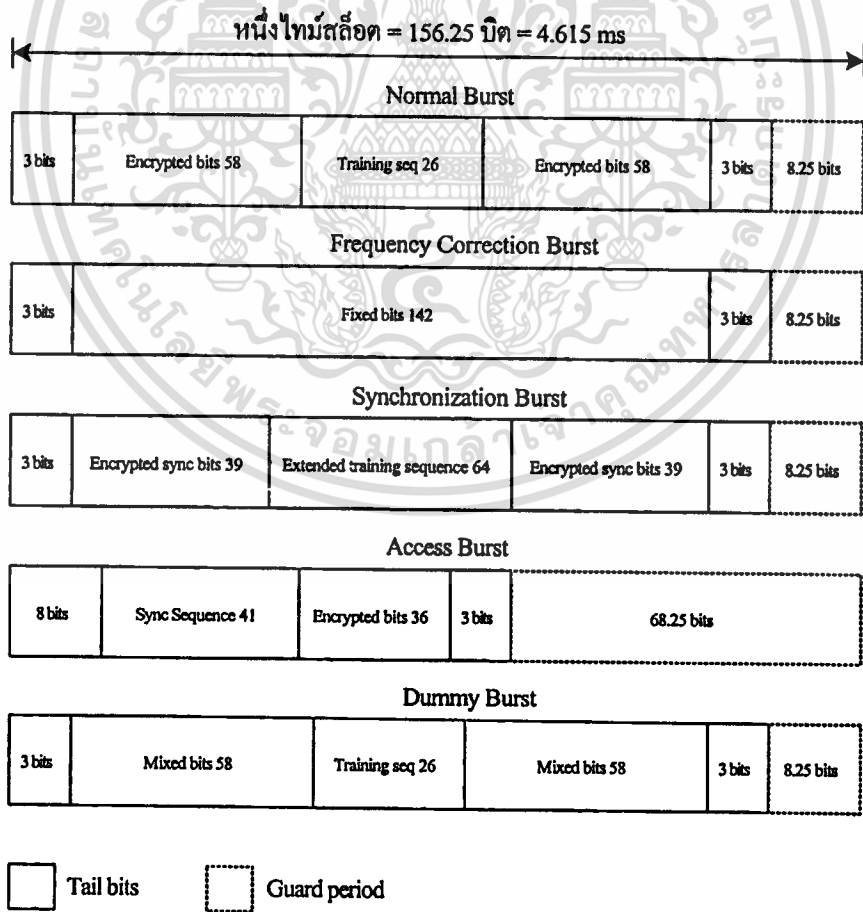
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากมัลติเฟรมแล้ว GSM ยังได้กำหนดซูเปอร์เฟรม (Super frame) ไว้ด้วยซึ่งสามารถสร้างขึ้นได้ 2 วิธี คือ สร้างจากมัลติเฟรมที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลผู้ใช้ทั้งหมด 51 ชุดหรือสร้างจากมัลติเฟรมที่ใช้สำหรับรับส่งสัญญาณซิงแนลลิงทั้งหมด 26 ชุด ดังนั้นคาบเวลาของซูเปอร์เฟรมมีค่าเท่ากับ 6.12 วินาที

โครงสร้างของเฟรมที่ใหญ่ที่สุดในระบบ GSM คือ ไฮเปอร์เฟรม (Hyper frame) ซึ่งประกอบขึ้นจากซูเปอร์เฟรมจำนวนทั้งสิ้น 2,048 ชุด ดังนั้นคาบเวลาของ 1 ไฮเปอร์เฟรมมีค่าเท่ากับ 3 ชั่วโมง 28 นาที 53 วินาที 760 มิลลิวินาที

2.4.5 ประเภทของเบิร์สต์ (Burst)

ที่ผ่านมาข้างต้นได้อธิบายถึงโครงสร้างของไทม์สล็อตที่มีชื่อเรียกว่า Normal Burst เท่านั้น ที่จริงแล้วระบบ GSM ได้มีการกำหนดโครงสร้างของไทม์สล็อตหรือที่เรียกว่า เบิร์สต์ (Burst) ไว้ทั้งหมด 5 ชนิดเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในการส่งสัญญาณชนิดต่างๆ สำหรับลักษณะโครงสร้างของเบิร์สต์ทั้ง 5 ชนิดสามารถดูได้จากรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเบิร์สต์แบบต่างๆ ที่ใช้ในระบบ GSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เบิสต์ปกติ (Normal Burst)

Normal Burst เป็นเบิสต์ที่มีโครงสร้างดังที่อธิบายไว้ข้างต้น มีไว้สำหรับรองรับสัญญาณประเภท TCH และสัญญาณอื่นๆ ยกเว้นสัญญาณ RACH, SCH และ FCCH ซึ่งจะใช้เบิสต์แบบอื่น

2. เบิสต์ปรับแก้ความถี่ (Frequency Correction Burst)

Frequency Correction Burst เบิสต์ประเภทนี้มีไว้สำหรับส่งสัญญาณ FCCH โดยเฉพาะเพื่อช่วยให้เครื่องโทรศัพท์สามารถซิงโครไนซ์ความถี่ของคลื่นพาห้ได้อย่างถูกต้อง ค่าของ Fixed Bits ได้กำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด นั่นหมายความว่าส่วนของคลื่นพาห้จะไม่มีข้อมูลมอดูเลทอยู่เลย ดังนั้นสัญญาณที่ได้ก็คือสัญญาณรูปไซน์นั่นเอง

3. เบิสต์สำหรับการซิงโครไนซ์ (Synchronization Burst)

Synchronization Burst เป็นเบิสต์ที่มีไว้สำหรับส่งสัญญาณ SCH ซึ่งช่วยในการซิงโครไนซ์จังหวะเวลาการรับส่ง (Time Synchronization) ของเครื่องโทรศัพท์ โดยจะมีข้อมูลต่างๆ เช่น หมายเลขเฟรมของ TDMA และ BSIC (Base Station Identity Code) ในส่วนของหมายเลขเฟรมนั้น GSM ได้กำหนดให้แต่ละเฟรมมีหมายเลขติดอยู่โดยจะใช้ทั้งหมด 2,715,648 หมายเลข และจะมีการเริ่มหมายเลขเดิมใหม่เมื่อครบหนึ่งรอบซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ไฮเปอร์เฟรมหรือประมาณทุกๆ 3 ชั่วโมงครึ่ง ในส่วนของโค้ด BSIC นั้นจะช่วยให้เครื่องโทรศัพท์สามารถตรวจสอบได้ว่าสัญญาณที่รับได้นั้นมาจากสถานีฐานใด เพื่อมิให้เกิดความสับสนกับสัญญาณจากแหล่งอื่นที่ใช้ความถี่เดียวกัน

4. เบิสต์แอ็กเซส (Access Burst)

Access Burst เป็นเบิสต์ที่มีขนาดของ Guard Period ยาวกว่าเบิสต์แบบอื่นๆ ทั้งนี้เพราะมีไว้สำหรับการส่งสัญญาณในการติดต่อครั้งแรกของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งเครื่องโทรศัพท์นั้นจะไม่ทราบถึงจังหวะเวลาการส่งที่ถูกต้อง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการเผื่อช่วงเวลา Guard Period ไว้ให้กว้างเพียงพอ โดยเฉพาะในกรณีที่โทรศัพท์อยู่ห่างจากสถานีฐานมากๆ ทั้งนี้เพราะสัญญาณจะต้องใช้เวลาเดินทางระยะเวลาหนึ่งซึ่งอาจจะนานพอที่จะทำให้ขณะที่สัญญาณเดินทางถึงสถานีฐานส่วนปลายของสัญญาณอาจจะไปทับกับส่วนต้นของสัญญาณของไทม์สล็อตถัดมาของโทรศัพท์อีกเครื่องหนึ่งที่อยู่ใกล้กับสถานีฐาน

5. เบิสต์ดัมมี่ (Dummy Burst)

Dummy Burst เบิสต์แบบนี้จะส่งโดย BTS ในบางโอกาสเท่านั้น โดยมีได้บรรจุข้อมูลใดๆ ในช่องออกเลข โครงสร้างของ Dummy Burst มีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้างของ Normal Burst ยกเว้นในส่วนของ Encrypted bits ซึ่งจะมีชุดบิตที่เรียกว่า Mixed bits ซึ่งมีรูปแบบที่แน่นอนและตายตัวมาแทน

2.4.6 ประเภทของสัญญาณ

โหมสล็อตหรือเบิรสต์ทั้ง 5 ประเภทที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้ มีไว้สำหรับใช้ในการรับส่งสัญญาณแบบต่างๆ หลากหลายชนิดที่เกิดขึ้นภายในระบบระหว่างเครื่องโทรศัพท์และสถานีฐาน ในส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงประเภทของสัญญาณที่มีการใช้ในระบบ GSM เราสามารถแบ่งประเภทของสัญญาณนี้ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่มีไว้สำหรับรับส่งสัญญาณเสียงและข้อมูลประเภทคาค้าของผู้ใช้บริการ (Traffic Channel) และกลุ่มที่มีไว้สำหรับรับส่งสัญญาณซิกแนลลิงของโครงข่ายเอง (Signaling Channel) สำหรับรายละเอียดของสัญญาณแต่ละกลุ่มจะได้กล่าวถึงต่อไป

2.4.6.1 ช่องสัญญาณทราฟฟิก (Traffic Channel)

TCH (Traffic Channel) เป็นช่องสัญญาณที่มีไว้สำหรับให้บริการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้โทรศัพท์ โดยสามารถแบ่งการบริการรับส่งข้อมูลออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เสียง และข้อมูลประเภทคาค้า การรับส่งข้อมูลแต่ละประเภทอาจจะเป็นแบบ Full Rate คือ บรรจุข้อมูลลงในหนึ่งโหมสล็อตของทุกๆ เฟรม หรืออาจจะเป็นแบบ Half Rate คือ บรรจุข้อมูลลงในโหมสล็อตเพียงหนึ่งครึ่งต่อเฟรมหรือ 2 เฟรมก็ได้ สังเกตว่าการส่งแบบ Half Rate จะช่วยให้ระบบสามารถรองรับจำนวนผู้ให้บริการได้มากขึ้นเท่าตัว แต่นั่นหมายความว่าจำนวนบิตข้อมูลที่ใช้แต่ละคนก็ลดลงครึ่งหนึ่งด้วย ตามมาตรฐานของ GSM นั้นได้แบ่งประเภทของช่องสัญญาณ TCH ไว้ทั้งหมด 7 รูปแบบดังที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.10 การให้บริการทั้ง 7 รูปแบบที่กล่าวมานี้ระบบโทรศัพท์จะต้องจัดสรรช่องสัญญาณหนึ่งช่องไว้เฉพาะสำหรับความต้องการดังกล่าวตลอดช่วงเวลาที่ใช้งาน (Dedicated Channel) และการรับส่งสัญญาณประเภทนี้จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ทิศทาง คือ ทั้งไปและกลับ

สำหรับการรับส่งสัญญาณเสียงมีได้ 2 แบบ คือ TCH/FS และ TCH/HS ในกรณีของ TCH/FS สัญญาณเสียงที่ได้รับการแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลมีอัตราบิตเท่ากับ 13 Kbps จะนำไปผ่านกระบวนการเข้ารหัสช่องสัญญาณเพื่อให้การรับส่งสัญญาณมีความถูกต้องมากขึ้น ผลที่ได้คือข้อมูลที่มีอัตราบิตสำหรับส่งจริงเท่ากับ 22.8 Kbps ส่วนช่องสัญญาณ TCH/HS มีอัตราบิตที่ลดลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งหมายถึงว่าวิธีการเข้ารหัสสัญญาณเสียงที่จะใช้จำเป็นต้องมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นั่นคือ คุณภาพเสียงต้องยังคงเดิมขณะที่จำนวนบิตที่ใช้ในการส่งมีปริมาณลดลง

การรับส่งสัญญาณประเภทคาค้า มีรูปแบบการส่งอยู่ 5 ประเภท คือ TCH/F9.6, TCH/F4.8, TCH/F2.4 ซึ่งเป็นการรับส่งแบบ Full Rate และ TCH/H4.8, TCH/H2.4 ซึ่งเป็นการรับส่งแบบ Half Rate สำหรับอัตราการส่งของแต่ละประเภทช่องสัญญาณก็มีความแตกต่างกันไป

ตารางที่ 2.10 ประเภทของช่องสัญญาณ TCH

Speech	Raw user data rate (Kbps)	Sending rate (Kbps)
TCH/FS	13	22.8
TCH/HS	6.5	11.4
Data	Raw user data rate (Kbps)	Sending rate (Kbps)
TCH/F9.6	9.6	22.8
TCH/F4.8	4.8	22.8
TCH/F2.4	2.4	22.8
TCH/H4.8	4.8	11.4
TCH/H2.4	2.4	11.4

2.4.6.2 ช่องสัญญาณซิกแนลลิง (SC : Signaling Channel)

SC คือ ช่องสัญญาณที่มีไว้ใช้ในการรับส่งสัญญาณซิกแนลลิงระหว่างเครื่องโทรศัพท์และสถานีฐานเพื่อช่วยให้การทำงานของระบบดำเนินไปอย่างถูกต้อง สัญญาณซิกแนลลิงที่ใช้ในระบบ GSM มีอยู่หลายชนิดโดยสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ BCH (Broadcast Channel), CCCH (Common Control Channel) และ DCCH (Dedicated Control Channel) สำหรับการส่งสัญญาณซิกแนลลิงของสถานีฐานประเภท BCH และ CCCH นั้นจะมีการส่งลงบนคลื่นพาห์เฉพาะบางความถี่ที่กำหนดให้เป็นช่องกระจายสัญญาณเท่านั้นและการส่งจะส่งในไทม์สล็อตที่ศูนย์ TS0 ของมัลติเฟรมประเภท Signaling multi-frame เท่านั้น การกำหนดวิธีการส่งแบบนี้ก็เพื่อที่ไทม์สล็อตที่เหลืออีก 7 ช่องบนคลื่นพาห์พิเศษนี้สามารถนำมาใช้ในการรับส่งสัญญาณเสียงได้ สำหรับมาตรฐานของระบบ GSM ได้กำหนดคลื่นพาห์พิเศษสำหรับการกระจายสัญญาณซิกแนลลิงนี้ไว้จำนวนทั้งสิ้น 34 คลื่นความถี่ โดยที่คลื่นความถี่เหล่านี้จะใช้โครงสร้างมัลติเฟรมแบบที่มีขนาดเท่ากับ 51 เฟรม

BCH (Broadcast Channels) เป็นกลุ่มของสัญญาณซิกแนลลิงที่ใช้ส่งในทิศทางเดียว คือ จากสถานีฐานไปที่โทรศัพท์ (Downlink) โดยที่การส่งนั้นจะกระทำเป็นระยะที่สม่ำเสมอและต่อเนื่องตลอดเพื่อประกาศให้โทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้งหลายได้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับเซลล์ที่เครื่องโทรศัพท์อยู่และเซลล์ที่อยู่รอบข้างด้วย สัญญาณกลุ่มนี้จะบรรจุอยู่ในไทม์สล็อตที่ศูนย์ TS0 ของมัลติเฟรมแบบที่มี 51 เฟรม (Signaling multi-frame) เท่านั้น โดยสัญญาณในกลุ่มนี้มี 3 ชนิด ดังจะกล่าวต่อไป

BCCH (Broadcast Control Channel) มีไว้สำหรับสถานีฐานใช้ในการกระจายข้อมูลต่างๆ

เช่น หมายเลขประจำตัวของเซลล์ หมายเลขประจำตัวของโครงข่าย โครงสร้างและสถานะของช่อง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ และรายละเอียดของช่องสัญญาณที่มีการใช้งาน ช่องสัญญาณนี้จะส่งในไทม์สล็อตที่ศูนย์ของเฟรมบางเฟรมเท่านั้น คือ จะส่งเฉพาะเฟรมที่ 2-5 ในทุกๆ 51 เฟรม ดังรูปที่ 2.10

FCCH (Frequency Correction Channel) เป็นช่องสัญญาณที่มีการส่งออกที่ไทม์สล็อตที่ศูนย์ของเฟรมที่ 0, 10, 20, 30 และ 40 ของทุกๆ มัลติเฟรม สัญญาณ FCH มีไว้เพื่อช่วยให้เครื่องโทรศัพท์สามารถซิงโครไนซ์ความถี่ของคลื่นพาห์ให้ถูกต้องตรงกับความถี่ที่ใช้ที่สถานีฐาน

SCH (Synchronization Channel) สัญญาณ SCH จะมีการส่งออกในเฟรมที่ถัดจากเฟรมที่มีการส่งสัญญาณ FCH ทันที มีไว้สำหรับช่วยให้เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่สามารถซิงโครไนซ์หมายเลขของเฟรม (Frame Number) ให้ถูกต้องโดยมาตรฐานระบบ GSM ได้กำหนดหมายเลขของเฟรมไว้ตั้งแต่ 0 ถึง 2, 715, 647 ($26 \times 51 \times 2,048$)

CCCH (Common Control Channel) เป็นกลุ่มของสัญญาณซิงแนลลิงที่มีการส่งในทั้งสองทิศทาง โดยการรับส่งสัญญาณจะเกิดขึ้นได้เฉพาะในไทม์สล็อตที่ศูนย์ของเฟรมใดๆ ก็ได้ที่มีได้ถูกใช้ในการส่งสัญญาณ BCH ข้างต้น สัญญาณในกลุ่มนี้มี 3 ประเภท ดังนี้ คือ

PCH (Paging Channel) ใช้ส่งจากสถานีฐาน ไปยังเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่อยู่ภายในเซลล์ เพื่อค้นหาเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ต้องการติดต่อด้วย



- R : Random Access Channel (RACH)
- F : Frequency Correction Channel (FCCH)
- S : Synchronization Channel (SCH)
- B : Broadcast Control Channel (BCCH)
- C : Access Grant/Paging Channel (AGCH/PCH)
- I : Idle Frame

รูปที่ 2.10 โครงสร้างการใช้งานของมัลติเฟรมประเภท 51 เฟรมเฉพาะ TSO

RACH (Random Access Channel) ใช้ส่งออกโดยเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อตอบรับการค้นหาหรือเพิกจากสถานีฐาน หรือใช้สำหรับการแสดงความต้องการโทรศัพท์ออก ช่องสัญญาณประเภทนี้มีคุณลักษณะที่แตกต่างไปจากช่องสัญญาณอื่นๆ ตรงที่เป็นช่องสัญญาณที่มีการใช้งานร่วมกันระหว่างเครื่องโทรศัพท์ทั้งหมดภายในเซลล์โดยที่ไม่มีการจัดสรรการใช้งานของแต่ละไทม์สล็อตอย่างชัดเจน เพราะฉะนั้นจึงมีโอกาที่เครื่องโทรศัพท์มากกว่าหนึ่งเครื่องส่งสัญญาณ RACH ออกพร้อมๆ กันลงในไทม์สล็อตเดียวกัน การชนกันของสัญญาณนี้อาจส่งผลให้สถานีฐานไม่ได้รับสัญญาณที่ถูกต้อง ในระบบ GSM อาศัยวิธีการที่เรียกว่า Slotted Aloha เพื่อจัดการกับปัญหาดังกล่าวนี้

AGCH (Access Grant Channel) เป็นช่องสัญญาณที่สถานีฐานใช้ในการตอบรับการติดต่อโดย RACH จากเครื่องโทรศัพท์ และส่งข้อมูลของช่องสัญญาณ SDCCH สำหรับใช้ในการติดต่อระหว่างกันในรายละเอียด

สัญญาณเหล่านี้จะใช้ในการติดต่อกันครั้งแรกระหว่างเครื่องโทรศัพท์กับสถานีฐาน ในกรณีที่สถานีฐานพยายามจะติดต่อไปที่เครื่องโทรศัพท์เครื่องหนึ่ง สถานีฐานจะส่งสัญญาณ PCH ออกไปเพื่อค้นหาตำแหน่งของโทรศัพท์ที่ต้องการจะติดต่อด้วย ซึ่งถ้าโทรศัพท์เครื่องนั้นได้รับสัญญาณนี้ก็จะตอบรับโดยใช้สัญญาณ RACH ส่งกลับไปในทางตรงกันข้าม จากนั้นสถานีฐานก็ส่งสัญญาณ AGCH กลับไปพร้อมกับจัดสรรช่องสัญญาณ SDCCH สำหรับใช้ในการติดต่อในรายละเอียด ส่วนกรณีที่ถ้าโทรศัพท์เครื่องหนึ่งต้องการจะติดต่อกับสถานีฐาน เช่น ต้องการจะโทรออก ก็จะส่งสัญญาณ RACH ออกไปโดยที่สถานีฐานก็จะตอบรับโดยการส่งสัญญาณ AGCH กลับไปพร้อมกับจัดช่องสัญญาณ SDCCH ให้ด้วย

DCCH (Dedicated Control Channel) เป็นกลุ่มของช่องสัญญาณที่คล้ายกันกับช่องสัญญาณ TCH คือ มีลักษณะการรับส่งสัญญาณเป็นแบบ Point to Point และมีการรับส่งได้สองทิศทาง กลุ่ม DCCH นี้ประกอบด้วยสัญญาณ 3 ประเภท คือ

1. SDCCH (Stand-alone Dedicated Control Channel) ช่องสัญญาณนี้ใช้สำหรับการรับส่งสัญญาณซิกแนลถึงในช่วงก่อนที่การรับส่งสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้จะเกิดขึ้น ตัวอย่างกิจกรรมที่ต้องใช้สัญญาณซิกแนลถึงเหล่านี้ คือการ Authentication และ Registration

2. SACCH (Slow Associated Control Channel) เป็นช่องสัญญาณที่จะอยู่คู่กับสัญญาณ TCH เสมอ สัญญาณนี้จะถูกส่งออกอย่างต่อเนื่องเป็นระยะๆ ตลอดเวลาและมีหน้าที่หลายอย่าง เช่น ใช้ส่งสัญญาณบอกถึงระดับความแรงของเครื่องโทรศัพท์ที่รับได้ ใช้ช่วยในช่วงเวลาที่มีการแฮนด์โอเวอร์ (Handover) เกิดขึ้น ใช้ปรับจังหวะการส่งสัญญาณของเครื่องโทรศัพท์ในแต่ละเฟรมให้ถูกต้อง และใช้ควบคุมระดับของกำลังสัญญาณส่งให้อยู่ระดับที่เหมาะสม (Power Control) โดยปกติสัญญาณนี้บรรจุอยู่ในไทม์สล็อตที่ 12 ของแต่ละมัลติเฟรม แต่หากระบบมีการใช้ช่องสัญญาณ

TCH แบบ Half Rate ไทม์สล็อตที่ 25 ซึ่งปกติจะกำหนดให้เป็น Idle จะถูกนำมาใช้ในการรับส่งสัญญาณ SACCH

3. FACCH (Fast Associated Control Channel) เป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับช่วงเวลาการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้ที่ส่งผ่านช่องสัญญาณ TCH ซึ่งโดยปกติจะไม่มีเวลาจำเป็นในการใช้สัญญาณนี้ออกจากในกรณีที่ระบบมีความจำเป็นต้องส่งสัญญาณซิกแนลถึงในปริมาณมากและมากเกินกว่าที่ช่องสัญญาณ SACCH เพียงช่องเดียวจะตอบสนองได้ เช่นในกรณีที่มีการแฮนด์โอเวอร์เกิดขึ้น FACCH จะใช้ช่องสัญญาณที่โดยปกติใช้สำหรับรับส่งสัญญาณเสียงของผู้ใช้เป็นเวลา 20 ms ซึ่งหมายความว่าข้อมูลเสียงของผู้ใช้จะหายไป 20 ms และภาครีซีฟก็จะใช้ข้อมูลของ 20 ms ที่แล้วมาแทน

2.4.7 การเข้ารหัสช่องสัญญาณในระบบ GSM

ในระบบ GSM เราสามารถแบ่งรหัสการเข้ารหัสช่องสัญญาณออกเป็น 3 แบบหลัก ตามประเภทของสัญญาณข้อมูลที่จะส่ง คือ สัญญาณข้อมูลเสียง (Speech), สัญญาณข้อมูลประเภทคาค้า (Data) และสัญญาณซิกแนลถึง (Signaling) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการเข้ารหัสช่องสัญญาณของสัญญาณข้อมูลที่เป็นประเภทหลักๆ คือ TCH/FS ที่ใช้สำหรับการส่งสัญญาณเสียง TCH/F9.6 ที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณประเภทคาค้าที่อัตราบิตเท่ากับ 9.6 Kbps หรือ TCH/F2.4 ที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณประเภทคาค้าที่อัตราบิตเท่ากับ 2.4 Kbps และสัญญาณซิกแนลถึง

2.4.7.1 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของสัญญาณเสียง TCH/FS

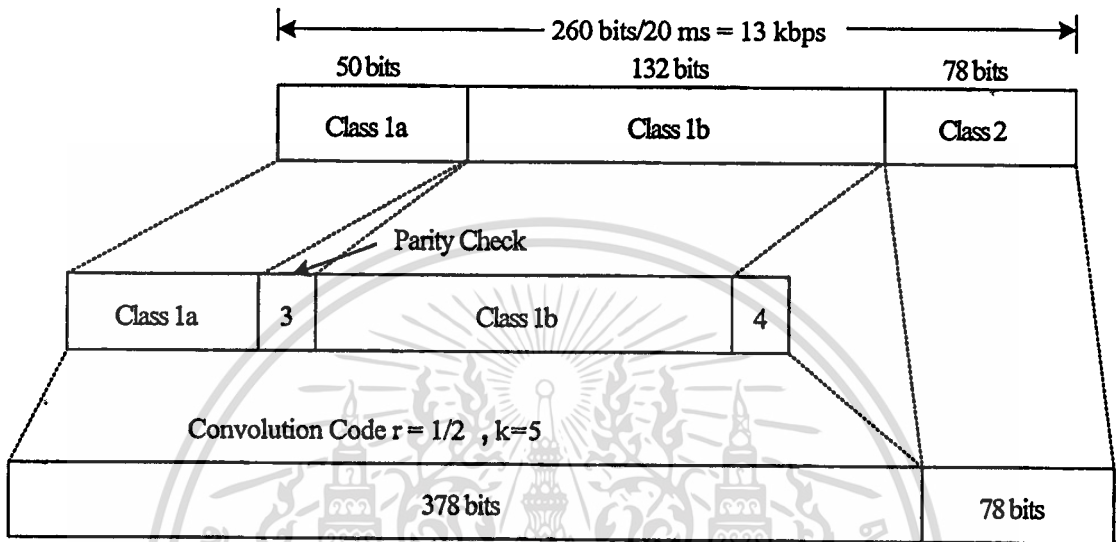
ข้อมูลเสียงซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลก่อนด้วยอัตราการสุ่มเท่ากับ 8,000 Sample/sec. โดยใช้ 13 bits/sample จากนั้นจะนำไปเข้ารหัสด้วยวิธี RPE-LTP (Regular Pulse Excitation-Long Term Prediction) ซึ่งจะได้ข้อมูลออกมาในอัตราเท่ากับ 13 Kbps ข้อมูลเหล่านี้จะต้องนำไปทำเข้ารหัสช่องสัญญาณก่อนเพื่อป้องกันข้อมูลเสียงจากการผิดพลาดของข้อมูลระหว่างการส่งผ่าน ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้นข้อมูลเสียงจะถูกแบ่งเป็นบล็อกๆ ที่มีขนาดเท่ากับ 20 ms ซึ่งมีจำนวนบิตทั้งหมดเท่ากับ 260 บิต จากนั้นข้อมูลนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามความสำคัญของข้อมูลนั้นๆ

กลุ่มแรกเรียกว่า Class 1 a มีจำนวน 50 บิตซึ่งเป็นกลุ่มที่มีความสำคัญที่สุดจึงได้เพิ่มบิตพิเศษอีก 3 บิตสำหรับทำการเข้ารหัส CRC เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลที่ได้รับมีความผิดพลาดหรือไม่ ชุดของโพลิโนเมียลที่ใช้ คือ X^3+X+1 ในกรณีที่พบว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้น ข้อมูลทั้งบล็อกก็จะถูกทิ้งไปและอาศัยวิธีการที่เรียกว่า Interpolation มาแทนที่

กลุ่มที่สองมีชื่อเรียกว่า Class 1 b ซึ่งมีทั้งหมด 132 บิต จะนำไปรวมกับข้อมูลที่เข้ารหัสแล้วของกลุ่มที่หนึ่งและเพิ่มอีก 4 บิตต่อท้าย จากนั้นก็นำข้อมูลทั้ง 189 บิตนี้ไปทำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolutional code) ที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 โดยมี Constraint length เท่ากับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 และชุดโพลีโนเมียลที่ใช้ คือ X^4+X^3+1 และ X^4+X^3+X+1 ผลที่ได้ คือ ข้อมูลจำนวนเท่ากับ 378 บิต และในขั้นสุดท้ายก็จะนำกลุ่มที่ 3 ที่เรียกว่า Class 2 จำนวน 78 บิตมาต่อท้ายเลขโดยไม่มีการเข้ารหัสใดๆ เลข รูปที่ 2.11 ประกอบ ผลที่ได้จากการเข้ารหัสของช่องสัญญาณ คือ จำนวนข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น 456 บิตจากเดิม 260 บิตในทุกๆ 20 ms นั่นคืออัตราข้อมูลเพิ่มจาก 13 Kbps เป็น 22.8 Kbps



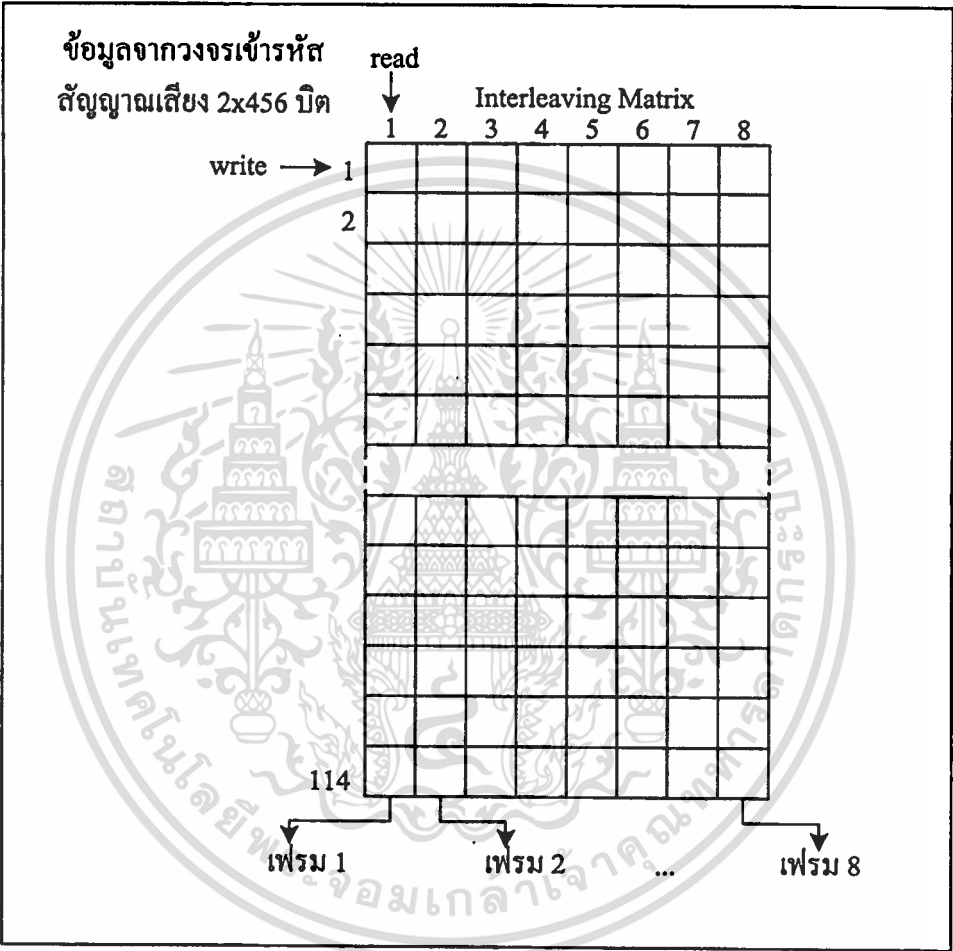
รูปที่ 2.11 การเข้ารหัสช่องสัญญาณสำหรับสัญญาณเสียงในระบบ GSM

ข้อมูลเหล่านี้มีได้นำไปบรรจุลงในไทม์สล็อตโดยตรงทันทีหากแต่ว่าจะถูกนำไปผ่านกระบวนการอินเตอร์ลีฟก่อนเพื่อลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีลักษณะเป็นเบิสต์ที่มีต่อประสิทธิภาพของวิธีการเข้ารหัสที่ใช้ โดยปกติแล้วสัญญาณรบกวนแบบเบิสต์จะทำให้ข้อมูลที่ส่งอยู่มีความผิดพลาดอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นเรื่องค่อนข้างยากที่จะหาวิธีการเข้ารหัสที่สามารถรับมือกับสัญญาณรบกวนแบบนี้โดยตรงได้ ดังนั้นการทำอินเตอร์ลีฟจึงมีประโยชน์เพราะช่วยทำให้การผิดพลาดของข้อมูลกระจัดกระจายกันออกไปหลายๆเฟรม

ในการทำอินเตอร์ลีฟนั้นจะต้องรอรับข้อมูลจากวงจรเข้ารหัสสัญญาณเสียงจนครบ 912 บิต หรือทุกๆ 40 ms ก่อน แล้วจึงนำข้อมูลทั้ง 912 บิตนี้มาแยกและกระจายลงใน 8 เฟรมที่ติดต่อกันโดยวิธีที่แสดงในรูปที่ 2.12 เริ่มโดยการเขียนข้อมูลทั้ง 915 บิตลงในเมทริกซ์ในแนวนอนทีละแถว แถวละ 8 บิต จนครบ 114 แถว จากนั้นก็อ่านข้อมูลเหล่านี้ออกในแนวตั้งแล้วนำไปบรรจุลงในแต่ละเฟรม จะเห็นว่าแต่ละเฟรมก็จะรับไปทั้งหมด $2 \times 57 = 114$ บิต โดย 57 บิตแรกจะเป็นข้อมูลจากสัญญาณเสียงใน 20 ms แรกและอีก 57 บิตที่เหลือเป็นข้อมูลจากสัญญาณเสียงใน 20 ms ถัดมา เมื่อได้ข้อมูลทั้ง 57 บิตทั้ง 2 ชุดแล้วก็นำมาบรรจุในไทม์สล็อตดังที่เคยแสดงในรูปที่ 2.7 แล้ว

2.4.7.2 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของข้อมูลประเภทคำ

การเข้ารหัสช่องสัญญาณสำหรับข้อมูลประเภทคำเป็นเรื่องที่สำคัญมากกว่าการเข้ารหัสช่องสัญญาณสำหรับสัญญาณเสียง ดังนั้นจึงต้องอาศัยวิธีการที่ซับซ้อนกว่าเพื่อปกป้องสัญญาณจากการผิดพลาดของบิตข้อมูล สำหรับอัตราการส่งข้อมูลที่ต่างกันก็จะมีรายละเอียดในการเข้ารหัสช่องสัญญาณที่แตกต่างกันด้วย



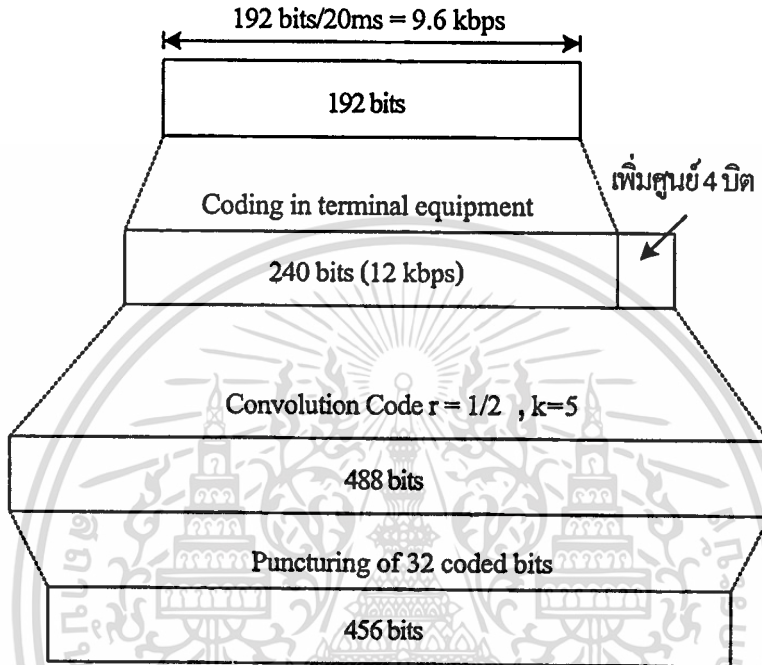
รูปที่ 2.12 การทำอินเตอร์ลีฟสำหรับสัญญาณเสียงในระบบ GSM

1. ข้อมูลคำที่มีอัตราบิต 9.6 Kbps

ข้อมูลที่จะส่งออกที่อัตราบิต 9.6 Kbps (หรือ 192 บิตในเวลา 20 ms) จะต้องทำการเพิ่มบิตเข้าไปเพื่อให้อัตราบิตก่อนการเข้ารหัสช่องสัญญาณเท่ากับ 12 Kbps (หรือ 240 บิตในเวลา 20 ms) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกเล็กๆ ขนาดเท่ากับ 20 ms หรือ 240 บิต เพื่อนำไปเข้ารหัสคอนไวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และมีค่า Constraint Length เท่ากับ 5 เพราะฉะนั้นจะต้องมีการเพิ่มศูนย์อีก 4 บิตก่อนการเข้ารหัสแต่ละบล็อก ผลที่ได้คือมีจำนวนบิตทั้งหมด 488 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

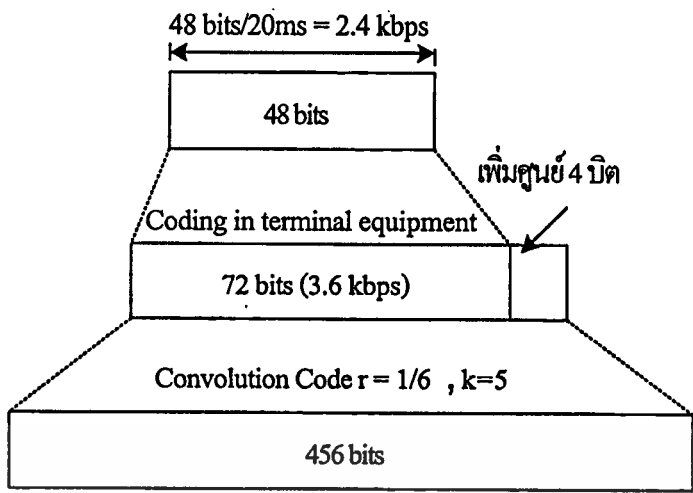
ทุกๆ 20 ms จากนั้นบิตบางส่วนจำนวนทั้งหมด 32 บิตจะถูกตัดออก (Punctured code) และสุดท้ายจะได้ข้อมูลที่มีจำนวน 456 บิตทุกๆ 20 ms ซึ่งมีค่าอัตราบิตเท่ากับการเข้ารหัสของสัญญาณเสียงดังรูปที่ 2.13 ข้อมูลเหล่านี้จะนำไปทำการอินเตอร์พรีที่มีช่วงความถี่สูงกว่าการทำอินเตอร์พรีในกรณีของสัญญาณเสียง



รูปที่ 2.13 การเข้ารหัสของสัญญาณของข้อมูลประเภทคำที่อัตราบิต 9.6 Kbps

2. ข้อมูลคำที่มีอัตราบิต 2.4 Kbps

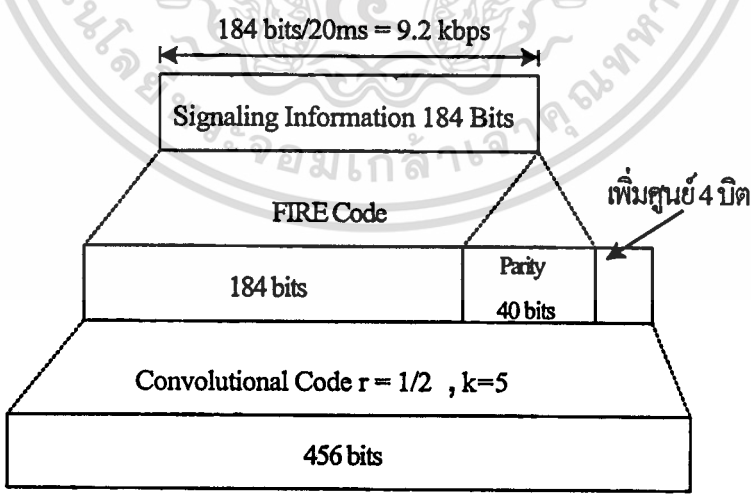
ในกรณีของข้อมูลที่จะส่งมีอัตราบิตเท่ากับ 2.4 Kbps (หรือ 48 บิตในเวลา 20 ms) จะต้องทำการเพิ่มบิตเข้าไปเพื่อให้มีอัตราของบิตเป็น 3.6 Kbps (หรือ 72 บิตในเวลา 20 ms) จากนั้นข้อมูลเหล่านี้จะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกขนาดเล็กๆ เท่ากับ 20 ms หรือ 72 บิต ในข้อมูลแต่ละบล็อกจะเพิ่มข้อมูลศูนย์อีก 4 ตัวต่อท้ายสำหรับการเข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/6$ และมีค่า Constraint length เท่ากับ 5 ผลที่ได้คือมีจำนวนบิตทั้งหมด 456 บิตในช่วงเวลา 20 ms ซึ่งจะได้อัตราของบิตข้อมูลเท่ากันกับการเข้ารหัสของสัญญาณในกรณีของสัญญาณเสียง ดังรูปที่ 2.14 จากนั้นก็ทำการอินเตอร์พรีโดยใช้วิธีเดียวกันกับของสัญญาณเสียง



รูปที่ 2.14 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของข้อมูลประเภทดาต้าที่อัตราบิต 2.4 Kbps

2.4.7.3 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของสัญญาณซิกแนลลิง

สัญญาณซิกแนลลิงเป็นข้อมูลส่วนที่มีความสำคัญมาก เพราะฉะนั้นจะต้องมีการปกป้องข้อมูลจากการผิดพลาดของการส่งเป็นอย่างดีเยี่ยม ชนิดของสัญญาณซิกแนลลิงที่มีการเข้ารหัสช่องสัญญาณซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปนี้ประกอบด้วย SACCH, FACCH, BCCH, SDCCH, PCH และ AGCH สัญญาณซิกแนลลิงมีทั้งหมด 184 บิตในทุกๆ 20 ms ข้อมูลนี้จะนำไปเข้ารหัสที่เรียกว่า FIRE Code ที่มี $G(X) = X^{40} + X^{26} + X^{23} + X^{17} + X^3 + 1$



รูปที่ 2.15 การเข้ารหัสช่องสัญญาณของสัญญาณซิกแนลลิง SACCH, FACCH, BCCH, SDCCH, PCH และ AGCH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีความสามารถในการตรวจว่ามีบิตใดผิดพลาดและก็ยังสามารถแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลนั้นๆ ได้อีกด้วย โดยต้องเพิ่มจำนวนบิตขึ้นทั้งสิ้น 40 บิต จากนั้นเพิ่มข้อมูลศูนย์อีก 4 ตัวต่อท้ายสำหรับการเข้ารหัสคอนไวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/2$ และมีค่า Constraint length เท่ากับ 5 ผลที่ได้ คือมีจำนวนบิตทั้งหมด 456 บิตในช่วงเวลา 20 ms ดังรูปที่ 2.15 จากนั้นก็นำข้อมูลเหล่านี้ไปทำการอินเทอร์ลิฟเพื่อลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนแบบเบิสต์

2.4.8 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องโทรศัพท์

ทันทีที่ผู้ใช้เปิดเครื่องโทรศัพท์เพื่อใช้งานเครื่องโทรศัพท์จะไม่ทราบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบโครงข่ายที่จะเริ่มการติดต่อด้วยเลข เช่น จะไม่ทราบถึงตำแหน่งว่าอยู่ภายในขอบข่ายการดูแลของเซลล์ใด ดังนั้นอุปกรณ์โทรศัพท์จะต้องทำการหาข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นทั้งหมดสำหรับการติดต่อกับสถานีฐานของระบบ ในขั้นแรกเครื่องโทรศัพท์จะต้องหาคลื่นความถี่ที่ช่องสัญญาณ BCCH ก่อนเพื่อจะได้อ่านข้อมูลบางส่วนของระบบโทรศัพท์ที่ต้องใช้ในการติดต่อ เนื่องจากในระบบ GSM 900 นั้นมีคลื่นความถี่สำหรับการใช้งานมากถึง 124 ช่อง การที่เครื่องโทรศัพท์จะสแกนคลื่นความถี่ทั้งหมดเพื่อหาช่องสัญญาณ BCCH นั้นจะต้องใช้เวลานานพอควร ดังนั้นเพื่อให้การค้นหาช่องสัญญาณมีความรวดเร็วขึ้น ระบบ GSM จึงได้กำหนดให้เครื่องโทรศัพท์ทำการจดบันทึกชุดคลื่นความถี่ของเซลล์ครั้งสุดท้ายที่มีการติดต่อกับ รวมไปถึงคลื่นความถี่ของเซลล์รอบข้างดังกล่าวด้วย เมื่อมีการเปิดเครื่องโทรศัพท์เพื่อใช้งานตัวเครื่องจะทำการสแกนหาความถี่ที่บันทึกอยู่ในแผ่น SIM ก่อน ตามมาตรฐานของ GSM คลื่นความถี่ที่มีช่องสัญญาณ BCCH อยู่จะต้องส่งออกด้วยกำลังที่สูงสุดตลอดเวลา ไม่อนุญาตให้มีการปรับลดระดับของกำลังสัญญาณเลย

2.4.8.1 การเลือกเซลล์ที่จะติดต่อ

หลังจากที่เครื่องโทรศัพท์ได้ข้อมูลต่างๆ ที่ต้องการจากสถานีฐานของเซลล์รอบข้างแต่ละแห่งทั้งหมดแล้ว เครื่องโทรศัพท์ก็จะต้องทำการตัดสินใจว่าจะเลือกที่จะติดต่อกับสถานีฐานใดจึงจะมีความเหมาะสมที่สุด ในการเลือกเซลล์นั้นเครื่องโทรศัพท์ก็จะต้องทำการพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัยดังนี้ ปัจจัยแรกที่ต้องพิจารณา คือกำลังที่เครื่องโทรศัพท์รับได้ ซึ่งมีความสำคัญที่สุด เพราะกำลังของคลื่นสัญญาณของช่อง BCCH สามารถใช้บ่งบอกถึงคุณภาพการรับส่งของช่องสัญญาณได้ ถ้าคลื่นสัญญาณ BCCH ที่รับได้มีกำลังที่แรงก็อาจจะหมายถึงว่าสถานีฐานได้รับสัญญาณที่มีกำลังที่ดีด้วย แต่หากสัญญาณที่รับได้มีกำลังอ่อนก็แสดงว่าการสนทนาของผู้ใช้ผ่านช่องสัญญาณนี้จะมีคุณภาพที่ไม่ดีตามไปด้วย ทั้งนี้จะต้องไม่ลืมว่าคลื่นสัญญาณในช่อง BCCH มีกำลังส่งที่แรงที่สุดตลอดเวลา เพราะฉะนั้นช่องสัญญาณอื่นๆ ที่ใช้ในภายหลังก็จะมีกำลังที่ต่ำกว่าเสมอ

ปัจจัยต่อมาที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ขนาดของกำลังส่งสูงสุดของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ยกตัวอย่าง เช่น หากเซลล์ที่ใช้งานอยู่ได้ออกแบบไว้สำหรับเครื่องโทรศัพท์ประเภทที่มีกำลังส่งสูงสุด 20 W (Class 1) การที่เครื่องโทรศัพท์สามารถรับสัญญาณที่มีความแรงพอก็มีได้หมายความว่า สถานีฐานจะต้องสามารถรับสัญญาณได้ดีตามไปด้วยเพราะหากเครื่องโทรศัพท์ที่ใช้มีกำลังส่งสูงสุดเพียง 0.8 W (Class 5) กำลังของสัญญาณที่รับได้ที่สถานีฐานก็อาจจะมีย่านที่อ่อนมากเกินไป

ปัจจัยสุดท้ายที่จะต้องนำมาพิจารณาด้วย คือ ตำแหน่งหรือบริเวณการใช้งานของเครื่องโทรศัพท์ ปัจจัยนี้มีได้มีผลกระทบต่อคุณภาพการรับส่งสัญญาณเลย แต่ก็มีส่วนช่วยลดปริมาณการรับส่งสัญญาณควบคุมที่เครื่องโทรศัพท์ใช้ในการรายงานถึงการเปลี่ยนตำแหน่งหรือบริเวณการใช้งาน ยกตัวอย่าง เช่น ในกรณีที่เครื่องโทรศัพท์มีการใช้งานอยู่ในบริเวณรอยต่อของเซลล์

2.4.8.2 การซิงโครไนซ์

ในการที่เครื่องโทรศัพท์จะสามารถซิงโครไนซ์การทำงานให้เข้ากับส่วนของสถานีฐานได้นั้น ในช่วงต้นของการติดต่อเครื่องโทรศัพท์จะต้องปรับความถี่ของคลื่นพาห์ให้ตรงกับความถี่ของสถานีฐานก่อน ซึ่งสามารถทำได้โดยดูจาก FCB ที่ส่งออกโดยสถานีฐานของคลื่นพาห์ BCCH จากนั้นเครื่องโทรศัพท์จะต้องปรับจังหวะการรับส่งข้อมูลในเชิงเวลาให้เข้ากันกับส่วนของสถานีฐานด้วย ซึ่งส่วนข้อมูลตรงนี้สามารถอ่านได้จาก SB (Synchronization Burst) วงจรที่มีใช้ในระบบ GSM เพื่อซิงโครไนซ์จังหวะเวลาระหว่างเครื่องโทรศัพท์และส่วนของสถานีฐานประกอบด้วย

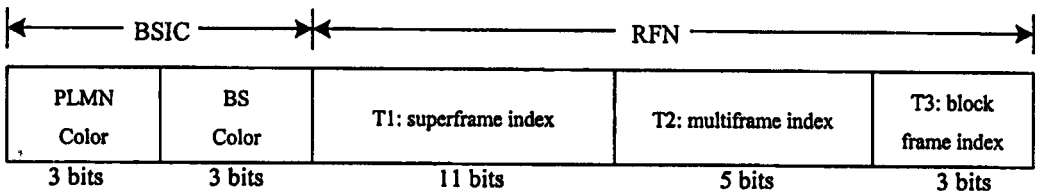
QN = 0-624 : Quarter-bit number

BN = 0-156 : bit number

TN = 0-7 : timeslot number

FN = 0-(26x51x2048) : frame number

ทันทีที่เครื่องโทรศัพท์ได้รับสัญญาณจาก SB ก็จะมีการตั้งค่าของวงจรนับภายในเครื่องให้ตรงกับสถานีฐาน โดยจะอ่านค่าของ QN ได้จาก Extended Training Sequence ที่มีขนาด 64 บิต ซึ่งบรรจุอยู่ใน SB จากนั้นตั้งค่าเริ่มต้นของ TN = 0 และท้ายสุดก็ทำการถอดรหัสค่า Encrypted Sync Bits จำนวน 78 บิตเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการซิงโครไนซ์จำนวน 25 บิตซึ่งมีโครงสร้างและรายละเอียดดังที่แสดงในรูปที่ 2.16 ข้อมูลเหล่านี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ BSIC และ RFN ส่วน BSIC (Base Station Identifier Code) จำนวน 6 บิตมีหน้าที่ในการบ่งบอกถึงหมายเลขประจำตัวของสถานีฐานที่เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่กำลังติดต่ออยู่ สำหรับส่วน RFN (Reduced TDMA Frame Number) อีก 19 บิตมีไว้สำหรับระบุหมายเลขของ TDMA frame โดยหมายเลขที่ RFN สามารถบ่งได้มีค่าจำกัดอยู่ระหว่าง 0 ถึง 26x51x2048-1



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของข้อมูลที่บรรจุใน SCH

2.4.8.3 การเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบแรนดอม (Random Access)

ในการติดต่อครั้งแรกของเครื่องโทรศัพท์ไปที่สถานีฐานแต่ละครั้งนั้นจะมีปัญหาอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณา คือ จังหวะการเข้าใช้ช่องสัญญาณของเครื่องโทรศัพท์ในไทม์สล็อต เพราะในช่วงเวลานี้โครงข่ายยังมิได้มีการจัดสรรช่องสัญญาณแต่ละไทม์สล็อตที่ชัดเจนให้เครื่องโทรศัพท์ใช้ ดังนั้นจึงมีโอกาสที่เครื่องโทรศัพท์มากกว่าหนึ่งเครื่องส่งสัญญาณการขอติดต่อออกพร้อมกันลงบนไทม์สล็อตเดียวกัน ผลที่เกิดขึ้นก็คือสัญญาณเหล่านี้เกิดการชนกัน สำหรับในระบบ GSM นั้นได้กำหนดสัญญาณเฉพาะสำหรับการแสดงความต้องการโทรศัพท์ออก คือ RACH ซึ่งได้มีการอธิบายถึงโครงสร้างไว้ในส่วนก่อนหน้านี้แล้ว เนื่องจากโครงสร้างของช่องสัญญาณ RACH มีลักษณะเป็นไทม์สล็อตที่แน่นอน ดังนั้นการชนกันของสัญญาณจากแหล่งกำเนิดต่างๆ จะเกิดขึ้นภายในแต่ละไทม์สล็อตแยกจากกัน สมมติว่า ณ เวลาที่ไทม์สล็อตหนึ่งมีเครื่องโทรศัพท์จำนวนสองเครื่องส่งสัญญาณออกพร้อมกัน จะเกิดเหตุการณ์ได้ใน 2 ลักษณะ คือ สถานีฐานสามารถรับสัญญาณจากเครื่องโทรศัพท์เครื่องหนึ่งได้ถูกต้องเพราะระดับสัญญาณที่รับได้มีกำลังสูงกว่าสัญญาณจากอีกเครื่องหนึ่งมาก หรือสถานีฐานไม่สามารถรับสัญญาณที่ถูกส่งจากเครื่องใดเครื่องหนึ่งเลย สำหรับในกรณีหลังเครื่องโทรศัพท์แต่ละเครื่องจะต้องทำการส่งสัญญาณชุดเดิมใหม่อีกครั้ง ในการที่จะส่งสัญญาณใหม่อีกครั้งนั้นจะต้องมีการเตรียมมาตรการที่สามารถป้องกันมิให้เกิดการชนกันของสัญญาณอีก สำหรับในระบบ GSM นั้นได้นำวิธีที่เรียกว่า Slotted Aloha มาใช้ เมื่อใดที่มีการชนกันของสัญญาณขึ้นใหม่อีกไม่สิ้นสุดดังนั้นในสถานการณ์ดังกล่าวนี้เครื่องโทรศัพท์แต่ละเครื่องจะหน่วงเวลาการส่งออกไปเป็นช่วงเวลาช่วงหนึ่ง โดยขนาดของช่วงเวลาที่หน่วงไว้นี้ได้มาจากการแรนดอมค่าขึ้นมา ด้วยเหตุนี้โอกาสที่จะเกิดการชนกันจึงมีขนาดลดลงอย่างมาก

2.4.8.4 การระบุตำแหน่งพื้นที่ (Location Areas)

เนื่องจากโดยปกติการใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่มักจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งของการใช้งานอยู่เสมอๆ ดังนั้นการค้นหาคำแหน่งของเครื่องโทรศัพท์จึงเป็นเรื่องที่จำเป็นและมีความสำคัญอย่างมากในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยทั่วไปแล้วเราสามารถแบ่งวิธีการค้นหาคำแหน่งของเครื่องโทรศัพท์ออกได้เป็น 2 วิธี วิธีแรกระบบโทรศัพท์จะไม่ทำการเก็บข้อมูลใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งของเครื่องโทรศัพท์เลย และเมื่อใดที่ระบบโทรศัพท์ต้องการจะติดต่อกับ เช่น มีการโทรศัพท์เข้าจากผู้ใช้อื่น ระบบโทรศัพท์ก็จะส่งคำสั่งให้สถานีฐานทั้งหมดทำการเพจ (Page) เพื่อค้นหาตำแหน่งของเครื่องโทรศัพท์ สังเกตว่าวิธีนี้จะไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้กับโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ครอบคลุมพื้นที่บริเวณกว้าง เช่น พื้นที่ทั้งประเทศหรือหลายๆประเทศ เพราะจะมีการส่งสัญญาณเพจออกไปเป็นจำนวนมาก ส่วนวิธีที่สองระบบจะทำการเก็บข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งหรือบริเวณที่เครื่องโทรศัพท์ที่มีการใช้งานอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อใดที่เครื่องโทรศัพท์พบว่าได้เคลื่อนที่ออกจากบริเวณการใช้งานเดิมเข้าสู่บริเวณการใช้งานในบริเวณใหม่ เครื่องโทรศัพท์จะต้องรายงานถึงการเปลี่ยนตำแหน่งหรือบริเวณที่ใช้งานดังกล่าวนี้ บริเวณการใช้งานบริเวณหนึ่งอาจจะมีขนาดที่แตกต่างกันไปตามที่ต้องการ เช่น อาจจะเป็นพื้นที่ของเซลล์หนึ่งเซลล์ สำหรับวิธีนี้เมื่อใดที่ระบบโทรศัพท์ต้องการจะติดต่อกับเครื่องโทรศัพท์ ก็สามารถเพจหรือค้นหาเฉพาะในบริเวณที่เครื่องโทรศัพท์อยู่ ซึ่งช่วยให้จำนวนสัญญาณซิกแนลลิงที่ต้องใช้ในการเพจหาเครื่องโทรศัพท์ที่มีปริมาณที่ลดลงมาก หากแต่ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ปริมาณสัญญาณที่เครื่องโทรศัพท์ต้องส่งไปบอกระบบถึงการเปลี่ยนบริเวณการใช้งานจะมีค่อนข้างมากหากมีการแบ่งบริเวณพื้นที่ที่มีขนาดเล็กเกินไป เช่น แบ่งขนาดของพื้นที่เท่ากับขนาดของเซลล์หนึ่งเซลล์ ด้วยเหตุนี้ระบบ GSM จึงใช้วิธีที่สองโดยกำหนดให้บริเวณพื้นที่แต่ละส่วนจะมีขนาดครอบคลุมเซลล์จำนวนหลายเซลล์ เพื่อลดปริมาณสัญญาณที่เครื่องโทรศัพท์จะต้องส่ง โดยที่ขอบเขตของพื้นที่แต่ละแห่งจะเรียกว่า Location Area

2.4.8.5 การแฮนด์โอเวอร์ (Handover)

การทำแฮนด์โอเวอร์จะเกิดขึ้นเมื่อเครื่องโทรศัพท์มีการเคลื่อนออกจากขอบเขตการดูแลของเซลล์ที่ติดต่อยู่ ส่งผลให้การติดต่อสื่อสารระหว่างทั้งสองฝ่ายมีคุณภาพที่ต่ำลงเรื่อยๆ และเมื่อเครื่องโทรศัพท์เริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณของเซลล์ใหม่ซึ่งโดยปกติแล้วจะสามารถให้คุณภาพการรับส่งคุณภาพที่ดีกว่าของเซลล์เดิม ระบบโทรศัพท์ก็จะทำการโอนย้ายการติดต่อไปให้กับสถานีฐานของเซลล์ใหม่เพื่อให้การสนทนาของผู้ใช้มีความต่อเนื่องและมีคุณภาพในระดับที่ติดลอคช่วงเวลาการสนทนา กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การทำแฮนด์โอเวอร์ สำหรับระบบ GSM เครื่องโทรศัพท์มีส่วนสำคัญในกระบวนการทำแฮนด์โอเวอร์ค่อนข้างมาก โดยระบบมอบหมายให้เครื่องโทรศัพท์ทำหน้าที่ในการตรวจวัดระดับสัญญาณที่รับได้จากทั้งเซลล์ที่ติดต่อยู่ด้วยและสัญญาณที่รับได้จากเซลล์รอบๆ จากนั้นจะรายงานผลที่ได้ไปให้สถานีฐานเพื่อใช้ในการตัดสินใจการทำแฮนด์โอเวอร์ต่อไป การแฮนด์โอเวอร์ในลักษณะนี้มีชื่อเรียกว่า MAHO (Mobile Assisted Handover)

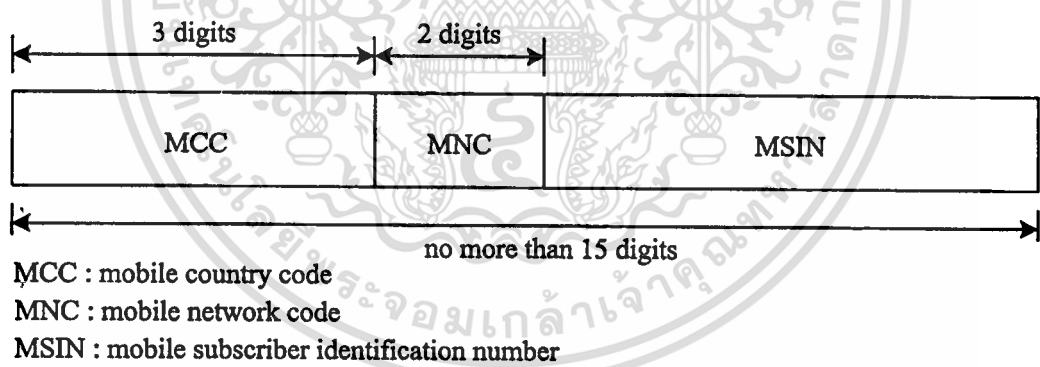
2.4.9 หมายเลขประจำตัวต่างๆ ที่ใช้ในระบบ GSM

หมายเลขประจำตัวต่างๆที่ใช้ในระบบ GSM จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังนี้

2.4.9.1 หมายเลข IMSI (International Mobile Subscriber Identity)

IMSI คือ หมายเลขประจำตัวของผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบ GSM หมายเลขดังกล่าวนี้จะบรรจุอยู่ในแผ่น SIM โดยหมายเลข IMSI จะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละแผ่น SIM ทั่วโลกโครงสร้างของ IMSI ประกอบด้วย 3 ส่วนดังรูปที่ 2.17 คือ

- 1. MCC (Mobile Country Code) ขนาด 3 digits มีไว้ใช้ในการบ่งบอกถึงประเทศที่ผู้ใช้เครื่องโทรศัพท์เป็นสมาชิกอยู่ สำหรับค่า MCC ของประเทศไทย คือ 520
- 2. MNC (Mobile Network Code) ขนาด 2 digits มีไว้สำหรับใช้บอกถึงชื่อของระบบโครงข่ายที่ให้บริการภายในประเทศหนึ่งๆ สำหรับประเทศไทยมีบริษัทที่ให้บริการระบบ GSM อยู่ 2 บริษัท คือ AIS และ Worldphone 1800 ในกรณีของ AIS ใช้ค่า MNC เท่ากับ 01 ส่วนของ Worldphone 1800 ใช้ค่า MNC เท่ากับ 18
- 3. MSIN (Mobile Subscriber Identification Number) มีไว้สำหรับบ่งบอกถึงตัวสมาชิกผู้ใช้ โดยรวมแล้วค่า IMSI จะต้องมีความยาวไม่เกิน 15 digits



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของ IMSI

3.4.9.2 หมายเลข MSISDN (Mobile Subscriber ISDN Number)

MSISDN คือ หมายเลขโทรศัพท์ที่ผู้ใช้จะต้องทราบเพื่อใช้ในการหมุนหมายเลขสำหรับการโทรติดต่อ หมายเลข MSISDN ประกอบด้วย CC (Country Code), NDC (National Destination Code) และ SN (Subscriber Number) ส่วนของ CC มีไว้สำหรับบ่งถึงประเทศที่ต้องการติดต่อด้วย หมายเลขนี้มีความยาวไม่แน่นอน เช่น ประเทศไทยใช้ 66 ในขณะที่ประเทศสหรัฐอเมริกาใช้ 1

และสหราชอาณาจักรใช้ 44 เป็นต้น การกำหนดหมายเลข CC เป็นหน้าที่ขององค์กรระหว่าง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

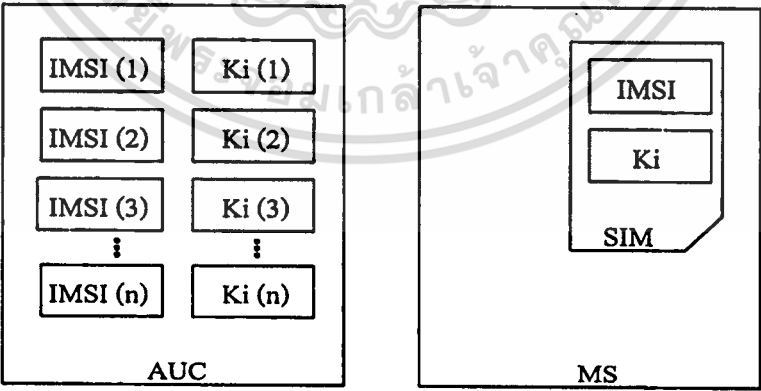
ประเทศ CCITT ส่วนของ NDC มีไว้สำหรับบ่งถึงพื้นที่ย่อยภายในประเทศ และสุดท้ายส่วนของ SN ก็คือหมายเลขโทรศัพท์ของผู้ใช้ที่มักจะติดป้ายอยู่บนเครื่อง หมายเลข NDC และ SN จะได้รับการกำหนดโดยองค์กรภายในประเทศ

2.4.9.3 หมายเลข TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity)

TMSI คือหมายเลขอีกชุดหนึ่งมีค่าต่างไปจาก IMSI มีไว้สำหรับใช้ในการบ่งบอกถึงเครื่องโทรศัพท์ในขณะที่กำลังติดต่ออยู่กับสถานีฐาน การนำหมายเลข TMSI มาแทนการใช้หมายเลข IMSI ในระหว่างที่มีการติดต่อสื่อสารผ่านอากาศ ก็เพื่อป้องกันการดักจับหมายเลข IMSI

2.4.9.4 กระบวนการ Authentication และ Ciphering

Authentication คือ กรรมวิธีในการป้องกันการแอบใช้บริการของระบบของผู้ที่ไม่ได้เป็นสมาชิก ในระบบ GSM ก่อนที่เครื่องโทรศัพท์จะสามารถโทรออกหรือรับสายเรียกเข้าได้จะต้องผ่านกระบวนการตรวจสอบว่าเป็นเครื่องที่มีสิทธิในการใช้บริการหรือเป็นสมาชิกที่ถูกต้องหรือไม่ ในการอธิบายถึงกระบวนการทำ Authentication ภายในระบบ GSM จำเป็นที่เราต้องกล่าวถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องก่อน แผ่น SIM ที่บรรจุอยู่ในเครื่องโทรศัพท์ทุกเครื่องจะมีการบันทึกค่า 2 ค่าที่กำหนดขึ้นจากบริษัทผู้ให้บริการ คือ IMSI และ Ki โดยค่าทั้งสองจะไม่มีเปลี่ยนแปลงและจะแตกต่างกันไปในเครื่องโทรศัพท์แต่ละเครื่อง สำหรับส่วนของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่จะมีฐานข้อมูลที่เก็บค่าทั้งสอง IMSI และ Ki ของเครื่องโทรศัพท์ทั้งหมดที่เป็นสมาชิกไว้ใน AUC (Authentication Center) ดังรูปที่ 2.18

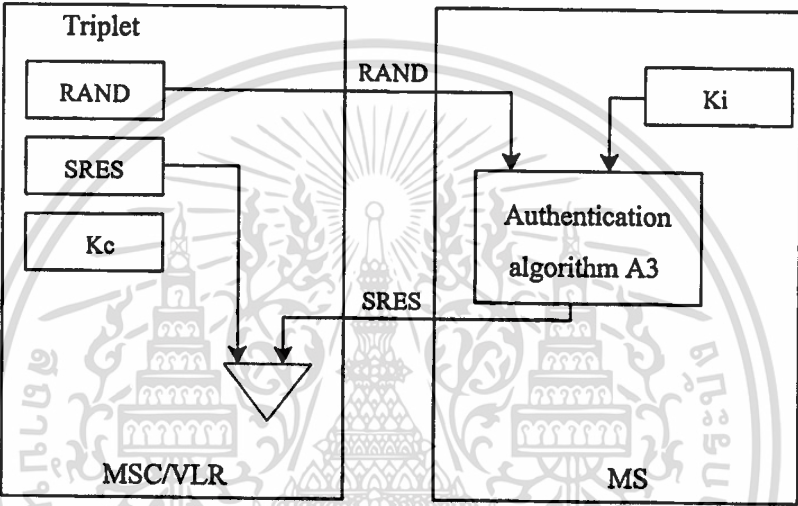


รูปที่ 2.18 โครงสร้างการเก็บข้อมูลของ AUC และ MS

เมื่อระบบจะต้องทำการ Authentication ให้กับเครื่องโทรศัพท์เครื่องหนึ่ง ก็จะอ่านรหัสลับ Ki ของเครื่องโทรศัพท์นั้นจากฐานข้อมูลใน AUC และกำเนิดหมายเลขแรนดอมขึ้นมาค่าหนึ่งที

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า RAND โดยมีความยาวเท่ากับ 128 บิต จากนั้นนำค่าทั้งสองไปป้อนเข้าวงจรที่ประมวลค่าทั้งสองตามอัลกอริทึม A3 และผลที่ได้คือ SRES (Signed Response) สำหรับในส่วน of เครื่องโทรศัพท์ก็จะมีการเก็บรหัสลับ Ki ของตนเองและมีอัลกอริทึม A3 เช่นกัน เครื่องโทรศัพท์จะรอรับค่า RAND จากโครงข่ายเพื่อนำไปประมวลผลด้วยวิธีการเดียวกันคืออาศัยรหัสลับ Ki กับอัลกอริทึม A3 ผลที่ได้คือ SRES ซึ่งจะถูส่งกลับไปให้โครงข่ายเพื่อเปรียบเทียบกับค่า SRES ที่คำนวณได้ที่ส่วนของโครงข่ายเอง หากว่าค่าทั้งสองตรงกันก็จะอนุญาตให้เครื่องโทรศัพท์เข้าใช้ระบบได้ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กระบวนการทำ Authentication

สำหรับการทำ Ciphering ในระบบ GSM นั้น ทางโครงข่ายจะอาศัยค่า RAND และ Ki ชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการทำ Authentication แต่จะป้อนค่าทั้งสองเข้าวงจรประมวลผลด้วยอัลกอริทึม A8 ผลที่ได้คือรหัส Kc ซึ่งจะนำไปใช้ร่วมกับหมายเลขเฟรมที่กำลังส่งอยู่ โดยนำไปป้อนเข้าวงจรประมวลผลด้วยอัลกอริทึม A5 ผลที่ได้จะนำไปใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลที่จะส่ง เนื่องจากการทำ Ciphering มีการนำหมายเลขของเฟรมที่กำลังส่งอยู่มาเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการด้วย ทำให้การดักฟังจากผู้ไม่เกี่ยวข้องกระทำได้ยากมากขึ้น

2.4.10 การมอดูเลตสัญญาณ

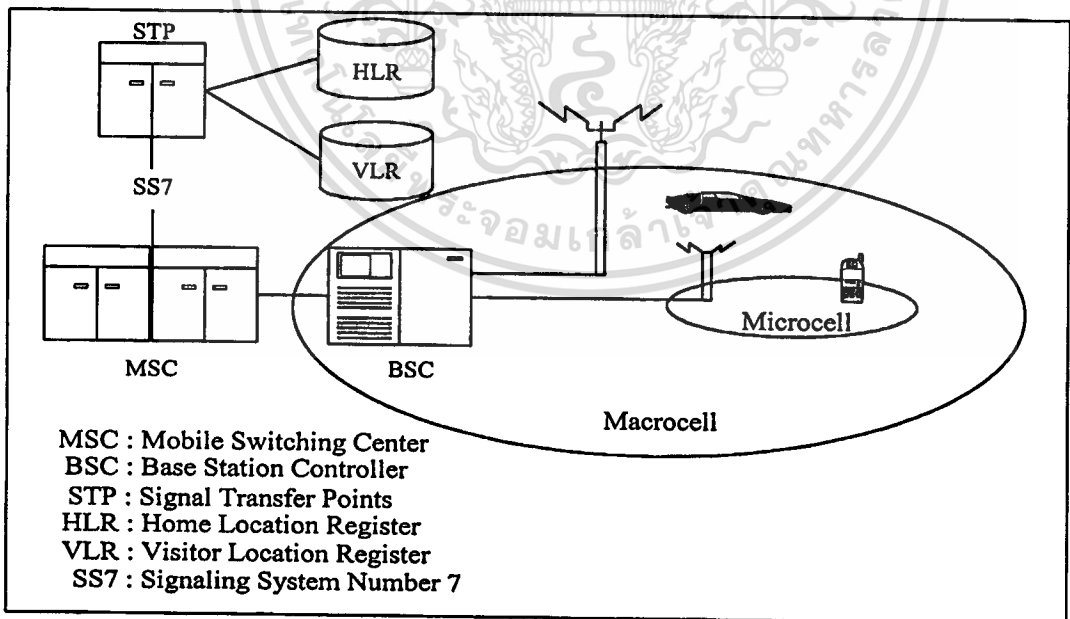
ระบบ GSM อาศัยการมอดูเลตแบบ GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) ซึ่งสามารถส่งสัญญาณดิจิทัลด้วยอัตรา 270.833 Kbps โดยใช้แบนด์วิดธ์ขนาด 200 KHz ดังนั้นค่าประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดธ์มีค่าเท่ากับ $270.833/200 = 1.35$ b/s/Hz ในแบนด์วิดธ์ขนาด 200 KHz นี้สามารถส่งข้อมูลได้ทั้งหมด 8 ช่องสัญญาณ ดังนั้นสเปกตรัมที่มีอยู่ทั้งหมด 2×25 MHz จึง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถใช้ส่งข้อมูลได้ทั้งหมด $8 \times 124 = 992$ ช่องสัญญาณ ซึ่งมีใช้ค่าที่สูงนักเพราะระบบอนาล็อกก็สามารถให้จำนวนช่องสัญญาณให้ใกล้เคียงกันด้วยขนาดของแบนด์วิดท์ที่เท่ากัน ในแง่มุมนี้ระบบดิจิทัลที่ GSM มีได้ดีกว่าระบบอนาล็อกที่มีการใช้งานอยู่เดิม หากแต่ว่าระบบ GSM สามารถทำงานได้ที่ค่า Cochannel-interference (C/I) ประมาณ 10-12 dB ซึ่งต่ำกว่าของระบบอนาล็อกถึง 6 dB นั้นหมายความว่าเราสามารถให้ความถี่ชุดเดียวกันมาใช้ในบริเวณอื่นที่อยู่ใกล้กันได้มากขึ้น ส่งผลให้ระบบมีความจุเพิ่มขึ้นและรองรับจำนวนผู้ใช้โทรศัพท์ได้มากขึ้น

2.4.11 เทคโนโลยีไมโครเซลล์

เทคโนโลยีไมโครเซลล์มีจุดประสงค์ที่จะประยุกต์ใช้งานสำหรับคนเดินเท้าตามถนน ซึ่งโดยปกติรัศมีการแพร่กระจายคลื่นจะน้อยกว่า 500 เมตร จึงทำให้สามารถใช้กำลังส่งที่ต่ำได้ เช่น น้อยกว่า 100 มิลลิวัตต์ สถานีฐานไมโครเซลล์จะให้ความถี่ต่างๆ เช่นเดียวกับระบบเซลลูลาร์ทั่วไป ด้วยการขยายระบบเซลล์ในชั้นล่างของโครงข่าย (Underlay) ซึ่งชั้นของไมโครเซลล์ตลอดจนถึงชั้นมาโครเซลล์จะสามารถใช้กับการสื่อสารส่วนบุคคลถึงการสื่อสารด้วยความเร็วสูงได้ด้วยวิธีมีการครอบคลุมเซลล์ทั้งหมดได้ ในการใช้ความถี่ร่วมกัน การจัดการช่องความถี่ และการแฮนด์โอเวอร์จำเป็นต้องมีการประสานกันระหว่างโครงสร้างของมาโครเซลล์ที่มีอยู่รวมทั้งไมโครเซลล์ด้วย ซึ่งการทำงานทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วย BSC ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 โครงข่ายของระบบไมโครเซลล์

ไมโครเซลล์ที่ต่อร่วมกันกับ BSC ด้วยการส่งผ่านจากอุปกรณ์ต่างๆที่สามารถอำนวยความสะดวกได้ เช่น สายโคแอกเชียล, ใยแก้วนำแสง และคลื่นวิทยุ MSC จะจัดเตรียมขบวนการของการเรียกและการเชื่อมต่อสัญญาณ ซึ่งโครงข่ายต่างๆจะถูกต่อรวมโดยทาง SS7 (Signaling System Number 7) และสำหรับการเข้าถึงผู้ใช้หรือตำแหน่งที่ผู้ใช้งานอยู่นั้น โครงข่ายจะใช้ STP (Signal Transfer Points) และ SCP (Signal Control Points) เช่น HLR และ VLR

ดังนั้นระบบไมโครเซลล์จะสามารถขยายความจุของช่องสัญญาณได้โดยใช้แบนด์วิดท์ที่จำกัด จึงทำให้การบริการด้วยเสียงหรือข้อมูลมีคุณภาพสูงด้วยการใช้กำลังของการสื่อสารสัญญาณที่ต่ำ เช่น Speech Codecs ที่ 32 kb/s ด้วยการประวิงเวลาน้อยกว่า 2 ms และการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสที่ 19.6 Kb/s ก็สามารถใช้ได้ดี [7]

ระบบไมโครเซลล์จึงมีความน่าสนใจมากดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนในเรื่องของการแพร่กระจายคลื่นก็จะต่างจากลักษณะของมาโครเซลล์ซึ่งก็พอจะสรุปได้ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ของไมโครเซลล์และมาโครเซลล์

Item	Macrocell	Microcell
Cell radius	1-20 km.	0.1-1 km.
Tx power	1-10 W.	0.1-2 W.
Fading	Rayleigh	Nakagami-Rice
Rms delay spread	0.1-10 μs	10-100 ηs
Max. bit rate	0.3 Mb/s	1 Mb/s

ระบบไมโครเซลล์จะมีการวางแผนใช้งานในเขตเมืองที่มีปริมาณการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่หนาแน่นมาก เมื่อใช้ความสูงของเสาอากาศภาคส่งที่ต่ำกว่าความสูงของอาคารโดยรอบแล้วกำลังของสัญญาณทั้งหมดที่ถูกแพร่กระจายไปตามถนนที่เรียกว่า “ถนนไมโครเซลล์” (Street Microcell) [3]

บทที่ 3

ทฤษฎีการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น

3.1 หลักการแพร่กระจายคลื่น

การสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่จะใช้การสื่อสารทางคลื่นวิทยุซึ่งใช้การแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปในอากาศ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะเป็นค่าส่วนกลับกำลังสองกับระยะทางตามทฤษฎีของ Inverse-square law ถ้ากำหนดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นลักษณะรอบทิศทาง โดยเครื่องส่งมีกำลังงานที่ส่งออกไป P_t การแพร่กระจายรอบทิศทางสามารถพิจารณาเป็นลักษณะของวงกลมรอบๆ แหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีรัศมีเป็น d_s เป็นค่าดิฟเฟอเรนเชียลของพื้นผิว (Differential of surface) จึงทำให้กำลังงานที่จุดใดๆ สามารถเทียบได้กับพื้นที่ส่วนเล็กๆ (A) ของพื้นผิวทรงกลม ค่าความหนาแน่นของกำลังงานจะเท่ากับ

$$P_t = P_r(\theta, \phi) d_s \quad (3.1)$$

โดยที่ P_r เป็นกำลังที่เครื่องรับได้ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งมีความสัมพันธ์รูปแบบปกติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากำหนดโดย

$$P_r(\theta, \phi) = \left[\frac{E_{\theta n}^2(\theta, \phi) + E_{\phi n}^2(\theta, \phi)}{Z_0} \right] \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$E_{\theta n}(\theta, \phi) = \frac{E_{\theta}(\theta, \phi)}{E_{\theta}(\theta, \phi)_{\max}} \quad (3.3)$$

$$E_{\phi n}(\theta, \phi) = \frac{E_{\phi}(\theta, \phi)}{E_{\phi}(\theta, \phi)_{\max}} \quad (3.4)$$

Z_0 เป็นค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 377.752 Ω

$E_{\theta}(\theta, \phi)_{\max}$ และ $E_{\phi}(\theta, \phi)$ คือ ค่าสูงสุดของสนามไฟฟ้าในมุมของ θ และ ϕ

ถ้ากำหนดให้สายอากาศเป็นแบบไอโซโทรปิก และพื้นผิวการแพร่กระจายคลื่นเป็นทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนั้นกำลังที่เครื่องรับได้รับ

$$P_t = r^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} P_r(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi \tag{3.5}$$

$$P_t = P_r r^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin \theta \, d\theta \, d\phi$$

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi r^2} \tag{3.6}$$

โดย $4\pi r^2$ คือ พื้นที่ของการกระจายคลื่นซึ่งเป็นรูปวงกลมและมีรัศมี r
สมมติให้ G_t คือ อัตราการขยายกำลังของสายอากาศจากเครื่องส่ง ดังนั้นความหนาแน่น
ของกำลังงานในทิศทางของการแพร่กระจายจะได้เป็น

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} \tag{3.7}$$

ส่วนทางด้านสายอากาศของเครื่องรับก็จะติดตั้งในทิศทางที่สามารถรับสัญญาณได้สูงสุดสมมติให้
 P_r คือ กำลังงานที่สายอากาศของเครื่องรับได้รับ ในกรณีเช่นนี้สายอากาศจะใช้พื้นที่เอพแฟกทีฟ
(A_{eff}) ในการรับสัญญาณ ดังนั้นค่ากำลังงานที่รับได้จะมีค่าเป็น

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} \cdot A_{eff} \tag{3.8}$$

ในสายอากาศใดๆก็ตาม อัตราส่วนของการขยายสูงสุดต่อพื้นที่เอพแฟกทีฟ คือ

$$\frac{A_{eff}}{G_r} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{3.9}$$

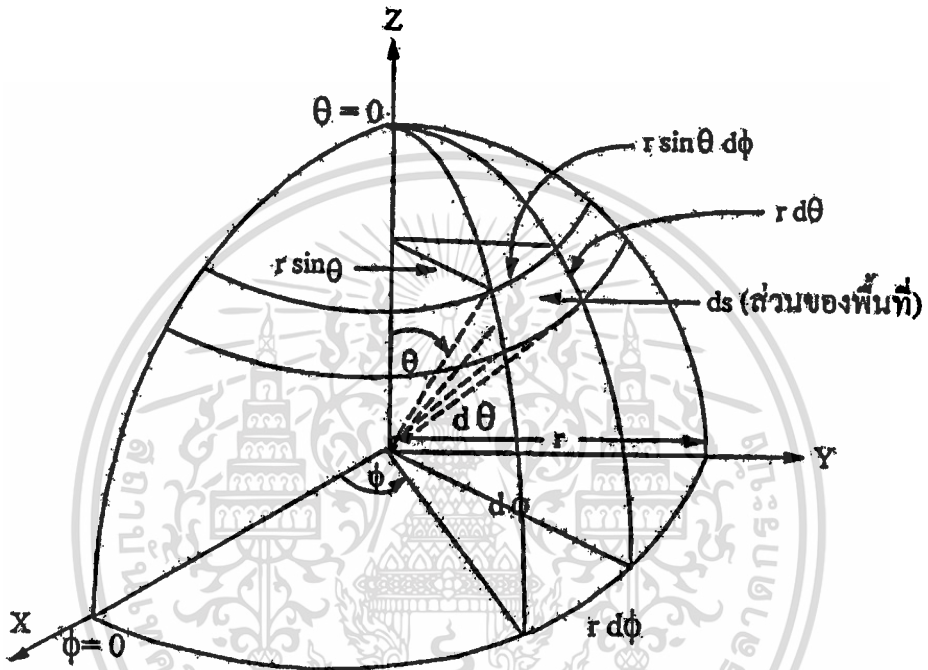
กำหนดให้ λ คือ ความยาวคลื่นของคลื่นที่แพร่กระจาย ถ้า G_r คือ อัตราการขยายกำลังของสาย
อากาศรับได้ดังสมการการแพร่กระจายคลื่นในอากาศของฟรีอิส (Friis free-space equation) ดังนี้

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 r^2 L} \tag{3.10}$$

โดย P_t เป็นกำลังงานในการส่งสัญญาณ
 P_r เป็นกำลังงานในการรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- G_t เป็นเกนของสายอากาศส่ง
 G_r เป็นเกนของสายอากาศรับ
 r เป็นระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งในหน่วยกิโลเมตร
 L เป็นการลดทอนของระบบ ($L > 1$)
 และ λ เป็นความยาวคลื่นในหน่วยเมตร



รูปที่ 3.1 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดแบบไอโซโทรปิก

ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังงานที่รับได้ จะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งยกกำลังสองและแปรผกผันกับความถี่ยกกำลังสองอีกด้วย ซึ่งถ้าระยะทางหรือความถี่เพิ่มขึ้น 2 เท่า จะทำให้กำลังงานที่ได้รับน้อยลง 4 เท่าจากค่าเดิม โดยสมการการลดทอนเนื่องจากระยะทาง (Path Loss) ในหน่วยเดซิเบล กำหนดได้โดย

$$L = -10 \log \frac{P_r}{P_t} = -10 \log \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 r^2 L} \quad (3.11)$$

$$L(\text{dB}) = G_t(\text{dB}) + G_r(\text{dB}) - (32.45 + 20 \log r + 20 \log f) \quad (3.12)$$

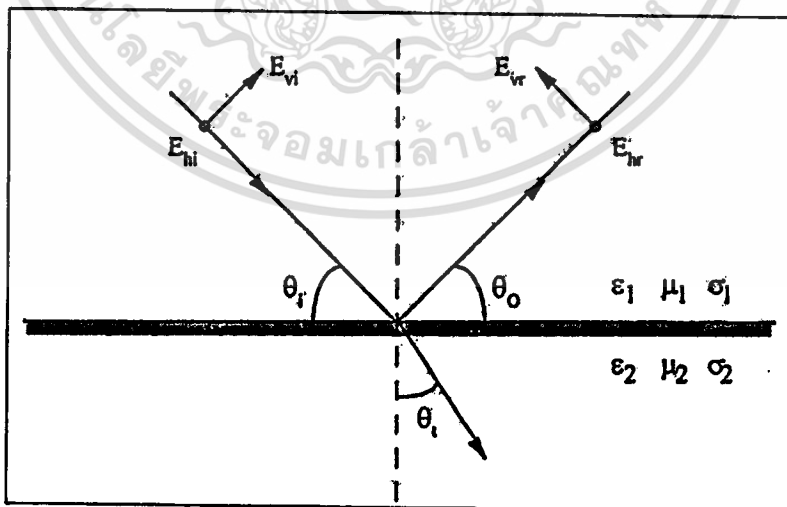
ถ้าอัตราส่วนของกำลังงานที่รับได้กับกำลังงานที่ส่ง (โดยใช้สายอากาศแบบไอโซโทรปิก ค่าอัตรา การขยายกำลังของ G_r และ G_t จะมีค่าเท่ากับ 1) และแทนค่าความสัมพันธ์ $\lambda = \frac{c}{f}$ (โดย c คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s) จะได้สมการการลดทอนเป็น

$$L(\text{dB}) = 32.45 + 20 \log r + 20 \log f \quad (3.13)$$

3.2 กลไกพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่น (Basic propagation Mechanisms)

3.2.1 การสะท้อนของคลื่น (Reflection)

การสะท้อนของคลื่นจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบนสิ่งกีดขวางที่มีมิติกว้าง มาก เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ โดยการสะท้อนจากพื้นผิวของโลกและจากสิ่ง ก่อสร้าง หรือคลื่นที่สะท้อนมาจากผืนน้ำ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นที่อุปกรณ์รับ สัญญาณก็ได้ เมื่อคลื่นวิทยุตกกระทบบนตัวกลางสองตัวที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแตกต่างกัน คลื่นส่วน หนึ่งจะมีการสะท้อนกลับและคลื่นอีกส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ทะลุผ่านไป สำหรับในกรณีที่คลื่นตก กระทบบนอากาศปกตินผิวของตัวนำไฟฟ้า คลื่นจะมีการสะท้อนกลับโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน ถ้าคลื่นตกกระทบบนผิวของฉนวนไฟฟ้า พลังงานส่วนหนึ่งจะทะลุผ่านเข้าไปในผิว พลังงานอีก ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับและจะไม่มีการสูญเสียของพลังงานในการดูดกลืน ซึ่งความหนาแน่นของ สนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบบนและคลื่นสะท้อนแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรสเนล (Fresnel reflection coefficient : Γ)



รูปที่ 3.2 การสะท้อนของคลื่น

จากรูปที่ 3.2 จะแสดงลักษณะการตกกระทบและสะท้อนของคลื่น โดยตัวห้อย v และ h จะหมายถึงการโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งและแนวนอนตามลำดับ และตัวห้อย i และ r จะหมายถึงสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบและสะท้อนตามลำดับ ค่าพหุมิตติวัตต์ ค่าความแทรกซึม และสภาพการนำของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 จะแทนด้วย $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$ และ $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$ ตามลำดับ ในกรณีที่ตัวกลางที่ 1 เป็นอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสำหรับการโพลาไรซ์ของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งและแนวนอน จะแสดงได้ดังสมการที่ (3.14) และสมการที่ (3.15)

$$\Gamma_v = \frac{E_{vr}}{E_{vi}} = \frac{-\epsilon_r \sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\epsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (3.14)$$

$$\Gamma_h = \frac{E_{hr}}{E_{hi}} = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (3.15)$$

เมื่อ ϵ_r เป็นค่าพหุมิตติวัตต์ที่สัมพันธ์กันระหว่างตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 และ θ_i เป็นมุมตกกระทบที่ทำให้สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน Γ_h มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะเรียกมุมนี้ว่า มุมของบริวสเตอร์ (Brewster angle) โดยสามารถเขียนสมการของค่ามุมบริวสเตอร์ ได้ดังสมการที่ (3.16)

$$\sin \theta_i = \frac{\sqrt{\epsilon_r - 1}}{\sqrt{\epsilon_r^2 - 1}} \quad (3.16)$$

การแพร่กระจายคลื่นระหว่างสายอากาศส่งและตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ในเส้นทางการมองเห็นในระดับสายตาจะเป็นไปตามสมการการแพร่กระจายคลื่นในอากาศของฟรีอิส ซึ่งเป็นการพิจารณาคลื่นที่เดินทางผ่านสูญญากาศเท่านั้น แต่สำหรับรูปแบบการสะท้อนของคลื่นบนพื้นดินในรูปที่ 3.3 จะเป็นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่พิจารณาถึงคลื่นตรงที่เดินทางผ่านอากาศและคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดิน (Two-ray model) โดยรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในลักษณะนี้ จะสมมุติให้ ความยาวคลื่นมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งกีดขวางทั้งหมด ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งมีค่าน้อย และสมมุติให้ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบ ค่าของสนามไฟฟ้าที่รับได้ทั้งหมด จะเป็นผลรวมระหว่างสนามไฟฟ้าในเส้นทางการมองเห็นในระดับสายตา (E_{Los}) หรือสนามไฟฟ้าที่ได้รับจากคลื่นตรงและค่าของสนามไฟฟ้าที่สะท้อนจากพื้นดิน (E_g) ที่ระยะทาง d_o จากรูปกำหนดให้ h_t เป็นความสูงของสายอากาศส่ง และ h_r เป็นความสูงของสายอากาศรับ ดังนั้นจากกฎของการสะท้อนจะแสดงได้ดังสมการที่ (3.17)

$$\theta_i = \theta_o \quad \text{และ} \quad E_o = \Gamma E_i \quad (3.17)$$

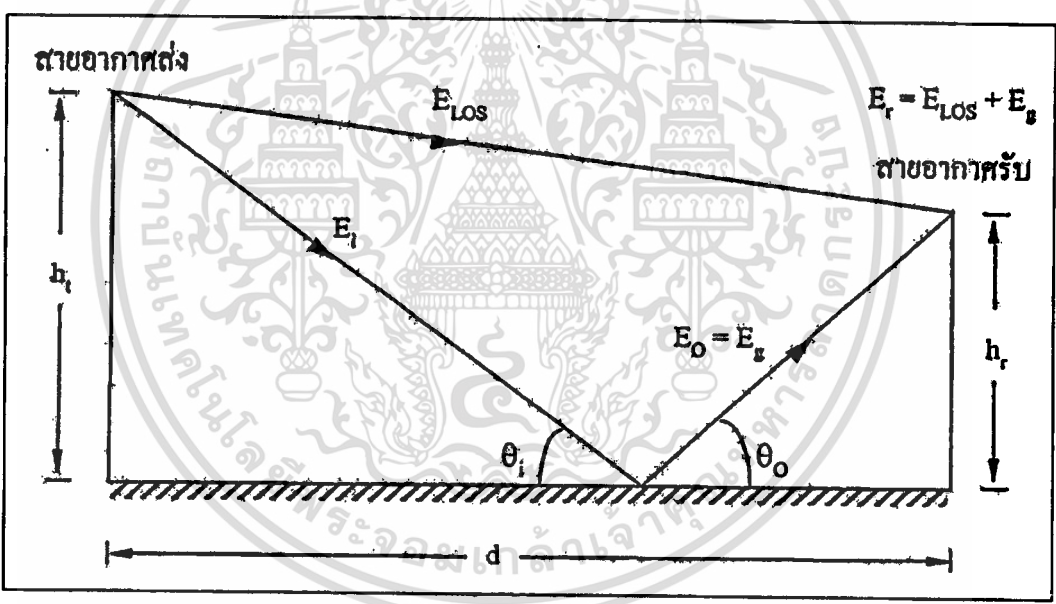
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Γ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นดิน พิจารณาในกรณีที่ระยะทางระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับมีระยะทางไกลมาก ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่ามุมตกกระทบ (θ_i) ให้มีค่าเป็น 0 องศา และคลื่นสะท้อนจะมีขนาดเท่ากับคลื่นตกกระทบ แต่จะมีความต่างเฟสเป็น 180 องศา ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการแสดงค่าสนามไฟฟ้าทั้งหมดได้ดังสมการที่ (3.18)

$$|E_r(d)| = \frac{2E_{Los}d_o}{d} \sin \frac{\theta\Delta}{2} \tag{3.18}$$

โดยค่าความต่างเฟส ($\theta\Delta$) จะสัมพันธ์กับค่าความต่างของเส้นทาง (Δ) ระหว่างเส้นทางของคลื่นตรงและคลื่นสะท้อน ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (3.19)

$$\theta\Delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \tag{3.19}$$



รูปที่ 3.3 คลื่นตรงที่เดินทางผ่านอากาศและคลื่นสะท้อนจากพื้นผิวโลก

จากรูปที่ 3.3 ถ้าระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ (d) มีค่ามาก จะสามารถประมาณได้ดังสมการที่ (3.20)

$$\sin \frac{\theta\Delta}{2} \approx \frac{\theta\Delta}{2} = \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \tag{3.20}$$

เมื่อ $\frac{\theta\Delta}{2}$ มีค่าน้อยมากๆ และค่าสนามแม่เหล็กที่รับได้ ในหน่วยโวลต์ต่อเมตร จะเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_r(d) \approx 2E_{los} \frac{2\pi h_t h_r d_o}{\lambda d^2} \approx \frac{k}{d^2} \quad (3.21)$$

โดย k เป็นค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับ E_{do} ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ที่ระยะ d_o จากสายอากาศส่ง ค่าพลังงานที่วัดได้ที่ตำแหน่ง d จะแปรผันตรงกับค่าสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง

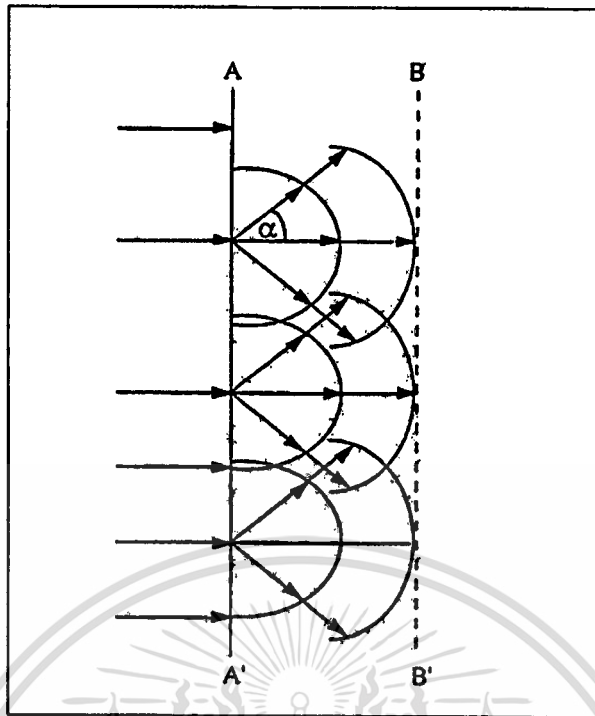
ถ้าระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีค่ามากๆ พลังงานที่ได้รับก็จะมีค่าลดลงด้วยอัตรา 40 dB/decade โดยค่าพลังงานที่ได้รับ และค่าของการลดทอนของสัญญาณจะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งสมการการลดทอนของสัญญาณจากพื้นดินในหน่วยเดซิเบล ได้ดังสมการที่ (3.22)

$$L(dB) = -10\log(G_t) - 10\log(G_r) - 20\log(h_t) - 20\log(h_r) + 40\log(d) \quad (3.22)$$

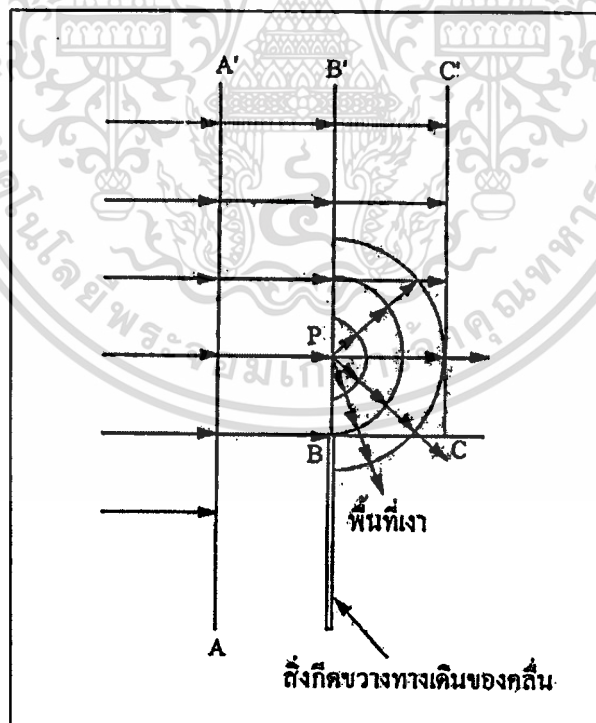
3.2.2 การหักเหของคลื่น (Diffraction)

การหักเหของคลื่น (Diffraction) จะเกิดขึ้นเมื่อมีสิ่งกีดขวางระหว่างเส้นทางการเดินทางของคลื่นระหว่างอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณ โดยพื้นผิวของสิ่งกีดขวางมีมุม หรือมีลักษณะที่ไม่เรียบ คลื่นที่มีการหักเหเนื่องจากสิ่งกีดขวาง จะมีการเคลื่อนที่ผ่านอากาศ และเคลื่อนที่บริเวณด้านหลังของสิ่งกีดขวาง (ทำให้เกิดเขตพื้นที่เงา) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การหักเหของคลื่นที่ความถี่สูง การหักเหจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของสิ่งกีดขวาง แอมพลิจูด เฟส และการโพลาไรซ์ของคลื่นที่จุดที่มีการหักเห ปรากฏการณ์ที่เกิดจากการหักเหของคลื่น สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีเบื้องต้นของฮิวเกน (Huygen's principle) ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า “ทุกๆจุดบนคลื่นวิทยุสามารถพิจารณาได้ในลักษณะเช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดคลื่นในอันดับที่สอง ซึ่งสามารถเป็นจุดกำเนิดคลื่นย่อยอื่นๆ และคลื่นย่อยต่างๆเหล่านี้ จะประกอบกันเป็นหน้าคลื่นใหม่ในเส้นทางของการแพร่กระจายคลื่น การหักเหที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่กระจายของหน้าคลื่นใหม่ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดเขตพื้นที่เงา ซึ่งค่าความหนาแน่นของคลื่นที่เกิดจากการหักเหในเขตพื้นที่เงาจะมีการรวมกันแบบเวกเตอร์ของคลื่นใหม่ที่เกิดขึ้นทั้งหมด”

จากรูปที่ 3.4 เมื่อพิจารณาที่ AA' จะเห็นว่ามีเกิดการเกิดคลื่นในแนวต่างๆที่แตกกระจายออกไปในมุม α ซึ่งมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ค่าแอมพลิจูดของคลื่นต่างๆจะมีค่าเป็น $(1 - \cos \alpha)$ แต่ในทิศทางตรงข้ามมุม α จะมีค่าเท่ากับศูนย์และมีค่าแอมพลิจูดสูงสุดคือเท่ากับ 2 ในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งมีมุม α เท่ากับ π จะมีค่าแอมพลิจูดต่ำสุด คือมีค่าเท่ากับ 1



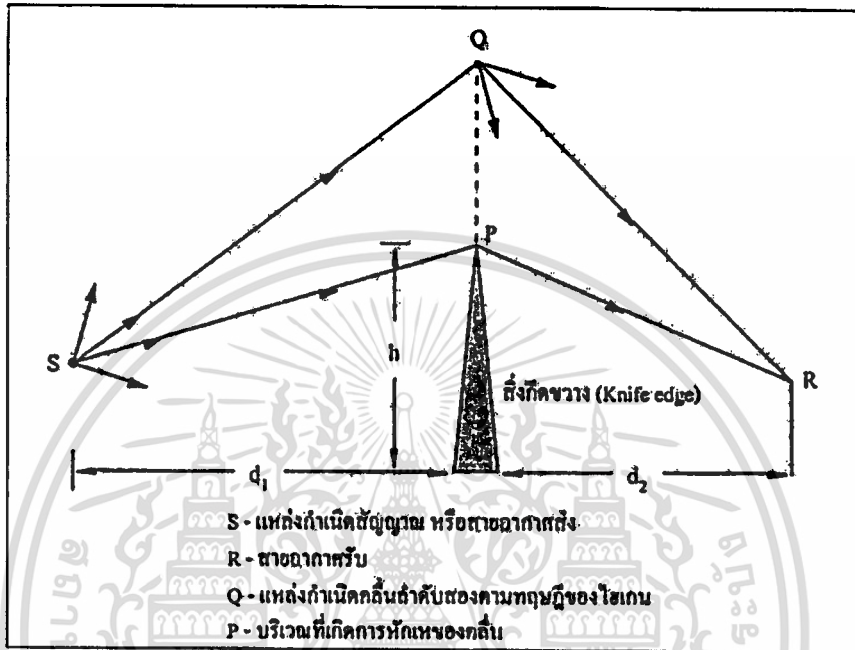
รูปที่ 3.4 หลักการของ Huygen



รูปที่ 3.5 การหักเหของคลื่นที่บริเวณส่วนปลายของสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 เมื่อมีเขตพื้นที่เงาเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากสิ่งกีดขวางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ เช่น ภูเขา หรืออาคาร สิ่งก่อสร้างต่างๆเหล่านี้ โดยให้ลักษณะของสิ่งกีดขวางเป็นเหลี่ยมแหลม และมีการหักมุม ที่มีลักษณะไม่เรียบ ซึ่งการลดทอนเนื่องจากการหักเหของคลื่นที่เกิดขึ้นบริเวณนี้ จะสามารถอธิบายด้วยหลักการของฮิวเกน



รูปที่ 3.6 แหล่งกำเนิดคลื่นในอันดับที่สองตามทฤษฎีของ Huygen

จากรูปที่ 3.6 ค่าความแรงของสนามไฟฟ้าที่จุด R ในพื้นที่เงา (จะเรียกว่าโซนการหักเห) จะเป็นผลรวมของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นในอันดับที่สองตามทฤษฎีของฮิวเกนในพื้นที่เหนือสิ่งกีดขวาง โดยค่าความแรงของสนามไฟฟ้า (E_d) ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการหักเหของคลื่นที่บริเวณสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นมุมแหลม จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.23)

$$E_d = E_0 F(\nu) \quad (3.23)$$

โดย E_0 เป็นความแรงของสนามไฟฟ้าในอากาศในบริเวณที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง และ $F(\nu)$ เป็นฟังก์ชันของค่าพารามิเตอร์การหักเหของเฟรสเนลและโคร์ชอฟฟ์ (Fresnel-Kirchoff diffraction parameter - ν) โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (3.24)

$$\nu = h\sqrt{(2/\lambda)(d_1 + d_2)/d_1 d_2} \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย h เป็นความสูงของสิ่งกีดขวาง และ d_1 และ d_2 เป็นระยะทางของสิ่งกีดขวางจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ตามลำดับ ถ้าสิ่งกีดขวางยื่นออกมาเหนือเส้นทางลากจากจุด S ไปยังจุด R โดยค่าของ h และ v จะเป็นบวก แต่ถ้าสิ่งกีดขวางมีระดับต่ำกว่าสภาวะการมองเห็นในระดับสายตา ค่าของ h และ v จะเป็นลบ และค่าอินทิกรัลของเฟรสเนลจะสามารถหาได้จากตาราง เพื่อใช้ในการหาค่า v โดยสมการการลดทอนเนื่องจากการหักเหในหน่วยเดซิเบลที่เกิดขึ้นจากสิ่งกีดขวางจะแสดงได้ดังสมการที่ (3.25)

$$L_d = 20 \log |F(v)| \quad (3.25)$$

เนื่องจากลักษณะของสมการการลดทอนเนื่องจากการหักเหที่จะนำไปหาค่าอินทิกรัลของเฟรสเนลนั้น ยากต่อการนำไปคำนวณ ดังนั้นในปี 1985 Lee จึงได้ทำการหาค่าคำตอบโดยประมาณในหน่วยของเดซิเบลไว้ดังสมการที่ (3.26) ถึงสมการที่ (3.30)

$$L_d = 0 \quad 1 \leq v \quad (3.26)$$

$$L_d = 20 \log(0.5 + 0.62v) \quad 0 \leq v \leq 1 \quad (3.27)$$

$$L_d = 20 \log(0.5 \exp(0.95v)) \quad -1 \leq v \leq 0 \quad (3.28)$$

$$L_d = 20 \log \left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.1v + 0.38)^2} \right) \quad -2.4 \leq v \leq -1 \quad (3.29)$$

$$L_d = 20 \log(-0.225/v) \quad v \geq -2.4 \quad (3.30)$$

3.2.3 การกระเจิงของคลื่น (Scattering)

การกระเจิงหรือการแตกกระจายของคลื่น (Scattering) จะเกิดขึ้นเมื่อตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน เช่น สิ่งกีดขวางต่างๆ มีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่น และจำนวนของสิ่งกีดขวางต่อหน่วยปริมาตรมีจำนวนมาก ในการวัดค่าการลดทอนของสัญญาณในสิ่งแวดล้อมของคลื่นวิทยุ จะประกอบไปด้วยค่าการลดทอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนและการหักเหของคลื่นควบคู่กัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อคลื่นวิทยุตกกระทบพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระ พลังงานสะท้อนจะมีการแตกกระจายออกไปในทุกทิศทาง ดังนั้นสิ่งกีดขวางต่างๆ เช่น ต้นไม้ เสาไฟฟ้า และพื้นผิวขรุขระต่างๆ จะได้รับพลังงานที่กระจายออกมา สำหรับพื้นผิวที่มีความขรุขระมากๆ จะใช้การทดสอบโดยหลัก

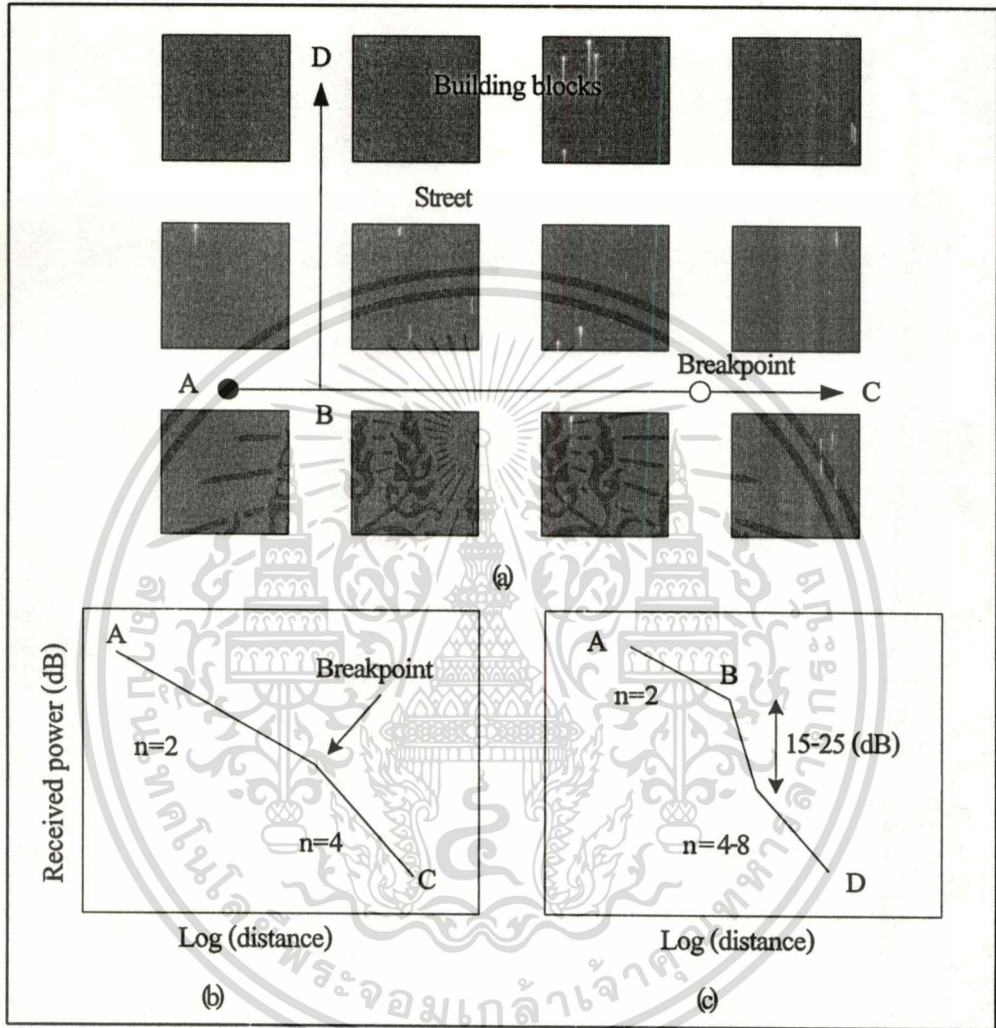
การของเรย์ลีย์ (Rayleigh criterion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 รูปแบบเส้นทางบนถนนไมโครเซลล์

การศึกษาเรื่องการแพร่กระจายคลื่นบนถนนไมโครเซลล์นั้นจะสมมติให้ถนนเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีจุดตัดกันด้วยบล็อกของอาคารดังรูปที่ 3.7 (a)



รูปที่ 3.7 (a) รูปแบบของถนนไมโครเซลล์ในเขตพื้นที่เมือง

(b) ลักษณะกราฟของ Path Loss บนเส้นทาง LOS

(c) ลักษณะกราฟของ Path Loss บนเส้นทาง NLOS

ซึ่งจากรูปที่ 3.7 (b) นั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นกราฟจะมีหนึ่งจุดหักเห (Breakpoint) และมีสองความชันที่ต่างกันเมื่อ Path Loss ใน Free Space จะกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 2 จากเครื่องส่งไปยังจุดหักเหโดยหลังจากจุดหักเหแล้วค่าของ n อาจจะประมาณเท่ากับ 4 ส่วนรูปที่ 3.7 (c) เมื่อเครื่องรับเลี้ยวตรงมุมจากถนนเส้นทาง LOS ไปยังเส้นทาง NLOS แล้วกำลังที่รับได้จะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างทันทีทันใดที่ค่าประมาณ 20 dB ซึ่งค่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงได้เมื่อความกว้างของถนนและระยะทางระหว่างเครื่องส่งและรับต่างกัน [3, 9]

3.4 วิธีการหาค่าสูญเสียของสัญญาณ

วิธีการหาค่าการลดทอนของสัญญาณในระบบการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ จะสามารถอธิบายได้ 2 ลักษณะ อันได้แก่ การอธิบายโดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ (Analytical Method) การลดทอนของสัญญาณและการอธิบายโดยวิธีการสังเกต (Empirical Method) โดยสามารถนำมาใช้ในการอธิบายร่วมกันได้ ซึ่งการอธิบายโดยการสังเกต จะใช้หลักการที่เรียกว่า “Fitting curves” และการอธิบายโดยวิธีการวิเคราะห์ จะสามารถทำได้โดยการวัดระดับความแรงของสัญญาณ และทำการรวบรวมไว้เป็นข้อมูลทางสถิติ หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลทางสถิตินำมาวิเคราะห์ เมื่อนำทั้งสองวิธีมารวมกัน ก็สามารถที่จะหาค่าแฟคเตอร์เบื้องต้นของการลดทอนของสัญญาณได้

3.4.1 วิธีการของ HATA สำหรับเซลล์ขนาดเล็ก

วิธีการหาสมการการลดทอนของ Hata ได้ทำการพัฒนาจากวิธีการของ Okumura เพื่อให้ทำการคำนวณหาค่าการลดทอนของสัญญาณได้ง่ายขึ้น ถึงแม้ว่ากราฟของ Okumura จะสามารถใช้งานได้จริงในภาคปฏิบัติและมีประสิทธิภาพสูงเมื่อทำการออกแบบระบบ แต่ยังมีความยุ่งยากซับซ้อนในการเขียนโปรแกรมออกแบบระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแฟคเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ดังนั้น Hata จึงได้ทำการแก้ไขค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากกราฟให้มาอยู่ในรูปของสมการลือกการที่

$$L(dB) = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_t - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log d + C_M \tag{3.31}$$

- โดย f เป็นความถี่ที่ใช้งาน
- d เป็นระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ
- h_t เป็นความสูงของสายอากาศส่งที่สถานีฐาน
- h_m เป็นความสูงของสายอากาศรับที่ตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่
- C_M มีค่าเท่ากับ 0 dB สำหรับเมืองที่มีขนาดเล็กและบริเวณปริมณฑล และมีค่าเป็น 3 ภายในตัวเมือง
- $a(h_m)$ เป็นแฟคเตอร์สำหรับแก้ไขค่าความสูงของสายอากาศของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่เทียบกับสถานะพื้นฐานที่เป็นเขตพื้นที่ในเมือง

ในเมืองขนาดเล็กและขนาดกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเอกสารฉบับนี้เท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น (3.32) คำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเมืองขนาดใหญ่

$$a(h_m) = 8.29[\log(1.54 h_m)^2] - 1.1 \quad f \leq 200 \text{ MHz} \quad (3.33)$$

$$a(h_m) = 3.2[\log(11.75 h_m)^2] - 4.97 \quad f \leq 400 \text{ MHz} \quad (3.34)$$

3.4.2 วิธีการของ COST-231/Walfish/Ikegami

วิธีการของ COST-231/Walfish/Ikegami เป็นวิธีหาค่าสมการการลดทอนที่ใช้อาศัยทั้งการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งรูปแบบของสมการการลดทอนของสัญญาณจะประกอบไปด้วยค่าการลดทอนผ่านสูญญากาศ การลดทอนเนื่องจากการหักเห และการลดทอนเนื่องจากระดับความสูงที่แตกต่างกันระหว่างหลังคาของอาคารสิ่งกีดขวางรอบๆตัวเครื่องโทรศัพท์ โดยวิธีการดังกล่าวได้พัฒนามาจากวิธีการของ Walfish วิธีการของ Bertoni และวิธีการของ Ikegami ซึ่งได้มีการทดลองเพิ่มเติมและเปรียบเทียบกับค่าระดับของสัญญาณที่วัดได้จริงในตัวเมือง โดยมีสถานะเบื้องต้น ดังนี้

1. ความถี่ใช้งานอยู่ในช่วง 800 MHz ถึง 2000 MHz
2. ความสูงของสายอากาศส่ง (H_b) 4 ถึง 50 เมตร
3. ความสูงของสายอากาศรับหรือตัวเครื่องโทรศัพท์ (H_m) 1 ถึง 3 เมตร
4. ระยะทาง (d) 0.02 กิโลเมตรถึง 5 กิโลเมตร
5. กำหนดให้ความสูงของหลังคาตึกเป็น H_{roof} มีหน่วยเป็นเมตร
6. กำหนดให้ความกว้างของถนนเป็น w มีหน่วยเป็นเมตร
7. กำหนดให้ระยะห่างระหว่างตึกเป็น b มีหน่วยเป็นเมตร
8. กำหนดให้การจัดเรียงของถนนตามเส้นทางของคลื่นในแนวระดับเป็น Φ

วิธีการของ COST-231/Walfish/Ikegami ประกอบด้วยสมการการลดทอนของสัญญาณใน 2 เส้นทางคือเส้นทางการมองเห็นในระดับสายตาและเส้นทางที่มีสิ่งกีดขวางบดบัง ซึ่งสมการการลดทอนของสัญญาณสำหรับเส้นทางที่มีสิ่งกีดขวาง จะแสดงดังสมการที่ (3.35)

$$L_b = L_f + L_{rst} + L_{msd} \quad (3.35)$$

โดย L_f เป็นการลดทอนของสัญญาณเมื่อผ่านอากาศ มีค่าดังสมการที่ (3.36)

$$L_f = 32.45 + 20 \log d + 20 \log f \quad (3.36)$$

L_{rst} เป็นการลดทอนของสัญญาณจากการหักเหและการกระเจิงจากหลังคาตึก

$$L_{rst} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log(H_r - H_m) + L_{ct} \quad (3.37)$$

L_{ct} เป็นการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการจัดเรียงของถนน

$$L_{ct} = -10 + 0.35 \phi_i \quad 0 \leq \phi_i \leq 35 \text{ องศา} \quad (3.38)$$

$$L_{ct} = 205 + 0.075(\phi_i - 35) \quad 35 \leq \phi_i \leq 55 \text{ องศา} \quad (3.39)$$

$$L_{ct} = 4 + 0.114(\phi_i - 55) \quad 55 \leq \phi_i \leq 90 \text{ องศา} \quad (3.40)$$

L_{msd} เป็นการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการหักเหของหลายๆหน้าคลื่น (Multiscreen diffraction loss ซึ่งเป็นวิธีของ Walfish) แสดงดังสมการ

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_d + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (3.41)$$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + H_b - H_{roof}) \quad H_b > H_{roof} \quad (3.42)$$

$$L_{bsh} = 0 \quad H_b \leq H_{roof} \quad (3.43)$$

$$k_a = 54 \quad H_b > H_{roof} \quad (3.44)$$

$$k_a = 54 - 0.8(H_b - H_{roof}) \quad d \geq 0.5 \text{ และ } H_b \leq H_{roof} \quad (3.45)$$

$$k_a = 54 - 0.8(H_b - H_{roof})(d/0.5) \quad d < 0.5 \text{ และ } H_b \leq H_{roof} \quad (3.46)$$

$$k_d = 18 \quad H_b > H_{roof} \quad (3.47)$$

$$k_d = 18 - 15(H_b - H_{roof})/H_{roof} \quad H_b \leq H_{roof} \quad (3.48)$$

$$k_f = -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (3.49)$$

สำหรับตัวเมืองขนาดเล็กและบริเวณศูนย์กลางปริมณฑลที่มีต้นไม้พุ่มประมาณ

$$k_f = -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (3.50)$$

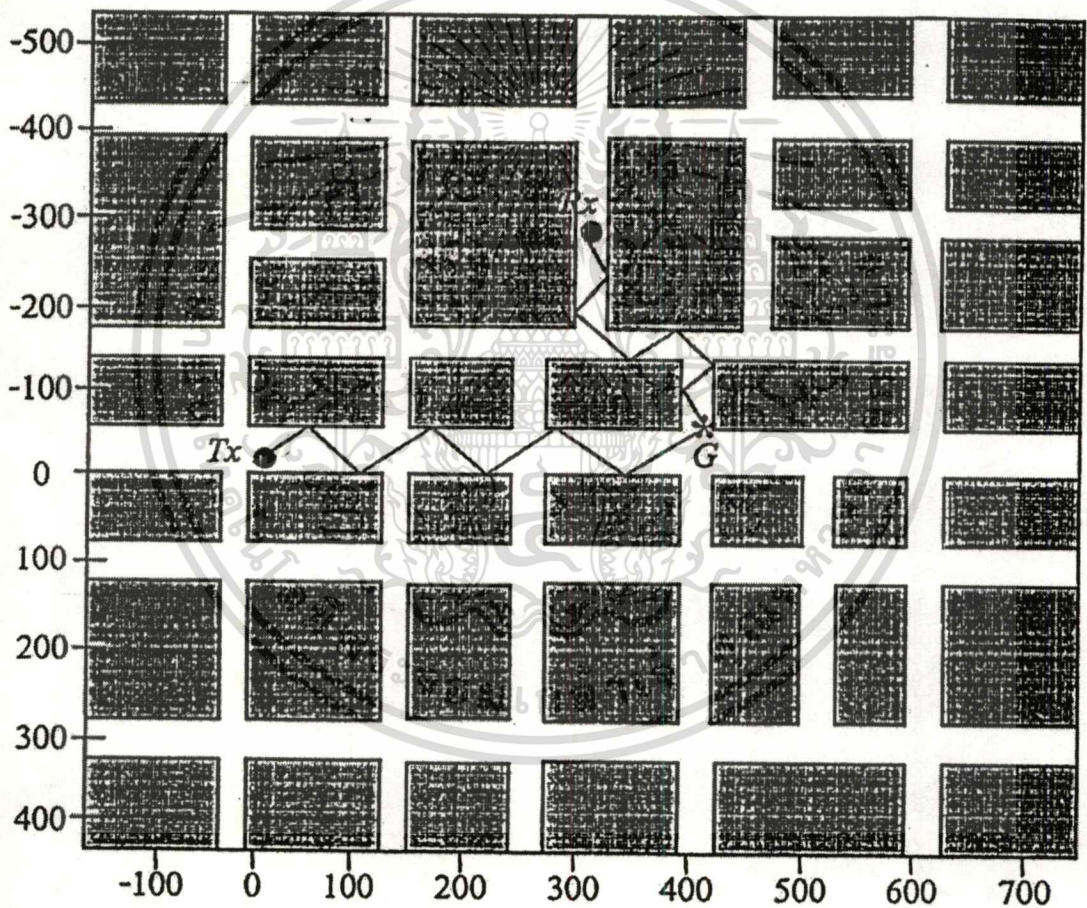
สำหรับศูนย์กลางของตัวเมือง

ในเส้นทางการมองเห็นในระดับสายตา จะมีสมการการลดทอนของสัญญาณ ดังนี้

$$L_{LOS} = 42.6 + 26 \log d + 20 \log f \quad (3.51)$$

3.4.3 วิธีการหาการลดทอนของสัญญาณโดยใช้หลักการ Ray tracing หลักการอิมเมจ และหลักการ UTD

ในรูปที่ 3.8 จะแสดงเส้นทางการเดินทางของคลื่นที่ได้กำหนดขึ้น โดยตำแหน่งของสายอากาศส่งสัญญาณ (T_x) จะติดตั้งไว้ที่ความสูง h_t เมตรเหนือพื้นผิวดินและมีระยะห่างจากผนังตึกที่ใกล้ที่สุดเป็น (x_0) เมตร ส่วนสายอากาศรับสัญญาณหรือตัวเครื่องโทรศัพท์ (R_x) จะมีความสูงเป็น h_r เมตรเหนือพื้นผิวดิน โดยตำแหน่งของ R_x จะมีการเคลื่อนที่ไปตามถนนสายหลักและถนนสายรองที่ตั้งฉากและขนานกับถนนสายหลัก ซึ่งตำแหน่งต่างๆ จะประกอบด้วยค่าแอมพลิจูดตามแนวตั้งและค่าเฟสของค่าความแรงของสัญญาณจะนำไปหาค่ากำลังงานของสัญญาณ [9]



รูปที่ 3.8 เส้นทางการเดินทางของคลื่น

โดยคลื่นจะเดินทางผ่านเส้นทางที่เกิดการสะท้อนเนื่องจากพื้นผิวดินเพียงครั้งเดียว กำหนดให้ $T_1, T_2, T_3, \dots, T_i, T_i^G, T_{i+1}, \dots, T_j$ เป็นจุดอิมเมจ อันเนื่องมาจากการเกิดการสะท้อนจากเส้นทางการเดินทางของสัญญาณ โดยสัญลักษณ์ตัวห้อยจะแสดงให้เห็นว่าจุดอิมเมจเกิดขึ้นเป็นครั้งที่ 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ตามลำดับต่อไปเรื่อยๆ และ T_I^G จะแสดงจุดอิมเมจอันเนื่องมาจากการสะท้อนของพื้นผิวฉนวนหลังจากที่มีการสะท้อนจากผนังมาแล้ว / ครั้งจาก T_X

กำหนดให้ใช้สัญลักษณ์

$$T_m = [X_m, Y_m, h_t] \quad \text{สำหรับ } m \leq I \text{ และ } T_I^G = [X_I, Y_I, -h_t]$$

และ $T_m = [X_m, Y_m - h_t] \quad \text{สำหรับ } m = I+1, I+2, \dots, j$

เมื่อ j เป็นจำนวนครั้งที่เกิดการสะท้อนจากผนัง

$[X_m, Y_m]$ เป็นตำแหน่งของอิมเมจบนแผนที่ซึ่งหาได้โดยใช้หลักการอิมเมจ

ในการหา $T_1, T_2, T_3, \dots, T_I, T_I^G, T_{I+1}, \dots, T_j$ จากตำแหน่ง $[X_m, Y_m]$ เราจะต้องทำการอธิบายลำดับการสะท้อน เช่น ตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งที่เกิดการสะท้อน อันเนื่องมาจากพื้นผิวฉนวน เป็นต้น ซึ่งจุดอิมเมจ $T_1, T_2, T_3, \dots, T_I, T_I^G, T_{I+1}, \dots, T_j$ ต่างๆเหล่านี้ เป็นจุดอิมเมจที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นเดียวกันสำหรับการสะท้อนหลายๆครั้งที่ผนังและพื้นผิวฉนวน

สำหรับการหักเหที่เกิดขึ้นบริเวณมุมตึก สามารถอธิบายได้ด้วยรัศมีการสะท้อนหลายๆครั้ง ก่อนที่เกิดการหักเหที่จุด Bc จากกฎการหักเห เมื่อคลื่นตกกระทบสิ่งกีดขวาง จะทำให้เกิดการหักเห และคลื่นใหม่ที่เกิดขึ้นก็มีจำนวนมากเป็นอนันต์ ซึ่งการเดินทางของคลื่นที่เกิดขึ้นเหล่านี้ไปยัง R_X จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของ R_X ซึ่งมีความสัมพันธ์ T_j และ Bc จุดที่เกิดการหักเหอย่างแท้จริง หรือจุด Q_e ที่มุมตึก Bc จะสามารถอธิบายได้โดยการใช้ทฤษฎีเบื้องต้นของ Fermat

ในกรณีที่มีการหักเหของคลื่นเกิดขึ้นระหว่างจุด S หรือจุดอิมเมจ T_j และจุด P หรือ R_X เมื่อลากเส้นระหว่าง 2 จุดแล้วจะได้เส้นโค้งที่มีจุดหักเหอยู่ที่บริเวณที่มีการหักเหของคลื่น กำหนดให้ $Q_e = [X_e, Y_e, Z_e]$ โดย Z_e เป็นตัวแปรในการอธิบายความสูงของตำแหน่งที่มีการหักเหบริเวณ Bc ค่าของ X_e และ Y_e จะรู้ได้โดยการบอกตำแหน่งของ Bc สำหรับค่า Z_e สามารถอธิบายได้โดยการเขียนระยะห่างระหว่างจุด S และจุด P ด้วยจุดเพียงจุดเดียวบน Bc ในเทอมของ Z_e เช่น $D_{SP}(Z_e) = S Q_e(Z_e) + Q_e P(Z_e)$ โดยค่าราก (Derivative) ของ D_{SP} ที่สัมพันธ์กับ Z_e มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจึงสามารถหาค่าของ Z_e ได้ ในทางกลับกันจุดที่เกิดการหักเห Q_e ก็สามารถหาได้โดยกฎของการหักเห สำหรับลำดับย่อยของการสะท้อนที่เกิดจากผนังและพื้นผิวฉนวน หลังจากการหักเหจะใช้ทฤษฎีเบื้องต้นของ Fermat ในการอธิบายจุดที่เกิดการสะท้อนและหักเห

อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบของการสะท้อนและการหักเห จะใช้อธิบายระดับความแรงของสัญญาณที่เกิดขึ้นในถนนรองที่ตั้งฉากและขนานกับถนนสายหลัก เราพบว่าองค์ประกอบของการสะท้อนและการหักเหจะขึ้นอยู่กับ ระยะห่างระหว่างสาขาอากาศส่งกับสี่แยกของถนน นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับความกว้างของถนนสายหลักและถนนสายรองทั้งที่ตั้งฉากและขนานกับถนนสายหลัก ประโยชน์ของหลักการอิมเมจ คือ สามารถที่จะอธิบายจุดที่เกิดการสะท้อนที่แท้จริงบริเวณผนังและ

พื้นผิวนอน ในกรณีที่เป็นกรหักเหตำแหน่งของจุดที่มีการหักเหจะอยู่บริเวณขอบของสิ่งกีดขวาง สำหรับการสะท้อนหรือการหักเหที่เกิดขึ้นที่จุด Q กำลังงานของคลื่นตกกระทบ $E'(Q)$ จะก่อให้เกิดกำลังงาน $E^{r,d}(s)$ ที่จุด S เมื่อ

$$E^{r,d}(s) = E'(Q)H(Q,S)e^{-jks} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} H(Q,S) &= R.A_s && \text{สำหรับการสะท้อน} \\ H(Q,S) &= D.A_d && \text{สำหรับการหักเห} \end{aligned} \quad (3.54)$$

โดย R เป็นสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนทั้งแนวตั้งและแนวนอน

$$E^r(s) = E'(Q)R.A_s(s)e^{-jks} \quad (3.55)$$

$$R = R_h e^j |e^j| + R_v e^j \|e^j\| \quad (3.56)$$

A_s เป็นแฟคเตอร์การแพร่กระจายสำหรับการสะท้อนจากพื้นผิว
 k เป็นค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น มีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$
 s เป็นระยะทางจากจุด Q ไปยังจุด S
 λ เป็นความยาวคลื่น

$$A_s(s) = \frac{\rho}{s + \rho} \quad (3.57)$$

$$R_h(\phi, \varepsilon) = \frac{\sin(\phi) - \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\phi)}}{\sin(\phi) + \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\phi)}} \quad (3.58)$$

$$R_v(\phi, \varepsilon) = \frac{\varepsilon \sin(\phi) - \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\phi)}}{\varepsilon \sin(\phi) + \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\phi)}} \quad (3.59)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r - j60\sigma\lambda \quad (3.60)$$

ρ เป็นรัศมีของเส้นโค้งของหน้าคลื่นที่มีการสะท้อน

$$E^d(s) = E'(Q)D.A_d(s)e^{-jks} \quad (3.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A_d เป็นแฟคเตอร์การแพร่กระจายสำหรับการหักเหที่ขอบสิ่งกีดขวาง

$$A_d = \sqrt{\frac{\rho}{s(\rho + s)}} \quad (3.62)$$

D เป็นสัมประสิทธิ์ของการหักเหทั้งแนวตั้งและแนวนอน

$$D = -D_h \beta'_0 \beta_0 - D_v \phi' \phi \quad (3.63)$$

$$D_{v,h}(L, \phi, \phi', \beta_0, n) = D_1 + D_2 + R_{v,h}(D_3 + D_4) \quad (3.64)$$

$$D_1 = \frac{-e^{-j(\pi/4)}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin(\beta_0)} \cot\left[\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n}\right] F[kLa + (\phi - \phi')] \quad (3.65)$$

$$D_2 = \frac{-e^{-j(\pi/4)}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin(\beta_0)} \cot\left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n}\right] F[kLa - (\phi - \phi')] \quad (3.66)$$

$$D_3 = \frac{-e^{-j(\pi/4)}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin(\beta_0)} \cot\left[\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n}\right] F[kLa + (\phi + \phi')] \quad (3.67)$$

$$D_4 = \frac{-e^{-j(\pi/4)}}{2n\sqrt{2\pi k} \sin(\beta_0)} \cot\left[\frac{\pi - (\phi + \phi')}{2n}\right] F[kLa - (\phi + \phi')] \quad (3.68)$$

$$L = \left(\frac{s s'}{s + s'}\right) \sin^2(\beta_0) \quad (3.69)$$

s เป็นระยะทางจากจุด Q ไปยังจุด S

s' เป็นระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปยังจุด Q

$$F(x) = 2j\sqrt{x} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-j u^2} du \quad (3.70)$$

$$F(x) = F^*(|x|) \quad \text{เมื่อ } x < 0 \quad (3.71)$$

$$a^\pm(\beta^\pm) = 2 \cos^2\left(\frac{2\pi n N + -\beta^\pm}{2}\right) \quad (3.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta^\pm = \phi \pm \phi' \quad (3.73)$$

$N^\pm$ เป็นอินทิกรัลที่เป็นไปดังสมการดังสมการที่ (3.74)

$$\begin{aligned} 2\pi n N^+ - (\phi \pm \phi') &= \pi \\ 2\pi n N^- - (\phi \pm \phi') &= -\pi \end{aligned} \quad (3.74)$$

โดย $n = \frac{2\pi - \alpha}{\pi}$ และ $\alpha = \frac{\pi}{2}$

สายอากาศส่งและรับสัญญาณ เป็นสายอากาศแบบไดโพลซึ่งมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นและการโพลาไรซ์ คือ $E_i \sin(\theta) \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) \theta$ โดยกำลังงานที่รับได้ จะแสดงดังสมการ

$$P_r = A S = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \left| \frac{E_r}{Z_0} \right|^2 = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 \quad (3.75)$$

เมื่อ

$$E_i = \sqrt{(\eta_0 / 4\pi) P_t G_t}$$

$$\eta_0 = \sqrt{\mu / \epsilon} \approx 120\pi \quad \text{เป็นค่าความต้านทาน}$$

$P_{t,r}$ เป็นกำลังงานในการส่งและรับสัญญาณ ตามลำดับ

$G_{t,r}$ เป็นค่าเกนหรือกำลังขยายในการส่งและรับสัญญาณ ตามลำดับ

A แอมพลิจูดของสายอากาศ

S ความหนาแน่นของกำลังงาน

E_r สนามไฟฟ้าที่ตัวรับสัญญาณ R_x

θ มุมโพลาไรซ์

$\sin(\theta)$ เป็นรูปแบบของสายอากาศ

ดังนั้น ค่าการลดทอนของสัญญาณจะสามารถหาได้จากสมการดังสมการที่ (3.76)

$$L = \frac{P_r}{P_t G_t G_r} = 20 \log \left| \frac{\lambda}{4\pi G_t G_r} \cdot \frac{E_r}{E_i} \right| \quad (3.76)$$

3.4.4 วิธีการของ C.Y. Lee

วิธีการหาค่าสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นโดยอาศัยการคาดคะเนแบบจุดต่อจุดจะสามารถทำได้ด้วยการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละจุดเทียบกับระยะทางในพื้นที่ต่างๆแล้วหาค่าระดับกำลังงานของสัญญาณที่มีการลดลงหรือค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางในลักษณะของฟังก์ชันเชิงเส้นด้วยการใช้ สเกลล็อกการิทึม (Log-normal distribution) ในหน่วย dB โดยกำลังของ d ที่ลำดับ n จะมีความสัมพันธ์ที่อ้างอิงกับระยะทาง (d_0) ซึ่งก็คือ รัศมีการแพร่กระจายคลื่นสำหรับไมโครเซลล์ ที่มีค่าเท่ากับ 100 เมตรเมื่อค่าของ n จะเท่ากับ 2 ในเส้นทางแนวระดับสายตาและเส้นทางนอกแนวระดับสายตาเท่ากับ 3 ถึง 4 โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระยะทาง [10] จะแสดงได้ดังนี้

$$\overline{L}_p(d) = \frac{d^n}{do} \quad (3.77)$$

$$\overline{L}_p(d) = L_s(do) + 10n \log\left(\frac{d}{do}\right) \quad (3.78)$$

$$L_s(do) = \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot do}{\lambda} \right]^2 \quad (3.79)$$

โดย $\overline{L}_p(d)$ คือ ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณที่ระยะทางใดๆ มีหน่วยเป็นเดซิเบล $L_s(do)$ คือ การสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณที่ระยะทางอ้างอิง (do) และค่า n คือ ค่าความชันของการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณ ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันออกไปตามสภาพแวดล้อมของการแพร่กระจายคลื่น ดังแสดงในตารางที่ 3.1 [3]

ตารางที่ 3.1 ความชันของสมการการลดทอนสำหรับสภาพแวดล้อมในพื้นที่ต่างๆ

สภาพแวดล้อม	ความชันของสมการการลดทอน
ในอากาศ	2
พื้นที่เขตตัวเมือง	2.7-3.5
พื้นที่เงาในเขตตัวเมือง	3-5
ภายในอาคารสำหรับการมองเห็นในระดับสายตา	1.6-1.8

บทที่ 4

การหาค่าเบี่ยงเบนการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคารจาก การแพร่กระจายคลื่นเซลลูลาร์บนเส้นทางไมโครเซลล์

ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ที่มีการวางเซลล์ในรูปแบบไมโครเซลล์นั้นจะทำการติดตั้งสถานีฐานในบริเวณใจกลางเมืองที่มีลักษณะพื้นที่เป็น ตรอก ซอย หรือทางเดินเท้า และพื้นที่ที่ต้องการเจาะจงขอบเขตพื้นที่ให้บริการโดยมีปริมาณของทราฟฟิกที่หนาแน่น ซึ่งสายอากาศจะทำการติดตั้งบนเสา Pole หรือผนังของอาคารที่สูงจากพื้นประมาณ 4-6 เมตร ดังนั้นค่าการสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นจะเกิดขึ้นตลอดเส้นทาง LOS และ NLOS ซึ่งการคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นจะช่วยให้การออกแบบหรือติดตั้งสถานีฐานอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมมีระดับสัญญาณที่ดี โดยการคาดคะเนจะใช้โมเดลทางสถิติที่ใช้ ค่าเฉลี่ย (Mean) ด้วยการเก็บข้อมูลจากการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณเพื่อหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std : Standard Deviation) และค่าลดทอนจากมุมอาคาร (Ac : Corner Attenuation) แล้วจึงนำไปใช้เป็นค่าแฟคเตอร์ร่วมกับสมการ Free space loss สำหรับการคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้น

4.1 หลักการวัด และวิเคราะห์ข้อมูล

4.1.1 หลักการวัด

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวัดค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่บริเวณช้อปปิ้งเซ็นเตอร์ ย่านถนนสยามสแควร์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดดังรูปที่ 4.1 จะประกอบด้วยชุดเครื่องส่ง (TTM : Test and Transmitter), เครื่องรับ (MS : Mobile Station) และระบบสายอากาศ (Antenna System) ซึ่ง TTM จะส่งผ่านคลื่นด้วยกำลังส่ง 33 dBm เมื่อใช้สายอากาศชนิด Omni-directional แบบ $\lambda/2$ ด้วยอัตราขยาย 2 dBi ที่ย่านความถี่ 900 MHz โดยจะใช้ช่องสัญญาณหมายเลข 33 ที่มีความถี่ทางด้านส่งเท่ากับ 941.600 MHz และความถี่ทางด้านรับเท่ากับ 896.600 MHz ดังตารางที่ 4.1 และชุด MS จะใช้สายอากาศชนิดเดียวกันนี้ที่อัตราขยาย 1 dBi [11] สายอากาศและชุด TTM จะติดตั้งตรงตำแหน่งต่างๆในเส้นทาง LOS ทั้งหมด 6 ตำแหน่ง โดยความสูงของสายอากาศเครื่องส่งเท่ากับ 5 เมตรและชุด MS สูง 1.50 เมตร ซึ่งสายอากาศ TTM จะต่อเข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ ด้วยสายเคเบิลนำสัญญาณที่มีความยาว 7 เมตรโดยมีค่าสูญเสียของการนำสัญญาณเท่ากับ 1 dB

ตารางที่ 4.1 ความถี่ที่ใช้ทางด้านส่งและรับของระบบ GSM ย่าน 900 MHz

Channel number	Downlink TX	Uplink RX	Channel number	Downlink TX	Uplink RX
1	935.200	890.200	29	940.800	895.800
2	935.400	890.400	30	941.000	896.000
3	935.600	890.600	31	941.200	896.200
4	935.800	890.800	32	941.400	896.400
5	936.000	891.000	33	941.600	896.600
6	936.200	891.200	34	941.800	896.800
7	936.400	891.400	35	942.000	897.000
8	936.600	891.600	36	942.200	897.200
9	936.800	891.800	37	942.400	897.400
10	937.000	892.000	38	942.600	897.600
11	937.200	892.200	39	942.800	897.800
12	937.400	892.400	40	943.000	898.000
13	937.600	892.600	41	943.200	898.200
14	937.800	892.800	42	943.400	898.400
15	938.000	893.000	43	943.600	898.600
16	938.200	893.200	44	943.800	898.800
17	938.400	893.400	45	944.00	899.000
18	938.600	893.600	46	944.200	899.200
19	938.800	893.800	47	944.400	899.400
20	939.000	894.000	48	944.600	899.600
21	939.200	894.200	49	944.800	899.800
22	939.400	894.400	50	945.000	900.000
23	939.600	894.600	51	945.200	900.200
24	939.800	894.800	52	945.400	900.400
25	940.000	895.000	53	945.600	900.600
26	940.200	895.200	54	945.800	900.800
27	940.400	895.400	55	946.000	901.000
28	940.600	895.600	56	946.200	901.200

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Channel number	Downlink TX	Uplink RX	Channel number	Downlink TX	Uplink RX
57	946.400	901.400	85	952.000	907.000
58	946.600	901.600	86	952.200	907.200
59	946.800	901.800	87	952.400	907.400
60	947.000	902.000	88	952.600	907.600
61	947.200	902.200	89	952.800	907.800
62	947.400	902.400	90	953.000	908.000
63	947.600	902.600	91	953.200	908.200
64	947.800	902.800	92	953.400	908.400
65	948.000	903.000	93	953.600	908.600
66	948.200	903.200	94	953.800	908.800
67	948.400	903.400	95	954.000	909.000
68	948.600	903.600	96	954.200	909.200
69	948.800	903.800	97	954.400	909.400
70	949.000	904.000	98	954.600	909.600
71	949.200	904.200	99	954.800	909.800
72	949.400	904.400	100	955.000	910.000
73	949.600	904.600	101	955.200	910.200
74	949.800	904.800	102	955.400	910.400
75	950.000	905.000	103	955.600	910.600
76	950.200	905.200	104	955.800	910.800
77	950.400	905.400	105	956.000	911.000
78	950.600	905.600	106	956.200	911.200
79	950.800	905.800	107	956.400	911.400
80	951.000	906.000	108	956.600	911.600
81	951.200	906.200	109	956.800	911.800
82	951.400	906.400	110	957.000	912.000
83	951.600	906.600	111	957.200	912.200
84	951.800	906.800	112	957.400	912.400

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Channel number	Downlink TX	Uplink RX	Channel number	Downlink TX	Uplink RX
113	957.600	912.600	119	958.800	913.800
114	957.800	912.800	120	959.000	914.000
115	958.000	913.000	121	959.200	914.200
116	958.200	913.200	122	959.400	914.400
117	958.400	913.400	123	959.600	914.600
118	958.600	913.600	124	959.800	914.800

การวัดตำแหน่งที่ 1 (Loc.1 : Location 1) จะกำหนดให้เส้นทางในแนว LOS คือ เส้นทาง A ที่ระยะทาง d1 เท่ากับ 300 เมตร และเส้นทาง NLOS มีทั้งหมด 7 เส้นทาง คือ เส้นทาง B, C, D, E, F, G และ H ที่ระยะทาง d1+d2 เท่ากับ 206, 205, 261, 348, 270, 420 และ 349 เมตร ดังรูปที่ 4.2

การวัดตำแหน่งที่ 2 (Loc.2 : Location 2) จะกำหนดให้เส้นทางในแนว LOS คือ เส้นทาง I ที่ระยะทาง d1 เท่ากับ 120 เมตร และเส้นทาง NLOS มีทั้งหมด 5 เส้นทาง คือ เส้นทาง J, K, L, M และ N ที่ระยะทาง d1+d2 เท่ากับ 240, 295, 243, 327 และ 329 เมตร ดังรูปที่ 4.3

การวัดตำแหน่งที่ 3 (Loc.3 : Location 3) จะกำหนดให้เส้นทางในแนว LOS คือ เส้นทาง O ที่ระยะทาง d1 เท่ากับ 299 เมตร และเส้นทาง NLOS มีทั้งหมด 3 เส้นทาง คือ เส้นทาง P, Q และ R ที่ระยะทาง d1+d2 เท่ากับ 295, 320 และ 479 เมตร ดังรูปที่ 4.4

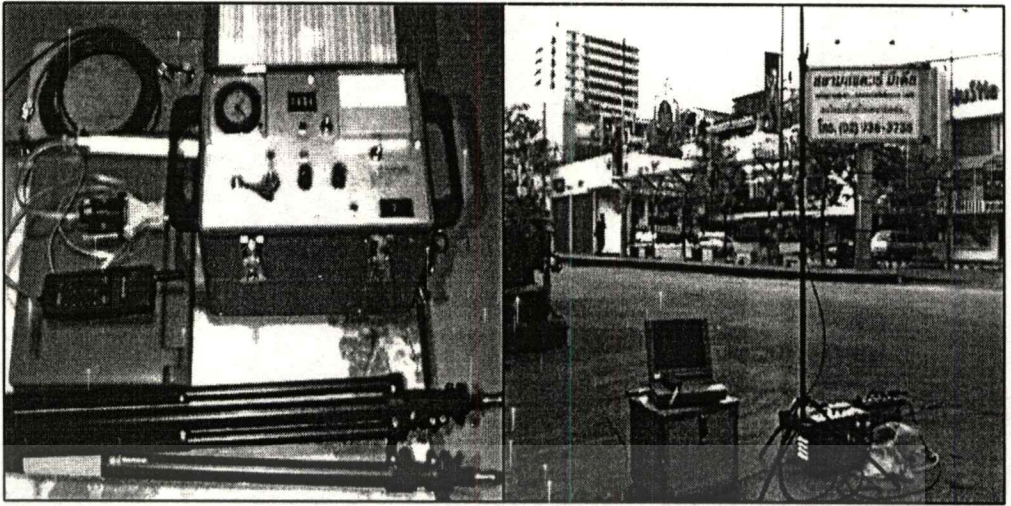
การวัดตำแหน่งที่ 4 (Loc.4 : Location 4) จะกำหนดให้เส้นทางในแนว LOS คือ เส้นทาง S ที่ระยะทาง d1 เท่ากับ 50 เมตร และเส้นทาง NLOS มีทั้งหมด 3 เส้นทาง คือ เส้นทาง T, U และ V ที่ระยะทาง d1+d2 เท่ากับ 150, 326 และ 280 เมตร ดังรูปที่ 4.5

การวัดตำแหน่งที่ 5 (Loc.5 : Location 5) จะกำหนดให้เส้นทางในแนว LOS คือ เส้นทาง W และ X ที่ระยะทาง d1 เท่ากับ 133 และ 168 เมตร และเส้นทาง NLOS มีทั้งหมด 2 เส้นทาง คือ เส้นทาง Y และ Z ที่ระยะทาง d1+d2 เท่ากับ 192 และ 268 เมตร ดังรูปที่ 4.6

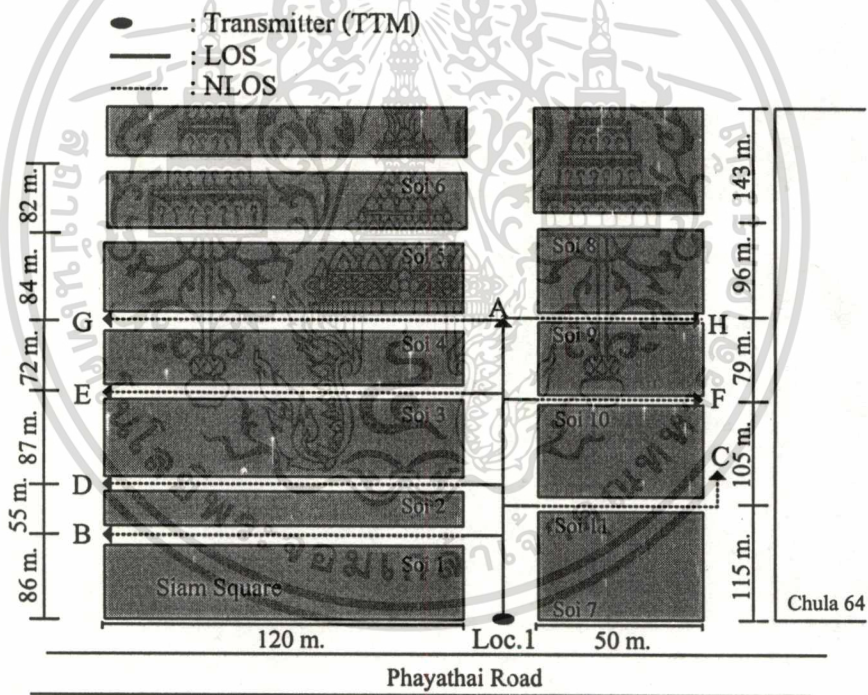
การวัดตำแหน่งที่ 6 (Loc.6 : Location 6) จะกำหนดให้เส้นทางในแนว LOS คือ เส้นทาง A0 ที่ระยะทาง d1 เท่ากับ 193 เมตร และเส้นทาง NLOS มีทั้งหมด 3 เส้นทาง คือ เส้นทาง B0, C0 และ D0 ที่ระยะทาง d1+d2 เท่ากับ 158, 144 และ 240 เมตร ดังรูปที่ 4.7

โดยถนนสยามสแควร์จะมีลักษณะของอุทหาอาคารเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมที่มีช่องว่างระหว่างอาคารบ้างเล็กน้อยและอุทหาอาคารจะมีความสูงเฉลี่ย 12 เมตรในทุกเส้นทางและมีความกว้างของถนนแต่ละซอยตั้งแต่ซอยที่ 1 ถึง ซอยที่ 11 คือ 18, 15, 15.4, 14.6, 13.6, 14, 11.6, 12, 4.2, 4.4 และ 13 เมตรตามลำดับ ส่วนซอยจุฬา 64 จะมีความกว้างของถนนเท่ากับ 10.10 เมตร

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

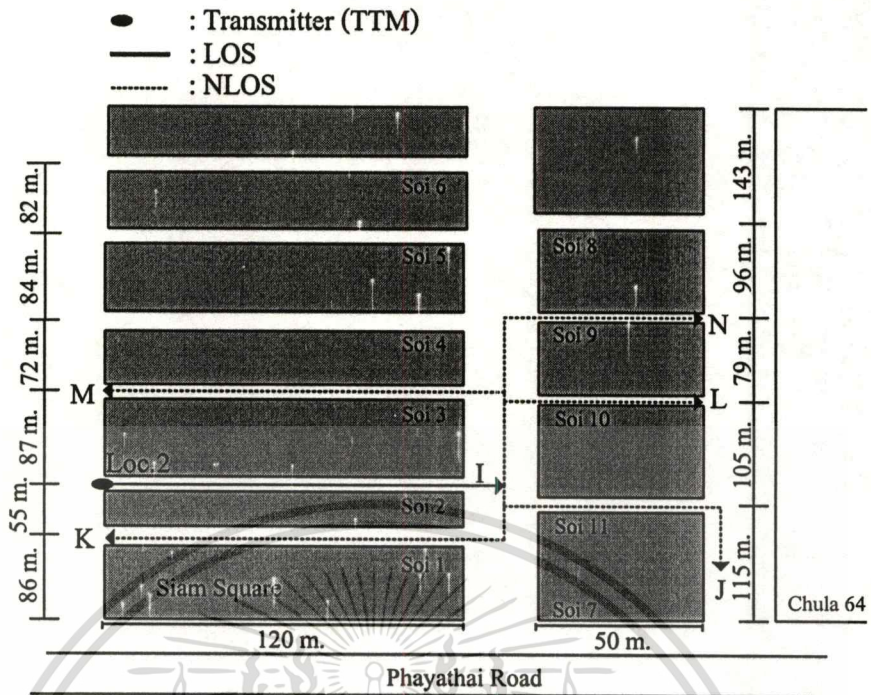


รูปที่ 4.1 อุปกรณ์และการติดตั้งชุดเครื่องรับและชุดเครื่องส่งที่ถนนสยามสแควร์

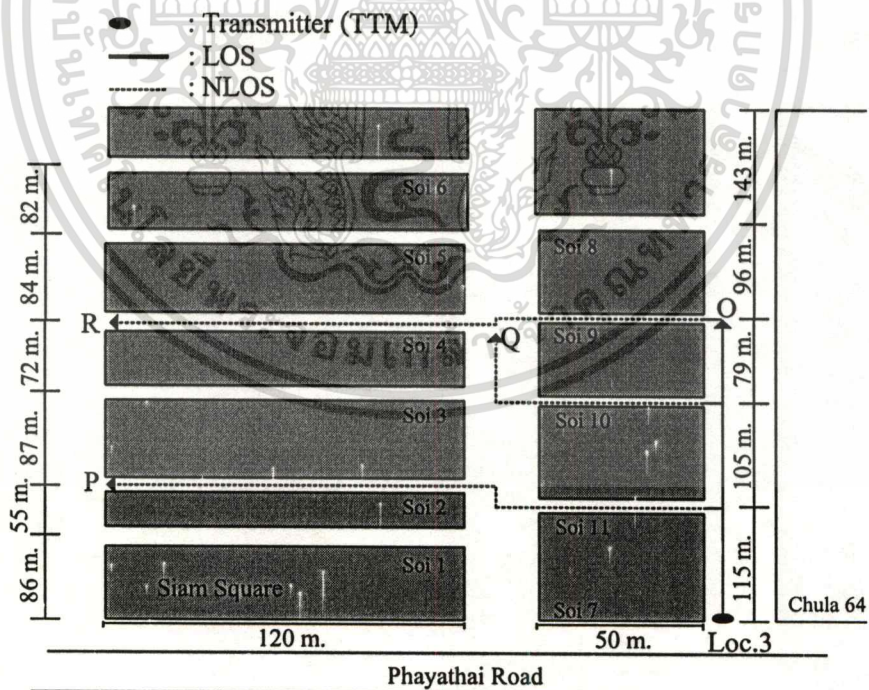


รูปที่ 4.2 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

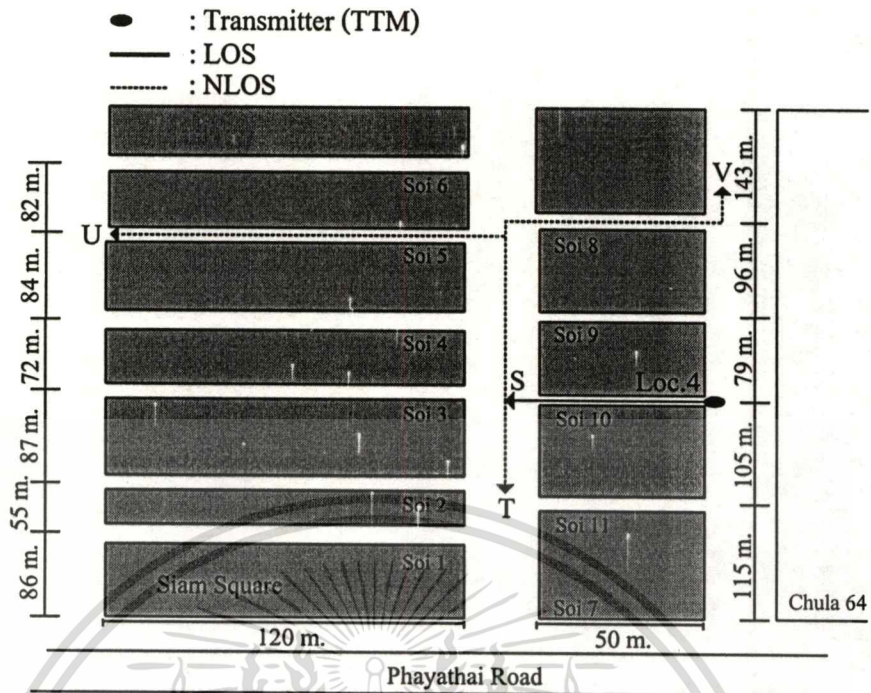


รูปที่ 4.3 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 2

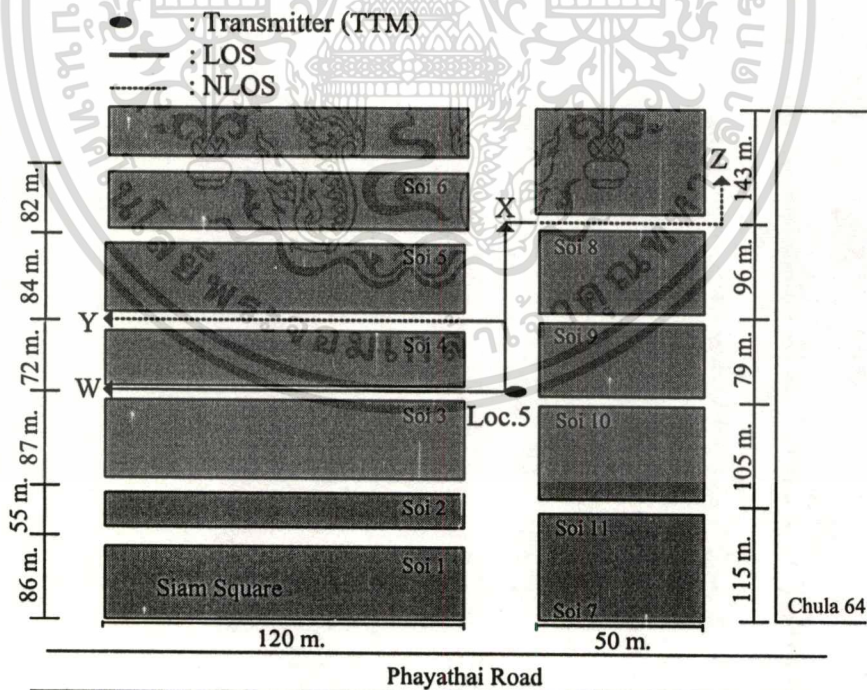


รูปที่ 4.4 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

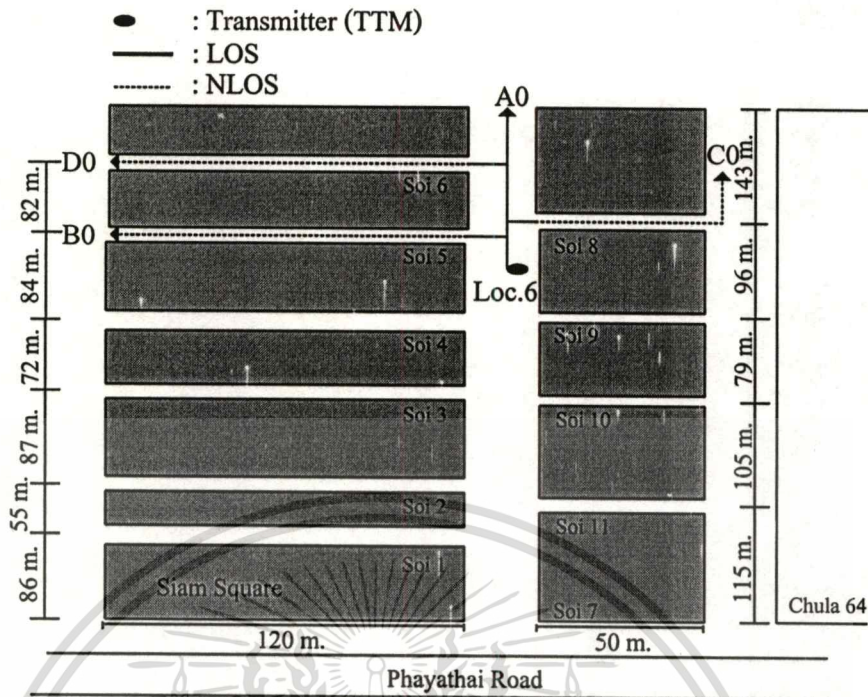


รูปที่ 4.5 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 4.6 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 เส้นทางที่ทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณในตำแหน่งที่ 6

4.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวัดระดับของกำลังงานที่รับได้ของแต่ละตำแหน่งโดยจะทำการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งที่ระยะทางทุกๆ 1 เมตรด้วยข้อมูลที่เกิดขึ้นภายใน 10 วินาทีทั้งในเส้นทาง LOS และ NLOS ด้วยชุด MS ที่มีความสัมพันธ์กับโปรแกรมการแสดงผลของค่าที่วัดได้ [11] ซึ่งค่าที่วัดได้จะเป็นค่าระดับของกำลังงานเฉลี่ยที่รับได้แต่ละจุดแล้วนำมาพิจารณาหาค่าสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นในหน่วยของ dB [12] ด้วยสมการที่ (4.1)

$$\overline{L_p}(d) = P_t + G_t + G_r - P_r - L_{misc} \quad (4.1)$$

เมื่อ P_t คือ กำลังงานที่ส่งออกจากภาคส่ง (dBm)

P_r คือ กำลังงานที่รับได้จากภาครับ (dBm)

G_t, G_r คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งและรับ (dBi)

L_{misc} คือ ค่าสูญเสียในสายเคเบิลนำสัญญาณ (dB)

โดยค่าสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ในแต่ละเส้นทางจะนำมาหาค่า Std. ทั้งในเส้นทาง LOS และ NLOS ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม Matlab version 6.0.0.88 Release 12 ช่วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว ในการหาค่า Std. ของค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นนั้น จะทำการพิจารณาจากสมการทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลซึ่งมีลักษณะของการกระจายของปริมาณข้อมูลแบบกลุ่มด้วยค่าเฉลี่ย (Mean) และความแปรปรวนของข้อมูล (Variance) ที่ได้ [13] ดังสมการที่ (4.2) ถึงสมการที่ (4.4)

$$\begin{aligned}\bar{X}(\text{Mean}) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \\ &= (X_1 + X_2 + \dots + X_N) / N\end{aligned}\quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}\sigma^2(\text{Variance}) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \\ &= [(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_N - \bar{X})^2] / (N - 1)\end{aligned}\quad (4.3)$$

$$\sigma(\text{Std.}) = \sqrt{\sigma^2}\quad (4.4)$$

เมื่อ $\{X_1, \dots, X_N\}$ คือ ชุดข้อมูลที่ลำดับที่ 1 ถึง N
N คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

ดังนั้นในกรณีเส้นทาง LOS จะใช้สมการที่ (3.78) โดยจะมีการพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการสูญเสียของการแพร่กระจายคลื่นร่วมด้วย แล้วจะได้ดังสมการที่ (4.5) ซึ่งจะมีการพิจารณาจุดหักเหบนเส้นทางเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสูญเสียอย่างทันทีทันใดด้วยจุด b_p (Break point) [10] ดังสมการที่ (4.6) ซึ่งจะได้ค่าประมาณเท่ากับ 140 เมตร

$$\bar{L}_p(d) = L_s(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \sigma(\text{Std.})\quad (4.5)$$

$$b_p = \frac{2\pi \cdot h_b \cdot h_m}{\lambda}\quad (4.6)$$

เมื่อ

h_b คือ ความสูงของสายอากาศภาคส่ง (m.)

h_m คือ ความสูงของสายอากาศภาครับ (m.)

λ คือ ความยาวคลื่น (m.)

ส่วนในกรณีเส้นทาง NLOS ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นอื่นเนื่องมาจากค่าลดทอนของ
มุมอาคารนั้นจะพิจารณาจากผลต่างที่จุดหักเหของค่า Mean ในเส้นทาง NLOS เทียบกับค่าสูญเสีย
จากการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะทาง $d1$ ในเส้นทาง LOS [14] ดังสมการที่ (4.7) และกำหนดให้ค่า
ของ n เท่ากับ 3 ซึ่งเป็นค่า Mean ของพื้นที่เขตตัวเมืองที่ได้จากตารางที่ 3.1

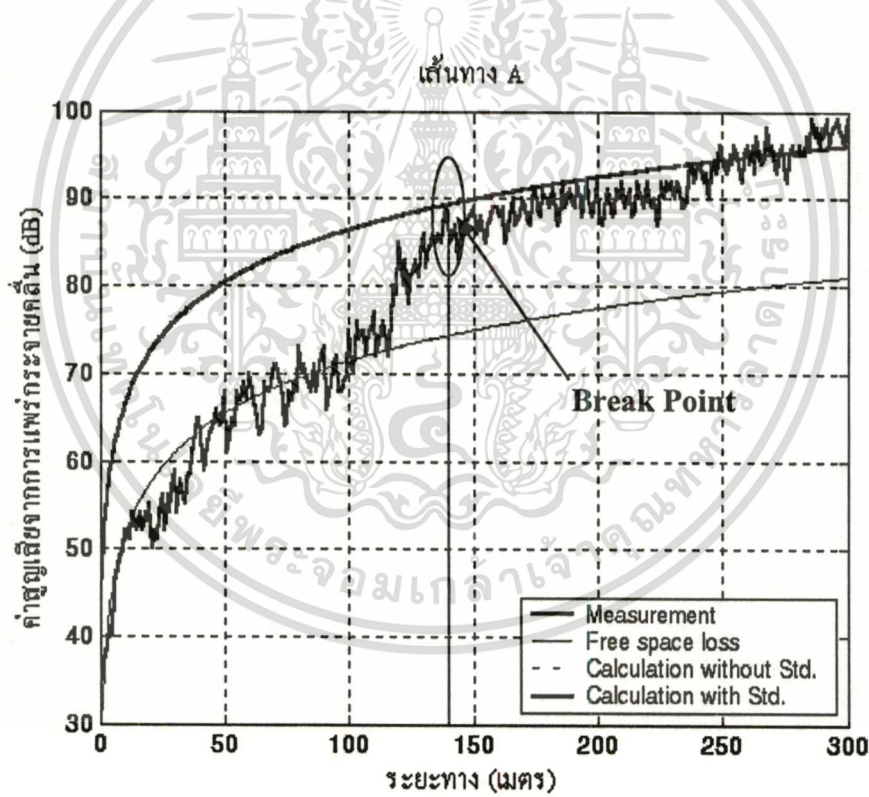
$$\overline{L_p}(d) = L_s(d1) + 10n \log\left(\frac{d1 + d2}{d1}\right) + A_c \tag{4.7}$$

เมื่อ

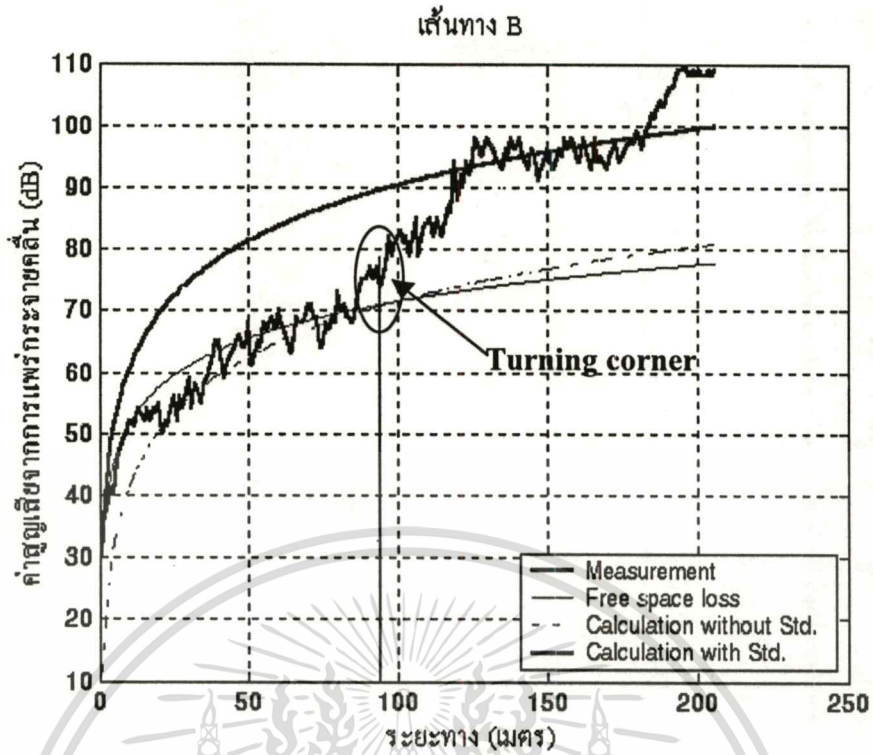
$\overline{L_p}(d)$ คือ ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นเฉลี่ย (Mean) ในเส้นทาง NLOS (dB)

$L_s(d1)$ คือ ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น ในเส้นทาง LOS ของจุดตัดถนน (dB)

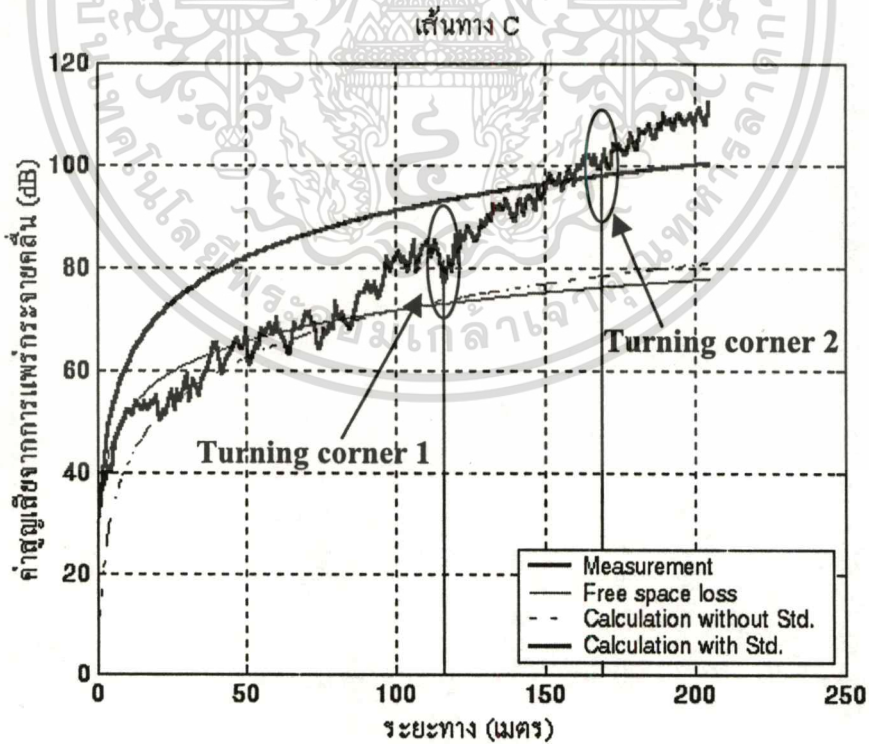
A_c คือ ค่าลดทอนจากมุมอาคาร (dB)



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง A (LOS)

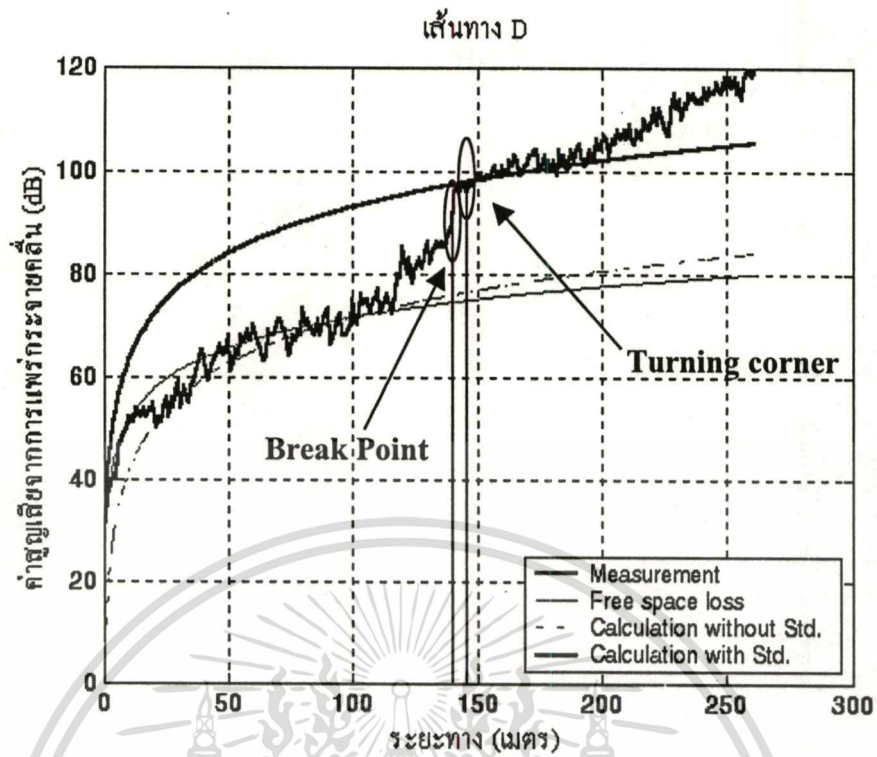


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง B (NLOS)

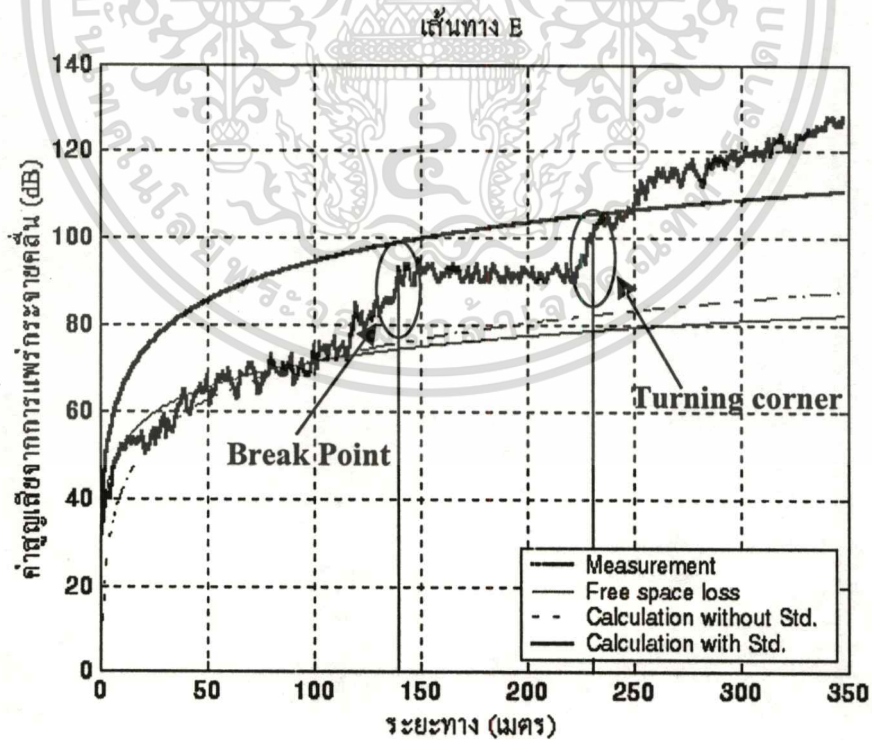


รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง C (NLOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

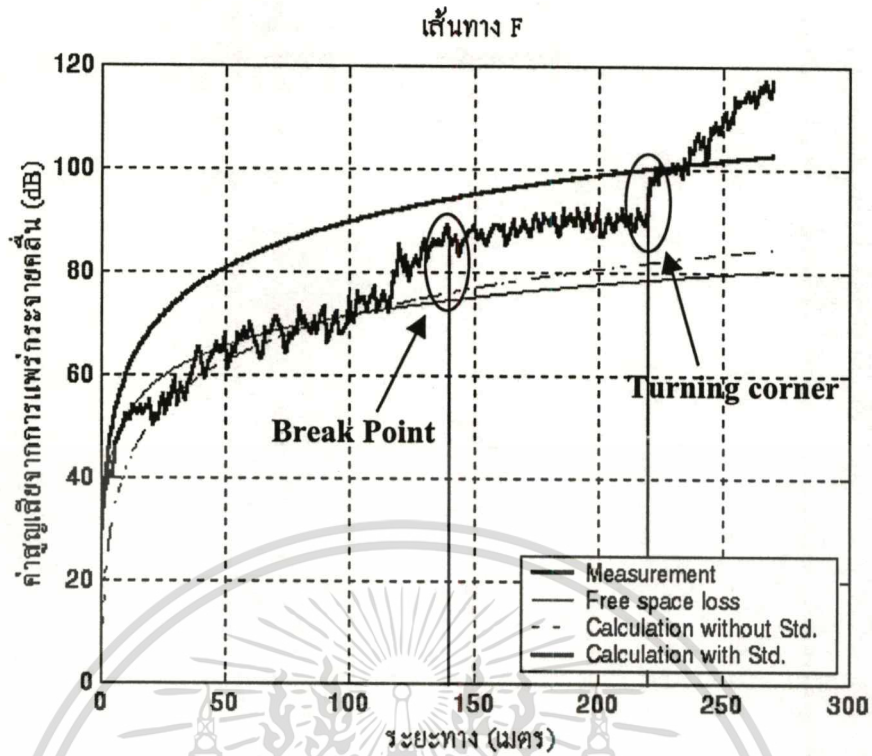


รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง D (NLOS)

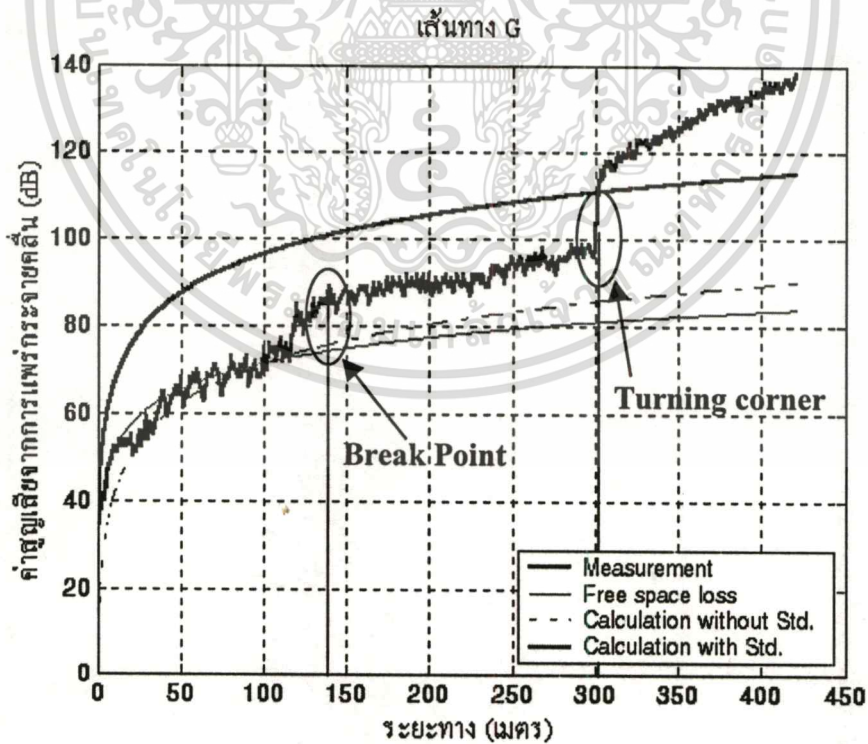


รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง E (NLOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

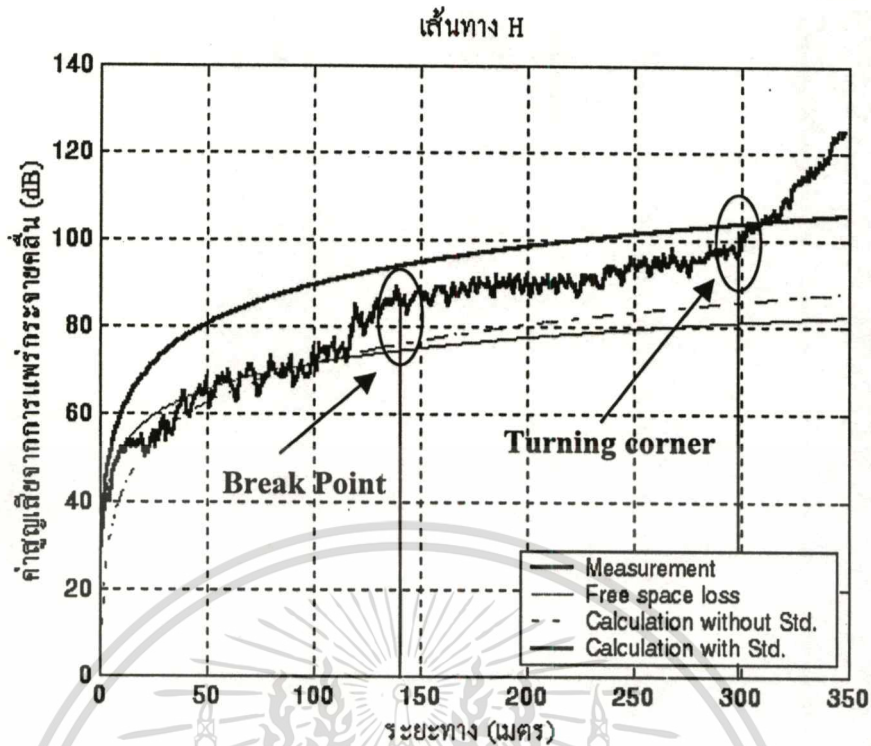


รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง F (NLOS)

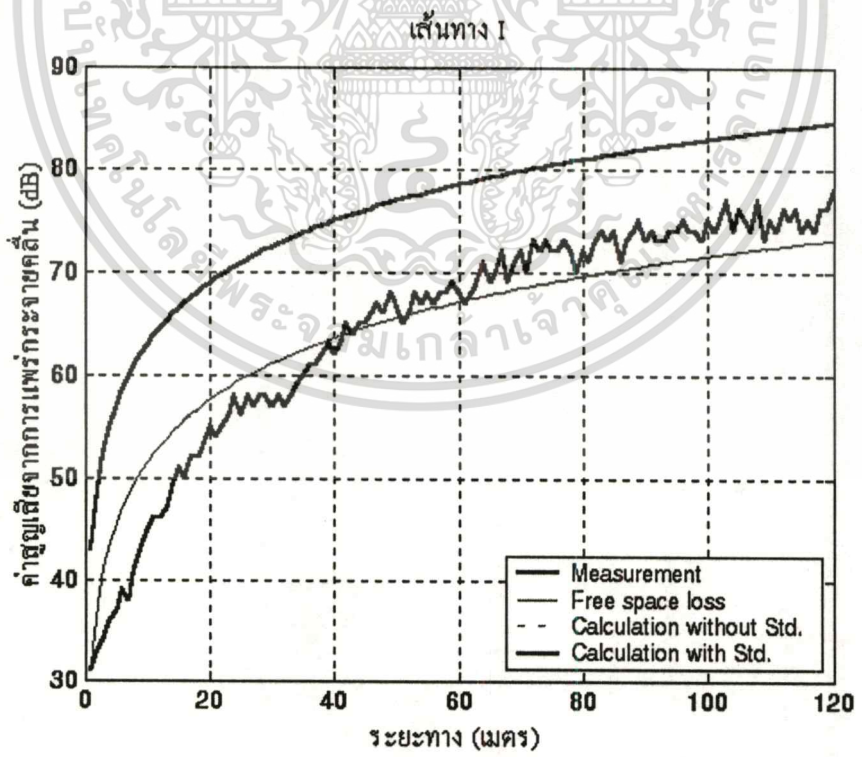


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง G (NLOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

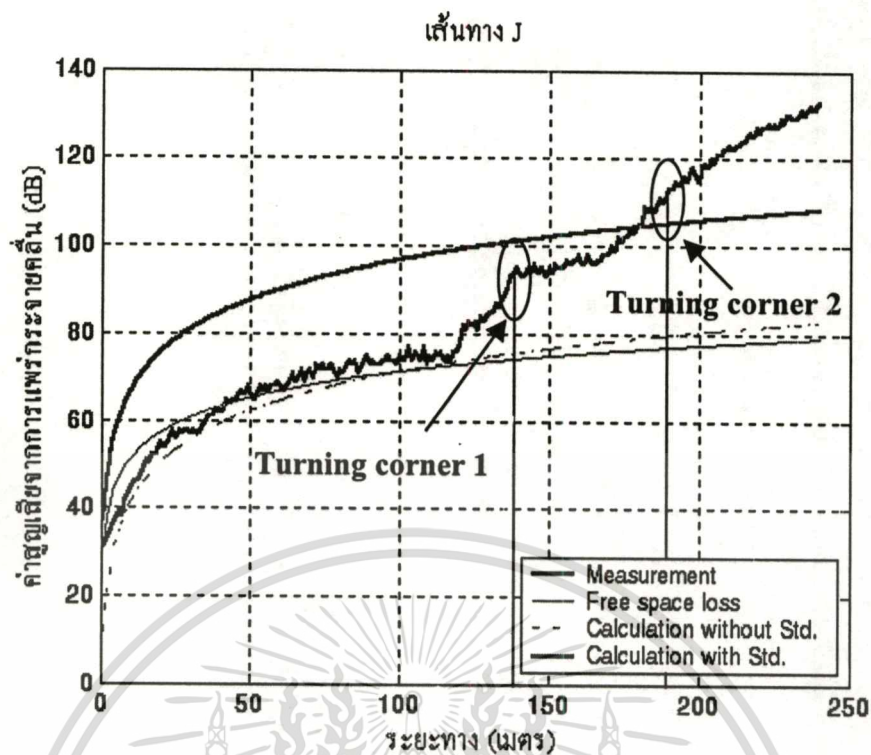


รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง H (NLOS)

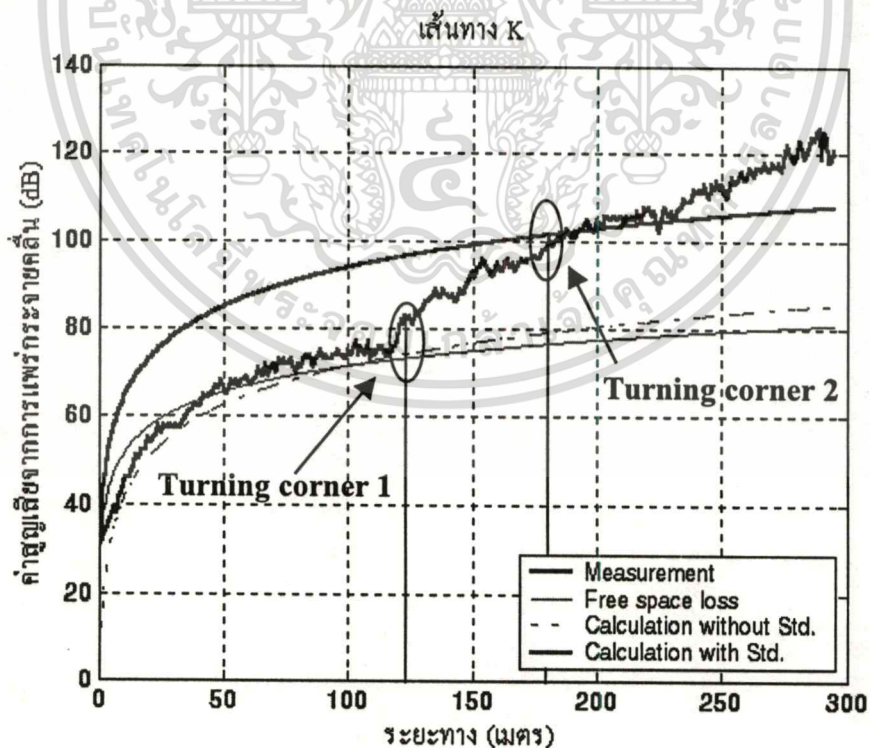


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง I (LOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

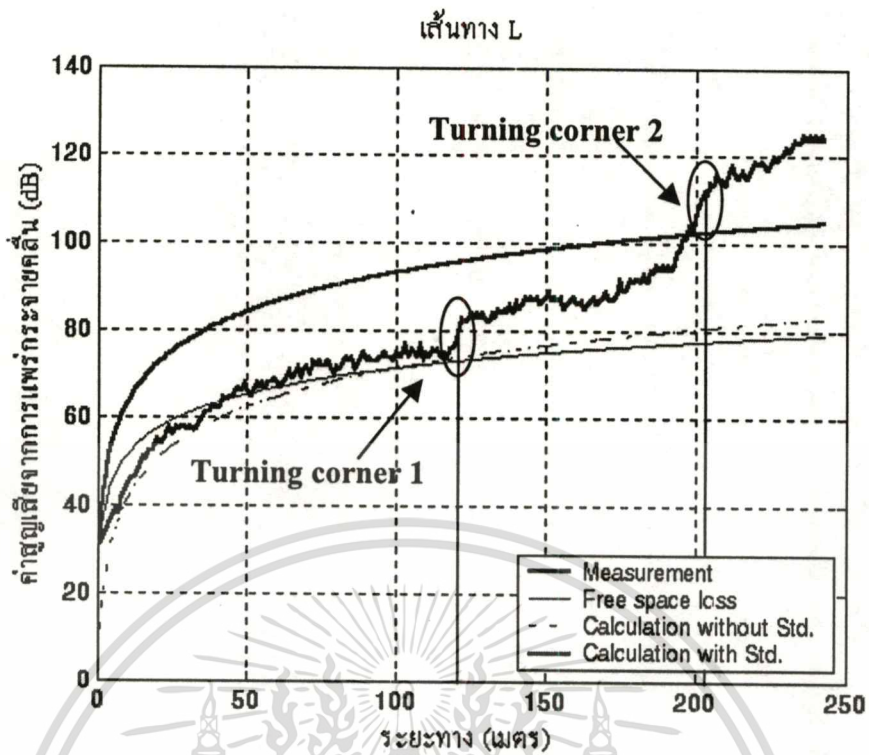


รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง J (NLOS)

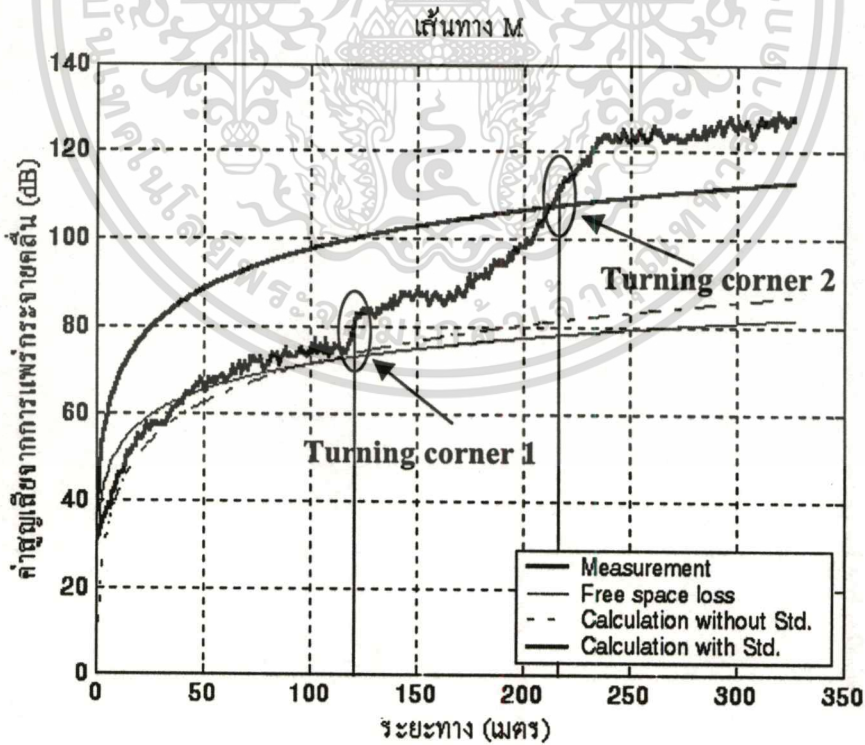


รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง K (NLOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

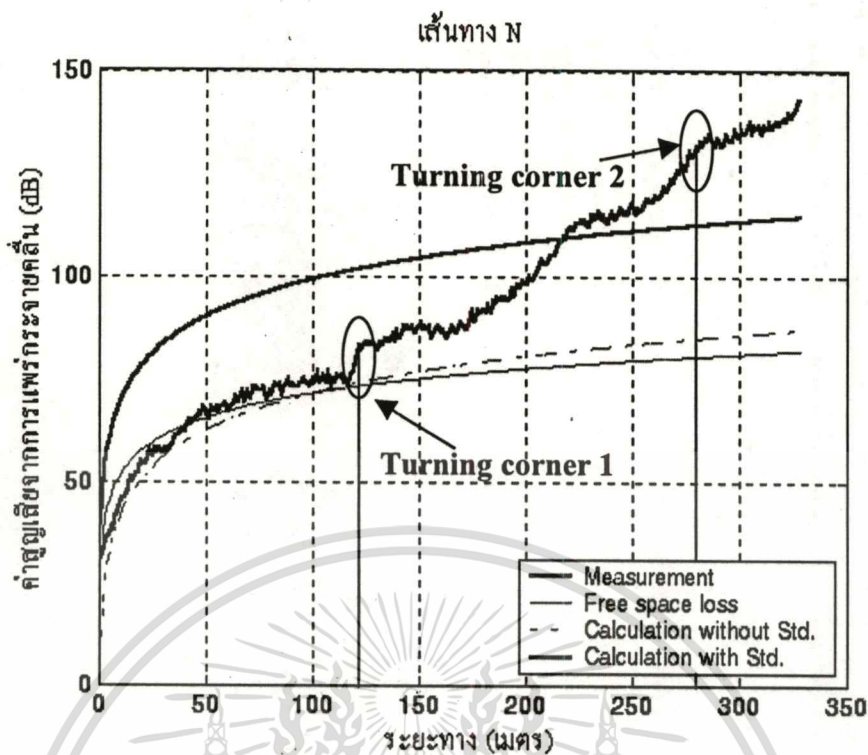


รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง L (NLOS)

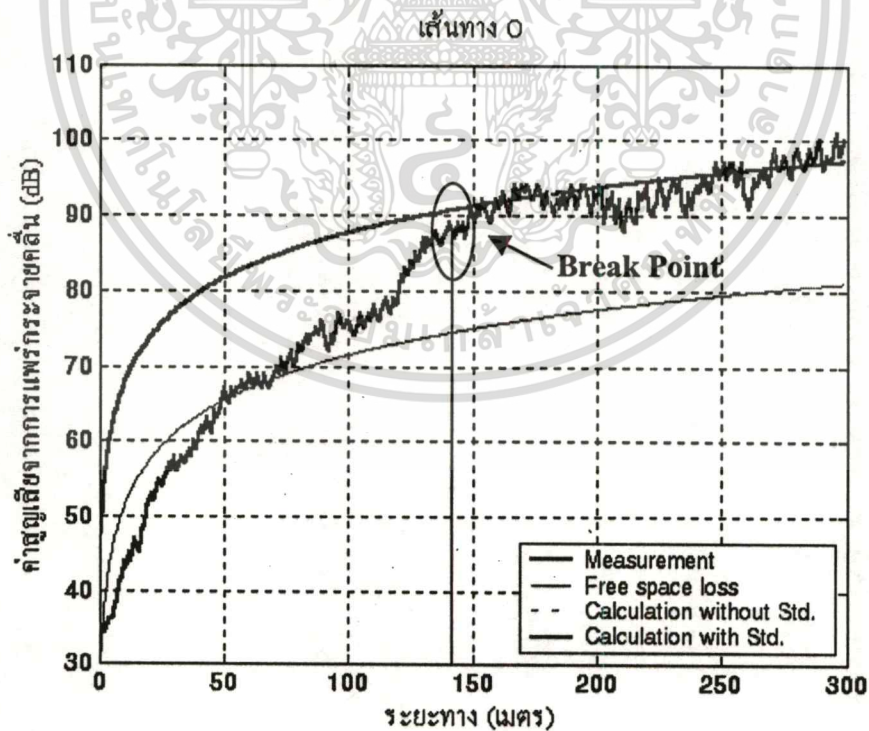


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง M (NLOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

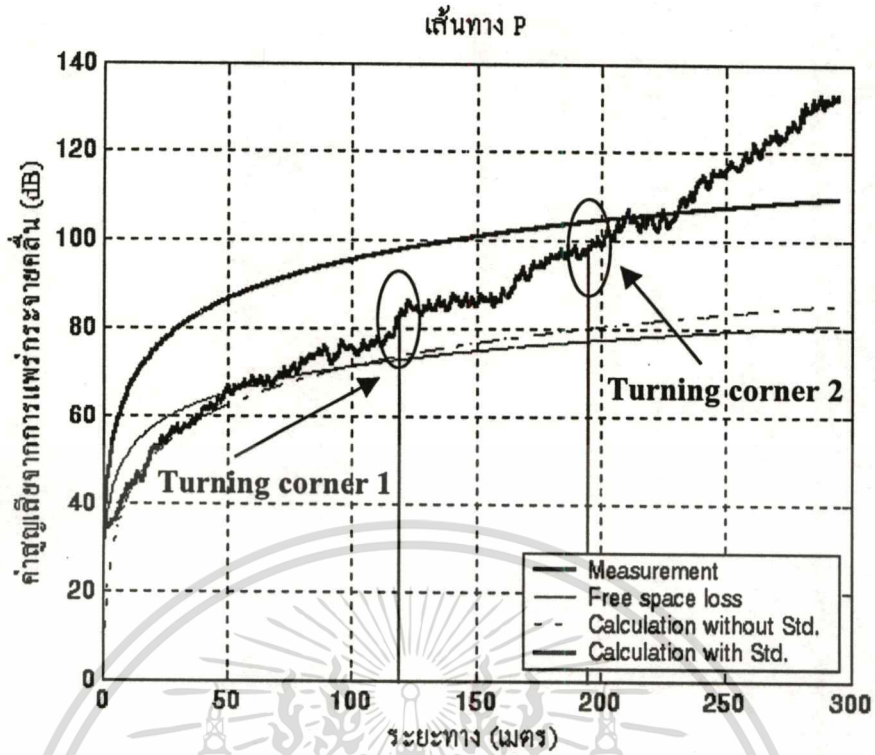


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง N (NLOS)

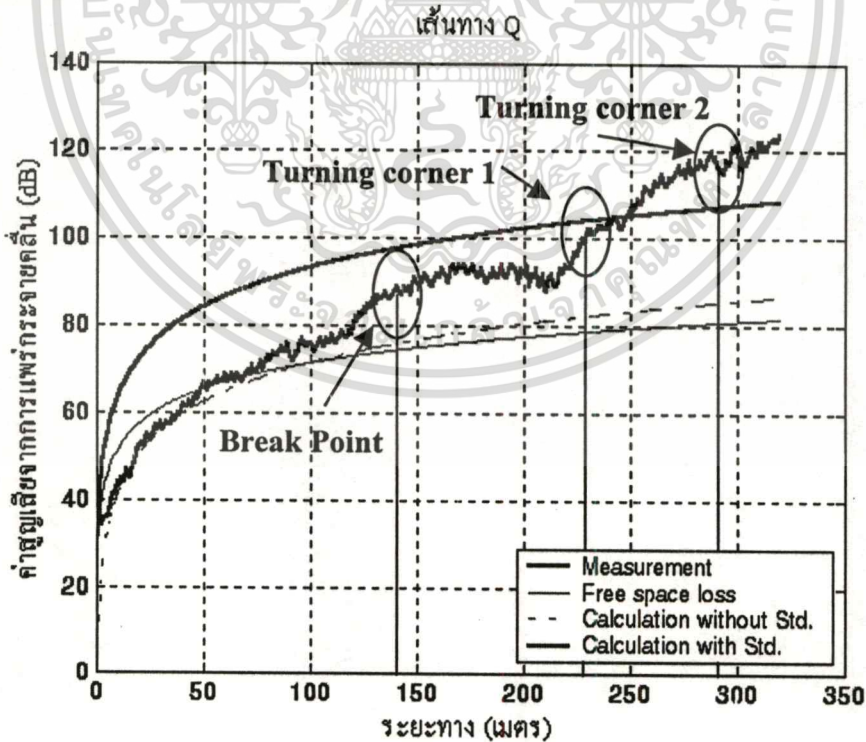


รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง O (LOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

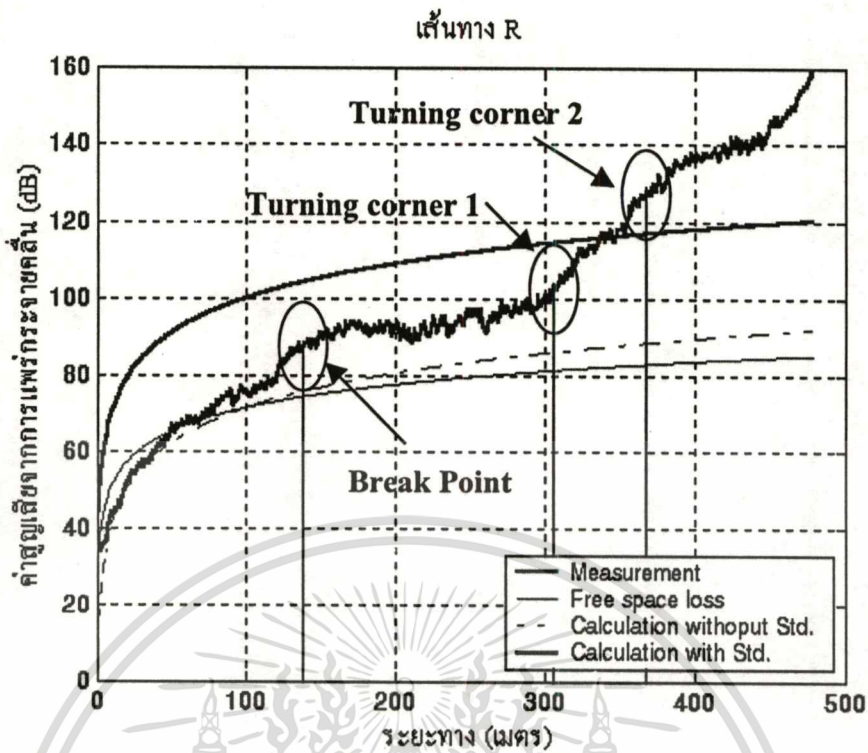


รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง P (NLOS)

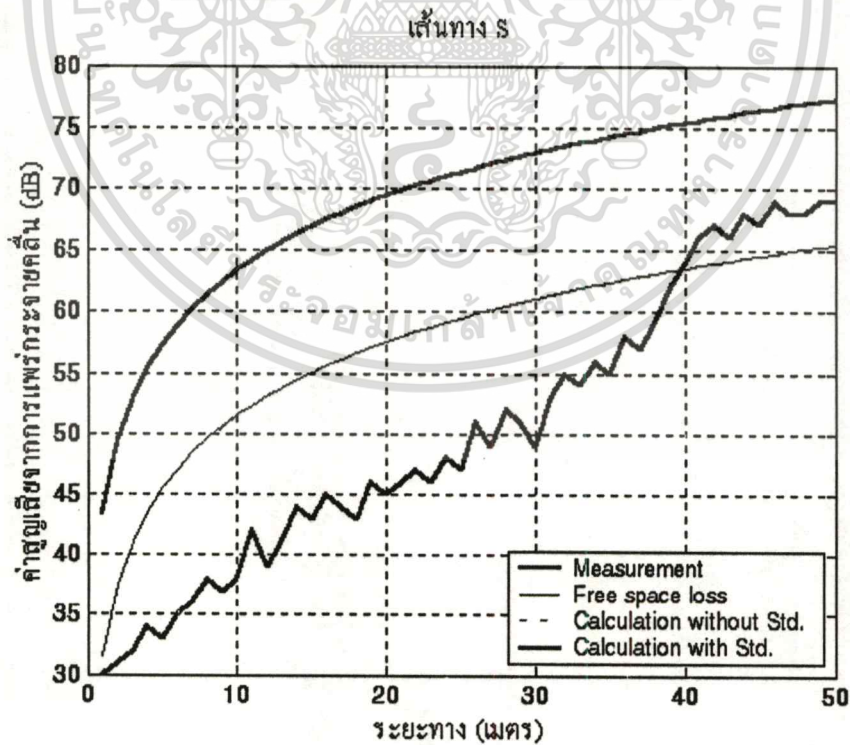


รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง Q (NLOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

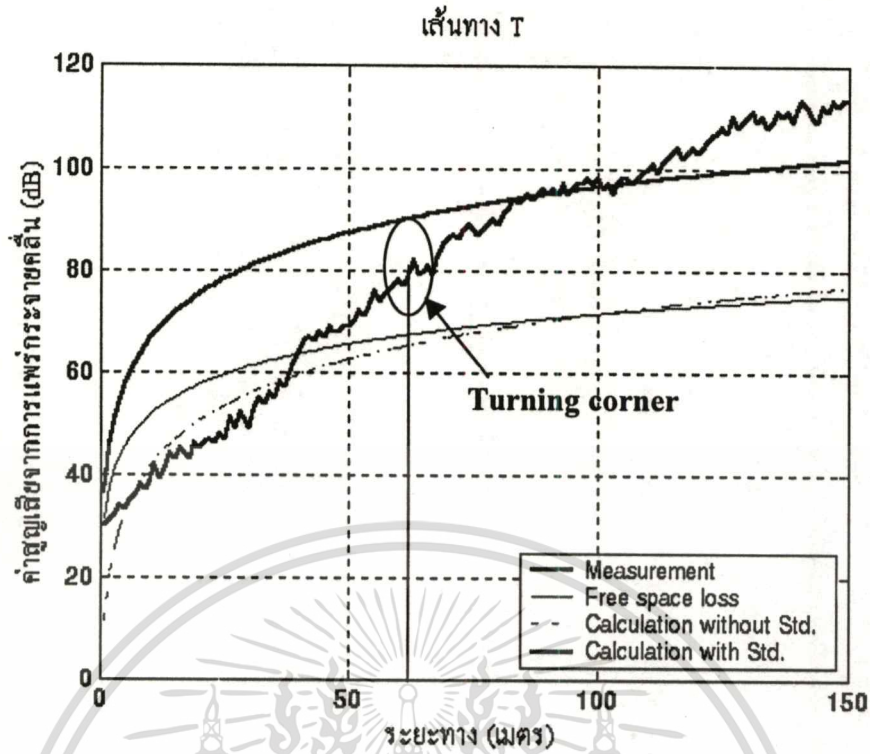


รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง R (NLOS)

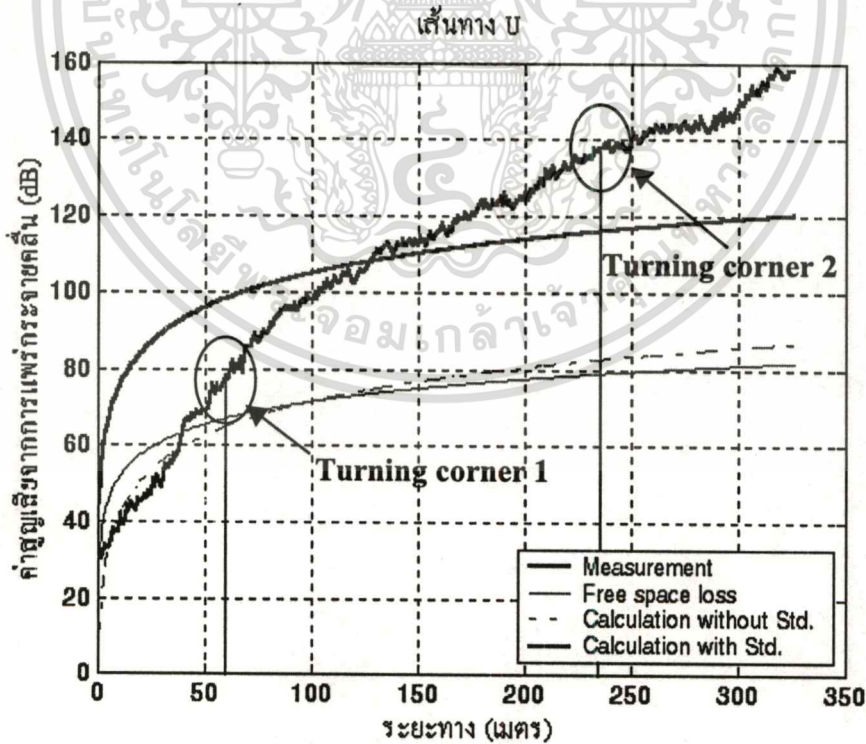


รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง S (LOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

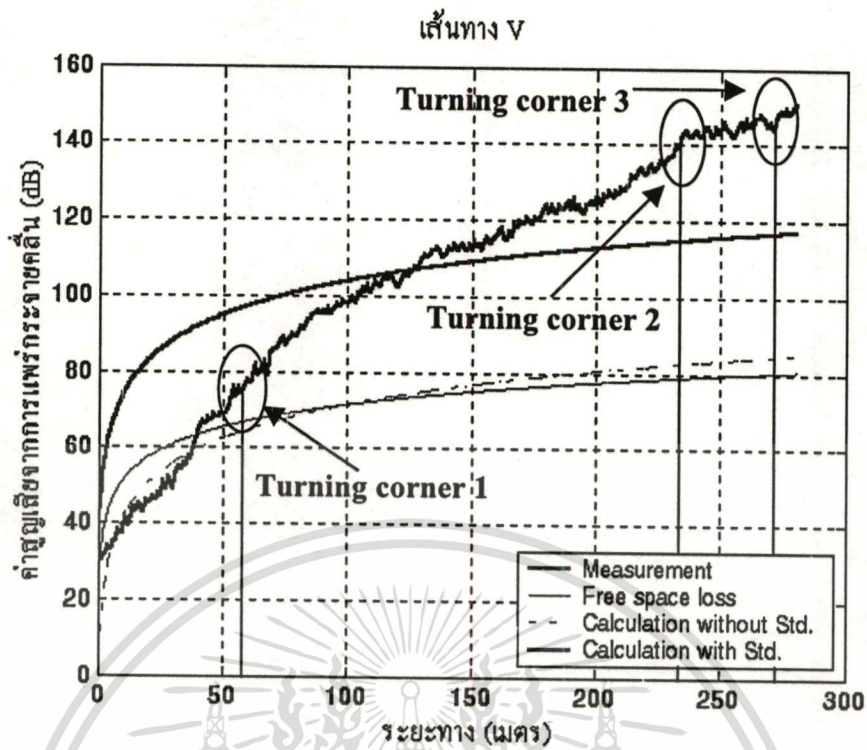


รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง T (NLOS)

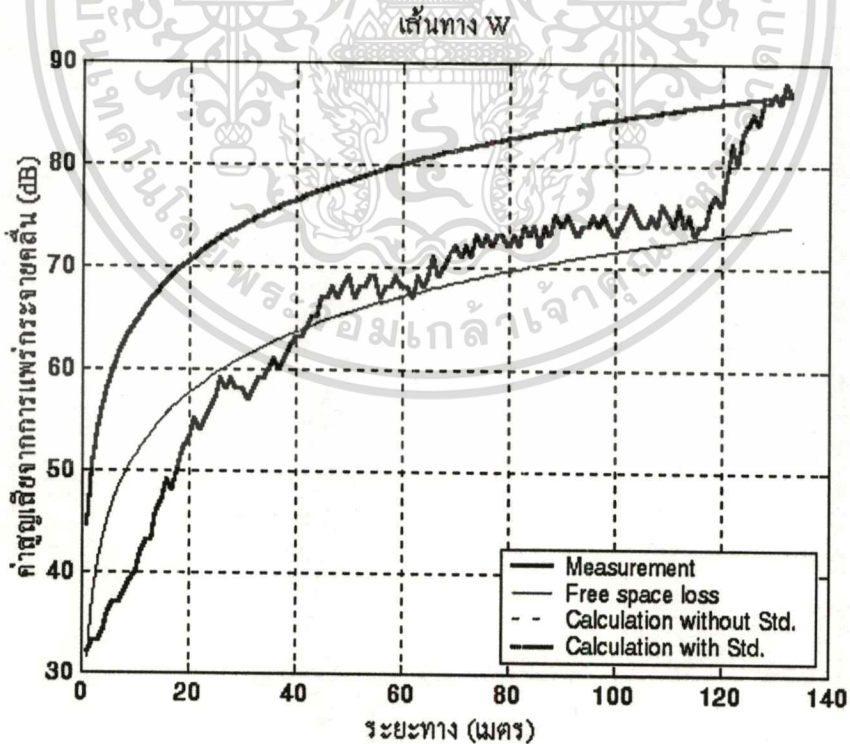


รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง U (NLOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

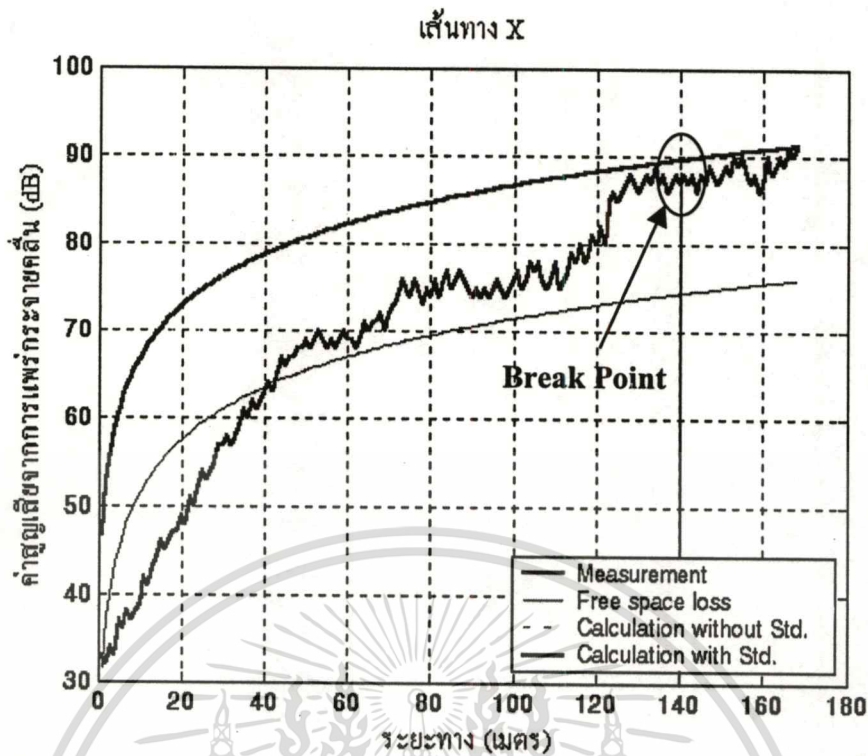


รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง V (NLOS)

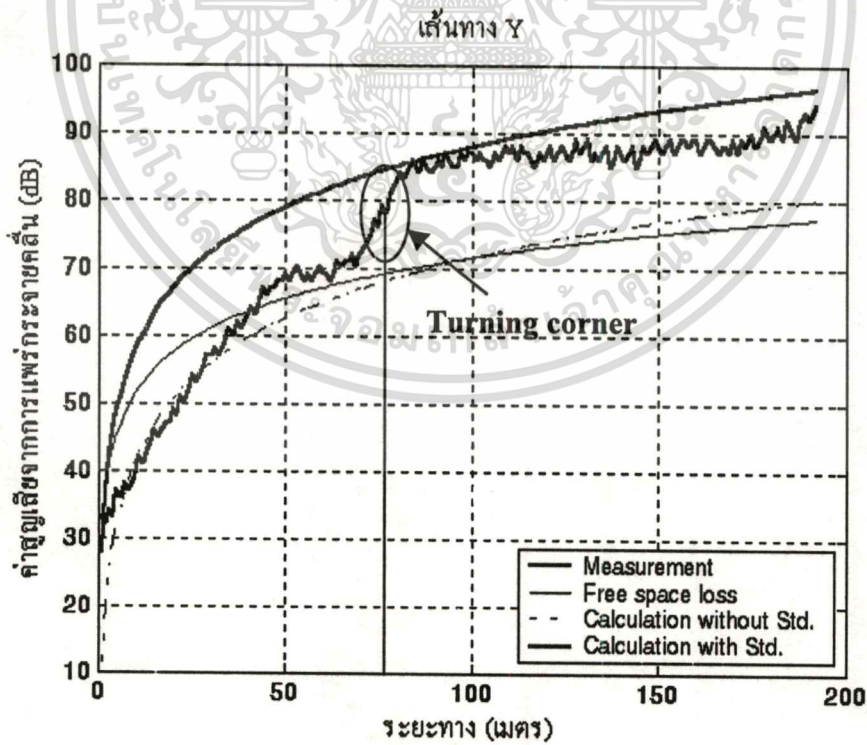


รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง W (LOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

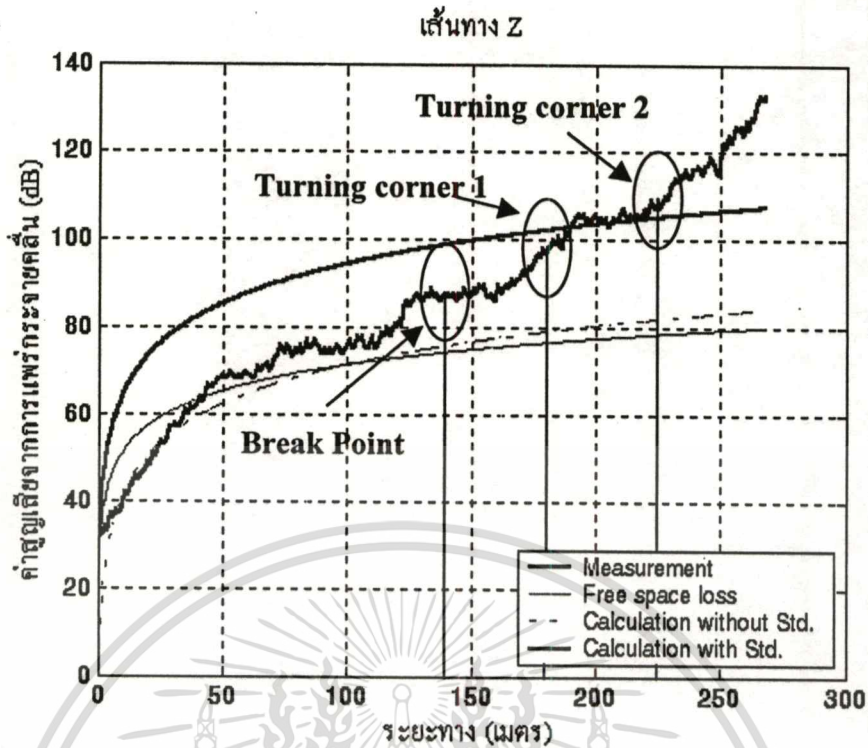


รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง X (LOS)

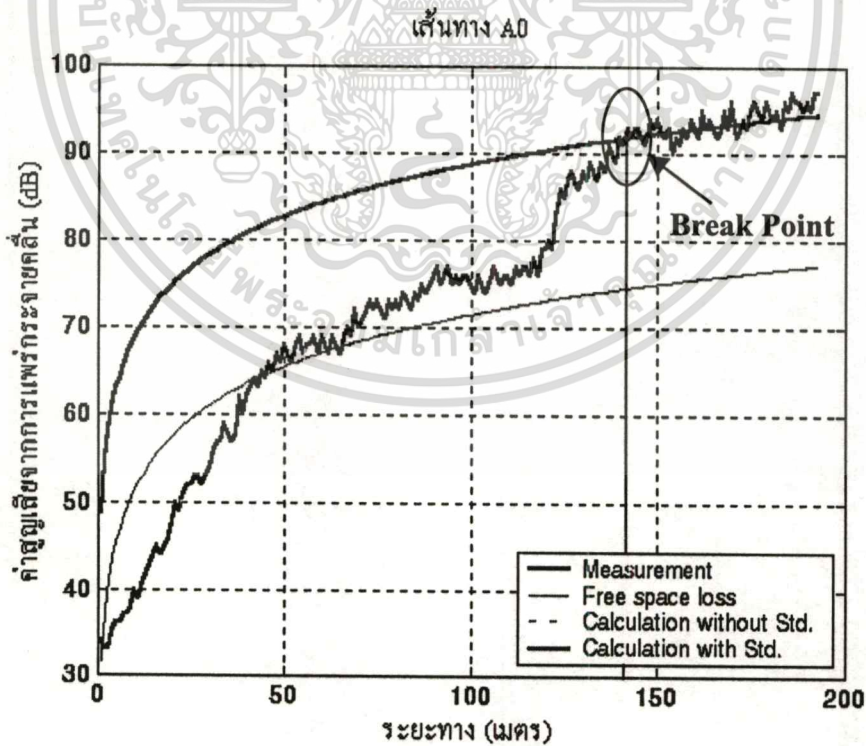


รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง Y (NLOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

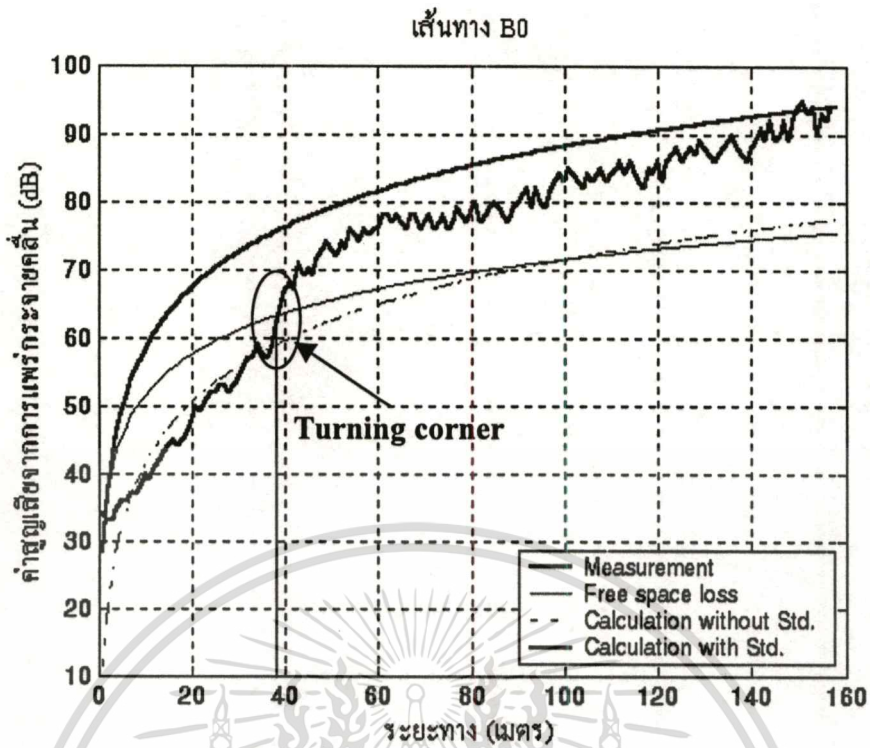


รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง Z (NLOS)

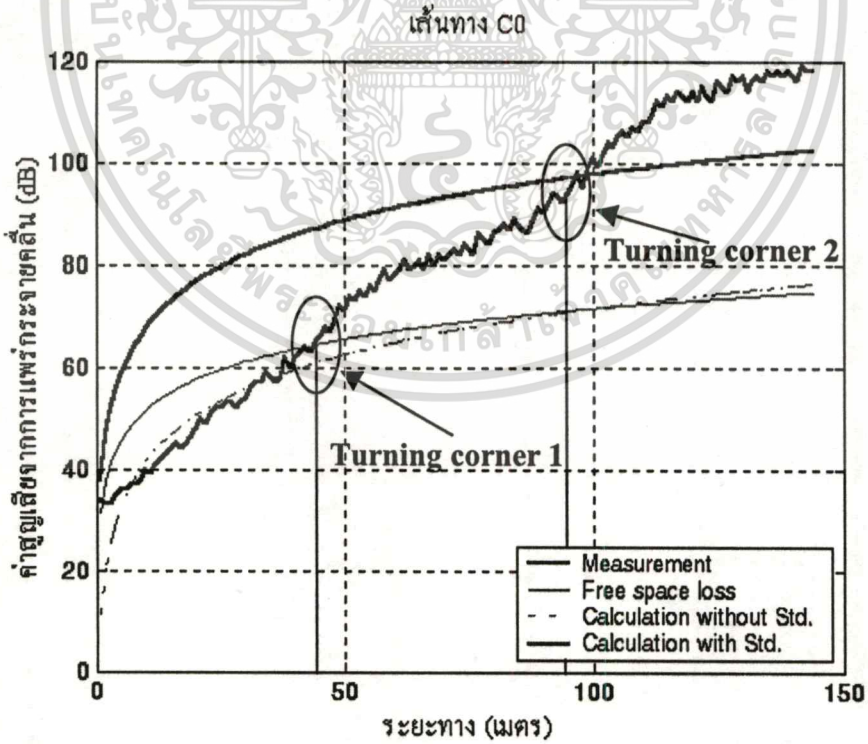


รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง A0 (LOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

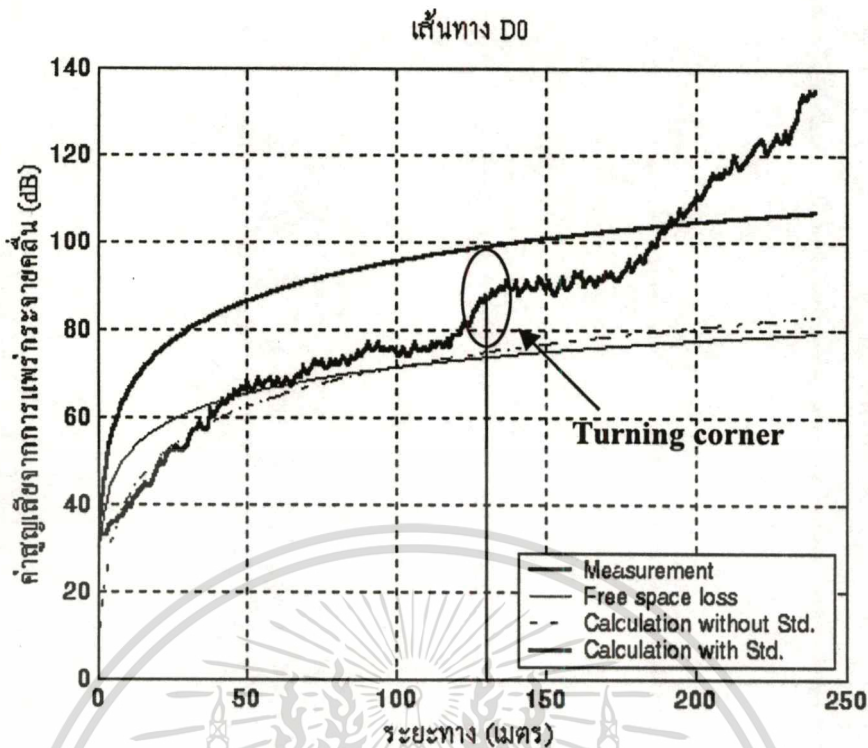


รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง B0 (NLOS)



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง C0 (NLOS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในเส้นทาง D0 (NLOS)

4.1.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 1

ในกรณีเส้นทาง A (LOS) นั้น จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการวัดค่าของกำลังงานเฉลี่ยที่รับได้แล้วนำมาคำนวณด้วยสมการที่ (4.1) แล้วพล็อตค่าลงบนกราฟแบบ Linear ซึ่งค่าที่ได้จะมีความชันที่สูงขึ้นอย่างทันทีทันใดเมื่อระยะทาง d_1 มากกว่า 120 เมตรขึ้นไปซึ่งใกล้เคียงกับการคำนวณจากสมการที่ (4.6) และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟ Free space loss จากสมการที่ (3.36) แล้วพบว่าจะมีค่าสูญเสียใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้เมื่อระยะทาง d_1 น้อยกว่า 120 เมตร ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟก็เหมือนกับเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4.5) เมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 2 โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ แต่เมื่อนำค่า Std. ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4.2) ถึงสมการที่ (4.4) มาร่วมในการพิจารณาแล้วพบว่าลักษณะของเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกันโดยเส้นกราฟที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดเมื่อระยะทาง d_1 มากกว่า 140 เมตรขึ้นไปโดยมีค่า Mean ของการสูญเสียตลอดเส้นทางเท่ากับ 79.92 dB และค่า Std. เท่ากับ 14.89 dB

ในกรณีของเส้นทาง NLOS นั้น จากรูปที่ (4.9), (4.10), (4.11), (4.12), (4.13), (4.14) และ (4.15) พบว่าลักษณะของข้อมูลจากการวัดจะคล้ายกับกรณีของ LOS เมื่อมีระยะทาง d_1 น้อยกว่า 120 เมตร แต่เมื่อ MS เคลื่อนที่ผ่านจุดตัดของถนนหรือมุมของอาคาร (Turning Corner) เข้าไปบนเส้นทางที่ระยะทาง d_2 แล้ว จุดที่พล็อตจะมีความชันที่สูงขึ้นอย่างทันทีทันใดในทุกเส้นทาง ซึ่งค่า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Free space loss จะต่างกับค่าการสูญเสียที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 3. ในสมการที่ (4.5) โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ ซึ่งค่าที่ได้จะมีลักษณะของเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกับค่าจากการวัดเมื่อระยะทาง $d1$ ในช่วง 20-120 เมตร แต่เมื่อนำค่า Std. มาพิจารณา ร่วมในการคำนวณแล้วพบว่าเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกันซึ่งจะใกล้เคียงกับข้อมูลจากการวัดที่ค่าสูญเสียประมาณ 100 dB โดยค่าสูญเสียที่ได้จะต่างจากค่าของข้อมูลการวัดที่มีค่า Mean ของการสูญเสียในเส้นทาง B, C, D, E, F, G และ H เท่ากับ 79.60, 79.55, 83.18, 89.38, 80.67, 93.42 และ 84.43 dB โดยมีค่า Std. เท่ากับ 18.85, 19.39, 21.37, 23.00, 18.02, 25.04 และ 17.98 dB ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (4.7) แล้วจะได้ค่า Ac สำหรับเส้นทาง NLOS ในทุกเส้นทางดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 1

เส้นทาง /(ระยะทาง) (เมตร)	$\overline{L_p}(d)$ (dB)	$L_s(d1)$ (dB)	Ac (dB)
B(206)	93.52	70.22	11.92
C(205)	97.78	72.74	17.51
D(261)	102.27	74.51	19.74
E(348)	115.80	78.68	31.61
F(270)	105.61	78.38	24.56
G(420)	127.17	81.07	41.72
H(349)	111.82	81.04	28.77

4.1.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 2

ในกรณีเส้นทาง I (LOS) นั้น จากรูปที่ 4.16 จะพบว่าค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากข้อมูลการวัดที่ระยะทางประมาณ 120 เมตรนั้นซึ่งจะไม่พิจารณาจุดหักเหจากสมการที่ (4.6) เพราะระยะทาง $d1$ มีค่าไม่เกิน 140 เมตร และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟ Free space loss แล้วพบว่าจะมีค่าสูญเสียที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้เมื่อระยะทาง $d1$ มากกว่า 20 เมตรขึ้นไป ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟก็เหมือนกับเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4.5) เมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 2 โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ แต่เมื่อนำค่า Std. มาร่วมในการพิจารณาแล้วพบว่าลักษณะของเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกันโดยมีค่า Mean ของการสูญเสียตลอดเส้นทางเท่ากับ 64.73 dB และ ค่า Std. เท่ากับ 11.35 dB

ในกรณีของเส้นทาง NLOS นั้น จากรูปที่ (4.17), (4.18), (4.19), (4.20) และ (4.21) พบว่าลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการวัดซึ่งจะเหมือนกับกรณีของ LOS เมื่อมีระยะทาง $d1$ น้อยกว่า 120 เมตร แต่เมื่อ MS ผ่านจุดตัดของถนนเข้าไปบนเส้นทางที่ระยะทาง $d2$ แล้วข้อมูลที่พล็อตได้จะมี

ความชันที่สูงขึ้นอย่างทันทีทันใดในทุกเส้นทาง ซึ่งค่าของ Free space loss จะต่างกับค่าการสูญเสียที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 3 ในสมการที่ (4.5) โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ ซึ่งค่าที่ได้จะมีลักษณะของเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกับค่าจากการวัดเมื่อระยะทาง $d1$ น้อยกว่า 120 เมตร แต่เมื่อนำค่า Std. มาพิจารณา ร่วมในการคำนวณแล้วพบว่าเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกัน โดยค่าสูญเสียที่ได้จะต่างจากค่าของการวัดโดยมีค่า Mean ของการสูญเสียในเส้นทาง J, K, L, M และ N เท่ากับ 86.03, 88, 82.19, 92.35 และ 93.33 dB ซึ่งจะมีค่า Std. เท่ากับ 25.36, 22.43, 21.82, 25.98 และ 27.54 dB โดยจะได้ค่า A_c สำหรับเส้นทาง NLOS ในทุกเส้นทางดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าลดทอนจากมุมมองการรับเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 2

เส้นทาง/ระยะทาง (เมตร)	$\overline{L_p}(d)$ (dB)	$L_s(d1)$ (dB)	A_c (dB)
J/(240)	107.63	73.11	25.49
K/(295)	103.96	73.11	19.13
L/(243)	99.24	73.11	16.94
M/(327)	108.37	73.11	22.2
N/(329)	109.75	73.11	23.5

4.1.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 3

ในกรณีเส้นทาง O (LOS) นั้น จากรูปที่ 4.22 จะพบว่าค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการวัดจะมีลักษณะคล้ายกับเส้นทาง A(LOS) ของตำแหน่งที่ 1 และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟ Free space loss แล้วพบว่าจะมีค่าสูญเสียใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้เมื่อระยะทาง $d1$ อยู่ในช่วง 30-120 เมตร ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟก็เหมือนกับเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4.5) เมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 2 โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ แต่เมื่อนำค่า Std. มาร่วมในการพิจารณาแล้วพบว่าลักษณะของเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกันและมีค่าสูญเสียที่ใกล้เคียงกับการวัดที่ระยะทางในช่วง 150 เมตร โดยมีค่า Mean ของการสูญเสียตลอดเส้นทางเท่ากับ 81.07 dB และ ค่า Std. เท่ากับ 16.15 dB

ในกรณีของเส้นทาง NLOS นั้น จากรูปที่ (4.23), (4.24) และ (4.25) พบว่าลักษณะของข้อมูลจากการวัดจะเหมือนกับกรณีของ LOS เมื่อมีระยะทาง $d1$ น้อยกว่า 120 เมตร แต่เมื่อ MS ผ่านจุดตัดของถนนเข้าไปบนเส้นทางที่ระยะทาง $d2$ แล้ว จุดที่พล็อตจะมีความชันที่สูงขึ้นอย่างทันทีทันใดในทุกเส้นทาง ซึ่งค่าของ Free space loss จะต่างกับค่าการสูญเสียที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 3 ในสมการที่ (4.5) โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ ซึ่งค่าที่ได้จะมี

ลักษณะของเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกับค่าจากการวัดเมื่อระยะทาง d_1 น้อยกว่า 120 เมตร แต่เมื่อนำค่า Std. มาพิจารณาร่วมในการคำนวณแล้วพบว่าเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกันและมีค่าใกล้เคียงกับค่าสูญเสียในช่วง 100 ถึง 120 dB โดยค่าสูญเสียที่ได้จะต่างจากค่าของการวัดโดยมีค่า Mean ของการสูญเสียในเส้นทาง P, Q และ R เท่ากับ 87.87, 87.18, และ 99.48 dB ซึ่งจะมีค่า Std. เท่ากับ 24.07, 21.72 และ 28.49 dB โดยจะได้ค่า A_c สำหรับเส้นทาง NLOS ในทุกเส้นทางดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 3

เส้นทาง/(ระยะทาง) (เมตร)	$\overline{L_p}(d)$ (dB)	$L_s(d_1)$ (dB)	A_c (dB)
P/(295)	103.44	72.74	18.43
Q/(320)	111.9	78.38	28.64
R/(479)	130.07	81.04	42.89

4.1.2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 4

ในกรณีเส้นทาง S (LOS) นั้น จากรูปที่ 4.26 จะพบว่าค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากข้อมูลการวัดที่ระยะทางไม่เกิน 120 เมตรนั้นจะไม่พิจารณาจุดหักเหจากสมการที่ (4.6) และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟ Free space loss แล้วพบว่าจะมีค่าสูญเสียที่ไม่ใกล้เคียงกันกับค่าที่วัดได้ตลอดเส้นทางซึ่งลักษณะของเส้นกราฟก็เหมือนกับเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4.5) เมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 2 โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ แต่เมื่อนำค่า Std. มา ร่วมในการพิจารณาแล้วพบว่าลักษณะของเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกัน โดยมีค่า Mean ของการสูญเสียตลอดเส้นทางเท่ากับ 50.24 dB และ ค่า Std. เท่ากับ 11.83 dB

ในกรณีของเส้นทาง NLOS นั้น จากรูปที่ (4.27), (4.28) และ (4.29) พบว่าลักษณะของข้อมูลจากการวัดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อมีระยะทาง d_1 มากกว่า 50 เมตร และเมื่อ MS ผ่านจุดตัดของถนนเข้าไปบนเส้นทางที่ระยะทาง d_2 แล้ว จุดที่พล็อตจะมีความชันที่สูงขึ้นอย่างทันทีทันใดในทุกเส้นทาง ซึ่งค่าของ Free space loss จะต่างกับค่าการสูญเสียที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 3 ในสมการที่ (4.5) อย่างมากโดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ ซึ่งค่าที่ได้จะมีลักษณะของเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกับค่าจากการวัดเมื่อระยะทาง d_1 น้อยกว่า 40 เมตร แต่เมื่อนำค่า Std. มาพิจารณาร่วมในการคำนวณแล้วพบว่าเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกันซึ่งจะใกล้เคียงกับค่าสูญเสียในช่วง 100 ถึง 120 dB โดยค่าสูญเสียที่ได้จะต่างจากค่าของการวัดโดยมีค่า Mean ของการสูญเสียในเส้นทาง T, U และ V เท่ากับ 80.93, 110.80, และ 104.99 dB ซึ่งจะมีค่า Std. เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ 24.79, 33.35 และ 32.31 dB โดยจะได้ค่า A_c สำหรับเส้นทาง NLOS ในทุกเส้นทาง ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 4

เส้นทาง/(ระยะทาง) (เมตร)	$\overline{L_p}(d)$ (dB)	$L_s(d1)$ (dB)	A_c (dB)
T/(150)	96.28	65.51	16.46
U/(326)	121.78	65.51	31.84
V/(280)	116.9	65.51	28.94

4.1.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 5

ในกรณีเส้นทาง LOS ทั้งเส้นทาง W และ X นั้น จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 จะพบว่าค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นจากการวัดจะมีลักษณะเดียวกับเส้นทาง O (LOS) ของตำแหน่งที่ 3 และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟ Free space loss แล้วพบว่าจะมีค่าสูญเสียใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้เมื่อระยะทาง $d1$ น้อยกว่า 120 เมตร ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟก็เหมือนกับเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4.5) เมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 2 โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ แต่เมื่อนำค่า Std. มาร่วมในการพิจารณาแล้วพบว่าลักษณะของเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกันซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าสูญเสีย 80 ถึง 90 dB โดยมีค่า Mean ของการสูญเสียตลอดเส้นทางเท่ากับ 66.39 และ 71.40 dB ส่วนค่า Std. เท่ากับ 12.88 และ 15.25dB

ในกรณีของเส้นทาง NLOS นั้น จากรูปที่ (4.32) พบว่าลักษณะของข้อมูลจากการวัดจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีระยะทาง $d1$ มากกว่า 80 เมตร เพราะเมื่อ MS ผ่านจุดตัดของถนนเข้าไปบนเส้นทางที่ระยะทาง $d2$ แล้ว ลักษณะของข้อมูลจะมีความชันที่สูงขึ้นอย่างทันทีทันใดเช่นเดียวกับเส้นทาง Z ของรูปที่ (4.33) เมื่อมีระยะทาง $d1$ มากกว่า 170 เมตร ซึ่งค่าของ Free space loss จะต่างกับค่าการสูญเสียที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 3 ในสมการที่ (4.5) โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ ซึ่งค่าที่ได้จะมีลักษณะของเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกับค่าจากการวัดเมื่อระยะทาง $d1$ น้อยกว่า 70 เมตร แต่เมื่อนำค่า Std. มาพิจารณาร่วมในการคำนวณแล้วพบว่าเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกัน โดยค่าสูญเสียที่ได้จะต่างจากค่าของการวัดโดยมีค่า Mean ของการสูญเสียในเส้นทาง Y และ Z เท่ากับ 75.92 และ 85.68 dB ซึ่งจะมีค่า Std. เท่ากับ 16.36 และ 23 dB โดยจะได้ค่า A_c สำหรับเส้นทาง NLOS ในทุกเส้นทางดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 5

เส้นทาง/(ระยะทาง) (เมตร)	$\overline{L_p}(d)$ (dB)	$L_s(d1)$ (dB)	A_c (dB)
Y/(192)	86.95	68.68	5.49
Z/(268)	109.67	76.04	27.55

4.1.2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งที่ 6

ในกรณีเส้นทาง A0 (LOS) นั้น จากรูปที่ 4.34 จะพบว่าค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการวัดจะมีลักษณะเดียวกับเส้นทาง W (LOS) และ X (LOS) ของตำแหน่งที่ 5 และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟ Free space loss แล้วพบว่าจะมีค่าสูญเสียใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้เมื่อระยะทาง d1 ในช่วง 40-120 เมตร ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟก็เหมือนกับเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4.5) เมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 2 โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ แต่เมื่อนำค่า Std. มาร่วมในการพิจารณาแล้วพบว่าลักษณะของเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกันซึ่งมีค่าสูญเสียที่ใกล้เคียงในช่วง 90 ถึง 100 dB โดยมีค่า Mean ของการสูญเสียตลอดเส้นทางเท่ากับ 74.46 dB และค่า Std. เท่ากับ 17.26 dB

ในกรณีของเส้นทาง NLOS นั้น จากรูปที่ (4.35), (4.36) และ (4.37) พบว่าลักษณะของข้อมูลจากการวัดจะเหมือนกับกรณีของ LOS เมื่อมีระยะทาง d1 น้อยกว่า 40 เมตร แต่เมื่อผ่านจุดตัดของถนนเข้าไปบนเส้นทางที่ระยะทาง d2 แล้ว ชุดข้อมูลจะมีความชันที่สูงขึ้นอย่างทันทีทันใดในทุกเส้นทาง ซึ่งค่าของ Free space loss จะต่างกับค่าการสูญเสียที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้ค่า n เท่ากับ 3 ในสมการที่ (4.5) โดยไม่พิจารณาค่า Std. ร่วมในการคำนวณ ซึ่งค่าที่ได้จะมีลักษณะของเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกับค่าจากการวัดเมื่อระยะทาง d1 น้อยกว่า 40 เมตร แต่เมื่อนำค่า Std. มาพิจารณาร่วมในการคำนวณแล้วพบว่าเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นขนานกัน โดยค่าสูญเสียที่ได้จะต่างจากค่าของการวัดโดยมีค่า Mean ของการสูญเสียในเส้นทาง B0, C0 และ D0 เท่ากับ 73.38, 81.63 และ 83.18 dB ซึ่งจะมีค่า Std. เท่ากับ 16.66, 26.16 และ 24.02 dB โดยจะได้ค่า A_c สำหรับเส้นทาง NLOS ในทุกเส้นทางดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าลดทอนจากมุมอาคารบนเส้นทาง NLOS ของตำแหน่งที่ 6

เส้นทาง/(ระยะทาง) (เมตร)	$\overline{L_p}(d)$ (dB)	$L_s(d1)$ (dB)	A_c (dB)
B0/(158)	81.79	63.13	0.094
C0/(144)	95.98	64.4	16.13

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

D0/(240)	102.52	73.11	20.38
----------	--------	-------	-------

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะนำค่า A_c ที่ได้จากทุกเส้นทางของแต่ละตารางที่ 4.2 ถึง 4.7 มาคำนวณหาค่า Mean ด้วยสมการที่ (4.2) ซึ่งจะได้ค่า A_c เท่ากับ 21.84 dB สำหรับใช้ในการคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและการวางตำแหน่งสถานีฐานไมโครเซลล์บนถนนสยามสแควร์ในบทต่อไป



ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

D (NLOS)	94.74↔123.07	-59.74↔-88.07
E (NLOS)	96.37↔127.20	-61.37↔-92.20
F (NLOS)	91.39↔120.02	-56.39↔-85.02
G (NLOS)	98.41↔130.87	-63.41↔-95.87
H (NLOS)	91.35↔122.21	-56.35↔-87.21

ตารางที่ 5.2 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 2

เส้นทาง (เมตร)	ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น (dB)	ความแรงของสัญญาณ (dBm)
I (LOS)	62.88↔84.46	-27.88↔-49.46
J (NLOS)	98.73↔126.33	-63.73↔-91.33
K (NLOS)	95.80↔125.19	-60.80↔-90.19
L (NLOS)	95.19↔122.90	-60.19↔-87.90
M (NLOS)	99.35↔129.64	-64.35↔-94.64
N (NLOS)	100.91↔131.25	-65.91↔-96.25

ตารางที่ 5.3 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 3

เส้นทาง (เมตร)	ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น (dB)	ความแรงของสัญญาณ (dBm)
O (LOS)	67.68↔97.19	-32.68↔-62.19
P (NLOS)	97.44↔126.84	-62.44↔-91.84
Q (NLOS)	95.09↔125.19	-60.09↔-90.19
R (NLOS)	101.86↔135.47	-66.86↔-100.47

ตารางที่ 5.4 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 4

เส้นทาง (เมตร)	ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น (dB)	ความแรงของสัญญาณ (dBm)
S (LOS)	63.36↔77.34	-28.36↔-42.34
T (NLOS)	98.16↔121.68	-63.16↔-86.68
U (NLOS)	106.72↔136.98	-71.72↔-101.98
V (NLOS)	105.68↔134.62	-70.68↔-99.62

ตารางที่ 5.5 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 5

เส้นทาง (เมตร)	ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น (dB)	ความแรงของสัญญาณ (dBm)
W (LOS)	64.41↔86.88	-29.41↔-51.88
X (LOS)	66.78↔91.29	-31.78↔-56.29
Y (NLOS)	89.73↔115.39	-54.73↔-80.39
Z (NLOS)	96.37↔124.93	-61.37↔-89.93

ตารางที่ 5.6 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 6

เส้นทาง (เมตร)	ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น (dB)	ความแรงของสัญญาณ (dBm)
A0 (LOS)	68.79↔94.50	-33.79↔-59.50
B0 (NLOS)	90.03↔114.00	-55.03↔-79.00
C0 (NLOS)	99.53↔122.69	-64.53↔-87.69
D0 (NLOS)	97.39↔124.99	-62.39↔-89.99

ในการอ้างอิงถึงค่าระดับความแรงของสัญญาณที่ยอมรับได้ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะพิจารณาค่าที่ไม่เกิน -92 dBm ตาม Recommendation ของ Ericsson [15]

จากตารางที่ 5.1 ถึง 5.5 นั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อวางชุด TTM ตรงตำแหน่งที่ 1 ถึง ตำแหน่งที่ 6 จะพบว่า ในกรณีเส้นทาง LOS ที่ประกอบด้วยเส้นทาง A, I, O, S, W, X และ A0 จะมีค่าระดับความแรงของสัญญาณที่ทำการคาดคะเนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับ Recommendation ในทุกเส้นทาง ส่วนกรณีเส้นทาง NLOS ที่ประกอบด้วยเส้นทาง E, G, M, N, R, U, V จะมีค่าระดับความแรงของสัญญาณไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5.2 การคาดคะเนการวางตำแหน่งสถานีฐานไมโครเซลล์ที่สยามสแควร์

จากข้อมูลที่ได้ในหัวข้อ 5.1 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงพอจะสามารถพิจารณาการวางตำแหน่งสถานีฐานไมโครเซลล์ได้โดยจุดแรกจะวางตำแหน่งได้ในเส้นทางที่ทำการวัดของตำแหน่งที่ 1 ส่วนตำแหน่งที่ 2 ของเส้นทาง I ที่ทำการวัดในซอย 2 ก็ควรที่จะย้ายการวางสถานีฐานไปที่ซอย 3 แทน เพื่อจะช่วยทำให้ระดับความแรงของสัญญาณในเส้นทาง E และ G ของตำแหน่งที่ 1 อยู่ในระดับที่เหมาะสมและยังสามารถใช้กับเส้นทาง M ได้อีกด้วย เมื่อวางตำแหน่งที่ 3 แล้วจะสามารถแก้ปัญหาของเส้นทาง N ของตำแหน่งที่ 2 ส่วนเส้นทาง R ของตำแหน่งที่ 3 จะถูกชดเชยด้วยตำแหน่งที่ 2 ส่วนเส้นทาง U และ V ของตำแหน่งที่ 4 จะสามารถชดเชยด้วยตำแหน่งที่ 6 แทนและยกเลิกตำแหน่งที่ 4 กับ 5 ได้ ดังรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและการวาง
ตำแหน่งสถานีฐานไมโครเซลล์

5.1 การคาดคะเนค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณ

ในการคาดคะเน (Prediction) ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นกรณีเส้นทาง LOS ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาจากสมการของ Free space loss โดยจะนำค่า $\sigma(Std.)$ ที่ได้ของแต่ละเส้นทางมาใช้เป็นค่าแฟคเตอร์ร่วมกับสมการนี้ในหน่วย dB ซึ่งจะได้ตามสมการที่ (5.1)

$$Pr e_{(Los)} = 32.45 + 20 \log f + 20 \log d + \sigma(Std.) \tag{5.1}$$

ส่วนกรณีเส้นทาง NLOS นั้นจะนำค่า $\sigma(Std.)$ และค่า Ac ที่ได้มาใช้เป็นค่าแฟคเตอร์ร่วมเช่นเดียวกับกรณีเส้นทาง LOS ดังสมการที่ (5.2)

$$Pr e_{(NLos)} = 32.45 + 20 \log f + 20 \log d + \sigma(Std.) + Ac \tag{5.2}$$

การพิจารณาถึงระดับความแรงของสัญญาณ (Signal Strength) ที่รับได้ทั้งเส้นทาง LOS และ NLOS ในหน่วย dBm นั้นจะได้ดังสมการที่ (5.3)

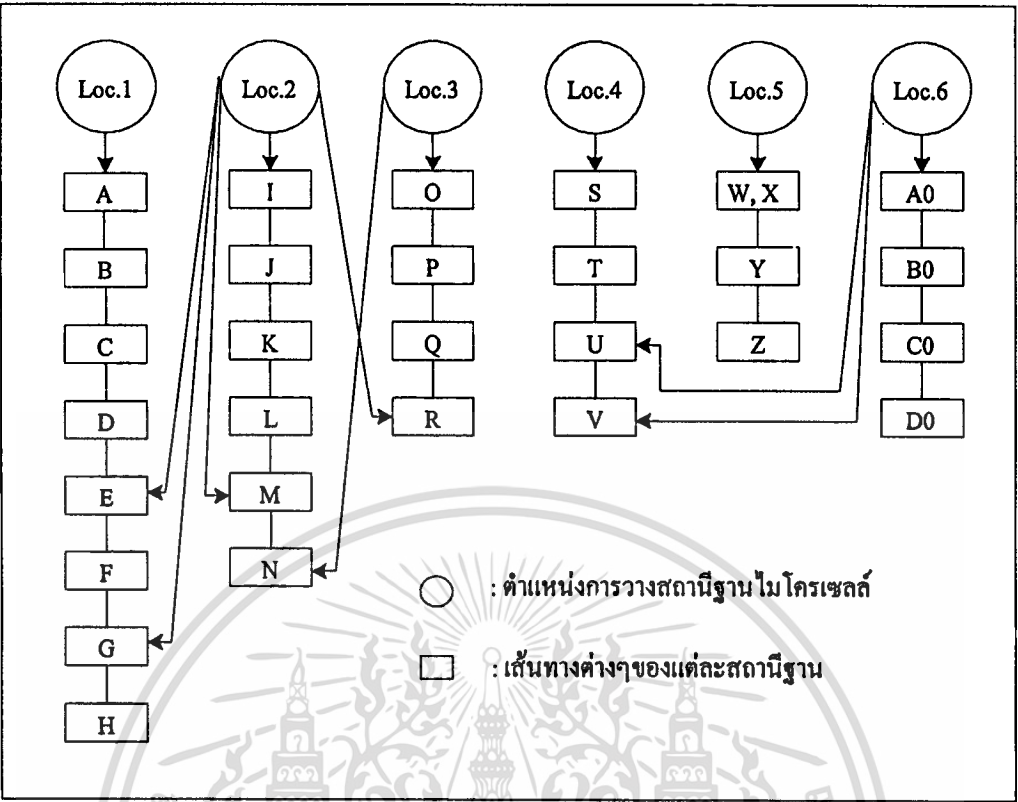
$$P_r = P_t - L_{misc} + G_r + G_t - Pr e_{(Los)}, Pr e_{(NLos)} \tag{5.3}$$

ดังนั้นระยะทาง d ที่ใช้ในการคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้จะเริ่มต้นที่ระยะทาง 10 เมตร ไปจนถึงระยะทางสูงสุดของแต่ละเส้นทาง LOS และ NLOS ซึ่งก็จะได้อีกค่าต่างๆ ตามตารางที่ 5.1 ถึง 5.6

ตารางที่ 5.1 ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นและระดับความแรงของสัญญาณจากตำแหน่งที่ 1

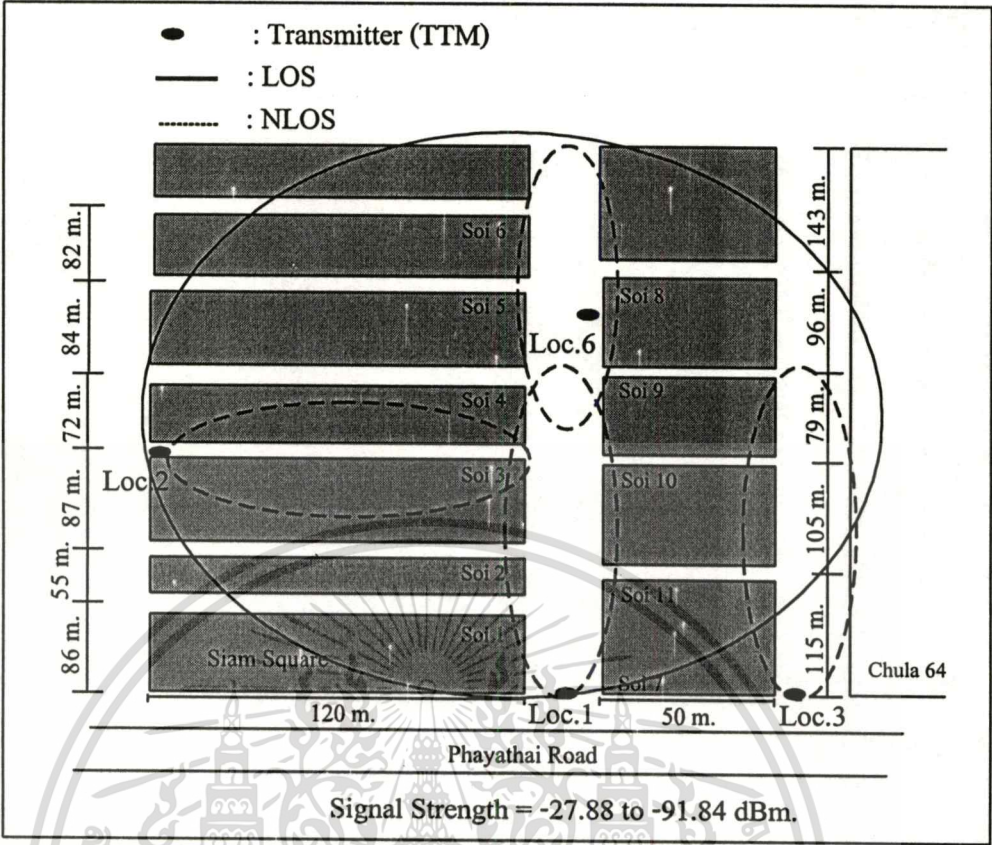
เส้นทาง (เมตร)	ค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่น (dB)	ความแรงของสัญญาณ (dBm)
A (LOS)	66.42↔95.97	-31.42↔-60.97
B (NLOS)	92.22↔118.50	-57.22↔-83.50
C (NLOS)	92.76↔118.99	-57.76↔-83.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ลักษณะการจับคู่ตำแหน่งการวางสถานีฐานไมโครเซลล์กับเส้นทางต่างๆ

ดังนั้นจึงสามารถคาดคะเนการวางตำแหน่งสถานีฐานไมโครเซลล์ที่สยามสแควร์ได้จำนวน 4 สถานีฐานดังรูปที่ 5.2 คือ สถานีฐานไมโครเซลล์ตรงตำแหน่งที่ 1, ตำแหน่งที่ 2 , ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 6 โดยมีระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้บนเส้นทางทั้งหมดอยู่ในช่วง -27.88 ถึง -91.84 dBm ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้ก็พอที่จะสามารถตัดสินใจในการลงทุนติดตั้งสถานีฐานไมโครเซลล์ให้มีความรวดเร็วได้



รูปที่ 5.2 การคาดคะเนวางตำแหน่งสถานีฐานจริงบนถนนไมโครเซลล์ที่สยามสแควร์

บทที่ 6

บทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้เข้ามามีส่วนร่วมกับการดำเนินชีวิตประจำวันของผู้คนโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นศูนย์กลางธุรกิจของประเทศ บริษัทผู้ให้บริการต่างก็ทุ่มเทวางแผนการขายเครือข่ายของตัวเองให้มีรัศมีการครอบคลุมของสัญญาณได้กว้างไกลที่สุด ซึ่งการติดตั้งสถานีฐานในช่วงแรกจะทำการติดตั้งด้วยการวางเซลล์ในรูปแบบมาโครเซลล์ที่ใช้กำลังส่งสูงและมีความสูงของเสาอากาศที่สูงกว่า 30 เมตรไปจนถึง 100 เมตร แต่ในปัจจุบันพื้นที่สำหรับการติดตั้งในใจกลางย่านธุรกิจจะกระทำได้ยากยิ่งขึ้น เนื่องจากพื้นที่ของอาคารมีอยู่อย่างจำกัดและโดยเฉพาะปัญหาเรื่องความถี่รบกวน (Interference Frequency) จากช่องสัญญาณข้างเคียง เช่น ย่านความถี่ 900 MHz ที่มีขนาดความกว้างของแถบความถี่แคบ ดังนั้นจึงได้มีการนำเทคโนโลยีของการวางสถานีฐานในรูปแบบไมโครเซลล์ขึ้นมาใช้สำหรับการให้บริการตรงจุดับสัญญาณหรือบริเวณที่เป็นตรอกซอยหรือคูหาอาคารและผู้ใช้บริการมีการเคลื่อนที่ช้าโดยเซลล์มีขนาดเล็กที่มีรัศมีการแพร่กระจายคลื่นไม่เกิน 1 กิโลเมตรซึ่งมีระยะทางหวังผลการใช้งานประมาณ 300 เมตร

เนื่องจากรูปแบบไมโครเซลล์ขนาดของเซลล์มีขนาดเล็กระบบเสาอากาศจึงต่ำกว่าความสูงของอาคารโดยรอบที่มีความสูงประมาณ 4 ถึง 6 เมตร ดังนั้นกำลังงานของคลื่นจะแพร่กระจายไปตามเส้นทางทั้งในแนวระดับสายตา (LOS : Line of Sight) และแนวนอกระดับสายตา (NLOS : Non-line of Sight) ซึ่งในการเลือกตำแหน่งการติดตั้งสถานีฐานนั้นจะต้องให้ความสำคัญกับค่าสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นด้วย เพราะไม่เพียงแต่ให้มีการครอบคลุมของสัญญาณเพื่อรองรับข้อมูลทางเสียงเท่านั้นแต่ในปัจจุบันการให้บริการสื่อสารด้วยข้อมูลภาพหรือข้อความของโทรศัพท์เคลื่อนที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการหาค่าเบี่ยงเบนและค่าลดทอนจากมุมอาคารด้วยการใช้สมการทางสถิติจากข้อมูลที่ได้จากการวัดในพื้นที่ที่เป็นลักษณะคูหาอาคารเพื่อที่จะได้นำมาใช้เป็นค่าแฟกเตอร์ร่วมกับสมการ Free space loss สำหรับการคาดคะเนการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นและการวางแผนการคาดคะเนวางตำแหน่งของสถานีฐานไมโครเซลล์ให้มีความรวดเร็วและเหมาะสมกับระยะเวลาที่ต้องรับดำเนินการแข่งขันของภาคธุรกิจ

6.1 สรุปผลค่าเบี่ยงเบนการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคาร

การวัดค่าเบี่ยงเบนการสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคารของการแพร่กระจายคลื่นในพื้นที่ของถนนสยามสแควร์ ที่มีลักษณะเป็นคูหาอาคารที่มีความสูงเฉลี่ยเท่าๆ กัน โดยแต่ละซอยจะมีระยะทางที่ตัดกันและมีความกว้างของถนนที่ต่างๆ กัน ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวัดและเก็บข้อมูลของระดับกำลังงานของสัญญาณที่จุดภาครับสามารถรับได้ โดยจะแบ่งตำแหน่งการวางอุปกรณ์

ภาคส่งไว้ 6 ตำแหน่งด้วยการพิจารณาจากตำแหน่งที่คาดว่าจะสามารถทำได้และอยู่ในเส้นทางที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าในเส้นทาง LOS ทั้ง 6 ตำแหน่งจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการสูญเสียในช่วงตั้งแต่ 11.35 ถึง 17.26 dB และเส้นทาง NLOS อยู่ในช่วง 16.36 ถึง 33.35 dB โดยมีค่าลดทอนจากมุมอาคารของเส้นทาง NLOS เท่ากับ 21.84 dB ซึ่งจะพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในเส้นทาง LOS จะมีค่าน้อยกว่าเส้นทาง NLOS ที่มีระยะทางมากกว่าด้วย ซึ่งลักษณะของกราฟที่ได้จะคล้ายกันแต่มีข้อแตกต่างบ้างเพราะเกิดจากสภาพแวดล้อมที่กีดขวาง เช่น ความหนาแน่นของต้นไม้ในเส้นทาง O ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทาง A และในบางครั้งคลื่นสัญญาณจะสามารถเดินทางในเส้นทาง LOS อื่นๆ ได้อีก ซึ่งจะมีการเสริมกันของสัญญาณจึงทำให้ค่าเบี่ยงเบนที่ได้ในเส้นทาง NLOS น้อยกว่า เช่น เส้นทาง V และ U ของตำแหน่งที่ 4 ก็ตาม และในกรณีของเส้นทาง NLOS ต่างๆ ที่มีระยะทางน้อยกว่าและขนาดความกว้างของถนนที่แคบกว่าโดยจะมีจำนวนจุดตัดของถนนที่เท่ากัน ก็จะทำให้มีค่าลดทอนจากมุมอาคารที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางที่มีขนาดความกว้างของถนนและระยะทางมากกว่าเมื่อพิจารณาจากกราฟจะมีความชันสูงขึ้นอย่างทันทีทันใดก็เป็นเพราะคลื่นจะเกิดการสะท้อนไปมากับอาคารทั้งสองด้านของถนนที่แคบได้มากกว่าถนนที่มีความกว้างมากๆ โดยเมื่อนำค่าเหล่านี้ไปใช้เป็นตัวแปรร่วมกับสมการ Free space loss แล้วจะสามารถคาดคะเนค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นของแต่ละตำแหน่งสถานีฐาน โดยสามารถคาดคะเนการวางตำแหน่งได้ 4 สถานีฐานจากการวัดระดับของกำลังงานสัญญาณทั้ง 6 ตำแหน่งนี้ ซึ่งพบว่าระดับความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมทั้งหมดอยู่ในช่วง -27.88 ถึง -91.84 dBm ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ โดยข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นของการตัดสินใจเพื่อความเร็วของการวางสถานีฐานในรูปแบบโมโครเซลล์สำหรับถนนสยามสแควร์ได้

6.2 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้น

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการวิจัยนี้ คือ ในการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณทั้ง 6 ตำแหน่งนั้น ในบางตำแหน่งจำเป็นต้องทำการวัดข้อมูลซ้ำๆ กันหลายครั้ง เนื่องจากปัญหาการเปลี่ยนแปลงของระดับกำลังงานสัญญาณที่ค่อนข้างมากอันเนื่องจากสภาพแวดล้อมต่างๆ ในพื้นที่ เช่น สัญญาณรบกวนจากเครื่องยนต์ หรือการจราจรรวมทั้งผู้คนที่กำลังเคลื่อนที่และอยู่กับที่ อีกทั้งบางซอยของถนนสยามสแควร์ที่มีช่องว่างทางเดินระหว่างอาคารที่ไม่ใช่เส้นทางหลัก จึงทำให้คลื่นสัญญาณสามารถเดินทางผ่านมายังชุดเครื่องรับได้อีกทางด้วยจึงทำให้สัญญาณจะมีแอมพลิจูดที่เสริมและหักล้างกันที่มากกว่าปกติ ดังนั้นเพื่อความถูกต้องของข้อมูลจึงต้องทำการวัดระดับกำลังงานของสัญญาณตรงจุดเหล่านี้แล้วนำไปเปรียบเทียบกับเส้นทางหลักด้วย

6.3 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยนี้ ได้ทำการวิจัยเฉพาะค่าสูญเสียและค่าลดทอนจากมุมอาคารที่มีการครอบคลุมของสัญญาณเพื่อให้สามารถคาดคะเนตำแหน่งที่จะเกิดขึ้นได้จริงสำหรับการวางเซลล์ที่เหมาะสม ซึ่งในการวัดค่าระดับของกำลังงานเพื่อจะหาค่าลดทอนจากมุมอาคารนั้นค่าที่ได้จะมีความถูกต้องเมื่อระยะทาง LOS ต้องไม่น้อยกว่า 100 เมตรเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทาง NLOS แต่ทั้งหมดที่ได้กล่าวมาก็ยังเป็นข้อมูลส่วนหนึ่ง ซึ่งในการออกแบบเซลล์ยังต้องคำนึงถึงปริมาณของทราฟฟิกผู้ใช้บริการรวมทั้งชนิดของอุปกรณ์ต่างๆของการติดตั้งสถานีฐาน อีกทั้งพื้นที่ที่จะดำเนินการขออนุญาตด้วย โดยเมื่อมีการติดตั้งจริงอาจจำเป็นต้องมีการขยับตำแหน่งที่ได้จากการคาดคะเนไว้แล้วมายังพื้นที่บริเวณใกล้เคียงด้วย ส่วนของปริมาณทราฟฟิกที่มีการเพิ่มขึ้นก็อาจจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนสถานีฐานเข้าไปแทรกตามจุดต่างๆเพิ่มเติมได้หรือเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณตรงตำแหน่งสถานีฐานที่ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการคาดคะเนไว้



เอกสารอ้างอิง

- [1] ถวิล พึ่งมา. ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ (Cellular Mobile Telephone System).
กรุงเทพมหานคร : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาด
กระบัง. 2541.
- [2] J.Wiart, "Micro-cellular Modeling when Base Station Antenna is below Roof Tops,"Proc.
IEEE Vehicular Technology Conference, June 1994, Stockholm, pp. 200-204.
- [3] Jorgen Bach Andersen, Theodore S. Rappaport, and Susumu Yoshida, "Propagation
Measurements and Models for Wireless Communications Channels," IEEE
Communications Magazine, January 1995, pp.43-46
- [4] T.Kurner, D.J.Cichon, and W.Wiesbeck, "Concepts and Results for 3D Digital Terrain-
Based wave Propagation Models," IEEE JSAC, Vol.11, no.7, Sept. 1993, pp. 1002-1012.
- [5] W.C.Y. Lee, Mobile Cellular Telecommunication System. Mc Graw Hill Inc. 1989
- [6] ประเสริฐ จริงโพธิ์, เอกสารประกอบการบรรยายพิเศษเรื่องระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ดิจิทัล
GSM, บริษัท Advanced Info Services, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 9
กันยายน พ.ศ. 2541
- [7] Joseph Samecki, C.Vinodrai, Alauddin Javed, Patrick O' Kelly, and Kevin Dick. "Microcell
Design Principles" IEEE Communications Magazine. April 1993 pp. 76-82
- [8] Y. Nagata, et.al., "Measurement and modeling of 2 GHz-band out-of-sight radio
propagation characteristics under microcellular environments," Proc. PIMRC' 91, Sept.
1991, pp. 341-346
- [9] ธเนศ พัฒนชาดาพงษ์. "การออกแบบการวางแผนสำหรับให้บริการในพื้นที่สาธารณะในระบบ
โทรศัพท์พื้นฐานพกพาส่วนบุคคลพีซีที" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา
วิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2541
- [10] Bernard Sklar, Communications Engineering Services, "Rayleigh Fading Channels in
Mobile Digital Communication Systems Part 1 : Characterization," IEEE
Communication Magazine, July 1997, pp.90-93
- [11] Ericsson Radio System AB, "TTM for system GSM & (E)-TACS, TEM 900/96 Software
Test," 1996-07-01 REV.B

- [12] Janne kolu & Jaakko Talvitie, **“Pathloss Measurements at 2.4 and 5.8 GHz. ISM Bands in Urban Microcellular Environment,”** Elektrobit Ltd., Hermiankatu 3 A 33720 Tampere, Finland.
- [13] Kreyszig, E., **“Advanced Engineering Mathematics,”** John wiley & sons, 1993
- [14] Vinko Erceg, Saeed Ghassemzadeh, Maxwell Taylor, Dong Li, and Donald L. Schilling, **“Urban/Suburban out-of-sight Propagation Modeling,”** IEEE Communication Magazine, June 1992, pp. 56-61
- [15] Ericsson Radio System AB 1992, **“Training Document, GSM cell Planning Workshop.”** S-164 80 STOCKHOLM, Sweden EN/LZT 123 3315 R2B



ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้รับการตีพิมพ์

เรื่อง “การศึกษาการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นของสถานีฐานแบบไมโครเซลล์ของระบบ GSM ในเขตพื้นที่เมืองโดยพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยและค่าลดทอนจากมุมอาคาร”

ตีพิมพ์ที่ วิศวกรรมลาดกระบัง

เมื่อวันที่ ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2544

สถานที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายเจษฎา เพชรประเสริฐ เกิดเมื่อวันที่ 15 มกราคม 2517 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีโทรคมนาคม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2539 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรติดตั้งและพัฒนาเครือข่าย (Radio & Transmission Operations) ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ ที่บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (AIS) จวบจนปัจจุบัน และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า (ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2541

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

พิเชฐ ม่วงนวล ถวิล พึ่งมา เจษฎา เพชรประเสริฐ และ ปราโมทย์ อนันต์วรพงษ์.
“การศึกษาการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่นของสถานีฐานแบบไมโครเซลล์ของระบบ GSM ในเขตพื้นที่เมืองโดยพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยและค่าลดทอนจากมุมอาคาร.” วิศวสาร
ลาดกระบัง ปีที่ 18 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2544 หน้า 99-104