

โครงข่ายผสมแบบดับเบิลสตาร์สำหรับเซลล์ขนาดเล็ก  
ในระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่

HYBRID DOUBLE STAR NETWORK FOR MICROCELLULAR  
IN MOBILE COMMUNICATION SYSTEM

ทัสนัย บรรลือ  
TASSANAI BANLUE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2545  
ISBN 974-643-844-9

โครงข่ายผสมแบบดับเบิลสตาร์สำหรับเซลล์ขนาดเล็ก  
ในระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่

**HYBRID DOUBLE STAR NETWORK FOR MICROCELLULAR  
IN MOBILE COMMUNICATION SYSTEM**

ทัสนัย บรรลือ

TASSANAI BANLUE

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 43255  
วัน, เดือน, ปี..... 8 ส.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-844-9

**HYBRID DOUBLE STAR NETWORK FOR MICROCELLULAR  
IN MOBILE COMMUNICATION SYSTEM**

**TASSANAI BANLUE**

**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 974-648-844-9**

**COPYRIGHT 2002**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์      โครงข่ายผสมแบบดับเบิลสตาร์สำหรับเซลล์ขนาดเล็ก  
ในระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่

นักศึกษา                    นาย ทศนัย บรรลือ

รหัสประจำตัว              41061060

ปริญญา                      วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                  วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.                          2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์      ผศ.ดร. สุทธิชัย นพนาดีพงษ์

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอโครงข่ายแบบ Hybrid Double Star (HDS) โดยพิจารณาที่ลักษณะของการเชื่อมโยงสัญญาณ ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระหว่าง Base Transceiver Stations (BTS) ของไมโครเซลล์ไปยัง Base Station Controllers (BSC) โดยใช้โครงข่าย HDS ที่ประกอบด้วยสายใยแก้วนำแสงและสายโคเอกเซียล ในบทความนี้ได้ปรับปรุงจากเดิมที่ใช้การเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุดเป็นการให้บริการเป็นกลุ่มของไมโครเซลล์ จากการให้บริการเป็นกลุ่มเซลล์จะส่งผลให้ ระยะของสายใยแก้วนำแสง จำนวนของเลเซอร์ไดโอดและโฟโตดีเทคเตอร์ลดลง โดยใช้ผลการคำนวณ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ ในการใช้โครงข่ายแบบ HDS นี้ กับเซลล์ที่มีพื้นที่การครอบคลุม น้อยๆเช่นไมโครเซลล์และพิโกเซลล์ และทำให้ราคาโดยรวมลดลงเมื่อนำมาใช้งานจริง

<b>Thesis Title</b>	Hybrid Double Star Network for Microcellular in Mobile Communication System
<b>Student</b>	Mr. Tassanai Banlue
<b>Student ID.</b>	41061060
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Suthichai Noppanakeepong

### **ABSTRACT**

This thesis presents the Hybrid Double Star (HDS) network. By described as an access link of Mobile Communications System between Base Transceiver Station (BTS) in microcell and Base Station Controller (BSC). This network architecture used Subcarrier Multiplexed Optical Fiber (SCMOL) and coaxial cable. By develop from point-to-point SCMOL link to several groups or unit cell of microcellular. The reduced total link length, number of laser diodes and photodetector in the unit cell structure based on the HDS network. The link length-dependent costs are compared for two reasonable values of the dynamic range. Analysis shows that network can use in small cell coverage or microcells and picocell the network cost would decrease proportionally.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถจัดทำสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยคำปรึกษาของ ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ ทั้งท่านยังเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่เอื้อเพื่อทั้งด้านวิชาการความรู้และความเอาใจใส่เป็นส่วนตัวกับศิษย์ทุกคน ขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง รวมถึง

ขอบพระคุณพระเจ้าที่ได้ให้โอกาส และเพื่อนพี่น้องคริสเตียนที่อธิษฐานเผื่อและให้กำลังใจ ขอบขอบคุณพ่อผู้เสียสละให้ความมานะและคำปรึกษาเสมอ ท่านได้เสียสละเพื่อมอบโอกาสทางการศึกษาในระดับต่างๆจนกระทั่งได้สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโทบัณฑิตและความสำเร็จทุกประการในชีวิตที่ท่านเป็นแรงบัลดาลใจ

ขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในรูปแบบการศึกษาวิจัยตลอดหลักสูตรการศึกษา เป็นหน่วยงานที่อำนวยความสะดวกอย่างยิ่งต่อวิชาการและการพัฒนาศักยภาพทางการวิจัย

ขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และ น้องๆ ห้อง T-302 ทุกคน ที่ให้คำแนะนำผ่านการสัมมนาช่วยการช่วยตรวจสอบแก้ไข การศึกษาค้นคว้าวิจัยทางวิชาการที่สนับสนุนกันดีได้เป็นอย่างดี

ท้ายที่สุด ความรู้และประโยชน์ที่พึงได้รับจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบความดีให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ทัศนัย บรรลือ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 เพราะเหตุใดปัญหานี้จึงน่าสนใจ.....	2
1.4 มีหลักการนำเสนอใหม่อย่างไร.....	3
1.5 ให้เปรียบเทียบกับหลักการเดิมที่มีอยู่.....	3
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีการสื่อสาร โทรศัพท์เคลื่อนที่.....	5
2.1 วิวัฒนาการการสื่อสาร โทรศัพท์เคลื่อนที่.....	5
2.1.1 โทรศัพท์เคลื่อนที่เมคโครเซล.....	6
2.1.2 โทรศัพท์เคลื่อนที่ไมโครเซล.....	6
2.1.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติเมคโครเซลและไมโครเซล.....	7
2.1.4 โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบผสม.....	9
2.2 รูปแบบเซล.....	10
2.2.1 เลขาคณิตของเซลจำลองหกเหลี่ยม.....	10
2.2.2 อัตราส่วนโคเซลเนลอินเตอร์เฟอเรนซ์.....	14
2.2.2.1 โคเซลเนลอินเตอร์เฟอเรนซ์ของเซลรอบทิศทาง.....	14
2.2.2.2 โคเซลเนลอินเตอร์เฟอเรนซ์ของเซลแบบมีทิศทาง.....	17
2.2.3 การขยายความจุช่องสัญญาณ.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM.....	19
2.3.1 การจัดสรรความถี่เมคโครเซล .....	20
2.3.2 โพรโตคอลของ GSM .....	23
2.3.3 โครงสร้างช่องสัญญาณของ GSM.....	28
2.3.3.1 ช่องสัญญาณเสียง.....	28
2.3.3.2 ช่องสัญญาณควบคุม.....	30
2.4 ช่องสัญญาณและความจุ .....	31
2.4.1 ช่องสัญญาณและกำลังส่ง.....	33
2.4.1.1 ความถี่กลับมาใช้ใหม่แบบมัลติเพลเจอร์.....	33
2.4.1.2 นำความถี่เดิมมาใช้แบบไม่ซ้ำ.....	35
บทที่ 3 สัญญาณและสัญญาณรบกวน .....	37
3.1 สัญญาณ (Signal) .....	37
3.1.1 กรณีอากาศเป็นตัวกลาง .....	37
3.1.1.1 การแพร่กระจายคลื่นในพื้นที่ว่าง .....	37
3.1.1.2 ลักษณะการแพร่กระจายคลื่นพื้นฐาน .....	38
3.1.2 สมการการลดทอนทางปฏิบัติ .....	42
3.1.2.1 สมการการลดทอนของ Okumura .....	43
3.1.2.2 สมการการลดทอนของ Hata .....	44
3.1.2.3 สมการการลดทอนของ Walfisch-Ikegami.....	45
3.1.2.4 สมการ Walfisch-Ikegami สำหรับ GSM ไมโคร-เมคโครเซล .....	47
3.1.3 การสื่อสารด้วยแสง .....	48
3.1.3.1 การประมวลผลสัญญาณทางแสง .....	49
3.1.4 การส่งผ่านสายโคเอกเซียล.....	53
3.2 สัญญาณรบกวน .....	57
3.2.1 สัญญาณรบกวนภายใน .....	57
1) เทอร์มินัลนอัสัย.....	57

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2) ชอทนอส์ย .....	57
3) กระแสมีค .....	58
4) ภาคขยายสัญญาณ .....	58
5) การผิคเพี้ยนจากการคลิป .....	61
6) เทอมผลคุณของหลายช่องสัญญาณ .....	62
7) รีเลทีฟอินเทนซิตีโนส์ย.....	65
บทที่ 4 วิเคราะห์การเชื่อม โยงสัญญาณ .....	66
4.1 เชื่อมโยงด้วยระบบไมโครเวฟ .....	68
4.2 เชื่อมโยงด้วยระบบทางแสง .....	68
4.3 เชื่อมโยงด้วยโครงข่ายระบบผสม .....	69
4.3.1 เชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียล .....	70
4.3.2 เชื่อมโยงด้วยสายใยแก้วนำแสง .....	71
4.3.3 เชื่อมโยงด้วยระบบผสม .....	72
บทที่ 5 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์การออกแบบ โครงข่าย HDS .....	77
5.1 รัศมีไมโครเซลและระยะเชื่อม โยงสัญญาณ.....	76
- ระยะครอบคลุมเซลกับกำลังส่ง	
- ระยะโครงข่ายภายในไมโครเซล	
- ราคากับระยะ โครงข่าย	
- ระยะครอบคลุมเซลกับความจุทราฟฟิค	
5.2 โครงสร้างโครงข่ายผสมแบบ HDS.....	80
- ระยะเชื่อมโยงที่น้อยที่สุด	
- ช่องสัญญาณรวมของโครงข่าย HDS	
- ราคาของระบบ	
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ.....	85
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	85
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	86

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม .....	87
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	101

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่าง ความถี่ TCH (Traffic Channel) ในรูปแบบ 4/3.....	20
2.2	ตัวอย่างความถี่ BCCH (Broadcast Control Channel).....	20
2.3	ตัวอย่างข้อกำหนดของ โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบเมคโครเซลและไมโครเซล.....	21
2.4	ลำดับกำลังส่งของโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ของความถี่ย่าน 900 และ 1800.....	21
2.5	ความถี่นำกลับมาใช้ใหม่กับไมโครเซลในแต่ละเซลล์.....	33
3.1	โอกาสกับระดับความน่าเชื่อถือ.....	43
4.1	เปรียบเทียบ BTS เดิม (เมคโครเซล) และ BTS ทวนสัญญาณ (ไมโครเซล).....	71
4.2	แสดงรัศมีครอบคลุมไมโครเซลกับความหนาแน่นผู้ใช้.....	73
4.3	ราคาโดยประมาณเฉพาะส่วนของอุปกรณ์โครงข่าย.....	76

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เพิ่มความจุทราฟฟิกด้วยไมโครเซล.....	9
2.2	เลขาคณิตและระบบพิกัดรูปหกเหลี่ยม.....	11
2.3	ระยะอินเตอร์เฟอเรนซ์กับการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่.....	12
2.4	ระดับกำลังสัญญาณกับระยะทางของ 3 เซลเรียงตามแนว.....	14
2.5	การโคเซลเนลอินเตอร์เฟอเรนซ์ของเซลจากเซลรอบเซลพิจารณา.....	15
2.6	เทียบ CIR ของสมการอินเตอร์เฟอเรนซ์ที่ (2.19) (2.21) และ (2.23).....	16
2.7	เซลแบบกระจายสัญญาณแบบมีทิศทาง.....	17
2.8	เซลเคอร์แบบ 120 ดีกรี นำความถี่กลับมาใช้ใหม่แบบ 4/3.....	19
2.9	ตัวอย่าง BTS ของระบบ GSM ที่ใช้ทั้งภายใน และ นอกอาคาร.....	22
2.10	สัญญาณในแต่ละเลเซอร์ในระบบ GSM/DCS1800.....	23
2.11	โครงสร้างหน้าที่การทำงานโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM.....	25
2.12	แสดงเลขเอร์ในส่วนของตัวเครื่องลูกข่าย.....	28
2.13	โครงสร้างช่องสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM.....	29
2.14	ประเภทของช่องสัญญาณควบคุม.....	30
2.15	แสดงอัตราการเรียกและการตอบสนองของ BSC04 ในช่วงเริ่มให้บริการ (DPC).....	32
2.16	แสดงจำนวนเมกโครเซล ( $n_{Om}$ ) โกลจากตำแหน่งไมโครเซลพิจารณามากที่สุด.....	34
2.17	การเพิ่มทราฟฟิกโดยนำความถี่เมกโครเซลกลับมาใช้.....	34
3.1	แสดงเลขคณิตสำหรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน.....	39
3.2	การหักเหและแหล่งกำเนิดคลื่นอันดับสองของฮิวเคน.....	40
3.3	แสดงการหักเหของคลื่นกับอาคารและการสะท้อน.....	45
3.4	แสดงหลักการพื้นฐานของการตรวจจับแบบร่วมนัย.....	51
3.5	แสดงวงจรสมมูลด้านหน้าของภาคขยายสัญญาณ.....	58
3.6	สัญญาณถูกคลิป์ในช่วงที่ไม่อุปกรณ์ไม่สามารถจ่ายกำลังได้.....	61
3.7	ผลการรวมหลายช่องสัญญาณทำให้เกิดทอมอื่นๆขึ้น.....	63
3.8	จำนวนทอมของ CTB เทียบกับจำนวนช่องสัญญาณความถี่.....	65
4.1	โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM.....	66
4.2	พื้นที่ติดตั้งเมกโครเซลอย่างหนาแน่น ย่าน รัชดาภิเษก กรุงเทพฯ.....	67

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.3	ลักษณะการเชื่อมโยง จาก BTS – BSC ด้วยระบบไมโครเวฟ.....	68
4.4	โครงข่ายแสงทั้งหมดสำหรับ ไมโครเซลล์แบบ Radio port-Broadband.....	69
4.5	โครงสร้างทั่วไปของการเชื่อมโยงในระบบผสม (Hybrid Double Star Link).....	70
4.6	เชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียลช่วงเคียว.....	70
4.7	เชื่อมโยงด้วยสายใยแก้วนำแสงช่วงเคียว.....	72
4.8	โครงข่ายผสมแบบดับเบิลสตาร์สำหรับ ไมโครเซลล์ แสดงการเชื่อมโยงขาขึ้น (Up-Link)	72
5.1	แสดงกำลังที่รับได้จากกำลังส่งหลายระดับเทียบกับระยะทาง.....	77
5.2	แสดงระยะการเชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียลและสายใยแก้วนำแสง เทียบระหว่างระยะเชื่อมโยงและ CNR.....	78
5.3	แสดง CNR กับระยะการเชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียลและสายใยแก้วนำแสงที่อัตราขยาย ของ RF-Amp ต่างกัน .....	79
5.4	แสดงราคาเชื่อมโยงกับระยะเชื่อมโยง.....	79
5.5	แสดงผลอัตราส่วนระยะเชื่อมโยงรวมกับจำนวนโครเซลล์ต่อกลุ่มเซลล์.....	81
5.6	อัตราส่วนของราคาสายโคเอกเซียลต่อสายใยแก้วนำแสง $C_{\text{coax}}/C_{\text{fiber}}$ กับอัตราส่วนราคาโครงข่ายผสมแบบ HDS และแบบทั่วไป.....	81
5.7	แสดงอัตราส่วน $r/R$ กับจำนวนไมโครเซลล์ที่เหมาะสม.....	82
5.8	อัตราส่วนราคาของโครงข่ายกับชนิดสายโคเอกเซียลและขนาดกลุ่มเซลล์.....	82

## คำย่อและสัญลักษณ์

A : an interface  
ACCH : associated control channel  
ADPCM : adaptive PCM  
AGCH : access grant channel  
AUC : authentication center  
BCCH : broadcast control channel  
BER : bit error rate  
Bps : bit per second  
BS : base station  
BSC : base station controller  
BSIC : base station identity code  
BSS : base station system  
BTS : base transceiver station  
CCCH : common control channel  
CIR : carrier-to-interference ratio  
DCCH : dedicated control channel  
EIR : equipment identity register  
FACCH : fast associated control channel  
FCCH : frequency correction channel  
FDMA : frequency division multiple access  
FEC : forward error correction  
FCC : forward control channel  
FN : frame number  
GMSC : gateway mobile switching center  
GMSK : gaussian minimum shift keying  
GOS : grade of service  
GSM : global system for mobile communication  
HLR : home locating registrar  
ID : identification

## คำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

ISDN : integrated services digital network

MS : mobile station

MSC : mobile switching center

NMC : network management center

OMC : operations and management center

OSI : open system interconnection

PCH : paging channel

PCM : pulse code modulator

PCN : personal communications network

PCS : personal communication services

PHS : personal handyphone system

PIN : personal identification number

PSTN : public switched telephone network

RACH : random access channel

RFCH : radio frequency channel

RR : radio resource

RX : receiver, or Rx

SACCH : slow associated control channel

SCH : synchronization channel

SDCCH : stand-alone dedicated control channel

SIM : subscriber identity module

SNR : signal-to-noise ratio

SS7 : signaling system No.7

TACS : total access communications

TCH : traffic channel

TDMA : time division multiple access

TRAU : transcoder unit

TRX : transceiver

VLR : visitor location register

# บทที่ 1

## บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิจัยวิธีการเชื่อมโยงสัญญาณจาก BTS (Base Transceiver Stations) ไปยังสถานีควบคุม BSC (Base Stations Controller) และ MSC (Mobile Switching Center) โดยใช้โครงข่ายที่นำเสนอเป็นโครงข่ายผสมที่ประกอบด้วย สายโคเอกเซียลและสายใยแก้วนำแสง เพื่อสนับสนุนต่อไมโครเซลในระบบ GSM วัตถุประสงค์และขั้นตอนการดำเนินงาน ตลอดจนประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในระยะเริ่มแรกของการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่มีผู้ต้องการใช้บริการจำนวนน้อย การติดตั้งเซลล์ไซต์ (Cell Site) จึงเป็นเซลล์ใหญ่และระยะครอบคลุมของเซลล์กว้างหลายสิบกิโลเมตร โดยเฉพาะในต่างจังหวัดจะติดตั้งเซลล์ไซต์ (Cell Site) เพียง 1 – 2 เซลล์ไซต์ในตัวเมือง การเชื่อมโยงสัญญาณและสัญญาณควบคุมจากสถานีฐาน (Base Transceiver Stations) กับสถานีควบคุมสถานีฐาน (Base Stations Controller) จึงใช้วิธีส่งผ่านไมโครเวฟ (Microwave Link) ทำให้สะดวกและประหยัดการวางโครงข่าย และในเมืองหลวง เช่น กรุงเทพมหานคร สามารถเลือกใช้ทั้งไมโครเวฟและโครงข่ายสายใยแก้วนำแสงหรือผสมทั้งสองอย่าง เพราะการติดตั้ง BTS (Base Transceiver Stations) เป็นไปอย่างหนาแน่น ทำให้สามารถใช้โครงข่ายสายใยแก้วนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามเมื่อความต้องการการติดตั้ง BTS เพิ่มขึ้นตามความต้องการใช้งาน ทำให้หลายพื้นที่ เช่น ในพื้นที่ธุรกิจในกรุงเทพมหานครมีระยะห่างการติดตั้งเมกโครเซลน้อยมาก ประมาณ 500 – 800 เมตร ซึ่งในระยะนี้เราสามารถวางแผนในการติดตั้งไมโครเซลแทนเมกโครเซลและการศึกษาวิจัยเรื่องโครงข่ายสนับสนุนจึงน่าสนใจสำหรับการพิจารณาและปรับปรุงให้เหมาะสมและยืดหยุ่นเพื่อสามารถลดค่าใช้จ่ายของโครงข่ายการเชื่อมโยงจำนวนมากลงได้ และสามารถวางแผนเพื่อรองรับกับการติดตั้งไมโครเซล ทั้งในปัจจุบันที่มีความต้องการการใช้งานระดับหนึ่งและในอนาคตที่ต้องการการใช้งานเพิ่มมากขึ้น โดยที่โครงข่ายการเชื่อมโยงและตัวแปรอื่นๆ สัมพันธ์ทั้งการติดตั้งเฉพาะจุดในปัจจุบันและเต็มพื้นที่ในหลายพื้นที่ในอนาคต

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาถึงข้อได้เปรียบเสียเปรียบของไมโครเซลและเมกโครเซลและทำการประยุกต์ให้

เหมาะสมโดยอ้างอิงที่ระบบเมคโครเซลในระบบ GSM (Global System for Mobile Communications) เพราะในขณะที่ทำการศึกษาที่ ทั้งสองระบบค่อนข้างแยกกันอย่างเด็ดขาดในประเทศไทย จึงน่าสนใจในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไมโครเซลและเมคโครเซลให้อยู่ในระบบเดียวกัน โดยบรรยายเจาะจงในหัวข้อที่เกี่ยวข้องให้ชัดเจน และหัวข้อหลักของวิทยานิพนธ์อยู่ที่การนำเสนอโครงข่ายที่สามารถรองรับกับการนำเสนอแนวคิดนี้ได้และมีความยืดหยุ่นต่อการรองรับไปยังอนาคตด้วย

### 1.3 เพราะเหตุใดปัญหานี้ถึงน่าสนใจ

แนวโน้มการติดตั้งเมคโครเซลที่เพิ่มมากขึ้นดังกล่าวทำให้ระยะการครอบคลุม Cell Site ลดลงมากจนอยู่ในระยะของไมโครเซลซึ่งเห็นได้ในหลายพื้นที่โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานคร อยู่ที่ประมาณ 300 – 800 เมตร จำนวนหลาย Cell Site เช่น สีลม รัชดาภิเษก สุขุมวิท เป็นต้น พื้นที่ดังกล่าวทำให้ต้องติดตั้ง Cell Site เพิ่ม ในระบบเมคโครเซล โดยใช้เทคโนโลยีการติดตั้งแบบเดิมคือ เสาสูงเป็นเสาสูง BTS เป็นระบบเต็มรูปแบบ และการเชื่อมโยงสัญญาณจาก BTS ไปยัง BSC ใช้ระบบเดิมคือดิจิทัลเต็มรูปแบบ ทำให้โครงข่ายการเชื่อมโยงทั้งระบบไมโครเวฟ หรือการเชื่อมโยงทางแสงใช้อุปกรณ์เป็นจำนวนมาก จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะพิจารณาติดตั้ง BTS เป็นไมโครเซลในพื้นที่ที่หนาแน่นโดยบริหารความถี่ใหม่ และทำการออกแบบโครงข่ายให้เหมาะสม เพื่อให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโครงข่ายการเชื่อมโยงสัญญาณและมีความยืดหยุ่นกับการเปลี่ยนแปลงได้มากขึ้น โดยเลือกโครงข่ายทางแสงเป็นหลักในการวิจัย เพราะมีเสถียรภาพและมีความยืดหยุ่นสูง

ระบบเมคโครเซลและไมโครเซลมีคุณสมบัติเด่นต่างกัน เช่น สามารถสื่อสารเคลื่อนที่ได้ที่ความเร็วสูงในพื้นที่เมคโครเซล และการให้สัญญาณครอบคลุมบริเวณกว้างทำได้ง่ายกว่าไมโครเซลซึ่งหมายถึงสัญญาณมีเสถียรภาพมากกว่า และในประเทศไทยทั้งสองระบบจะแยกจากกันอย่างเด็ดขาด จึงน่าสนใจสำหรับการทำไมโครเซลในระบบเมคโครเซลเดิม แม้การติดตั้งไมโครเซลในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเพื่อแก้ปัญหาสัญญาณ เรายังสามารถออกแบบรูปแบบเซลล์และโครงข่ายการเชื่อมโยงให้ง่าย สะดวกในการติดตั้งและการดูแลรักษา และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งทั้ง Cell Site และโครงข่ายการเชื่อมโยงลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับแบบเดิมที่เป็นแบบจุดต่อจุดทุก Cell Site ในระบบเดิม และสามารถรองรับกับการเติบโตขึ้นของโครงข่าย

เมื่อพิจารณาไปถึงระยะภายในไมโครเซลที่น้อยนี้เองทำให้เราสามารถนำเอาสายโคเอกเซียลมาใช้เป็นสายอากาศระยะไกลหรือสายส่งสัญญาณร่วมกับสายใยแก้วนำแสงได้ด้วย ซึ่งจะได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาเหล่านี้พร้อมทั้งรูปแบบโครงข่ายและค่ากำหนดที่เหมาะสมในเนื้อหาในวิทยานิพนธ์อย่างละเอียดต่อไป

## 1.4 มีการนำเสนอหลักการใหม่อย่างไร

โดยการนำข้อดีของระบบไมโครเซลและพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของเมกโครเซล นำเสนอโครงข่ายที่สามารถรองรับกับการออกแบบได้ การจัดความถี่เมกโครเซลนำมาใช้ในไมโครเซลอีกครั้ง จนกลายเป็นโครงข่าย HDS (Hybrid Double Star Network) และนำเสนอโครงข่ายผสมแบบ HDS เพื่อรองรับกับการติดตั้ง BTS จำนวนมาก นี้ได้นำเสนอให้ติดตั้งเมกโครเซลให้ครอบคลุมพื้นที่บริเวณกว้าง และพิจารณาถึงการติดตั้งไมโครเซลแทนการติดตั้งเมกโครเซลอย่างเดียว การติดตั้งไมโครเซลสามารถรองรับได้ทั้งเรื่องความจุช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้น เพราะมีช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้ของเมกโครเซลในพื้นที่ไมโครเซลนั่นเอง เป็นไมโครเซลที่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วสูงเพราะมีการรองรับของเมกโครเซลอีกเลเยอร์หนึ่ง และนำข้อดีของระบบไมโครเซลมาใช้ร่วมกับเมกโครเซลได้

โครงข่าย HDS ได้นำเสนอ การใช้ทั้งสายโคเอกเซียลและสายใยแก้วนำแสงมาเชื่อมโยงสัญญาณ ระหว่าง BTS – BSC โดยรวมสัญญาณจากหลายๆ BTS ก่อนส่งสัญญาณผ่านสายใยแก้วนำแสงแทนการใช้โครงข่ายแบบเดิมที่เป็นระบบไมโครเวฟหรือโครงข่ายสายใยแก้วนำแสงเชื่อมโยงถึงทุก BTS ทั้งหมด และออกแบบการวาง BTS สำหรับปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณเดียวกันและพิจารณาถึงรูปแบบการวางไมโครเซลที่มีลักษณะคล้ายกันเพื่อสามารถประยุกต์ใช้งาน ได้ทั้งแบบเฉพาะจุดสำหรับบางพื้นที่ที่ต้องการการแก้ไขปัญหาสัญญาณหรือเพิ่มความจุช่องสัญญาณก็ตามหรือไมโครเซลสำหรับอาคาร และแบบเต็มพื้นที่เป็นบริเวณกว้างเพื่อรองรับกับการขยายความต้องการการติดตั้งไมโครเซลในอนาคตด้วย

## 1.5 ให้เปรียบเทียบกับหลักการเดิมที่มีอยู่

ไมโครเซลส่วนใหญ่ในกรุงเทพมหานครใช้เพื่อแก้ไขปัญหาของสัญญาณบางจุด เช่น จุดอับสัญญาณและอาคารสูงที่มีปัญหาสัญญาณอินเตอร์เฟอเรนซ์ ในกรณีที่นำมาเพิ่มความจุช่องสัญญาณนั้น ถ้าในระบบเมกโครเซลสำหรับระบบ GSM ก็มักจะเพิ่มการติดตั้งสถานีฐานเข้าไปโดยตรง ถ้าเป็นระบบไมโครเซลที่พื้นที่ครอบคลุมน้อยก็จะสามารถรองรับกับความต้องการสูงได้อยู่แล้ว แต่ทั้งสองระบบในประเทศไทยโดยเฉพาะกรุงเทพมหานครจะต่างระบบไม่สามารถใช้สัญญาณความถี่ร่วมกันได้ มีข้อเปรียบเทียบจุดเด่นจุดด้อยเกิดขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอไมโครเซลในระบบเมกโครเซล และ เน้นการศึกษาวิจัยที่โครงข่ายผสมที่สามารถรองรับกับการติดตั้งไมโครเซลแบบบางจุดในปัจจุบัน หรือ ขยายการครอบคลุมเซลล์ขึ้นจนเต็มพื้นที่เข้าใกล้การสื่อสารส่วนบุคคลด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่ในอนาคตได้

เมกโครเซลเป็นเซลล์ใหญ่จึงใช้วิธีการเชื่อมโยงสัญญาณจาก BTS ไปยัง BSC เป็นแบบจุดต่อจุดทุก Cell Site และ BTS เต็มหน้าที่การทำงาน เมื่อเมกโครเซลมีรัศมีการครอบคลุมเซลล์น้อยเรา

สามารถใช้สายโคเอกเซียลเป็นส่วนเชื่อมโยงสัญญาณภายในกลุ่มเซลล์ (Unit cell) แทนการเชื่อมโยงแบบดิจิทัลทั้งหมด และสามารถประยุกต์เป็นแบบสายอากาศระยะไกล แบบไม่รวมช่องสัญญาณ เพราะปัญหาเรื่องการรบกวนจากสัญญาณช่องเดียวกันหรือสามารถรวมช่องสัญญาณความถี่ทุกช่องสัญญาณรวมถึงสัญญาณควบคุมสถานีฐานด้วยเมื่อใช้โครงข่าย HDS กับอาคารสูงเพราะมีอุปกรณ์กีดขวางมากกว่าไมโครเซลล์ในพื้นที่ราบ

เดิม BTS ทำหน้าที่รับ-ส่งสัญญาณ โดยเฉพาะเลเซอร์กายภาพกับ Mobile Station (MS) และถูกควบคุมโดยสถานีควบคุมสถานีฐาน Base Stations Controller (BSC) และ BSC เชื่อมโยงการส่งผ่านพร้อมทั้งควบคุมโดย MSC (Mobile Service Switching Center) อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจาก MS-BTS ส่งผ่านอากาศ (Air Interface) และ BTS-BSC ใช้การส่งสัญญาณเป็นข้อมูลดิจิทัล (Abis Interface) ทำให้เมื่อใช้ BTS เต็มหน้าที่กับไมโครเซลล์จำนวนมากที่มีราคาสูง ใช้สถานที่ติดตั้ง BTS พื้นที่มาก(ซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งของการติดตั้งไมโครเซลล์โดยใช้ BTS เต็มหน้าที่ให้กระจายเต็มพื้นที่บริเวณกว้าง) การดูแลรักษายากขึ้นเมื่อมี BTS จำนวนมากโดยเฉพาะไมโครเซลล์ ซึ่งในระบบโครงข่าย HDS สามารถใช้ BTS เป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณและ BTS เป็นเพียงสายอากาศและให้ BTS รวมอยู่ที่เซลล์ศูนย์กลางของกลุ่มเซลล์ (Unit Cell) ทำให้ดูแลรักษาง่าย กำหนดสถานที่ติดตั้งให้ตรงตำแหน่งออกแบบไมโครเซลล์ได้ง่ายขึ้น BTS มีราคาถูก และอุปกรณ์ของโครงข่ายการเชื่อมโยงลดลง

## 1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บทด้วยกัน กล่าวคือ

บทที่ 1 บทนำ : กล่าวถึงความเป็นมาของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ปัญหาที่น่าสนใจ และการเปรียบเทียบหลักการใหม่กับหลักการเดิม

บทที่ 2 ทฤษฎีการสื่อสาร โทรศัพท์เคลื่อนที่ : กล่าวเริ่มต้นจากการวิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ บรรยายถึงหลักการสื่อสาร โทรศัพท์เคลื่อนที่

บทที่ 3 สัญญาณและสัญญาณรบกวน : กล่าวถึงสัญญาณที่ต้องการ และสัญญาณรบกวนที่แทรกเข้ามาในระบบ ที่ต่อมาเป็นความจำกัดของระบบ ทราบถึงเงื่อนไขและตัวแปรออกแบบ

บทที่ 4 วิเคราะห์การเชื่อมโยงสัญญาณ : กล่าวถึงการออกแบบโครงข่าย นำเสนอและพิจารณาความเป็นไปได้ และตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ตลอดจนความจำเป็นและความเหมาะสมของระบบ

บทที่ 5 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์การออกแบบโครงข่าย HDS : แสดงผลการคำนวณและการวิเคราะห์ตัวแปร ตัวเลือกที่สามารถตัดสินใจนำไปใช้ได้

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ : เป็นบทสรุป พร้อมข้อเสนอแนะต่างๆ รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการวิจัย และคำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางในการวิจัยและพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

# ทฤษฎีการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่

บทนี้กล่าวถึงหลักการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นความรู้พื้นฐานของการวิจัย เพื่อช่วยต่อ การศึกษาในบทต่อไป เนื้อหาเริ่มจากวิวัฒนาการของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งทฤษฎีทั่วไปมีมาก ที่ใช้ เป็นความรู้ในการออกแบบ ผู้เขียนได้เลือกมาโดยเฉพาะเนื้อหาหลักที่จะสัมพันธ์ไปถึงการ ออกแบบโครงข่ายผสม โดยแสดงเป็นลำดับหัวข้อดังต่อไปนี้

### 2.1 วิวัฒนาการการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นที่นิยมใช้เพราะความสะดวกในการพกพา สามารถติดต่อ สื่อสารขณะเดินทางได้ภายในพื้นที่การบริการ และสามารถเชื่อมโยงสัญญาณไปยังพื้นที่การบริการ อื่นได้โดยผ่านตัวกลาง เช่น อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Radio repeater(s)) สถานีฐาน (Base Station) และอุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณ (Switch(es)) เป็นต้น

ระยะการรับ-ส่งสัญญาณของทั้งเครื่องลูกข่าย (Mobile station) และสถานีฐาน (Base station) ถูกจำกัดที่กำลังส่ง เวลาหน่วง และ สภาพแวดล้อม เมื่อระยะทางสื่อสารมีพื้นที่ขอบเขต จำกัดจึงจำเป็นต้องมีโครงข่ายที่สนับสนุนสามารถเชื่อมโยงสัญญาณไปยังทุกพื้นที่บริการและมีความยืดหยุ่นต่อการบริหารจัดการได้ในภายหลัง เมื่อพิจารณาที่พื้นที่ครอบคลุม 1 เซลจะเห็นว่าเซล และการจัดการหลายๆเซลต่อกันเป็นรูปรวงผึ้ง (Cellular) ดังรูป 2.1 ก็จะสามารถให้บริการเต็มพื้นที่

#### 2.1.1 โทรศัพท์เคลื่อนที่เมคโครเซล

โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถแยกตามขนาดของเซลได้สองระบบคือ เซลขนาดใหญ่ (เมคโคร เซล) และ เซลขนาดเล็ก (ไมโครเซล/พิโกเซล) ซึ่งรวมไปถึงโครงข่ายสนับสนุนระบบที่อาจ แตกต่างตามไปด้วย เมคโครเซลมีพื้นที่ครอบคลุมกว้าง (ประมาณ 1-35 กิโลเมตร) ที่สามารถ สื่อสารขณะเดินทางเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่อง

โทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคต้นจะใช้เพื่อสื่อสารทางเสียงเท่านั้น เริ่มต้นด้วยมอดูเลท สัญญาณเสียงแบบอนาล็อก จนถึงแบบดิจิทัล หรือผสมทั้งสองอย่างเข้าด้วยกัน ส่งสัญญาณแบบ ช่องสัญญาณเดียวต่อความถี่เดียวต่อหนึ่งเครื่องลูกข่าย เรียกว่าการเข้าถึงแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access, FDMA) แบบแบ่งช่วงเวลา (Time Slot) ภายใต้ความถี่ เดียวกันเรียกว่าการเข้าถึงแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access, TDMA) และการเข้าถึง แบบต่างรหัส (Code Division Multiple Access, CDMA) ที่ใช้รหัสแทนแต่ละช่วงเวลาและความถี่

มีการพัฒนาเรื่องการเข้ารหัสสัญญาณในแต่ละชนิดมาเป็นลำดับทำให้ระบบโทรศัพท์เปลี่ยนแปลงไปด้วย ทั้งรองรับต่อวิถีชีวิตในการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เปลี่ยนแปลงไปมากกว่าการสื่อสารเพียงเสียงปกติ

การพัฒนาโทรศัพท์จาก กลุ่มประเทศนอร์ดิก (Nordic countries) จากห้องทดลองเบล ปี 1970 และเสนอเป็นธุรกิจโทรศัพท์ขึ้นมาจากได้ชื่อ Nordic Mobile Telephone ใช้ความถี่ย่าน 450 MHz (NMT 450 ) ในปี 1981 และจากกลุ่มอเมริกาเหนือ (North American ) ได้พัฒนาระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ชื่อ Advance Mobile Phone Service ใช้ความถี่ย่าน 800 MHz (AMPS 800) และเริ่มต้นให้บริการในปี 1983 ซึ่งทั้งหมดยังเป็นการมอดูเลทแบบ FM (Frequency Modulation)

ช่วงเวลาก่อนปี 1980 โทรศัพท์ใช้ระบบอนาล็อกมากกว่าดิจิทัลเหมือนดังปัจจุบัน แต่การขยายการบริการก็ทำให้ระบบมีราคาสูงมากขึ้น ระบบดิจิทัลที่มีคุณภาพสัญญาณดีกว่า ความคุมสัญญาณ (Signaling) ได้ดีกว่า และขยายความจุได้เพิ่มมากขึ้น โทรศัพท์ระบบดิจิทัลได้ถูกนำมาใช้ตั้งแต่ปี 1991 ในชื่อ American Digital Cellular (ADC) และในปีเดียวกันกับระบบ Global System for Mobile Communication (GSM 900) ที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันและใช้อย่างยิ่งในวิทยานิพนธ์นี้ด้วย ระบบ Digital Cellular System (DCS 1800) ในปี 1992 ดิจิตอลเซลลูลาร์นี้เป็นระบบเดียวกันกับ GSM 900 แต่นำมาใช้ในความถี่ย่าน 1800 MHz

จากความสำเร็จของโทรศัพท์ดิจิทัลโดยเฉพาะระบบ GSM ก็ได้มีการพัฒนาต่อให้เป็นระบบส่งความเร็วข้อมูลสูงขึ้น ที่พัฒนามาเป็นระบบ General Packet Radio Service (GPRS) ที่ไม่ต้องการการเชื่อมต่อกับช่องสัญญาณ (TCH) อย่างสมบูรณ์ และ พื้นฐานการเข้ารหัสเสียงของ GSM ก็จะใช้กันต่อไปในโทรศัพท์ในยุคที่สองพลัส (2G<sup>+</sup>) และระบบ Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) ของบริษัทวิจัย และมหาวิทยาลัยของยุโรปพัฒนาขึ้นมา ซึ่งต้องการช่องสัญญาณเป็น Broadband Multimedia Services

### 2.1.2 โทรศัพท์เคลื่อนที่ไม่โครเซล

ความต้องการของการสื่อสารช่วงเริ่มต้นยังต้องการการใช้งานช่องสัญญาณน้อย ต่อมาพอระบบเป็นเข้าสู่เชิงพาณิชย์ เป็นที่ต้องการมากขึ้นก็ได้มีการพัฒนาระบบให้มีความจุเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการขยายความจุแต่ละระบบก็มีค่าความจำกัดของตัวเอง ฉะนั้นการขยายวิธีการที่ปรับเปลี่ยนได้อย่างไม่จำกัดกับระบบทางช่องสัญญาณที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งคือการลดขนาดของการครอบคลุมเซลล์ลง ซึ่งขนาดที่เล็กลงไปที่ไม่เกิน 1 กิโลเมตร นี้เรียกว่าเป็นเซลล์ขนาดเล็กหรือไมโครเซล

ขนาดของเซลล์ที่เล็กจนมีอีกระบบหนึ่งในชื่อโทรศัพท์ส่วนบุคคลว่า Personal Communication System (PCS) ที่ครอบคลุมบ้าน อาคาร สำนักงาน และ นอกอาคารได้ด้วยระบบเดียวกัน ในสหรัฐอเมริกา ได้เริ่มใช้ในระบอบอนาล็อกมาเป็นเวลานานแล้วในระบบ FM ที่แถบความถี่ 1.6 MHz สำหรับความถี่ขาลง และ 49 MHz สำหรับขาขึ้นซึ่งไม่มีประสิทธิภาพมาก จึงจัดสรรความถี่ในช่วง

46.6 – 47.0 MHz และ 49.6 – 50.0 MHz สำหรับความถี่ขาลงและขาขึ้นตามลำดับ กับความกว้างแถบความถี่ (Channel Bandwidth) 20 kHz แต่ก็ยังไม่เพียงพอกับความต้องการเพราะในพื้นที่ที่ต้องการความถี่สูงก็จะมีเกิดการเหลื่อมล้ำ (Overlapping) จากช่องสัญญาณความถี่เดียวกันรบกวน (Co-Channels Interference) สูง หมายถึงคุณภาพสัญญาณที่ลดลงด้วย และในประเทศอังกฤษใช้ระบบ CT0 ความถี่ย่าน 1.7 MHz และ 47.5 MHz สำหรับความถี่ขาลงและความถี่ขาขึ้นตามลำดับ แต่ละแถบความถี่จะแบ่งได้ 8 ช่องสัญญาณ และยุโรปใช้ระบบ CEPT/CT1 ใช้ความถี่ช่วง 914 – 915 MHz และ 959 – 960 MHz สำหรับความถี่ขาขึ้นและความถี่ขาลงตามลำดับ กับแถบความถี่กว้างช่องสัญญาณความถี่ 25 kHz ทำให้มีช่องสัญญาณเสียงได้สูงถึง 40 ช่องสัญญาณ และระบบอนาล็อกในญี่ปุ่น ที่ความถี่ย่าน 254 MHz และ 380 MHz สำหรับความถี่ขาขึ้นและความถี่ขาลงตามลำดับ กับแถบความถี่กว้างช่องสัญญาณความถี่ 12.5 kHz พร้อมกับช่องสัญญาณควบคุมด้วย ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นระบบโทรศัพท์ไร้สายส่วนบุคคลระบบอนาล็อก

ระบบโทรศัพท์ไร้สายส่วนบุคคลดิจิทัลก็เป็นการประยุกต์ใช้ตามเทคโนโลยี สามารถสนับสนุนเรื่องสัญญาณ (Signaling) ได้มีประสิทธิภาพมากกว่า มีดังนี้คือ ระบบ CT2 ของอังกฤษ ในปี 1989 บริการสื่อสารทางเดียว (One-way outgoing) และไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามเขตหรือทำการแฮนด์โอเวอร์ได้ ระบบ CT2 ที่เพิ่มสัญญาณเพจเข้าไปด้วยเพื่อให้ผู้ใช้เรียกกลับในเอเชีย เช่นฮ่องกง จีน มาเลเซีย และ ไทย และการพัฒนาจากสถาบันมาตรฐานโทรคมนาคมของยุโรป (ETSI : European Telecommunication Standards Institute) ใช้มาตรฐานของ Open Standard Interconnection, OSI) หรือเหมือนกับโครงข่ายบริการร่วม (ISDN : Integrated Services Digital Network) และ ระบบ PHS (Personal Handy Phone System) ใช้โครงข่ายบริการร่วมระบบดิจิทัล (ISDN) หรือ ระบบ PCT (Personal Cordless Telephone) ที่สามารถรับส่งสองทางได้ และโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ก็พัฒนาสถานะที่ใช้สำหรับไมโครเซลหรือสำหรับ ด้วย GSM Cordless Telephone System (CTS) บนพื้นฐานระบบ GSM ผ่านคู่สาย ISDN และรองรับกับการสื่อสารความเร็วสูงในยุคที่สาม (3G) ได้ อีกทั้งเพิ่มโครงข่ายและใช้สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ส่วนบุคคล

### 2.1.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติเมคโครเซลและไมโครเซล

#### คุณสมบัติของเมคโครเซล

- ความเร็วเคลื่อนที่สูง เนื่องจากรัศมีครอบคลุมเขตมาก ทำให้รอยต่อเขตห่างกันมาก จึงเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วสูง
- ตัวเครื่องลูกข่ายมีกำลังส่งสูง ทำให้สามารถเลือกช่องสัญญาณว่างข้ามเขตได้ ใช้ในพื้นที่ลดทอนสูงและระยะไกลจากพื้นที่บริการได้
- พกพาได้สะดวกในพื้นที่ครอบคลุมกว้าง
- สัญญาณมีเสถียรภาพ ไม่ขาดหายบ่อย

### คุณสมบัติของไมโครเซล

- ความจุกราฟฟิคสูงกว่า
- ประหยัดพลังงานแบตเตอรี่
- ความเร็วในการส่งข้อมูลสูง
- เครื่องลูกข่ายราคาถูก
- ระบบราคาถูก เมื่อเทียบกับที่กราฟฟิคที่ระดับสูง
- ปลอดภัยจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### สรุปการเปรียบเทียบ และ ข้อคิด

โทรศัพท์เคลื่อนที่เมคโครเซลและไมโครเซล มีข้อดีและข้อด้อยกว่าแตกต่างกันตามคุณสมบัติของระบบ ในประเทศไทยเป็นระบบที่แยกจากกัน (PCT และ เซลลูลาร์ระบบอื่นๆ) ไม่สามารถเลือกระบบการรับ-ส่งสัญญาณ ได้ระหว่างเมคโครเซลกับไมโครเซล จึงต้องตัดสินใจในการเลือกใช้ตามความจำเป็นสูงสุด รวมไปถึงอัตราค่าบริการด้วย

กำลังส่ง : กำลังส่งของเครื่องลูกข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่แสดงให้เห็นมักเป็นกำลังส่งสูงสุดในทางปฏิบัติจะใช้กำลังส่งหลายระดับในวิธีการควบคุมกำลังส่ง ถ้าอยู่ใกล้สถานีฐานก็จะใช้กำลังส่งในระดับต่ำ ทำให้มีความปลอดภัยมากขึ้น ซึ่งโดยปกติจะเลือกการสื่อสารให้ได้ผล

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า : ไมโครเซลใช้กำลังส่งต่ำเพราะระยะทางใกล้ เมคโครเซลมีพื้นที่กว้างส่งด้วยกำลังส่งสูงโดยเฉพาะ นอกปริมณฑล หรือ ต่างจังหวัด เพราะระยะรับ-ส่งไกล

อัตราค่าบริการ : ทางความเป็นไปได้ GSM สามารถให้บริการที่ราคาประหยัดโดยเฉพาะในเมืองหลวงได้หากโครงข่ายมีมากพอที่จะรองรับกับการโทรศัพท์แทนโทรศัพท์บ้านและต้นทุนโครงข่ายมีราคาถูก และจำนวนผู้ใช้บริการมากจนเข้าใกล้โทรศัพท์ส่วนบุคคลมากขึ้น เช่น ระบบ CTS ที่สามารถให้บริการ ราคา/ครั้ง ได้เมื่ออยู่ในบ้านเป็นต้น

ความจุกราฟฟิค : ไมโครเซลจะสามารถให้ความจุกราฟฟิคได้สูงกว่า เพราะสถานีฐานหนาแน่น ให้บริการในพื้นที่ครอบคลุมน้อย

พื้นที่ครอบคลุม : เซลใหญ่จะให้พื้นที่ครอบคลุมได้ดีกว่า ทั้งกำลังส่งที่สูงทำให้ในพื้นที่บางพื้นที่ที่เหมือนดูมองข้ามก็สามารถมีสัญญาณไปถึงได้ ในขณะที่ไมโครเซลจะติดตั้งให้ครอบคลุมเขตชุมชนหนาแน่นก่อน อีกทางหนึ่งสถานีฐานของเมคโครเซลจะติดตั้งหนาแน่นก็จะหาพื้นที่ติดตั้งและดูแลยากกว่า รวมถึงมีราคาแพง

ราคาเครื่องลูกข่าย : ราคาเครื่องลูกข่ายของทั้งสองระบบปัจจุบันมีราคาใกล้เคียงกัน ทำให้ปัจจุบันผู้ใช้จะเลือกระบบและการบริการ ตามความจำเป็นในการใช้งาน

จุดอับสัญญาณ : ไมโครเซลจะเสียเปรียบตรงที่ทำให้พื้นที่ครอบคลุมกว้างด้วยเซลล์เล็กๆ ยากกว่า และ เมคโครเซลก็อาจมีจุดอับสัญญาณตามจุดบัง หรือ ชั้นใต้ดินได้เหมือนกัน

แบตเตอรี่ : ได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่มาเป็นลำดับจนเข้าใกล้การไม่เป็นการระกับผู้ใช้มากขึ้น

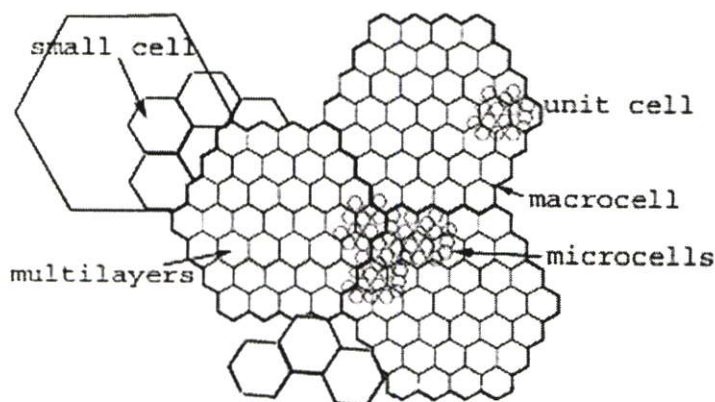
จากข้อเปรียบเทียบจะเห็นว่าไมโครเซลมีข้อได้เปรียบที่เด่นชัดที่ความจุของสัญญาณที่มากกว่าต่อพื้นที่ เสริมสัญญาณในพื้นที่ที่มีปัญหาอย่าง ชันใต้ดินที่จอร์จหรือจูดินเตอร์เฟอร์เรนซ์สูงที่อาคารสูง ซึ่งสามารถใช้ไมโครเซลแก้ปัญหาได้ แต่จะทำให้พื้นที่ครอบคลุมพื้นที่บริการทั้งหมดก็เป็นไปได้ยาก ในอีกทางหนึ่งก็นำความถี่เมกะโครเซลมาบริหารความถี่ใหม่ใช้สำหรับไมโครเซลโดยยังคงให้เป็นระบบสัญญาณความถี่เดิมผลทำให้รองรับทราฟฟิกได้สูงขึ้น แต่โครงข่ายและสถานีฐานของเมกะโครเซลมีราคาแพงจึงสามารถพิจารณาโครงข่ายไมโครเซลและเมกะโครเซลที่สามารถใช้ร่วมในระบบเดิมได้ คือโครงข่ายผสมนำโครงข่ายแบบผสมมาใช้กับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ เมื่อมีราคาถูกลงก็สามารถให้บริการด้วยราคาถูกลงได้โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานคร ที่อาจจะเป็นไมโครเซลของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถใช้รองรับกับโทรศัพท์ส่วนบุคคลในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ในอนาคต

#### 2.1.4 โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบผสม

โทรศัพท์ระบบผสมในปัจจุบันหมายถึง ย่านความถี่รวมกัน สามารถเลือกบริการต่างโครงข่าย หรือ ระบบโทรศัพท์มากกว่า 2 ระบบในเครื่องเดียว ซึ่งในวิทยานิพนธ์ระบบไมโครเซลรวมกับเมกะโครเซลในระบบเดียวกัน (GSM)

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่หากติดตั้งในพื้นที่ทราฟฟิกสูงให้พื้นที่ครอบคลุมแต่ละสถานีฐานน้อยจะทำให้มีราคาต้นทุนสูง ฉะนั้นเราสามารถใช้อิงข่ายผสมเพื่อสามารถใช้ข้อดีของไมโครเซล พร้อมทั้งโครงข่ายราคาประหยัดของไมโครเซลได้ และทำให้จุดเด่นของ 2 ระบบเซลมารวมกัน

เสถียรภาพของสัญญาณ : การขาดหายของสัญญาณช่วงเดินทางข้ามรอยต่อไมโครเซลจะลดลงเพราะมีพื้นที่ของเมกะโครเซลเป็นเลเยอร์ล่าง (Underlay) อีกเลเยอร์หนึ่งรองรับอยู่ รองรับกับการเคลื่อนที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.1 เพิ่มความจุทราฟฟิกด้วยไมโครเซล

ความจุทราฟฟิก : ความจุช่องสัญญาณหรือทราฟฟิกจะเพิ่มขึ้นกับสถานีฐานที่เพิ่มขึ้น หากติดตั้งไมโครเซลล์ (ในความถี่ระบบเมคโครเซลล์) บางพื้นที่ในช่วงเริ่มต้นก็มีโอกาสเลือกช่องสัญญาณว่างได้มากขึ้นแม้ในพื้นที่นอกไมโครเซลล์ด้วย หากติดตั้งไมโครเซลล์เต็มพื้นที่ก็สามารถใช้ประสิทธิภาพไมโครเซลล์ได้เต็มที่เรื่องความจุและใช้เมคโครเซลล์เรื่องการเคลื่อนที่และเสถียรภาพของสัญญาณ

พลังงานเบตเตอรี่ : จะใช้งานได้นานขึ้นเพราะมีโอกาสใช้ไมโครเซลล์รับ-ส่งระยะใกล้ในพื้นที่ไมโครเซลล์

อัตราค่าบริการ : ความเป็นไปได้เมื่อโครงข่ายไมโครเซลล์ราคาถูกและเข้าสู่โทรศัพท์ส่วนบุคคลได้ก็สามารถให้บริการที่ราคาต่ำได้เนื่องจากจำนวนผู้ใช้มาก แต่หากออกนอกพื้นที่เมคโครเซลล์ก็อาจยังคงค่าบริการเดิมไว้เป็นต้น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า : การควบคุมกำลังส่งหลายระดับของโทรศัพท์เคลื่อนที่ทำให้ปลอดภัยมากขึ้นเมื่อใช้ไมโครเซลล์ และนอกไมโครเซลล์ปกติแล้วมักจะเลือกความสามารถในการสื่อสารให้ได้ผล (โดยเฉพาะพื้นที่ลดทอนสูงและไกลออกไปจากพื้นที่บริการ) มากกว่าความปลอดภัยที่ยังไม่ทราบแน่ชัด (ระบบควบคุมกำลังส่งจะรักษาให้อยู่ในระดับไมโครเซลล์ หากอยู่ในใกล้สถานีฐานหรือเซลล์หนาแน่นมากขึ้น)

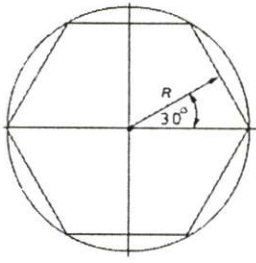
## 2.2 รูปแบบเซลล์ (Cell Feature)

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีช่องสัญญาณความถี่จำกัดตามระบบและข้อกำหนด ยิ่งหากมีการสัมปทานแบ่งความถี่ก็จะมีช่องความถี่ให้บริหารลดน้อยตามลงในแต่ละผู้ให้บริการไป ด้วยรูปแบบของเซลล์ในบทนี้จะเป็นส่วนแสดงให้เห็นถึงการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่และประเมินถึงผลกระทบได้ชัดเจนขึ้น รูปแบบของการจัดเซลล์จะเป็นผลในการบรรยายไปถึง โครงสร้างการจัดช่องสัญญาณ รูปแบบการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ ความจุช่องสัญญาณ จำนวนผู้ใช้ต่อพื้นที่รวมถึงคุณภาพของสัญญาณและการประเมินค่าใช้จ่ายของระบบได้จากรูปแบบเซลล์ไซท์ด้วย

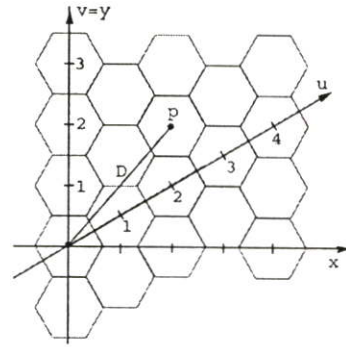
การจัดรูปแบบเซลล์ไซท์จะมีตัวแปรสัมพันธ์กันระหว่าง อัตราการนำความถี่มาใช้ใหม่ (Reuse ratio,  $q$ ) และกลุ่มความถี่ (Cluster size,  $N$ ) โดยใช้เซลล์รูปหกเหลี่ยมประกอบการบรรยาย โดยกระจายสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งสายอากาศแบบรอบทิศทาง (Omni directional antenna) และสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional antenna)

### 2.2.1 เสาคณิตของเซลล์จำลองหกเหลี่ยม (Geometry of hexagonal cell)

เซลล์รูป 6 เหลี่ยมสมมาตรวางชิดกันจะเกิดแกน  $u$  และแกน  $v$  ขึ้นตามธรรมชาติรูป 6 เหลี่ยมเทียบกับแกน  $x, y$  ปกติ ได้ระยะห่างจุดใดๆกับจุดเริ่มต้นแกน  $(0,0)$  เป็น



ก



ข

รูปที่ 2.2 เลขาคณิตและระบบพิกัดรูปหกเหลี่ยม

$$D^2 = x^2 + y^2 \quad (2.1)$$

$$D^2 = u^2 \cos^2 30^\circ + (v + u \sin 30^\circ)^2 \quad (2.2)$$

$$D^2 = u^2 + v^2 + uv \quad (2.3)$$

$$\therefore D = (u^2 + v^2 + uv)^{1/2} \quad (2.4)$$

และได้ระยะห่างตำแหน่ง 2 จุดใดๆบนพิกัดเป็น

$$D^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 \quad (2.5)$$

$$D^2 = (u_2 - u_1)^2 \cos^2 30^\circ + [(v_2 - v_1) + (u_2 - u_1) \sin 30^\circ]^2 \quad (2.6)$$

$$D = \{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2 + (v_2 - v_1)(u_2 - u_1)\}^{1/2} \quad (2.7)$$

$$D = [i^2 + j^2 + ij]^{1/2}, i = (u_2 - u_1), j = (v_2 - v_1) \quad (2.8)$$

$$\therefore D/R = \{3(i^2 + j^2 + ij)\}^{1/2} \quad (2.9)$$

เมื่อระยะ  $D$  ของเซลล์ติดกันเท่ากับ  $\sqrt{3}R$

$$\therefore D^2 = 3R^2(i^2 + j^2 + ij) \quad (2.10)$$

และสามารถหาพื้นที่ของรูป 6 เหลี่ยมสมมาตร ดังรูป 2.2 ได้ดังนี้

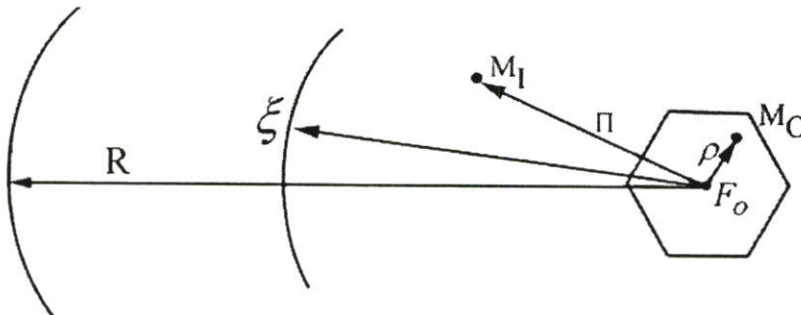
$$A_{large} = k[3R^2(i^2 + j^2 + ij)] \quad (2.11)$$

$$A_{small} = k(R^2) \quad (2.12)$$

เพราะฉะนั้นอัตราส่วน  $A_{large} / A_{small}$  ก็คือจำนวนเซลล์ในพื้นที่อินเตอร์เฟอเรนซ์รอบๆ เซลล์นั่นเอง

$$\frac{A_{large}}{A_{small}} = 3(i^2 + j^2 + ij) = \frac{D^2}{R^2} = 3N \quad (2.13)$$

$\frac{D}{R} = q = \sqrt{3N}$  ;  $N$  เป็นจำนวนเซลล์ใน 1 กลุ่ม  $q$  เป็นอัตราส่วนการนำความถี่มาใช้ใหม่



รูปที่ 2.3 ระยะอินเตอร์เฟอเรนซ์กับการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่

$M_0$  คือ MS ในเซลล์ข้างเคียงในรัศมี  $r$  ภายในระยะ  $\rho$  จากตำแหน่งอ้างอิง  $F_0$ ,  $M_1$  คือ MS อินเตอร์เฟอเรนซ์ในพื้นที่บริการรัศมี  $R$  ในระยะจริง  $\Pi$  [4]

สัญญาณรับได้ที่  $F_0$  จาก  $M_0$  ให้เป็น  $c$  และอินเตอร์เฟอเรนซ์ที่  $F_0$  เป็น  $i$  จะได้อัตราส่วนอินเตอร์เฟอเรนซ์ เป็น CIR เป็น  $z$  กับตัวแปรสุ่ม (Random variable)  $\sigma$  ให้ CRR (Channel Reuse Ratio) เป็น  $\mathfrak{R} = \Pi / r$  สำหรับ DCA (Dynamic Channel Allocation) สามารถพิจารณา CRR ได้ดังนี้

$$F_{\mathfrak{R}}(\mathfrak{R} \geq Z) = F_{\mathfrak{R}}\left(\frac{\Pi}{r} \mid \frac{C}{I} \geq Z\right) = p \left\{ \frac{\frac{\Pi}{r} \leq \mathfrak{R}, \frac{C}{I} \geq Z}{p \left\{ \frac{C}{I} \geq Z \right\}} \right\} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $p\{x\}$  เป็นโอกาสการเกิด  $\Pi > \xi$  ที่  $M_1$  ทำให้ไม่สามารถสร้างอินเตอร์เฟอเรนซ์กับ  $F_0$  เพียงพอได้  $z$  จะมากกว่า  $Z$  เสมอ และโอกาส  $p\{\Pi/r \leq \mathfrak{R}\}$  และ  $p\{C/I \geq Z\}$  ใน (2.14) จึงเกิดขึ้นในทางกลับกัน สำหรับ  $\Pi \leq \xi$  ทำให้อินเตอร์เฟอเรนซ์สูงขึ้น

$\xi$  อาจหาได้ง่ายด้วยการทำ การสูญเสียจากการเดินทางคลื่นเทียบระยะทาง (signal – slope distance – dependent path loss propagation) จากสมการ  $C = C_p P_t \rho^{-\gamma}$  และ  $I = a C_p P_t \Pi^{-\gamma}$  เมื่อ  $a$  เป็นจำนวนอินเตอร์เฟอเรนซ์ (ให้มีค่าเป็น 1)  $C_p$  เป็นค่าคงที่ของความถี่  $P_t$  เป็นกำลังส่ง  $\gamma$  เป็นคิรีการสูญเสียการเดินทางคลื่น

ให้กำลังต่ำสุดที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ที่ขอบเขตเป็น  $CIR$   $C = C_p P_t r^{-\gamma}$  ดังนั้นกำลังต่ำสุดของ

$$z = \frac{C}{I} = \frac{C_p P_t r^{-\gamma}}{a C_p P_t \Pi^{-\gamma}} = \frac{1}{a} \left( \frac{\Pi}{r} \right)^{\gamma} = \frac{1}{a} \left( \frac{r \mathfrak{R}}{r} \right)^{\gamma} = \frac{\mathfrak{R}^{\gamma}}{a} \quad (2.15)$$

และเมื่อ  $z = Z$  จะได้

$$\xi = r \mathfrak{R} = r (aZ)^{1/\gamma} \quad (2.16)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.15) ในทอม reuse ratio  $\mathfrak{R} = (aZ)^{1/\gamma}$  แสดงได้ว่า เมื่อ  $\mathfrak{R} \leq (aZ)^{1/\gamma}$  จากสมการ (2.15) เขียนได้เป็น

$$p \left\{ \frac{\frac{\Pi}{r} \leq \mathfrak{R}, \frac{S}{i} \geq Z}{p \left\{ \frac{S}{i} \geq Z \right\}} \right\} = \frac{F_{\mathfrak{R}}(\mathfrak{R}) - F_{\mathfrak{R}\xi}(\mathfrak{R}, Z)}{1 - F_{\xi}(Z)} \quad (2.17)$$

$$\text{เมื่อ } 0 \leq \mathfrak{R} \leq (aZ)^{1/\gamma}$$

เมื่อ  $F_{\mathfrak{R}Z}(\mathfrak{R}, Z)$  เป็นฟังก์ชันทั้ง  $\mathfrak{R}$  และ  $Z$  เมื่อ  $\mathfrak{R} > (aZ)^{1/\gamma}$  ในสมการ (2.15) สามารถเขียนได้เป็น

$$p \left( \frac{\Pi}{r} \geq (aZ)^{1/\gamma} \right) = \frac{F_{\mathfrak{R}}(\mathfrak{R}) - F_{\mathfrak{R}}(aZ)^{1/\gamma}}{1 - F_{\mathfrak{R}}(aZ)^{1/\gamma}} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $(aZ)^{1/\gamma} < \mathfrak{R} < \frac{R}{r}$

สมการ (2.18) เป็น Distribution function ที่ถูกต้องของมันเองบนสมมติฐาน  $\mathfrak{R} > (aZ)^{1/\gamma}$  เป็นสเกลของ  $(1-q)$  โดย  $q$  ได้จากสมการ (2.16) คือ  $\mathfrak{R} = (aZ)^{1/\gamma}$

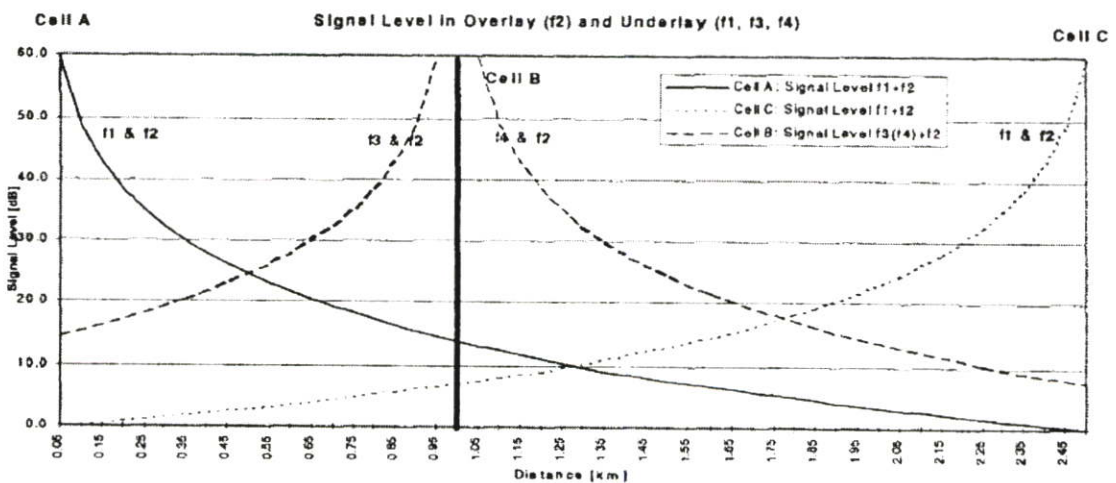
ใน FCA (Fixed Channel Allocation) จะกล่าวถึงเรื่องหลักเกี่ยวกับเลขาคณิต (Geometry) และตำแหน่ง (Locations) ของ Co-Channel หรือ Adjacent channel interferers

สำหรับตัวอย่างของ GSM กับกลุ่มเซลล์แบบ 3 เซลเตอร์ ต้องการ CRR เป็น 2.0 ดังแสดงในสมการที่ (2.13) จะให้ CIR พอที่  $Z = 9$  dB ที่  $\gamma = 3$  จะได้  $\mathfrak{R} > 2.0$

**2.2.2 อัตราส่วนโคเชลเนลอินเตอร์เฟอเรนซ์ (Co-Channel Interference Ratio)**

เมื่อนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ ระยะห่างของความถี่เดียวกันจากเซลล์รอบเซลล์พิจารณาเรียกว่า ระยะโคเชลเนลอินเตอร์เฟอเรนซ์ซึ่งจะกลายเป็นสัญญาณรบกวนช่องสัญญาณหลักที่ใช้อยู่ และ ความแรงของสัญญาณที่ขึ้นกับระยะทางทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อโคเชลเนลอินเตอร์เฟอเรนซ์ (CIR) คำนวณได้ในเทอมของระยะทางโดยประมาณ อัตราส่วนนี้ในระบบ GSM กำหนดไว้อย่างต่ำที่ 9 dB และ 12 dB สำหรับแบบไม่ฮอปปี้งและฮอปปี้งตามลำดับซึ่งแยกพิจารณาอัตราส่วนนี้ตามชนิดของสายอากาศหรือเซลล์ไซต์ ดังนี้

ทดสอบใช้เซลล์ A(f1,f2),B(f2,f3,f4) และ C(f1,f2) [3] ที่กำลังลดทอน  $\gamma$  เท่ากับ 3.5 เทียบกำลังที่รับได้กับระยะทางของทั้ง 3 เซล ดังรูปที่ 2.4 f2 ใช้เป็นเหมือนกับความถี่เซลล์ Overlay และ f1,f3,f4 เป็นเหมือน BCCH ของเซลล์ Underlay ดังรูปที่ 2.4 จะได้ CIR แปรกับระยะทางระหว่าง



รูปที่ 2.4 ระดับกำลังสัญญาณกับระยะทางของ 3 เซลเรียงตามแนว

BTS และ CIR น้อยที่สุดคือตำแหน่งที่ห่างจาก BTS มากที่สุดในเซลล์ จากรูประหว่างเซลล์ A และ C แยกกันที่ตำแหน่ง 1.3 กิโลเมตร และ CNI<sub>0</sub> ที่ตำแหน่ง 0.5 และ 1.75 กิโลเมตร ที่ 12 dB โดยที่ระบบ GSM สามารถใช้งานได้ที่ 9dB เป็นอย่างน้อยสำหรับสภาพแวดล้อมที่ และ ไม่มีการฮอปปีง

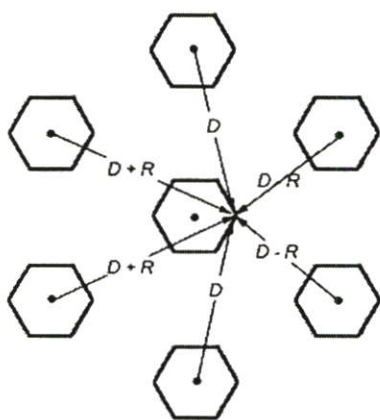
### 2.2.2.1 โคลเซลล์อินเตอร์เฟอเรนซ์ของเซลล์รอบทิศทาง

ในระยะ  $D$  คือระยะอินเตอร์เฟอเรนซ์ของเซลล์ที่ใกล้ที่สุด ดังรูปประกอบที่ 2.2 และความแรงสัญญาณอินเตอร์เฟอเรนซ์แปรตามระยะทางจะได้ว่า

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{K=1}^{N_I} I_k} = \frac{1}{\sum_{K=1}^6 \left(\frac{D_k}{R}\right)^{-\gamma}} = \frac{1}{6(q)^{-\gamma}} = \frac{q^\gamma}{6} \quad (2.19)$$

$$\therefore q = \left(6 \frac{C}{I}\right)^{1/\gamma} \quad (2.20)$$

นำสมการมาใช้ในการออกแบบ เช่น ต้องการให้ CIR อย่างน้อย 18 dB



รูปที่ 2.5 การโคลเซลล์อินเตอร์เฟอเรนซ์ของเซลล์จากเซลล์รอบเซลล์พิจารณา

$$q = (6 \times 63.1)^{0.25} = 4.41$$

$$\therefore N = (4.41^2 / 3) = 6.49 \approx 7$$

ต่อมาพิจารณาอัตราส่วนโคเชลเนลอินเตอร์เฟอเรนซ์ที่ต้องการสัมพันธ์จากระยะทางและควมรบกวน

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{2(D-R)^{-\gamma} + 2D^{-\gamma} + 2(D+R)^{-\gamma}} \quad (2.21)$$

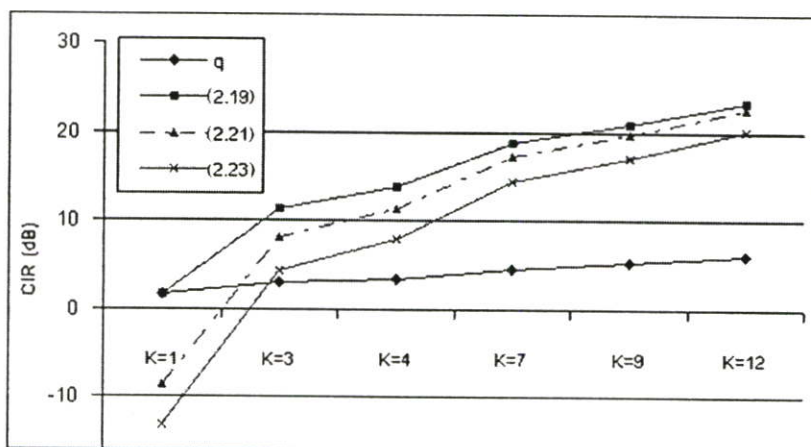
ให้  $\gamma=4$  และ  $D/R = q$  จะได้

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{2(q-1)^{-4} + 2q^{-4} + 2(q+1)^{-4}} \quad (2.22)$$

จากสมการข้างต้นเมื่อคำนวณถึงอินเตอร์เฟอเรนซ์ที่ทั้ง 6 เซลเฉพาะในเซลล์วงรอบใกล้เคียงพิจารณาที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วน  $q$  เท่าเดิมจะได้ค่า CIR เป็น 14.46 dB ซึ่งน้อยกว่าที่กำหนดจะเห็นว่าสายอากาศหรือเซลล์ที่กระจายสัญญาณรอบทิศทางต้องการใช้จำนวนกลุ่มเซลล์  $N$  มากกว่า 7 คือ 9 หรือ 12 เป็นต้น

และอีกสมการที่ใช้สำหรับกรณี worst case คือ

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6(q-6)^{-\gamma}} \quad (2.23)$$



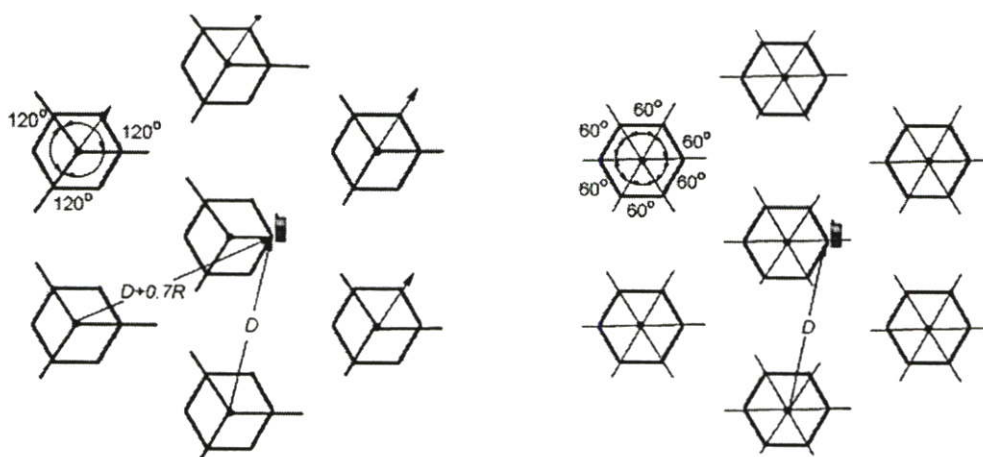
รูปที่ 2.6 เทียบ CIR ของสมการอินเตอร์เฟอเรนซ์ที่ (2.19) (2.21) และ (2.23)

สมการเหล่านี้ถูกใช้และอ้างอิงเลขาคณิตซึ่งมีความแตกต่างกันพอสมควร จากสมการของ  $q$  (2.19) (2.21) และ (2.23) ซึ่งให้ความแตกต่างกัน [5] ดังรูป 2.6 จะเห็นความแตกต่างของสมการที่อ้างอิงจากรูปเลขาคณิตพอสมควร ซึ่งในการประมาณจะแม่นยำยิ่งขึ้นเมื่อใช้พื้นที่และตำแหน่ง

อินเตอร์เฟอเรนซ์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น อย่างไรก็ตามระบบตรวจสอบและควบคุมกำลังส่งจะควบคุมทั้ง ขาขึ้น และ ขาลง

2.2.2.2 โคลเซลล์อิตเตอร์เฟอเรนซ์ของเซลล์แบบมีทิศทาง

เมื่อความต้องการการใช้โทรศัพท์เพิ่มขึ้นการกำหนดให้  $N$  มากขึ้นจะทำให้ช่องสัญญาณความถี่ถูกแบ่งไปมากเท่านั้นทำให้อาจไม่เพียงพอกับความต้องการใช้งานได้ ฉะนั้นเรื่องคุณภาพสัญญาณจึงไม่ใช่เรื่องหลักเรื่องเดียวที่ต้องพิจารณา และวิธีการแบ่งเซลล์ของเซลล์ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่จะลดสัญญาณรบกวนนี้ได้



ก. เซลล์ไซท์ 3 เซกเตอร์

ข. เซลล์ไซท์ 6 เซกเตอร์

รูปที่ 2.7 เซลล์แบบกระจายสัญญาณแบบมีทิศทาง

กรณี 3 เซกเตอร์

กรณีเซลล์มี 3 เซกเตอร์ก็โดยการใช้สายอากาศมีบริมวิดธ์ (Beamwidth)  $120^\circ$  จะมีเซลล์อินเตอร์เฟอเรนซ์ที่ใกล้ที่สุดในวงแรกเพียง 2 เซลล์ ที่มีระยะ  $D + 0.7R$  และ  $D$  นั่นเอง ทำให้ CIR เพิ่มขึ้นเป็น

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{D^{-\gamma} + (D + 0.7R)^{-\gamma}} = \frac{1}{q^{-\gamma} + (q + 0.7)^{-\gamma}} \tag{2.24}$$

สมมติใช้อัตรา  $q$  เดิมคือ 4.6 จะได้ CIR เท่ากับ 24.5 dB

### กรณี 6 เซกเตอร์

โดยการใช้สายอากาศมีปริมาตร (Beamwidth)  $60^\circ$  จะมีเซกเตอร์เฟอเรนที่ใกล้ที่สุดในวงแรกเพียง 1 เซล และได้ CIR เป็น

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{(D + 0.7R)^{-\gamma}} = \frac{1}{(q + 0.7)^\gamma} = (q + 0.7)^\gamma \quad (2.25)$$

ซึ่งจะได้ CIR เท่ากับ 29 dB แม้จะมีการลดลงในช่วงเวลาการใช้โทรศัพท์มีมาก แต่ก็ยังเป็นค่าที่ถือว่าไว้ได้มากพอทั้งแบบ 3 เซกเตอร์และ 6 เซกเตอร์ และใช้ในประเทศไทยในปัจจุบันด้วย

### 2.2.3 การขยายความจุช่องสัญญาณ

#### การแบ่งเซกเตอร์

การแบ่งเซกเตอร์ทำให้ CIR ดีขึ้น จึงสามารถนำช่องความถี่เดิมกลับมาใช้ใหม่ได้มากขึ้น และเป็นการประหยัดการติดตั้งเซลล์ไซต์ด้วย ทั้งเสาส่งและโครงข่ายสัญญาณระหว่างสถานีฐาน และสถานีควบคุมฐานยังสามารถใช้ร่วมกับเซลล์ไซต์เดิมได้

#### การนำความถี่กลับมาใช้ใหม่กับเมโครเซลล์

การเพิ่มช่องสัญญาณโดยการแบ่งเซลล์และนำความถี่มาใช้ใหม่ สามารถทำได้พร้อมกับการควบคุมกำลังส่ง สามารถติดตั้งอุปกรณ์รับส่งความถี่เพิ่มเข้าไปได้โดยตรงที่เซลล์ไซต์เดียวกันพร้อมกับลดกำลังส่งลง โดยคำนึงถึง CIR เป็นเรื่องหลัก

#### การแบ่งเซลล์

การแบ่งเซลล์ต้องติดตั้งเซลล์ไซต์ที่ตำแหน่งใหม่ ในบางพื้นที่แม้การเพิ่มความจุช่องสัญญาณเพียงพอแล้ว การแบ่งเซลล์ก็เป็นวิธีการช่วยในเรื่องคุณภาพสัญญาณด้วยเช่น เช่น พื้นที่อับสัญญาณพื้นที่ที่มี CIR ต่ำ ซึ่งต้องติดตั้งโครงข่ายสัญญาณเพิ่มขึ้น พิจารณาที่กำลังของเซลล์ที่แบ่งภายใต้การครอบคลุมของเมโครเซลล์ได้ดังนี้

#### วิธีการอื่นๆ

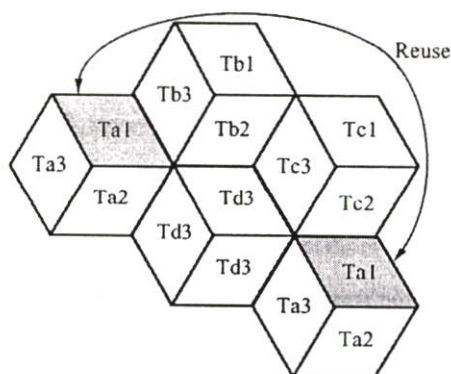
ช่องสัญญาณแบบไดนามิกคือความยืดหยุ่นในการขีมความถี่ของเซลล์ไซต์อื่นๆที่ยังว่างอยู่มาใช้ จะสามารถทำได้โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่ม แต่ระบบก็มีราคาแพงกว่าจากการสำรองอุปกรณ์ และวิธีการลดอัตราการใช้ส่งเพื่อแบ่งให้ผู้ใช้รายอื่น แต่คุณภาพเสียงก็จะลดลง

## 2.3 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM (Global System for Mobile Communications) รู้จักกันโดยทั่วไปในชื่อของ GSM 900 เพราะใช้ความถี่ย่าน 900 MHz เป้าหมายเริ่มแรกของการกำเนิดระบบ GSM คือสามารถให้ทำโรมมิ่ง (Roaming) กับผู้ใช้ทั่วยุโรป จนถึงปัจจุบันก็เป็นระบบที่ใช้มากที่สุดและสามารถทำการโรมมิ่งได้หลายประเทศทั่วโลก และให้บริการเสียงร่วมกับระบบ ISDN และ PSTN ได้ จึงสามารถใช้อ้างอิงกับโมเดลของ ISDN จากพัฒนาการแรกของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เป็นระบบอนาล็อก GSM เป็นระบบพัฒนาการที่สองเป็นดิจิทัลและเทคโนโลยีเดียวกันในคลื่นพาห้ความถี่อื่นคือ DCS 1800 (Digital Cellular System 1800) ความถี่ 1710-1785 MHz สำหรับความถี่ขาขึ้นและ 1805-1880 MHz สำหรับความถี่ขาลง และ GSM 1900 ในสหรัฐอเมริกา ความถี่ 1850-1910 MHz สำหรับความถี่ขาขึ้น 1930-1990 สำหรับความถี่ขาลง หรือเรียกระบบนี้อีกชื่อหนึ่งว่า PCS 1900

ซึ่งในส่วนของโครงสร้างการจัดสัญญาณข้อมูล (Data information) อยู่ในระบบ GSM แตกต่างกันที่คลื่นพาห้ในส่วนการรับส่งสัญญาณผ่านอากาศ ตัวอย่างในทางปฏิบัติ เมื่อมีผู้ใช้บริการรายใหม่ที่ยังไม่มีโครงข่าย GSM ครอบคลุมพื้นที่ทั้งประเทศไทย ก็สามารถใช้โครงข่ายที่มีอยู่แล้วโดยติดตั้งที่เพียงอุปกรณ์สนับสนุนสัญญาณความถี่ (Radio Part) สำหรับแถบความถี่บริการใหม่

MS (Mobile Station) แต่ละเครื่องจะรับ-ส่งสัญญาณในเวลาอันสั้นโดยใช้ความถี่ร่วมกันกับเครื่องอื่นๆแต่คนละช่วงเสี้ยวเวลาเรียกว่าการเข้าถึงแบบ FDMA/TDMA ส่งสัญญาณแบบสองทางอย่างสมบูรณ์ (Full duplex) ใช้ช่วงความถี่สัญญาณขาขึ้นจาก 890 – 915 MHz และ สัญญาณขาลงจาก 935 – 960 MHz ห่างช่องสัญญาณรับกับส่งที่ 45 MHz แต่ละช่องสัญญาณความถี่ (Frequency Channel) ใช้ความกว้างแถบความถี่ 200 kHz ทำให้ได้ช่องสัญญาณ รับ-ส่ง พร้อมกันได้ 125 ช่อง แต่ ละช่องให้ช่องสื่อสารได้ที่ 8 หรือ 16 ช่องสัญญาณเสียง (Traffic Channel)



รูปที่ 2.8 เซลเตอร์แบบ 120 ดีกรี นำความถี่กลับมาใช้ใหม่แบบ 4/3

### 2.3.1 การจัดสรรความถี่เมกโครเซล (GSM)

ในระบบ GSM ที่ใช้กันทั่วไปมีการจัดเซกเตอร์ (Sectors) สายอากาศ อยู่ 2 วิธีคือ 3 และ 6 เซกเตอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติดังที่ได้กล่าวไว้ใน 2.2.2.2 หัวข้อนี้บรรยายเฉพาะในกรณี 3 เซกเตอร์เป็นตัวอย่าง ดังรูป 2.8 และ อธิบายการใช้ความถี่ในแต่ละเซกเตอร์ได้ดังตารางความถี่ด้านล่าง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่าง ความถี่ TCH (Traffic Channel) ในรูปแบบ 4/3

เซกเตอร์	A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2	A3	B3	C3	D3
T1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T2	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T3	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างความถี่ BCCH (Broadcast Control Channel)

S1	S2	S3
37	44	51
38	45	52
39	46	53
40	47	54
41	48	55
42	49	56
43	50	57

และช่องสัญญาณที่เหลือเป็นช่องสัญญาณสำรองสำหรับไมโครเซลหรือสำรองช่องสัญญาณ BCCH เมื่อเกิดปัญหาอินเตอร์เฟอเรนซ์ของช่องสัญญาณควบคุมก็ได้

### การฮอปปีงความถี่ (Frequency Hopping)

การฮอปปีงเป็นการเปลี่ยนความถี่หรือช่องสัญญาณไปเมื่อส่งช่วงเวลาเสร็จ ทำให้สามารถเลือกเวลาสัญญาณไปถึงปลายทางได้ค่อนข้างแม่นยำ และสามารถเลือกไม่รับสัญญาณที่มาถึงซ้ำได้ และเป็นระบบรักษาความปลอดภัยอย่างหนึ่ง ที่เซลไซต์ (Cell Site) แต่ละต้น ไม่ใช่เพียงความถี่เดียวตามรูปแบบเซลล์ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8 และตาราง 2.1 แต่เปลี่ยนความถี่ไปตามที่กำหนดไว้ โดยรูปแบบความถี่ (Frequency Pattern) ยังคงเหมือนเดิม (เปลี่ยนความถี่ไปทุกสถานีฐานอย่างเป็นระเบียบ) ในระบบ GSM จะมีรูปแบบการฮอป ดังนี้

- HSN : Hopping Sequence Number

HSN คือการฮอปแบบเรียงช่องสัญญาณความถี่ แบบวนจากช่องความถี่แรกถึงช่องความถี่สุดท้าย และ ฮอปช่วงเวลา (time slot) ด้วย

- FN : Frame Number คือการฮอปที่หมายเลขเฟรม
- Nf : Number of hopping frequencies คือการฮอปไปยังความถี่อื่นๆ ในความถี่ที่สามารถใช้ได้

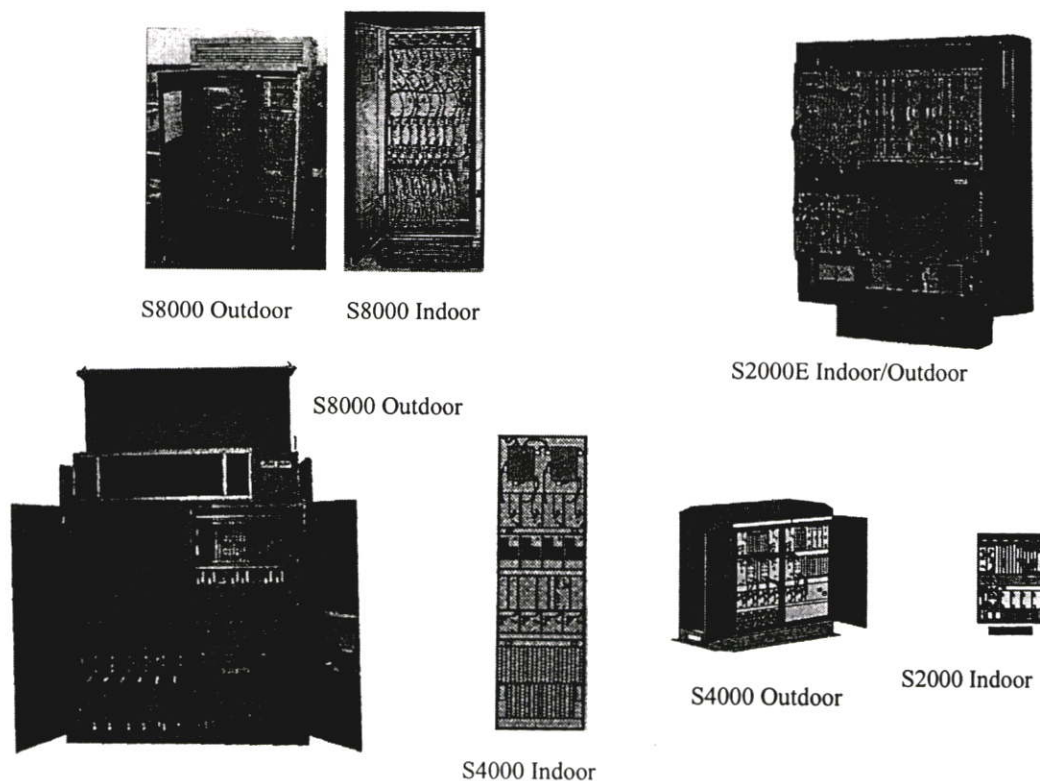
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างข้อกำหนดของ โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบเมคโครเซลและไมโครเซล

	DCS	GSM	AMPS	PHPS
ความถี่ ขาขึ้น (MHz)	1710-1785	890-915	824-849	1895-1907
ความถี่ ลงลง (MHz)	1805-1880	935-960	869-894	
ความกว้างแถบความถี่ (kHz)	200	200	30	300
จำนวนช่องสัญญาณ	375	125	832	77
จำนวนผู้ใช้ต่อช่องความถี่	8/16	8/16	3	4
ความเร็ว / ช่องความถี่ (kb/s)	270.8	270.8	48.6	384
กำลังส่ง โทรศัพท์เคลื่อนที่ (W)	1, 0.25	2, 0.8	4.8, 1.8	0.08
CIR ขั้นต่ำ (dB)	9	9	16	26
รัศมีครอบคลุมเซล (km)	0.5-8	0.5-8	2-25	0.05-0.1
รูปแบบนำความถี่มาใช้ใหม่	Dynamic	Dynamic	7	
จำนวนเซกเตอร์สาขาอากาศ	3/6	3/6	3	1
วิธีการเข้าถึง	TDMA	TDMA	TDMA	TDMA
วิธีการส่งสองทาง	FDD	FDD	FDD	TDD
ควบคุมกำลังส่ง	ได้	ได้	ได้	ได้

ตารางที่ 2.4 ลำดับกำลังส่งของ โทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ของความถี่ย่าน 900 และ 1800

ระดับ	0.25 W		0.8W		1W		2W	
	dBm	mW	dBm	mW	dBm	mW	dBm	mW
0	-	-	-	-	30	1000	-	-
1	-	-	-	-	28	630	-	-
2	-	-	-	-	26	398	-	-
3	24	250	-	-	24	250	-	-
4	22	158.4	-	-	22	158.4	-	-
5	20	100	-	-	20	100	33	1995
6	18	63.1	-	-	18	63.1	31	1258
7	16	39.8	29	800	16	39.8	29	800
8	14	25.1	27	501.1	14	25.1	27	501.1
9	12	15.8	25	316.2	12	15.8	25	316.2

10	10	10	23	200	10	10	23	200
11	8	6.3	21	125.8	8	6.3	21	125.8
12	6	4	19	79.4	6	4	19	79.4
13	4	2.51	17	50.1	4	2.51	17	50.1
14	2	1.58	15	31.6	2	1.58	15	31.6
15	0	1	13	20	0	1	13	20



รูปที่ 2.9 ตัวอย่าง BTS ของระบบ GSM ที่ใช้ทั้งภายใน และ นอกอาคาร

#### BTS S8002 Outdoor

เซลเต็มหน้าที่ใช้งาน ติดตั้งนอกอาคาร ตัวถังแข็งแรง พื้นที่ครอบคลุมสูง ทราฟฟิกสูง 8 TRXs ในตัวถังเดียว อุปกรณ์รักษาแรงดันไฟ แบตเตอรี่สำรอง 2 ชม. ระบบระบายความร้อน ควบคุมกำลังส่ง ขนาด  $1.4 \times 1 \times 0.54$  เมตร<sup>3</sup> น้ำหนัก 240 กิโลกรัม sensitivity  $-110$  dBm กำลังส่ง 45 dBm

#### BTS S8000 Outdoor

เซลเต็มหน้าที่ใช้งาน ติดตั้งนอกอาคาร ตัวถังแข็งแรง พื้นที่ครอบคลุมสูง ทราฟฟิกสูง 8 TRXs ในตัวถังเดียว อุปกรณ์รักษาแรงดันไฟ แบตเตอรี่สำรอง ระบบระบายความร้อน ควบคุมกำลังส่ง ขนาด  $1.6 \times 1.35 \times 0.65$  เมตร<sup>3</sup> น้ำหนัก 415 kg sensitivity  $-110$  dBm กำลังส่ง 45 dBm  $-40-50$  °C

### BTS S4000 Outdoor (Mini BTS)

ติดตั้งนอกอาคาร 3 – 4 TRXs เบตเตอร์รี่สำรอง ขนาด  $1.42 \times 1.53 \times 0.52$  เมตร<sup>3</sup> น้ำหนัก 390 kg  
กำลังส่ง 45 dBm -33 – 45 °C

### BTS S4000 Indoor (Standard BTS)

ติดตั้งในอาคาร พื้นที่ครอบคลุมน้อย ทราฟฟิกสูง 4 – 24 TRXs ขนาด  $2.2 \times 0.6 \times 0.3$  เมตร<sup>3</sup> กำลังส่ง 45 dBm

### BTS S2000 H

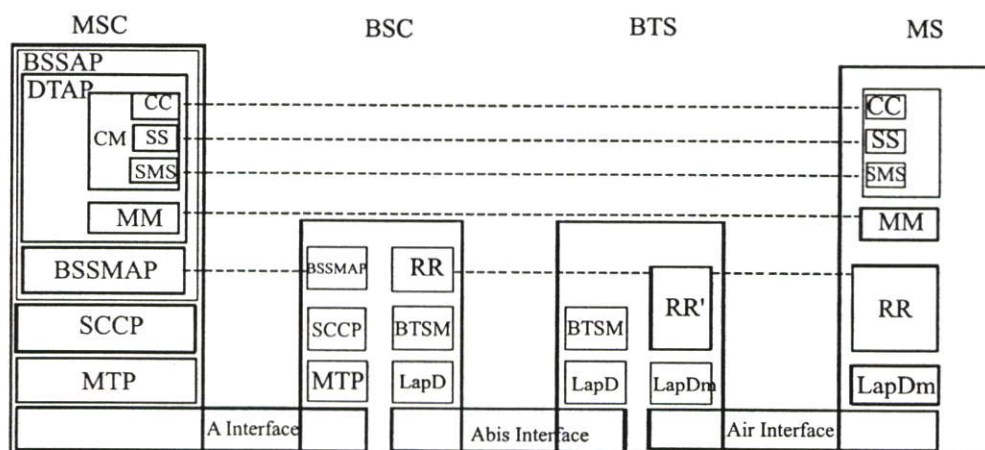
ติดตั้งนอกอาคาร ตัวถังแข็งแรง พื้นที่ครอบคลุมสูง ทราฟฟิกต่ำ พื้นที่ชนบท sensitivity -109 dBm  
กำลังส่ง 42 dBm

### BTS S2000 E (Micro BTS) Outdoor

ติดตั้งในอาคาร 1-2 TRX ราคาต่ำ ทราฟฟิกต่ำ sensitivity -109 dBm กำลังส่ง 42 dBm

## 2.3.2 โปรโตคอลของ GSM (The protocol architecture of GSM)

ผังรูป 2.8 แสดงโปรโตคอลของ GSM จาก MS ถึง BTS เรื่องหลักคือ U<sub>m</sub> interface ผ่านอากาศด้วยเลเยอร์กายภาพ (physical layer) การจัดความถี่ การสร้างเบริสท์ รวมเบริสท์เข้าไปในเฟรม TDMA การซิงค์ (synchronization) กับ BTS ตรวจสอบช่องสัญญาณว่าง วัดคุณภาพสัญญาณ โดยเฉพาะสัญญาณขาลง เลเยอร์กายภาพ ใช้การมอดูเลทแบบ GMSK พร้อมเข้ารหัส/ถอดรหัสข้อมูล การถอดรหัสไม่ใช้การถอดรหัสข้อมูลทั้งหมดแต่ถอดเฉพาะการสื่อสารของ MS-BTS ในส่วนสัญญาณความถี่จาก Air interface



รูปที่ 2.10 สัญญาณในแต่ละเลเยอร์ในระบบ GSM/DCS1800

การซิงค์เพิ่มส่วนของการหน่วงเวลา (delay) ของ MS แต่ละเครื่องไปด้วยเนื่องจากระยะ MS ถึง BTS ไม่เท่ากันทำให้เวลา RTT (Round Trip Times) ไม่เท่ากันเรียกว่าการซิงค์ส่วนบุคคลให้

ทันโครงสร้างช่วงเวลาของ BTS ที่สร้างขึ้น ก่อนการแก้ไข (Correction) สามารถให้หน่วงได้ไม่เกินร้อยละ 40 ของเวลาบิตจากรูป 2.11 เวลาของ 1 TS ของ TDMA เป็น 0.577 มิลลิวินาที ทำให้ระยะทางจาก MS– BTS สูงสุดเท่ากับ 35 กิโลเมตร ต่อมา BTS ส่ง RTT ไปยัง MS ทำการปรับเวลาจนเวลาหน่วงลดลงเพียง 30.5 ไมโครวินาที หรือ 5 เปอร์เซ็นต์

ส่วนหลักของเลเซอร์กายภาพประกอบด้วย การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (channel coding) และการตรวจจับความผิดพลาด (error detection) และการแก้ไขความผิดพลาด (error correction) การเข้ารหัสช่องสัญญาณรูปแบบ FEC (forward error correction) เมื่อตรวจจับและแก้ไขแล้วจะไม่ส่งผลนั้นไปยังเลเซอร์ที่สูงขึ้น ฉะนั้นเลเซอร์กายภาพต้องให้ความเชื่อถือได้รวมเวลาหน่วงทั้งหมดสำหรับ TCH/FS เป็น 60 มิลลิวินาที และ 100 มิลลิวินาที สำหรับ TCH/F9.6 และรวมเวลาการสื่อสารอีกในส่วนของเลเซอร์ที่สูงขึ้นไปพร้อมทั้ง MS ปลายทางหรือโทรศัพท์พื้นฐาน

จากโปรโตคอล LAPDm ที่ถูกกำหนดด้วย Um ดังรูป 2.10 คล้าย LAPD แต่น้อยกว่าเพราะไม่ต้องการ flags synchronization flags หรือ checksumming สำหรับทำ error detection LAPDm ถูกส่งข้อมูลจากการเชื่อมต่ออย่างต่อเนื่องเป็นช่วง (re-sequencing) ในเฟรมควบคุมการไหลโดยไม่มีที่พักข้อมูล (buffer) ระหว่างเลเซอร์กายภาพและเลเซอร์เชื่อมโยงข้อมูล(Data Link layer)

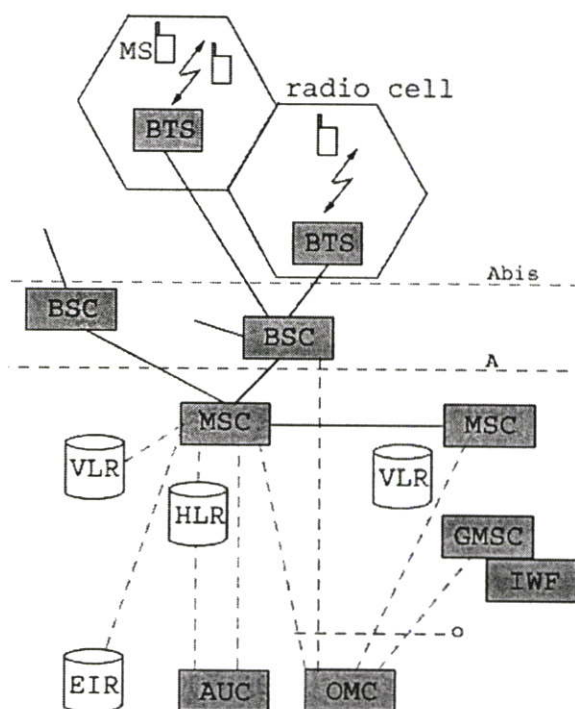
เลเซอร์เชื่อมโยงข้อมูล (Data Link layer) เทียบได้กับ RR' ของ BTS และมี RR (Radio Resource) หลักอยู่ใน BSC ทำหน้าที่ควบคุมความถี่และสัญญาณควบคุมแต่ละช่องสัญญาณ และเชื่อมต่อกับเลเซอร์สูงขึ้น เลเซอร์นี้ควบคุมโดยตรงกับเลเซอร์กายภาพของ BTS โดยการจัดการของ BTSM (BTS management)

MM (Mobility Management) : ควบคุมการลงทะเบียนของผู้ใช้แต่ละคนและการใช้รหัสประจำเครื่อง บันทึกตำแหน่งของ MS ใหม่ลงใน VLR ซึ่งหน้าที่นี้ทำงานใน MSC และระบุมาจาก MS บันทึกตำแหน่งล่าสุดของ MS และสร้าง ID ชั่วคราวให้กับผู้ใช้เพื่อซ่อน ID จริงขณะส่งความถี่ผ่านอากาศและเชื่อมต่อกับเลเซอร์สูงขึ้น

สุดท้ายคือ CM (Call Management) เลเซอร์นี้ประกอบไปด้วย 3 ส่วนย่อยคือ CC (Call Control) SMS (short message service) และ SS (Supplementary Service) จากรูป 2.8 SMS จะยอมให้ข้อความจาก MS ส่งผ่านช่องสัญญาณควบคุม SDCCH และ SACCH ในกรณีช่องนี้ไม่มีสัญญาณควบคุมต้องส่ง ขณะที่ CC เชื่อมต่อโดยตรงกับ MSC และก็หมายถึงว่าเชื่อมตรงไปยัง MS อีกฝั่งหนึ่งนั่นเอง และเชื่อมต่อกับเลเซอร์สูงขึ้นสำหรับการเรียก ยกเลิกการเรียก และเปลี่ยนแปลงการเรียก และส่งเสียงเรียกหรือ DTMF (dual tone multiple frequency) ผ่านเลเซอร์นี้ใช้สำหรับ e-banking (electronic banking) แต่ไม่สามารถส่งเสียงนี้โดยตรงรวมไปขณะเข้ารหัสเสียงสนทนาแต่ส่งไปเป็นสัญญาณผ่านระบบโครงข่าย GSM และแปลงกับเป็นเสียงอีกครั้งที่ปลายทาง

ข้อมูลที่ส่งผ่านเลเซอร์กายภาพใช้ระบบ PCM (pulse code modulation) ทั่วไป ขณะที่ PCM ส่ง 64 kbps ต่อช่อง GSM ก็ส่ง 16 kbps ต่อช่องความถี่เสียง (TCF) ได้ 4 ช่อง เลเซอร์กายภาพที่ A interface ปกติใช้ได้ถึง 2.048 Mbps หรือ 32 ช่อง PCM LAPD ใช้เลเซอร์ที่สองที่ Abis โดย BTSM เป็นส่วนควบคุม

สำหรับสัญญาณควบคุมระหว่าง MSC และ BSC ใช้ระบบสัญญาณ No.7 (SS7) โปรโตคอลนี้ใช้ทั้งหมดกับ MSCs HLR VLRs AuC EIR และ OMC และ BSC สามารถควบคุม BSS ผ่าน BSSAP (BSS application part)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างหน้าที่การทำงานโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ GSM

จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นหน้าที่การทำงานระบบ GSM ได้ชัดเจนขึ้น แบ่งบรรยายการทำงานออกเป็นสามส่วนได้ดังนี้

#### Radio Subsystem :RSS

ส่วน RSS ประกอบด้วยส่วนที่ใช้ความถี่ จาก Mobile Station ถึง Base Station Subsystem (BSS) เชื่อมต่อระหว่าง RSS และ NSS ผ่านอินเตอร์เฟซสาย ไปยัง OSS อีกครั้งอินเตอร์เฟซโดยปกติไปใช้ PCM-30 (2.048 Mbps) ส่งต่อช่องที่ 64 kbps ใช้สัญญาณควบคุม SS7 (Signaling System No. 7)

Base Station Subsystem : BSS

BSS แต่ละหน่วยจะถูกควบคุมด้วย BSC (Base Station Controller) ทำหน้าที่เชื่อมต่อด้วย สัญญาณความถี่กับ MS เข้ารับ/ถอดรหัส สัญญาณเสียง และแปลงสัญญาณความถี่เป็นข้อมูลเข้าสู่ โครงข่าย BSS จะประกอบไปด้วยหลาย BTSs

Base Transceiver Station: BTS

ประกอบด้วยอุปกรณ์ส่งความถี่ สายอากาศ ประมวลผลสัญญาณ ขยายสัญญาณเมื่อจำเป็น สามารถจัดโครงสร้างช่องสัญญาณที่ควบคุมด้วย BSC ทั้ง TDMA และ FDMA เชื่อมต่อกับ MS ด้วย U<sub>m</sub> Interface (ISDN U interface for mobile use) และเชื่อมต่อกับ BSC ด้วย A<sub>bis</sub> Interface A<sub>bis</sub> Interface เชื่อมต่อที่ความเร็ว 16 หรือ 64 kbps เซลของ GSM สามารถวัดได้ที่ 100 เมตร ถึง 35 กิโลเมตร ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม และทราฟฟิก กลุ่มของ BTS จะควบคุมโดย BSC

Base Station Controller : BSC

BSC มีหน้าที่บริหาร BTSs คือ จัดความถี่ข้อมูลรูปแบบเซลล์ (cell configuration data) การ แสนด์โอเวอร์ระหว่าง BTSs ระดับกำลังของ BTS ไปถึง ระหว่าง BSS โดยส่งสัญญาณไปยัง MS BSC สามารถส่งสัญญาณความถี่ด้วย และส่งข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายคงที่ (fixed network connections) และทุก BSC จะถูกควบคุมโดย MSC

Mobile Station : MS

MS ประกอบด้วยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่จำเป็นสำหรับการสื่อสารกับโครงข่าย GSM พร้อมรหัสส่วนบุคคลโดย SIM (Subscriber Interface Module) กำลังส่งของ GSM 900 ทั่วไปใช้ กำลังส่งสูงสุด 2 วัตต์ และ 1 วัตต์สำหรับ GSM 1800 เนื่องจากขนาดเซลล์เล็กกว่า ซึ่งแต่ละระบบก็มี ทั้ง BTS และ MS

**Network and Switching Subsystem : NSS**

NSS เป็นหัวใจของระบบ GSM เชื่อมต่อกับโครงข่ายสาธารณะ สร้างการแสนด์โอเวอร์ ระหว่าง BSSs เชื่อมต่อกับการสื่อสารอื่นทั่วโลก บอกตำแหน่งของผู้ใช้ พร้อมทั้งคิดค่าบริการ โรมมิ่งผู้ใช้ระหว่างผู้ให้บริการและระหว่างประเทศ NSS ประกอบด้วยส่วนประกอบดังนี้

Mobile Services Switching Center : MSC

MSCs จะมีประสิทธิภาพสูงมากกับดิจิทัลกับ ISDN ติดต่อกับ MSCs อื่น และบริหาร BSCs ในพื้นที่ ผ่านทาง A Interface MSCs จะมีจำนวนไม่มากขึ้นกับขนาดของเมืองเช่น กรุงเทพมหานคร อาจมี 4 MSCs เชื่อมโยงด้วยโครงข่ายสายใยแก้ว และ GMSC (Gateway MSC) ก็เชื่อมโยกับ โครงข่ายอื่นๆเช่น ISDN และ PSTN ใช้ IWF (Interworking Functions) สร้างการส่งต่อการเรียก (call forwarding) และการสนทนาพร้อม (multiparty calls) และ MSC สามารถติดต่อกับ PDN (Public Data Networks) อย่างเช่น x.25 สร้างการแสนด์โอเวอร์ระหว่าง MSCs ใช้สัญญาณควบคุมมาตรฐาน No.7 (SS7)

Home Location Register : HLR

HLR เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดเรื่องการเก็บฐานข้อมูลพื้นฐาน(database) ในระบบ GSM หน้าที่เก็บข้อมูล (Information) ของผู้ใช้ในระบบทุกคน ประกอบด้วยข้อมูลแน่นอน (static information) เช่น MSISDN (mobile subscriber ISDN) รหัสผ่านผู้ใช้ การบริการ และข้อมูลเปลี่ยนแปลงได้ เช่น ตำแหน่งปัจจุบันของ MS (location area, LA) และ ตำแหน่งเดิม HLR ก็ จะเปลี่ยนแปลง

Visitor Location Register : VLR

ข้อมูลแต่ละ MSC จะมีการเปลี่ยนแปลงมาก ถ้า MS เข้ามายัง LA VLR ก็จะตอบสนอง VLR จะคัดลอกข้อมูลทุกอย่างของ HLR มาใช้งาน แต่ HLR จะมีช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงนานกว่า VLR เป็นเหมือนที่เก็บข้อมูลชั่วคราว (Temporary information) ของ MS ต้องการการถ่ายข้อมูลจาก MSCU และเชื่อมต่อกับ MSC ตลอดเวลา ถ้า MS ทำการเรียก VLR จะมีข้อมูลพร้อมสำหรับสร้าง การติดต่อโดยไม่เอาข้อมูลจาก HLR

**Operating Subsystem : OSS**

OSS เป็นส่วนที่สามของระบบ GSM ประกอบด้วยการทำงานทุกอย่างที่จำเป็นของ โครงข่าย เชื่อมต่อถึงอุปกรณ์ทุกอย่างในระบบสวิตซ์และถึง BSC ด้วย เรียกได้ว่าเป็นส่วน สนับสนุนระบบ (Operation and Support System, OSS) ก็ได้ OSS ส่งผ่านโครงข่ายเชื่อมต่อกับ สัญญาณ SS7 ประกอบไปด้วย

Operation and Maintenance Center : OMC

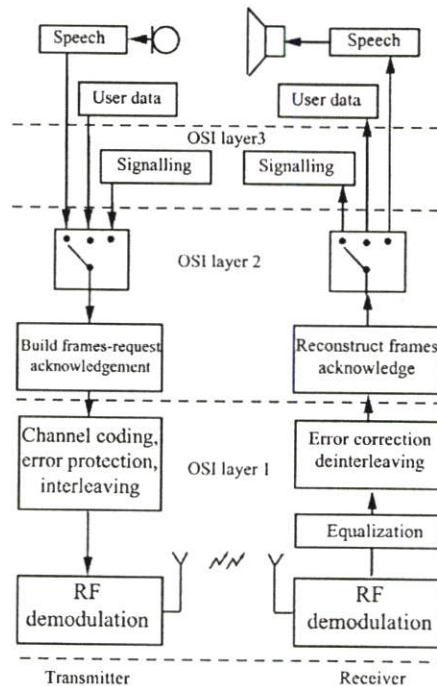
OMC เป็นส่วนแสดงผลและควบคุมโครงข่ายทั้งหมดผ่าน O Interface (SS7 กับ x.25) การ แสดงผลประกอบด้วย ผลกราฟฟิค สถานะของโครงข่าย การรักษาคาમปลอดภัยผู้ใช้ คิดเงิน

Authentication Center : AuC

เป็นส่วนสนับสนุนต่อ MS โดยเฉพาะในส่วนที่มีความเสี่ยง เช่น การป้องกัน ID การ เข้ามายังของใช้ที่ส่งต่อไปเก็บไว้ที่ HLR หรือเรียกได้ว่า AuC คือส่วนป้องกันของ HLR

Equipment Identity Register : EIR

EIR เป็นข้อมูลของ IMEIs (International Mobile Equipment Identity) เป็นส่วนเก็บข้อมูล เสมือนเป็นจุดทำงานเดี่ยว (Stand-a lone) เชื่อมต่อกับ AUC



รูปที่ 2.12 แสดงเลเยอร์ในส่วนของตัวเครื่องลูกข่าย

การใช้ และการเชื่อมต่อในส่วนกลางทะเลเบียน เช่น MS ที่ใช้ SIM ถูกต้องแต่กลับถูกบล็อก ก็ สามารถแสดงการใช้ของผู้อื่นหรือขโมยเป็นข้อมูล IMEIs ทำงานร่วมกับ AUC ในการป้องกัน และ ร่วมกับ MSC ในการตรวจสอบข้อมูล

รูปที่ 2.12 แสดงเลเยอร์เทียบกับฟังก์ชันการทำงานของ MS จะเห็นสวิทช์เลือกจาก สัญญาณควบคุมข้อมูลผู้ใช้ และ เมื่อเชื่อมต่อสำเร็จก็เป็นข้อมูลเสียงต่อมา

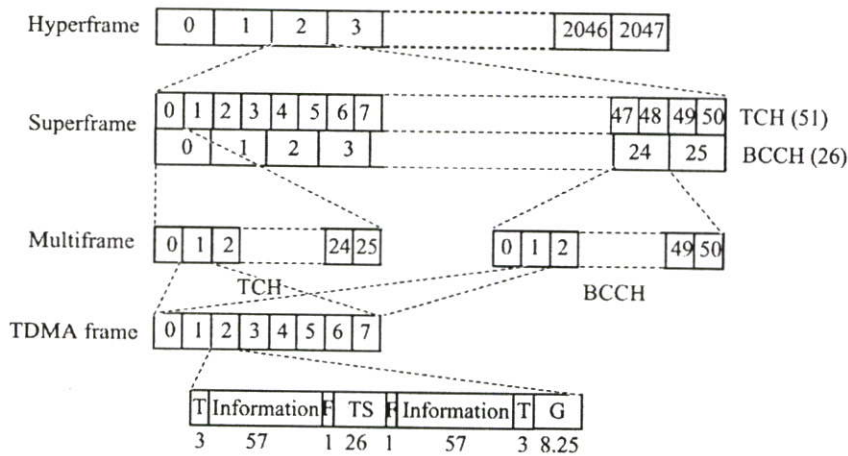
### 2.3.3 โครงสร้างช่องสัญญาณของ GSM (The timing structure of GSM)

สิ่งที่เด่นชัดที่สุดของหน้าที่การทำงานในเลเยอร์ที่ 1 คือ การสร้างโครงสร้างช่วงเวลา ระบบ GSM มีช่วงความกว้างแถบความถี่แต่ละช่องสัญญาณความถี่เท่ากับ 200 kHz เท่ากัน มี ช่องสัญญาณ 2 ประเภทคือ ช่องสัญญาณเสียง (Traffic Channels) และช่องสัญญาณควบคุม (Control Channels) เช่น ที่เซกเตอร์หนึ่งๆมี 3 TRX (Radio Transceiver) และจะต้องมีช่องสัญญาณ ควบคุมอีก 1 TRX ในแต่ละเซกเตอร์ หรือ ใช้ 1 ช่อง TCF เป็นช่องควบคุม ระบบ GSM มีการ ตรวจสอบจับสัญญาณตั้งแต่ 1/4 ของบิทจนถึง 3 ชั่วโมง 28 นาที 53.76 วินาที (Hyperfame)

#### 2.3.3.1 ช่องสัญญาณเสียง (Traffic Channels, TCH)

TCH ใช้ความกว้างแถบความถี่เท่ากับที่ 200 kHz ที่ความเร็วสัญญาณดิจิทัลที่ 270.83 kbps ไฮเปอร์เฟรมเป็นเฟรมใหญ่ที่สุดมี 2048 ซุปเปอร์เฟรม (Superframe) ซุปเปอร์เฟรมของเฟรม สัญญาณความถี่มี 51 มัลติเฟรม (Multiframe) ใช้เวลา 6.12 วินาที 1 มัลติเฟรมใช้เวลา 0.12 วินาที มี

26 ช่องเวลา 1 ช่องเวลา (Time slot) ของมัลติเฟรมใช้เวลา 0.4615 มิลลิวินาที ภายในมัลติเฟรมบรรจุ 8 ช่องเวลา เรียกว่าทีดีเอ็มเอเฟรม (TDMA frame) แต่ละช่องเวลาสำหรับผู้ใช้แต่ละคน ซึ่งจะสามารถใช้ได้ 8 เครื่องพร้อมกัน (Traffic channels) แบบความเร็วฟูลเรท (Full rate Speech) และ 16 เครื่องสำหรับ ฮาร์ฟเรท (Half rate Speech)



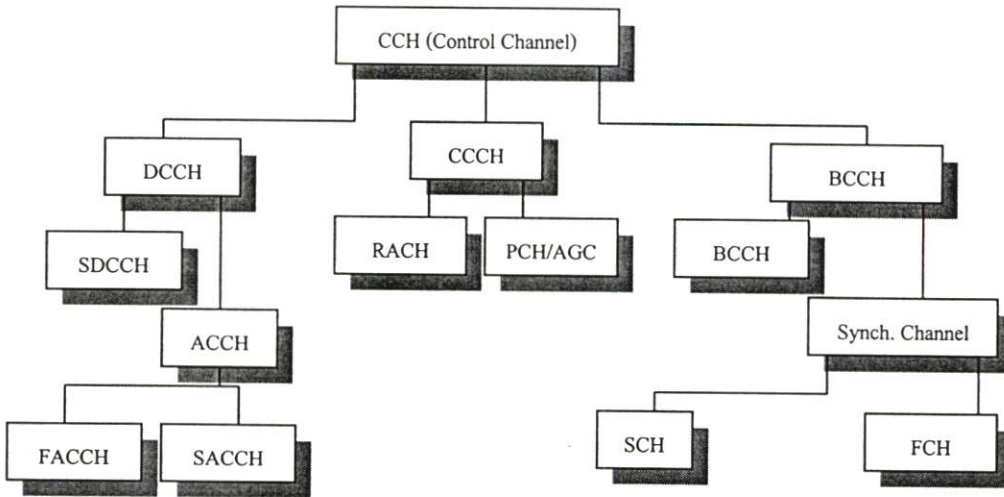
รูปที่ 2.13 โครงสร้างช่องสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM

ภายในช่องสัญญาณผู้ใช้นี้อัตราบิตท้าย (Tailbits) 3 บิต ซึ่งถูกกำหนดให้เป็น “0” ใช้เป็นเบริสท์ (burst) ของเครื่องรับ-ส่ง และข้อมูลเสียง (Information) 144 (57+57) บิต ทำหน้าที่ให้สัญญาณควบคุม เพราะในแต่ละช่องเวลาถูกส่งผ่านอากาศออกมาอย่างอิสระ TS จะทำหน้าที่บอกถึงลำดับช่องสัญญาณได้ถูกต้อง ความเป็นไปได้หนึ่งในทางปฏิบัติเมื่อระยะเวลาส่งไกลๆอย่างไม่โครเซลล์ก็อาจไม่ต้องมีส่วนควบคุม TS ก็ได้ และบอกความแรงสัญญาณที่รับเพื่อเลือกสัญญาณที่แรงที่สุดในกรณีสัญญาณเดินทางแบบมัลติพาท (multipath propagation) มีบิตคั่นหัว-ท้ายของ TS 1 บิต และทั้งช่องเวลาหนึ่งใน TDMA มีบิตป้องกัน (Guard bits) 8.25 บิต สำหรับแต่ละช่องสัญญาณผู้ใช้ รวมทั้งหมดเป็น 156.25 บิต ในเวลา 0.5769 มิลลิวินาที รวมมีจำนวนบิตส่งผ่านอากาศทั้งหมด 270.833 kbps

สัญญาณเสียงผ่านไมโครโฟนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ความถี่ของเสียงทั่วไปอยู่ที่ 300 Hz – 3.4 kHz ผ่านการสุ่ม (Sampling) ด้วยอัตรา 8kHz ได้ 8000 สัญญาณสุ่มต่อวินาที ใช้ 8 บิตสำหรับเลือกระดับสัญญาณเสียง สามารถจำแนกได้ 256 ระดับ ได้ความเร็วสัญญาณเสียงในรูปดิจิตอลเป็น 64 kbps ตามมาตรฐาน CCITT แล้วส่งผ่านโครงข่ายที่ 13 kbps โดยใช้ LPC (Linear Predictive Coding) LTP (Long Term Prediction) และ RPE (Residual Pulse Excitation) ตามลำดับ จำนวนบิต 13 kb นี้ไม่ได้ส่งต่อกันตามลำดับภายในครั้งเดียวแต่แทรกด้วยสัญญาณเบริสท์ (bursts) ทุกๆ 260 บิต ได้อัตราบิต 22.8 kbps ของแต่ละช่องเวลาของผู้ใช้แต่ละคนใน มัลติเฟรมหนึ่งที่บรรจุด้วย

26 มัลติเฟรม ใช้บรรจุสัญญาณควบคุมที่ช่วงเวลา 13 และ 26 จึงเหลือช่วงเวลา 24 ช่อง แต่ละช่องบรรจุทุกข้อมูลของผู้ใช้ทุกคนในช่วงความถี่นั้น

### 2.3.3.2 ช่องสัญญาณควบคุม (Control Channels, CCH)



รูปที่ 2.14 ประเภทของช่องสัญญาณควบคุม

ช่องสัญญาณควบคุมในระบบ GSM มี 3 ชนิดคือ Broadcast control channel (BCCH) Common control channel (CCCH) และ Dedicated control channel (DCCH)

BCCH ใช้ส่งสัญญาณขาลงเท่านั้นเพื่อส่งให้ MS รู้ตำแหน่ง BS โครงข่าย และข้อมูลของเซลล์รอบข้าง SCH (Synchronization Channel) เป็นสัญญาณขาลงเพื่อให้ MS ทำเฟรมซิงค์กับ BTS หมายเลข BTS (Base station identity code, BSIC) และหมายเลขเฟรม CCCH (Common Control Channel) มีหน้าที่ระบุสัญญาณทุกอย่างของการเชื่อมต่อจาก MS และ BS และชนิดการขอปลความถี่ ส่วนการเรียกมายัง MS BTS จะใช้สัญญาณ PCH (Paging Channel) เป็นสัญญาณขาลงเพื่อบอกการเรียก และ ข้อความ ถ้า MS ต้องการเรียกออกจะใช้ RACH (Random Access Channel) ส่งสัญญาณขาขึ้นบอก BTS พร้อมแจ้งตำแหน่งปัจจุบัน MSs ทั้งหมดในเซลล์อาจใช้ช่องสัญญาณนี้ร่วมกันส่งแบบสล็อต Aloha หากเกิดการชนกันเกิดขึ้น BTS จะใช้ AGCH (Access Grant Registration Channel) เพื่อใช้ TCH หรือ SDCCH (Stand-alone Dedicated Control Channel) สำหรับการเชื่อมต่อไป DCCH (Dedicated control channel) ขณะที่ช่องสัญญาณติดต่อกับทางเดียว ปกติจำเป็นต้องใช้สองทิศทางเหมือนว่า MS ไม่ได้สร้างช่องสัญญาณ TCH ขึ้นมาติดต่อกับจะใช้ SDCCH (Stand-alone Dedicated Control Channel) กับข้อมูลความเร็วต่ำ (782 bps) เป็นช่องสัญญาณใช้อิสระแยกจากการเรียก มีข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการสร้างช่องสัญญาณ TCH อย่าง ข้อมูลผู้ใช้ การลงทะเบียน แต่ละ TCH และ SDCCH ประกอบด้วย SACCH (slow associated dedicated control

channel) ประกอบด้วยข้อมูลสำหรับการเปลี่ยนระบบ เช่น คุณภาพของช่องสัญญาณและระดับกำลังส่ง และสุดท้ายถ้ามัลติมีเดียหรือ TCH พร้อมแล้วก็จะใช้ FACCH (Fast ACCH) โดยใช้ช่องสัญญาณ TCH ในการส่ง และในกรณีที่มีการแฮนด์โอเวอร์สัญญาณควบคุมความเร็วสูงนี้จะช่วยให้การโอนถ่ายข้อมูลใช้เวลาสั้นลง

#### 2.4. ช่องสัญญาณและความจุ

สิ่งที่สำคัญของการจัดช่องสัญญาณคือ คุณภาพ ความจุ และ ราคา ความจุช่องสัญญาณทำให้รู้ถึงความต้องการของผู้ใช้ สิ่งที่จะเป็นจะต้องรู้ในขั้นแรกคือ พื้นที่ครอบคลุมเซลล์ จำนวนการเรียกในชั่วโมงเร่งด่วน และต่อมาเป็นการหา จำนวนช่องสัญญาณและอุปกรณ์รับส่งสัญญาณความถี่ที่สนับสนุนต่อจำนวนการเรียกของผู้ใช้ต่อพื้นที่ได้

เมื่อ  $A$  คือความจุในหน่วยเออร์แลง (Erl) จากจำนวนการเรียก ( $Q$ ) ต่อเวลา ( $t_s$ ) คูณกับเวลาใช้โทรศัพท์ ( $T_t$ ) ต่อหนึ่งครั้ง [12]

$$A = \frac{Q}{t_s} \times \frac{T_t}{1} \quad \text{Erl} \quad (2.26)$$

เมื่อรู้ทราฟฟิกต่อมาหาอัตราช่องสัญญาณไม่ว่าง (Blocking Probability,  $P_B$ ) จาก

$$P_B = \frac{A^N / N!}{\sum_{i=0}^N A^i / i!} \quad (2.27)$$

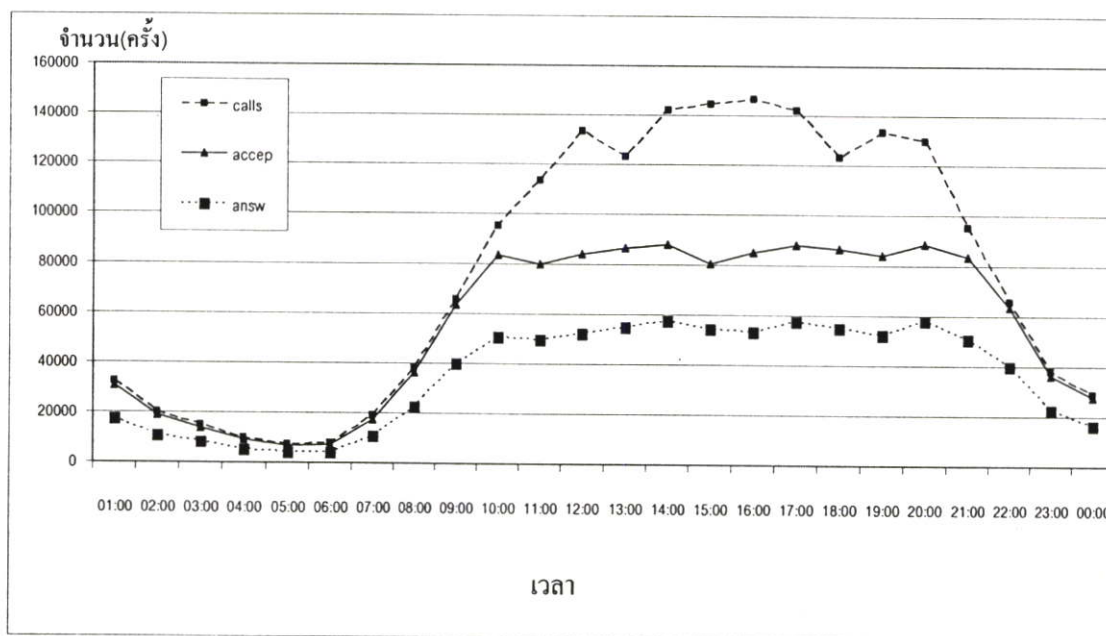
เมื่อ  $A$  คือ ทราฟฟิกที่ต้องการ และ  $N$  คือ จำนวนช่องสัญญาณเสียง (TCH) ของเซลล์ แต่ว่าค่านี้เป็นค่าโดยประมาณที่ใช้กับเมกโครเซลล์ [9] สำหรับไมโครเซลล์หรือพิโกเซลล์จะมีพฤติกรรมการใช้ช่องสัญญาณทราฟฟิกต่างออกไปโดยเฉพาะเป็นโทรศัพท์ส่วนบุคคลและพื้นที่ใช้งานหนาแน่น จัดช่วงเวลาโทรราคาประหยัด ใช้อินเตอร์เน็ตไร้สายผ่านไมโครเซลล์ของ GSM เป็นต้น จะเห็นว่าช่องสัญญาณจะมีค่าเข้าใกล้จำนวนผู้ใช้งานมากขึ้นตามลำดับ จาก [9] ใช้ Engset models อัตราการเรียกไม่เป็นค่าคงที่ โอกาสที่ช่องสัญญาณของผู้ใช้  $M$  ได้ทราฟฟิกเป็น  $a$  คือ

$$P_n = \frac{\binom{M}{n} a^n}{\sum_{i=0}^n \binom{M}{i} a^i} \quad (2.28)$$

และกรณีเรียกแล้วไม่มีช่องสัญญาณว่าง (Blocking) คือ

$$P_B = \frac{\binom{M-1}{n}}{\sum_{i=0}^n \binom{M-1}{i} a^i} \quad (2.29)$$

ตัวอย่างจากการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สถานีควบคุมฐาน (BSC) หลักสี่ มีจำนวนการเรียกและผลการตอบสนองขณะที่ทำการติดตั้งโครงข่ายและการบริการในช่วงเริ่มต้น เพื่อวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ได้ดังนี้ (ภาคผนวก ก.)



รูปที่ 2.15 แสดงอัตราการเรียกและการตอบสนองของ BSC04 ในช่วงเริ่มให้บริการ (DPC)

จากรูปที่ 2.15 ได้การเรียกใช้งานมากที่สุดที่เวลา 15.00 – 16.00 น. ได้เท่ากับ 1758 Erl ซึ่งจำกัดอยู่ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณหรือพื้นที่ครอบคลุมมากเกินไป ในการกำหนดต่อการบริการของ โทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM ได้กำหนด GOS (Grad of Service) หรือโอกาสการโทรไม่ติด (blocking probability) หรือไม่มีช่องสัญญาณว่าง ที่ 2 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ เฉลี่ยผู้ใช้ 1 คนต้องการ 0.025 Erl และจากตารางสรุปได้ว่า เราสามารถพิจารณาในช่วงที่มีจำนวนการเรียกสูงสุดเพื่อรองรับกับความต้องการ ซึ่งต้องขยายความจุไปถึง 3665.3 Erl ซึ่งต้องติดตั้ง RTX (radio transceiver) เพิ่มประมาณ เท่าตัว ซึ่งเป็นไปได้ยาก ในทางปฏิบัติเซลล์ไซต์มักจะมีรูปแบบคล้ายๆกันเพื่อความสะดวกในการติดตั้งและดูแลรักษา การเพิ่มความจุจึงสามารถเพิ่มได้โดยการลดพื้นที่ครอบคลุมเซลล์ลงจน

เพียงพอ และลดกำลังส่งของทั้ง BTS และ MS ให้เหมาะสมโดยวิธีการควบคุมกำลังส่ง หรือคงกำลังส่งของเมโครเซลล์ในพื้นที่นั้นๆไว้ แล้วเลือกติดตั้งไมโครเซลล์เพิ่ม โดยจะกล่าวถึงอีกครั้งในบทต่อไป

**2.4.1 ช่องสัญญาณและกำลังส่ง**

จุดเด่นของไมโครเซลล์คือสามารถรองรับกับความจุทราฟฟิกสูงทำได้โดยติดตั้งให้ครอบคลุมพื้นที่น้อยและติดตั้งเป็นเลเยอร์ใหม่เสริมเข้ากับเมโครเซลล์ โดยให้ไมโครเซลล์รองรับทราฟฟิกและสนับสนุนต่อการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องด้วยเมโครเซลล์ หรือรู้จักกันในชื่อ Underlay และ Overlay หรือ Multilayer จนถึงในอนาคตที่กลายเป็นการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ส่วนบุคคล เนื่องจากความจำกัดเรื่องความถี่ ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่และเสนอโครงข่ายที่เหมาะสมของการติดตั้งเซลล์อย่างหนาแน่นดังกล่าว

**2.4.1.1 ความถี่กลับมาใช้ใหม่แบบมัลติเลเยอร์**

การติดตั้งไมโครเซลล์ในพื้นที่เมโครเซลล์แล้วจะกลายเป็นเลเยอร์ใหม่ หรือ Overlay ที่สามารถใช้ความถี่เมโครเซลล์ได้ โดยคำนึงถึง CIR เป็นเรื่องหลัก เมื่อ MS มากขึ้นนอกจากต้องการ

**ตารางที่ 2.5 ความถี่นำกลับมาใช้ใหม่กับไมโครเซลล์ในแต่ละเซ็คเตอร์**

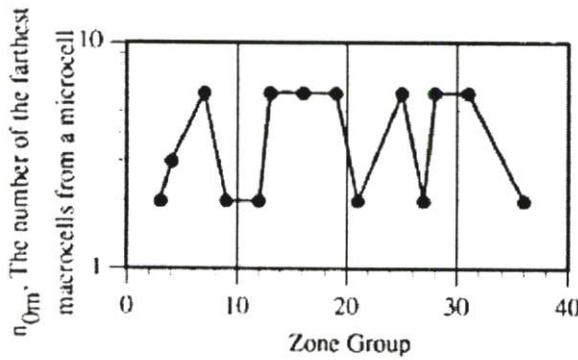
F/S	A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2	A3	B3	C3	D3
A1	-	✓	✓	✓	X	✓	X	X	X	X	✓	X
B1	✓	-	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	X	✓
C1	✓	✓	-	✓	X	X	X	✓	X	✓	X	X
D1	✓	✓	✓	-	X	X	✓	X	✓	X	X	X
A2	✓	✓	X	X	-	✓	✓	✓	X	X	✓	X
B2	✓	X	X	X	X	-	✓	✓	✓	X	X	✓
C2	X	X	X	✓	✓	✓	-	✓	X	✓	X	X
D2	X	X	✓	X	✓	✓	✓	-	✓	X	X	X
A3	X	X	X	✓	X	X	X	✓	-	✓	✓	✓
B3	X	X	✓	X	✓	X	✓	X	X	-	✓	✓
C3	✓	X	X	X	✓	X	X	X	✓	✓	-	✓
D3	X	✓	X	X	X	✓	X	X	✓	✓	✓	-

✓ ช่องสัญญาณที่ใช้ได้ X ช่องสัญญาณจากเซลล์ข้างเคียง - ช่องสัญญาณในพื้นที่เดียวกัน

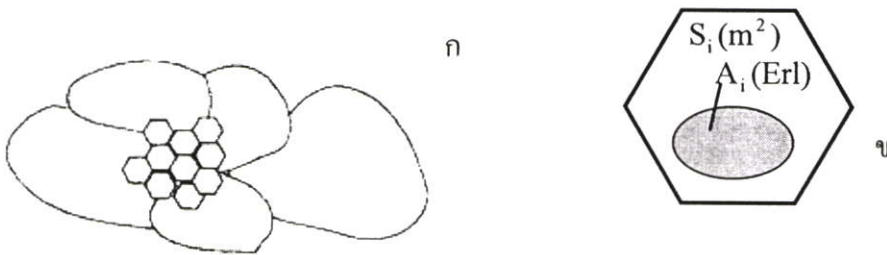
ช่องสัญญาณความถี่มากขึ้นแล้วยังต้องจัดช่องสัญญาณควบคุม (Control Channel) ไว้ให้เพียงพอด้วย โดยเฉพาะ BCCH เพราะโทรศัพท์เคลื่อนที่ทุกเครื่องต้องการการติดต่อกับสถานีฐานเป็นระยะตลอดเวลาแม้ยังไม่สร้างช่องสัญญาณเสียง ในระบบ GSM แบบ 4/3 โดยทั่วไปใช้ช่องสัญญาณความถี่ 3 ช่องต่อเซกเตอร์และช่องสัญญาณควบคุม 1 ช่อง ฉะนั้นต้องใช้ทั้งหมด 12+36 ช่องสัญญาณความถี่

ในเซกเตอร์หนึ่งๆสามารถนำความถี่ควบคุมกลับมาใช้ใหม่ได้โดย ไม่ใช้ความถี่ TCH และ BCCH ภายในเมคโครเซลและเมคโครเซลข้างเคียง จากตัวอย่างตาราง 2.5 ที่ TCH ทั้งหมด 32 ช่องสามารถให้ความถี่นำมาใช้ใหม่แบบไม่ซ้ำกับความถี่ในเมคโครเซลและเซลข้างเคียง ได้  $(5 \times 3)FCH + (5 \times 1)BCCH$  และแสดงช่องสัญญาณและกำลังส่งได้ดังนี้

รูปที่ 2.16 แสดงจำนวนกลุ่มความถี่นำกลับมาใช้ใหม่ กับเซลที่ไกลจากตำแหน่งเลขอร์ของไมโครเซลพิจารณามากที่สุด เพื่อนำกลุ่มความถี่ของเมคโครเซลนั้นมาใช้ใหม่กับไมโครเซลพิจารณา การอินเตอร์เฟียร์เรนทีมีทั้ง ไมโครเซล – เมคโครเซล และ ไมโครเซล – ไมโครเซล



รูปที่ 2.16 แสดงจำนวนเมคโครเซล ( $n_{om}$ ) ไกลจากตำแหน่งไมโครเซลพิจารณามากที่สุด



รูปที่ 2.17 การเพิ่มทราฟฟิคโดยนำความถี่เมคโครเซลกลับมาใช้ (ก) มัลติเลเยอร์ของเซลลูลาร์ (ข) พื้นที่ของเซลเลเยอร์ล่าง(เมคโครเซล) และ พื้นที่กลุ่มไมโครเซล

รูป 2.16 (ข) ภายในเมคโครเซลจะได้ทราฟฟิคเพิ่มขึ้นจากไมโครเซลเป็น  $A_i$  (Erl) ในพื้นที่  $S_i$  ( $m^2$ ) ที่ไมโครเซลรัศมี  $r$  กับ จำนวนไมโครเซล  $n$  จะได้พื้นที่กลุ่มไมโครเซลเป็น

$$S_i = n \cdot \frac{3\sqrt{3}}{2} r^2 \quad (2.30)$$

กำลังส่งในไมโครเซลล์จำกัดโดย CIR ของระบบ ด้วยการเกิดอินเตอร์เฟียร์เรนท์จากกำลังสัญญาณจากเมคโครเซลล์และกลุ่มไมโครเซลล์ใหม่ กำลังส่งที่ต่างกันสามารถหาได้จากสมการด้านล่าง [6]

$$\Delta P \geq \frac{10^{\frac{A}{10}} \cdot 6 \cdot (\sqrt{N})^{-\gamma}}{n_{om}} \quad (2.31)$$

$$1 - 10^{\frac{A}{10}} \cdot n_m \cdot (\sqrt{3N})^{-\gamma}$$

เมื่อ  $n_m = \text{int}(\frac{n}{N})$  หาก  $n_m > 6$  ใช้  $n_m$  เป็น 6  $N$  เป็นจำนวนกลุ่มเซลล์  $A$  เป็น CIR ที่ระบบต้องการ  $\gamma$  เป็นครีกริลด์ทอนของอากาศ  $n_{om}$  เป็นจำนวนเมคโครเซลล์ที่ไกลที่สุด ดังรูปที่ 2.15  $n_m$  เป็นจำนวนไมโครเซลล์ที่ให้อินเตอร์เฟียร์เรนท์กับไมโครเซลล์ จากสมการ 2.31 ปรับปรุงกับกำลังส่งกับเมคโครเซลล์ได้ดังนี้

$$P_m \leq P_{om} \left( \frac{1 - 10^{\frac{A}{10}} \cdot 6 \cdot (\sqrt{3N})^{-\gamma}}{10^{\frac{A}{10}} \cdot 6 \cdot n_d \cdot (\sqrt{N})^{-\gamma}} \right) \quad (2.32)$$

เมื่อ  $n_d = \text{int}(\frac{R_0^2}{n \times r^2})$  เป็นจำนวนกลุ่มไมโครเซลล์ในเมคโครเซลล์ เมื่อ  $R_0^2$  เป็นรัศมีครอบคลุมของไมโครเซลล์ในเมคโครเซลล์  $P_{om}$  เป็นกำลังส่งสูงสุดของเมคโครเซลล์ จากสมการ 2.15 เมื่อกลุ่มไมโครเซลล์มากกำลังส่งสูงสุดจะลดน้อยลงมาก และกำลังภายในไมโครเซลล์  $P_b$  ไม่มากไปกว่า  $P_m$

จากการคำนวณได้ความถี่ของเมโครเซลล์จำนวน 2 กลุ่มความถี่มาใช้กับไมโครเซลล์ คือ  $(2 \times 3)$  FCH +  $(2 \times 1)$  BCCH ช่องความถี่ และมีกำลังส่งตามสมการ (2.31)

#### 2.4.1.2 นำความถี่เดิมมาใช้แบบไม่ซ้ำ

การนำความถี่เดิมมาใช้แบบไม่ซ้ำกับไมโครเซลล์ทำให้แยกพิจารณา CIR ของแต่ละเลเยอร์เป็นอิสระต่อกัน มีอยู่ 2 วิธีคือ นำความถี่สำรองสำหรับไมโครเซลล์ และ นำกลุ่มความถี่เมโครเซลล์จัดสรรมาใช้กับไมโครเซลล์ เช่น GSM (ประเทศไทย) ส่วนใหญ่ จัดความถี่แบบ 4/3

$$N_M \frac{\text{channels}}{\text{cell}} \times 12 \text{cell} \quad (2.33)$$

ซึ่งต้องใช้ความถี่  $N_M$  อย่างน้อย 12 ช่องสำหรับเมคโครเซลล์และ (2.33) ถ้าใช้ความถี่ 36 ช่อง จะสามารถให้ความจุได้ 14 Erl ต่อเซลล์ ต่อมานำความถี่เมคโครเซลล์มาใช้ใหม่กับกลุ่มไมโครเซลล์  $K_m$  ได้เป็น

$$(N_M - N_m) \frac{\text{channels}}{\text{cell}} \times 12 \text{cell} + N_m \frac{\text{channels}}{\text{cell}} \times k_m \text{cell} \quad (2.34)$$

ซึ่งสามารถมีความถี่ไมโครเซลล์นำมาจัดอินเตอร์เฟอเรนซ์ได้อย่างอิสระกับเมคโครเซลล์ ดังรูปที่ 2.4 ที่สามารถจัดห่างกันได้ประมาณ 1.3 กิโลเมตร เมื่อใช้ความถี่เดิม

## บทที่ 3

### สัญญาณและสัญญาณรบกวน

ความจำกัดของระบบสื่อสารประการหนึ่งอยู่ที่ระดับของสัญญาณที่เพียงพอ หรือสัญญาณรบกวนที่สามารถจำกัดให้อยู่ในขนาดที่เหมาะสมที่ยอมรับได้ และหมายถึงคุณภาพของสัญญาณด้วย สัญญาณและสัญญาณรบกวนยังขึ้นอยู่กับอุปกรณ์และตัวแปรในระบบที่ออกแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางสัญญาณไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ในระบบสายโคเอกเซียลและทางแสงสำหรับสายใยแก้วนำแสง

#### 3.1 สัญญาณ (Signal)

ในหัวส่วนนี้แบ่งพิจารณาสัญญาณผ่านตัวกลางชนิดต่างๆ โดยเฉพาะจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ส่งผ่านไปยังหน่วยควบคุมหลักผ่านโครงข่ายผสม โดยพิจารณาแบ่งตัวกลางออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

##### 3.1.1 กรณีอากาศเป็นตัวกลาง

เฉพาะสัญญาณจากโทรศัพท์เคลื่อนที่มายังสายอากาศเครื่องรับหรือ BTS สัญญาณจะสัมพันธ์กับองค์ประกอบดังนี้

##### 3.1.1.1 การแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง

เครื่องส่งมีกำลังส่ง  $P_t$  แพร่กระจายคลื่นจากจุดศูนย์กลางไปรอบๆ เป็นวงกลม ณ ตำแหน่งใดๆ จึงเท่ากับความหนาแน่นของกำลังงานรวมที่จุดศูนย์กลาง

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

$$P_t = d^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} P_r(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.2)$$

$$P_t = P_r \cdot d^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.3)$$

$$P_t = 4\pi d^2 P_r \quad (3.4)$$

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi d^2} \quad (3.5)$$

ให้  $G_r$  คืออัตราขยายกำลังของสายอากาศจากเครื่องส่ง ดังนั้นจะได้  $P_r$  เป็น

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (3.6)$$

เมื่อความหนาแน่นกำลังแพร่กระจายสัญญาณมาถึงจุดหมายแล้วสายอากาศรับก็จะรับด้วยพื้นที่

$$\text{พื้นที่รับสัญญาณ} = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \quad (3.7)$$

$$\therefore P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (3.8)$$

หรือถ้า  $G_t = G_r$  เท่ากับ 1 และ  $\gamma$  เป็นคิกรการลดทอนขึ้นกับสภาพแวดล้อม จะได้

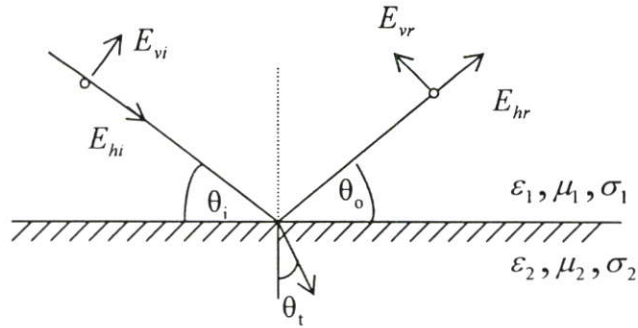
$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^\gamma \quad (3.9)$$

### 3.1.1.2 ลักษณะแพร่กระจายคลื่นพื้นฐาน (Basic propagation Mechanisms)

ลักษณะพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่นคือสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอเมื่อมีการสื่อสารด้วยคลื่นตามพฤติกรรมของการ รับ-ส่ง คลื่น และสภาพแวดล้อม ดังนี้

#### 1. การสะท้อนของคลื่น (Reflection)

การสะท้อนเกิดขึ้นเมื่อคลื่นสนามแม่เหล็กเดินทางไปเหนือสิ่งกีดขวางที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมาก การสะท้อนจากพื้นผิวโลกและจากอาคารหรือผนังจะทำให้เกิดทิศทางใหม่ขึ้นมาซึ่งสัญญาณสะท้อนนี้อาจเดินทางไปที่เครื่องรับด้วย และอีกกรณีคือคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางที่มีไดอิเล็กทริกต่างกันก็อาจหักเหเปลี่ยนทิศทางได้ด้วย ดังรูป 3.1 ทิศทางคลื่นส่วนหนึ่งทะลุผ่านตัวกลางตกกระทบอีกส่วนหนึ่งสะท้อน ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าของคลื่นตกกระทบและสะท้อนแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรสเนล (Fresnel reflection coefficient:  $\Gamma$ )



รูปที่ 3.1 แสดงเลขาคณิตสำหรับสัมประสิทธิ์การสะท้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเป็นฟังก์ชันกับค่าพหุคูณตรีโกณมิติของพื้น โพลาริเซชันของคลื่น มุมตกกระทบ และความถี่ของคลื่น จากสมการตัวห้อย  $v$  และ  $h$  แทนโพลาไรซ์สนามไฟฟ้าทาง แนวตั้งและแนวนอนตามลำดับ ส่วน  $i$  และ  $r$  หมายถึงสนามไฟฟ้าตกกระทบและสะท้อนตามลำดับ และ  $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$  คือพหุคูณตรีโกณมิติ ค่าความแทรกซึม และสภาพการนำของตัวกลางที่ 1 ตามลำดับ และ ตัวห้อยด้วย 2 หมายถึงเป็นค่าความหมายเดียวกันของตัวกลางที่สอง ในกรณีที่ตัวกลางที่ 1 เป็น อากาศค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนทั้งสนามไฟฟ้าในแนวตั้งและแนวนอนจะได้

$$\Gamma_v = \frac{E_{vr}}{E_{vi}} = \frac{-\epsilon_r \sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\epsilon_r \sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (3.10)$$

$$\Gamma_h = \frac{E_{hr}}{E_{hi}} = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}} \quad (3.11)$$

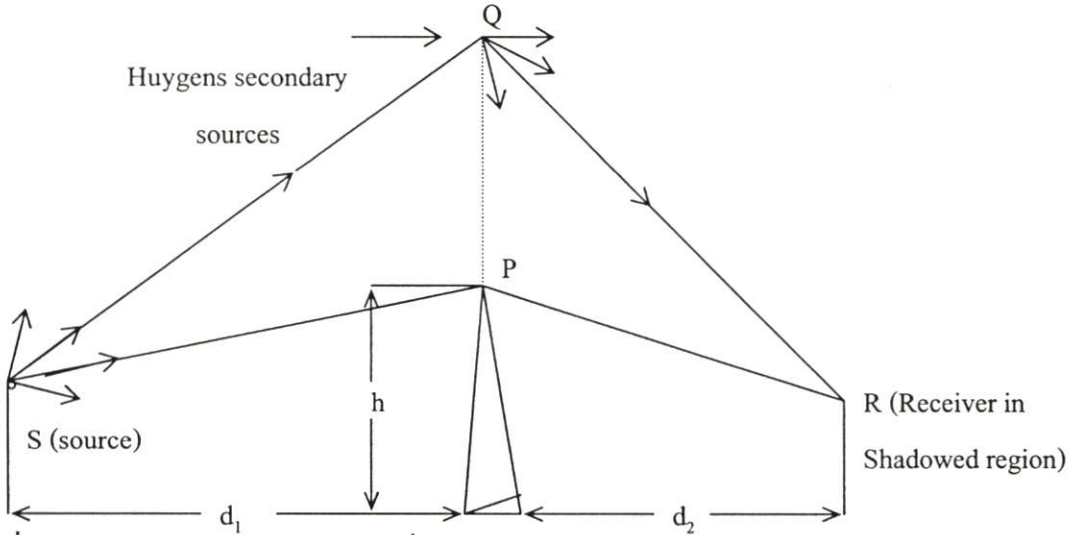
และหากมุม  $\theta_i$  เป็นมุมที่ทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อน  $\Gamma_v$  มีค่าเป็นศูนย์ มุมนี้เรียกว่ามุม ของ บรีวส์เตอร์ (Brewster angle) แสดงมุมบรีวส์เตอร์ดังนี้

$$\sin \theta_i = \frac{\sqrt{\epsilon_r - 1}}{\sqrt{\epsilon_r^2 - 1}} \quad (3.12)$$

## 2. การหักเหของคลื่น (Diffraction)

การหักเหของคลื่นคือการเดินทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปตามส่วนโค้งของโลก และสามารถเดินทางเหนือสิ่งกีดขวางได้ ปรากฏการณ์การหักเหสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎี ของฮิวเกน (Huygen's principle) ที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางเหนือสิ่งกีดขวางแล้วเกิดหน้าคลื่น

ใหม่หลังสิ่งกีดขวาง จากการรวมกันแบบเวกเตอร์ของคลื่นใหม่ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากแหล่งกำเนิดคลื่นอันดับที่สองกำหนดเป็นคลื่นย่อยๆ ซึ่งเรียกพื้นที่ใช้สัญญาณแบบนี้ว่าเป็นพื้นที่เงา แม้ว่าจะมีการลดทอนสัญญาณลงอย่างมาก แต่อาจเพียงพอต่อการสื่อสารได้



รูปที่ 3.2 การหักเหและแหล่งกำเนิดคลื่นอันดับสองของฮิวเกน

ความแรงของสนามไฟฟ้าที่ R จะเป็นผลของผลรวมของเวกเตอร์ของแหล่งกำเนิดคลื่นอันดับสอง แสดงสมการความแรงของสนามไฟฟ้า  $E_d$  ได้ว่า

$$E_d = E_0 F(v) \quad (3.13)$$

เมื่อ  $E_d$  เป็นความแรงสนามไฟฟ้าในอากาศสว่าง และ  $F(v)$  เป็นฟังก์ชันการหักเหของเฟรสเนล และไครว็อฟฟ์ (Fresnel-Kirchoff diffraction parameter-  $v$ ) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $h$  เป็นความสูงของสิ่งกีดขวาง ส่วน  $d_1$  และ  $d_2$  เป็นระยะจากเครื่องส่งถึงสิ่งกีดขวางและจากสิ่งกีดขวางถึงเครื่องรับตามลำดับ และสามารถหาอัตราการลดทอน  $L_d$  ในหน่วยเดซิเบล ดังสมการ

$$L_d = 20 \log |F(v)| \quad (3.15)$$

การแสดงอัตราการลดทอนของเฟรสเนลหาได้ยาก จึงได้มีค่าโดยประมาณของลี (Lee) ดังนี้

$$L_d = 0 \quad 1 \leq v \quad (3.16)$$

$$L_d = 20 \log_{10}(0.5 + 0.62v) \quad 0 \leq v \leq 1 \quad (3.17)$$

$$L_d = 20 \log_{10}(0.5 \exp(0.95v)) \quad -1 \leq v \leq 0 \quad (3.18)$$

$$L_d = 20 \log_{10}(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.1v + 0.38)^2}) \quad -2.4 \leq v \leq -1 \quad (3.19)$$

$$L_d = 20 \log_{10}(-0.225/v) \quad v \geq -2.4 \quad (3.20)$$

ในสมการ (3.17-3.18) จะเห็นว่าถ้า  $v$  เป็นศูนย์ จะได้อัตราการลดทอนเป็น  $-6$  dB ในทางปฏิบัติแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณภูเขาเป็นสิ่งกีดขวางมากกว่าหนึ่งลูก ฉะนั้นเส้นทางการเดินทางคลื่นจะประกอบด้วยการหักเหหลายครั้งอัตราการลดทอนจึงเป็นการลดทอนรวม

### 3. การแตกกระจายของคลื่น (Scattering)

การประเมินอัตราการลดทอนในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่มักจะมีค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงอยู่เสมอเพราะส่วนใหญ่พิจารณาเพียงเรื่องการสะท้อนและการหักเหของคลื่น ในความเป็นจริงการหาพลังงานของคลื่นสะท้อนได้ถูกกระจายออกหลายทิศทางเป็นผลจากผิวหน้าสะท้อนไม่เรียบเรียกว่าการแตกกระจาย พื้นผิวที่มีความขรุขระจะใช้ทฤษฎีของเรย์ลีย์ (Rayleigh criterion) ในการบรรยายซึ่งได้กำหนดความสูงวิกฤติของปุ่มขรุขระของพื้นผิวกับมุม  $\theta_i$  ไว้ว่า

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i} \quad (3.21)$$

ถ้าผิวหน้าราบเรียกว่า ( $h$  มีความสูงน้อยกว่า  $h_c$ ) และมีความขรุขระกว่า ( $h$  มีความสูงมากกว่า  $h_c$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต้องรวมด้วยค่าสูญเสียการแตกกระจาย  $\rho_s$  ดังที่อาเมนต์ (Ament) ได้คำนวณออกมาว่า

$$\rho_s = \exp \left[ -8 \left( \frac{\pi \sigma_h \cos \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3.22)$$

เมื่อ  $\sigma_h$  เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงพื้นผิวเฉลี่ย และสมการ (3.22) ก็ได้ถูกปรับปรุงโดย

บอยธัส(Boithias) ที่ให้ผลการวัดออกมาแม่นยำมากกว่าคือ

$$\rho_s = \exp\left[-8\left(\frac{\pi\sigma_h \cos\theta_i}{\lambda}\right)^2\right] I_0\left[8\left(\frac{\pi\sigma_h \cos\theta_i}{\lambda}\right)^2\right] \quad (3.23)$$

เมื่อ  $I_0$  เป็นเบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function)

### 3.1.2 สมการการลดทอนทางปฏิบัติ

การหาการลดทอนทางภาคปฏิบัติมีทั้งวิธีการสังเกต (Empirical Method) และวิธีการวิเคราะห์ (Analytical Method) และรวบรวมข้อมูลในทางสถิติด้วยทั้งสองวิธีประกอบกัน ได้ค่าคงที่ที่ทำให้สมการใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริงมากขึ้น

สมการการลดทอนทั้งทฤษฎีและการวัดทางปฏิบัติที่ค่ากำลังเฉลี่ยที่รับได้สัมพันธ์กับระยะทางและคิกรีการลดทอน

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^\gamma \quad (3.24)$$

ทางปฏิบัติกำลังที่รับได้จะเป็นผลรวมของกำลังเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบน เพื่อให้ความน่าเชื่อถือมากขึ้น คึงสมการ (3.25)

$$PL(d) = \overline{PL}(d) + X\sigma \quad (3.25)$$

$X\sigma$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็นค่าที่ได้จากสถิติทางการวัดที่มีโอกาสคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่มีโอกาสเกิดมากที่สุด (ค่ากลางของรูประฆังคว่ำ) จะช่วยให้ค่าที่ได้อยู่ในขอบเขตที่น่าเชื่อถือมากขึ้น จากโอกาสการคลาดเคลื่อนของความแรงสัญญาณจะช่วยให้ประมาณระยะทางที่ยังสามารถให้กำลังคลื่นที่เพียงพอ

ให้  $A$  เป็นค่าระดับเฉลี่ยตลอดความชันการลดทอน  $A = P_0 - \gamma \log(r_1 / r_0)$  เมื่อระดับ  $A$  เป็นระดับกำลังที่  $r_1$  ให้เป็นพื้นที่ 50 เปอร์เซนต์ของสมการ Gaussian Probability Density Function (3.26) ซึ่งแสดงผลในตารางที่ 3.1 [11] [12]

$$fx(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-A)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.26)$$

ถ้าให้ระดับ  $A$  เพิ่มความน่าเชื่อถือขึ้น หมายถึงระยะทางจะลดลง เช่น ที่ระยะครอบคลุมเซล 90 เปอร์เซนต์เป็น

$$90\% = \int_A^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-C)^2}{2\sigma^2}\right) dx = \int_{\frac{A-C}{\sigma}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \quad (3.27)$$

คือที่ระดับ  $C$  ( $r_{90}$ ) เพิ่มจาก  $A$  ( $r_{50}$ ) ดังตารางจะได้  $r_{90} = r_{50} 10^{\frac{-0.13\sigma}{\gamma}}$  เพื่อนำมาพิจารณาระยะครอบคลุมเซลต่อไป

### ตารางที่ 3.1 โอกาสกับระดับความน่าเชื่อถือ

$P(x \geq C)$ , %	$C = B\sigma + A$
80	$-0.85\sigma + A$
70	$-0.55\sigma + A$
60	$-0.25\sigma + A$
50	$A$
40	$0.25\sigma + A$
30	$0.55\sigma + A$
20	$0.85\sigma + A$
16	$1\sigma + A$
10	$1.3\sigma + A$
2.28	$2\sigma + A$

เมื่อ  $B$  เป็นค่าคงที่ที่ได้จาก Gaussian distribution ของรูปประฆังค่าจากสมการที่ (3.26)  $A$  เป็นระดับสัญญาณเฉลี่ยที่คาดไว้ และ  $C$  เป็นระดับสัญญาณที่สูงเกินกว่าระดับเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ ดังตาราง

#### 3.1.2.1 สมการการลดทอนของ Okumura

วิธีการของ Okumura เป็นวิธีการหาค่าลดทอนที่ใช้มากที่สุด ใช้ในความถี่ระหว่าง 150 – 2000 MHz และที่ระยะ 1-100 กิโลเมตร สามารถใช้กับเสาอากาศที่มีความสูง 30-100 เมตร แสดงสมการการลดทอนดังนี้

$$L_{50} = L_F + A_{mu}(f, d) + G(h_{te}) + G(h_{re}) \quad (3.28)$$

- เมื่อ  $L_{50}$  เป็นค่าการลดทอนเฉลี่ยในหน่วยเดซิเบล  
 $L_F$  เป็นค่าการลดทอนจากอากาศว่าง  
 $A_{mu}$  เป็นค่าลดทอนของควมถี่ที่สัมพันธ์กับตัวกลาง  
 $G(h_{te})$  เป็นอัตราการขยายของเสาอากาศส่งสัมพันธ์กับความสูง  
 $G(h_{re})$  เป็นอัตราการขยายของเสาอากาศรับสัมพันธ์กับความสูง

### 3.1.2.2 สมการการลดทอนของ Hata

สมการการลดทอนของ Hata หรือเรียกว่า Okumura-Hata เพราะได้ปรับปรุงมาจากสมการของ Okumura โดยปรับปรุงจากผลทางการวัดและสถิติ ใช้สมการลดทอนนี้กับความถี่ระหว่าง 100 – 1500 MHz ที่ระยะครอบคลุมไม่เกิน 1 กิโลเมตร กับความสูงเสาอากาศ 30-200 เมตร เหมาะสำหรับการลดทอนของเซลล์ขนาดเล็ก

$$L_{50} = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_{te}) \log_{10} d \quad (3.29)$$

- เมื่อ  $L_{50}$  เป็นค่าการลดทอนเฉลี่ยในหน่วยเดซิเบล (dB)  
 $f_c$  เป็นความถี่ใช้งาน  
 $h_{te}$  เป็นความสูงเสาส่ง (สถานีฐาน) ระหว่าง 30 - 200 เมตร (m)  
 $h_{re}$  เป็นความสูงเสารับ (โทรศัพท์เคลื่อนที่) ระหว่าง 1-10 เมตร (m)  
 $d$  เป็นระยะทางจากเสาส่งถึงเสารับ ในหน่วย กิโลเมตร (km)  
 $a(h_{re})$  เป็นค่าแฟกเตอร์แก้ไขค่าความสูงเสารับ ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของพื้นที่ให้บริการในตัวเมือง

$$a(h_{re}) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7) h_{re} - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8) \quad (3.30)$$

และที่เมืองขนาดใหญ่ได้  $a(h_{re})$  เป็น

$$a(h_{re}) = 8.26(\log_{10} 1.54 h_{re})^2 - 1.1 \quad \text{สำหรับ } f_c \leq 200 \text{ MHz} \quad (3.31)$$



- เมื่อ  $d$  เป็นระยะทางจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ถึงสถานีฐานในระยะไม่เกิน 20 กิโลเมตร  
 $f$  เป็นความถี่ในหน่วย MHz  
 $L_b$  เป็นอัตราการสูญเสีย และที่ระยะ  $d$  ไม่เกิน 20 เมตรจะมีค่าเท่ากับอัตราการสูญเสียของอากาศว่าง

ได้มาจากสมการพื้นฐานที่ พิจารณาทั้งการสูญเสียจากการหักเหและการแตกกระจายของสัญญาณ

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad (3.36)$$

- เมื่อ  $L_0$  เป็นอัตราการลดทอนของอากาศว่าง

$$L_0 = 32.4 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (3.37)$$

- $L_{rts}$  เป็นอัตราการลดทอนจากการหักเหของเสาอากาศและการแตกกระจาย

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log(w) + 10 \log(f) + 20 \log \Delta h_m + L_{street} \quad h_{rf} > h_m \quad (3.38)$$

$$L_{rts} = 0 \quad L_{rts} < 0 \quad (3.39)$$

- $L_{street}$  เป็นอัตราการลดทอนเนื่องจากการจัดเรียงของถนน

$$L_{street} = (-10) + 0.354\alpha \quad 0 \leq \alpha < 35^\circ \quad (3.40)$$

$$L_{street} = 2.5 + 0.075(\alpha - 35) \quad 35 \leq \alpha < 55^\circ \quad (3.41)$$

$$L_{street} = 4.0 - 0.11(\alpha - 55) \quad 55 \leq \alpha < 90^\circ \quad (3.42)$$

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

$L_{msd}$  เป็นการลดทอนจากการหักเหของหลายหน้าคลื่น (Multiscreen diffraction loss) แสดงได้จากค่าของ Walfish ดังนี้

$$L_{msd} = L_{msd(1)} + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) - 9 \log(b) \quad (3.43)$$

$$L_{msd} = 0 \quad L_{msd} < 0 \quad (3.44)$$

เมื่อ  $L_{msd} = -18 \log(1 + \Delta h_b) \quad h_b > h_{rf} \quad (3.45)$

$$L_{msd} = 0 \quad h_b \leq h_{rf} \quad (3.46)$$

$$k_a = 54 - 0.8(\Delta h_b) \quad d \geq 0.5 \text{ km} \quad h_b \leq h_{rf} \quad (3.47)$$

$$k_a = 54 - 0.8 \Delta h_b \frac{d}{0.5} \quad d < 0.5 \text{ km} \quad h_b \leq h_{rf} \quad (3.48)$$

$$k_d = 18 \quad h_b > h_{rf} \quad (3.49)$$

$$k_d = 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_{rf}} \quad h_b \leq h_{rf} \quad (3.50)$$

สำหรับตัวเมืองขนาดกลางและศูนย์กลางชานเมืองที่มีความหนาแน่นของต้นไม้พอประมาณ

$$k_f = -4 + 0.7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) \quad (3.51)$$

และสำหรับศูนย์กลางตัวเมืองเป็น

$$k_f = -4 + 1.5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) \quad (3.52)$$

### 3.1.2.4 สมการ Walfisch-Ikegami สำหรับ GSM ไมโคร-เมคโครเซล

สมการทางปฏิบัติสำหรับไมโครเซลในอาคารและนอกอาคาร จะมีงานวิจัยกล่าวถึงเป็นจำนวนมาก เพราะมีความแตกต่างกันด้านสภาพแวดล้อมและระบบที่ใช้อ้างอิง ต่อไปนี้เป็นสมการ Walfisch -Ikegami ที่ใช้กับอินเตอร์เฟอรัลเรนททางปฏิบัติของ ไมโครเซล – เมคโครเซลในอาคารใน

ระบบ GSM900 โดย COST-231 (European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research 231) [10] จุดประสงค์เพื่อใช้สนับสนุนกับ GSM ในระบบ 3G สรุปได้ดังนี้

BTS-Macro ไปยัง MS-Macro

$$L_{GG} = 31.5 + 20 \cdot \log(d / m) + \sigma(\text{dB}) \quad \text{สำหรับ } d \leq 21 \text{ m} \quad (3.53)$$

$$L_{GG} = 7.7 + 38 \log(d / m) + \sigma(\text{dB}) \quad \text{สำหรับ } d > 21 \text{ m} \quad (3.54)$$

BTS-Macro ไปยัง MS-Micro

$$L_{CG} = L_{GG} + L_{indoor} \quad \text{โดย } L_{indoor} = 12 \text{ dB} \quad (3.55)$$

BTS-Micro ไปยัง MS-Macro

$$L_{GG} = 31.5 + 20 \cdot \log(d / m) + \sigma(\text{dB}) + L_{indoor} \quad \text{สำหรับ } d \leq 23.25 \text{ m} \quad (3.56)$$

$$L_{GG} = 31.5 + 20 \cdot \log(d / m) + \sigma(\text{dB}) + L_{indoor} \quad \text{สำหรับ } d > 23.25 \text{ m} \quad (3.57)$$

BTS-Micro ไปยัง MS-Micro

$$L_{CC} = 31.5 + 20 \log(d / m) + \sigma(\text{dB}) + 0.9d / m \quad \text{สำหรับ } d \leq 40 \text{ m} \quad (3.58)$$

$$L_{CC} = -7.54 + 49 \log(d / m) + \sigma(\text{dB}) + 2 \cdot L_{indoor} \quad \text{สำหรับ } d > 40 \text{ m} \quad (3.59)$$

### 3.1.3 การสื่อสารด้วยแสง

การสื่อสารด้วยการใช้แสงเป็นพาหะนำข้อมูลถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งสำหรับโครงข่ายการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วย โดยในเนื้อหาได้บรรยายสัมพันธ์ถึงการใช้อย่างเป็นเส้นใยแก้วนำแสง ที่ให้ประสิทธิภาพในการส่งกำลังได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ไดโอด คุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงดังต่อไปนี้

- 1) การสูญเสียในการส่งสัญญาณต่ำ ใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณน้อยลง
- 2) แบนด์วิธที่กว้าง ความจุในการส่งข้อมูลสูงขึ้น
- 3) ไม่ถูกรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Interference, EMI)

4) ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า (Conductive) สามารถแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับได้ทำให้ไม่เกิดสัญญาณรบกวนกัน

5) ไม่เป็นตัวเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Inductive)

6) ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา

7) ความปลอดภัยสูง

8) ทนความร้อนและสารเคมีได้ดีกว่าสายทองแดง

9) ม้วนและงอได้ง่าย

นอกจากข้อดีเหล่านี้แล้วการส่งผ่านทางแสงยังให้ความน่าเชื่อถือได้มากและให้เสถียรภาพสูงกว่าการส่งแบบไมโครเวฟที่มีโอกาสแปรปรวนตามสภาพแวดล้อมและสภาพอากาศ อย่างไรก็ตามราคาในการติดตั้งโครงข่ายก็สูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งจะได้พิจารณาในเทอมราคาต่อไป

### 3.1.3.1 การประมวลสัญญาณทางแสง (Optical signal processing)

การประมวลผลทางแสงเริ่มต้นด้วยการตรวจจับแสงแล้วเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าตามการมอดูเลตจากเครื่องส่ง โดยรับสัญญาณในรูปความเข้มแสงที่ตกกระทบซึ่งสามารถแบ่งการตรวจจับสัญญาณได้ 2 วิธี คือ แบบตรง (Direction detection) และ แบบร่วมนัย (Coherent detection) ในที่นี้จะกล่าวถึงในส่วนแรก ที่เป็นระบบตรวจจับที่ง่ายเพื่อประกอบการพิจารณาในงานวิจัย

#### 1) การตรวจจับแบบตรง (Direction detection, DD)

การตรวจจับแบบตรงสามารถทำได้ง่ายเพราะเปลี่ยนแปลงของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ดังนั้นผลของการตรวจจับจะวิเคราะห์สัญญาณและสมการทางคณิตศาสตร์ได้ในรูปของกระแสหรือแรงดัน

การตรวจจับแบบตรง เริ่มจากสัญญาณถูกมอดูเลตเข้ากับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ โดยตรงแล้วส่งกำลังแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง และรับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetector) จะเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยตรงตามการเปลี่ยนขนาดกำลังแสงด้วยโฟโตไดโอด (Photodiode) โฟโตไดโอดส่วนใหญ่ที่ใช้จะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

1) โฟโตไดโอดชนิดพิน (PIN)

2) โฟโตไดโอดชนิดอะวาแลนช์ (Avalanche photodiodes, APD)

และตัวโฟโตไดโอดนั้นมีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

1) ประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum efficiency)

$$\eta = \frac{r_e}{r_p} \quad (3.60)$$

เมื่อ  $r_e$  และ  $r_p$  คือจำนวนอิเล็กตรอนที่เก็บสะสมได้และจำนวนโฟตอนของแสงที่ตกกระทบตามลำดับ สมการนี้จะบอกถึงประสิทธิภาพในการแปลงกำลังแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอดไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยปกติจะใช้เป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์

2) ความไวในการตอบสนองสัญญาณ (Responsivity)

$$R = \frac{I_p}{P_o} = \frac{\eta e}{hf} \quad A.W^{-1} \quad (3.61)$$

เมื่อ  $e$  คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่า  $1.602 \times 10^{-19}$  คูโลมปี  $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์มีค่า  $6.626 \times 10^{-34}$  จูล.วินาที  $f$  คือ ความถี่แสงที่ตกกระทบ  $I_p$  คือ กระแสเอาต์พุต และ  $P_o$  คือ กำลังแสงตกกระทบ สมการนี้จะบอกถึงความไวแสงที่ตกกระทบ

ได้กระแสเฉลี่ย (mean square current) ของแต่ละช่องสัญญาณจากช่องสัญญาณรวมเป็น  $\overline{I_i^2(t)} = I_o^2 m_i^2 / 2$  เมื่อ  $m_i$  เป็นดัชนีการมอดูเลตของช่องสัญญาณ

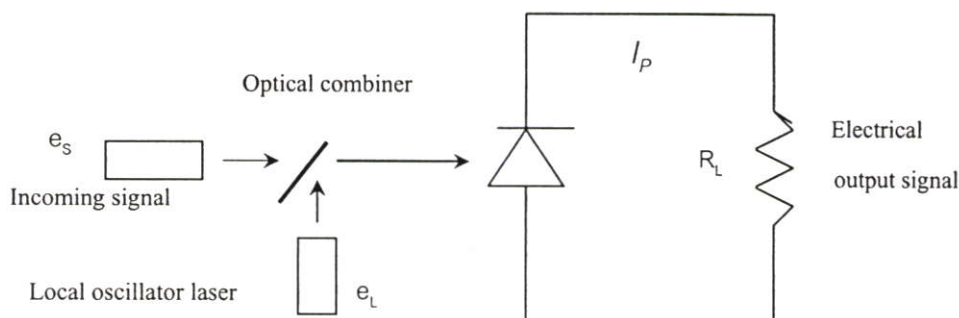
สำหรับโฟโตไดโอดชนิด APD จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกคือมัลติพลีเคชันแฟกเตอร์ (Multiplication factor, M) ซึ่งจะเป็นตัววัดอัตราขยายกระแสภายในดังนี้

$$M = \frac{I_o}{I_p} \quad (3.62)$$

เมื่อ  $I_o$  คือ กระแสเอาต์พุตรวม  $I_p$  คือ กระแสเริ่มแรก (Initial or primary photocurrent) ก่อนเกิดการทวีคูณของพาหะ (Carrier Multiplication)

## 2) การตรวจจับแบบร่วมนัย (Coherent detection)

ระบบการสื่อสารทางแสงส่วนใหญ่ใช้วิธีตรวจจับแบบตรง นอกจากการส่งข้อมูลในรูปการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดต่อเวลา และสามารถส่งในรูปของการเปลี่ยนแปลงเฟสและความถี่ด้วย โดยที่การตรวจจับแบบตรงนั้นตัวตรวจจับแสงไม่สามารถจับการเปลี่ยนแปลงได้ทันที ความถี่สูงมากๆ ทั้งตัวตรวจจับแสงแบบอูณหภูมิต่ำและแบบควอนตัมก็ไม่มีความเร็วพอในการติดตามการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแสง สิ่งที่ตรวจจับได้ก็คือการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของกำลังแสงที่มีต่อเวลาเท่านั้น การตรวจจับแบบร่วมนัยนั้นเฟสหรือความถี่ของเลเซอร์จะถูกเปรียบเทียบกับเฟสหรือความถี่ของคลื่นแสงที่เป็นตัวอ้างอิงที่ต้องมีเสถียรภาพดี



รูปที่ 3.4 แสดงหลักการพื้นฐานของการตรวจจับแบบร่วมนัย

ต่อไปนี้จะเป็นการวิเคราะห์หลักการพื้นฐานอย่างง่ายของการตรวจจับแบบร่วมนัยแสดงดังรูปที่ 3.4 กำลังแสงที่ตกลงบนตัวตรวจจับแสงซึ่งจะแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเกิดกระแส  $I_p$  ไหลในวงจรผ่านโหลดที่มีความต้านทาน  $R_L$  และสนามไฟฟ้าจากทั้งสองแหล่งกำเนิดจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$e_s = E_s \cos(\omega_s t + \phi_s) \quad (3.63)$$

$$e_L = E_L \cos(\omega_L t + \phi_L) \quad (3.44)$$

$E_s$  และ  $E_L$  คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า  $\omega_s$  และ  $\omega_L$  คือความถี่เชิงมุมของสนามไฟฟ้า โดยที่  $\phi_s$  และ  $\phi_L$  คือเฟสของสัญญาณ

ต่อมาที่ตัวตรวจจับแสงจะเกิดกระแส  $I_p$  ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบตามกฎกำลังสองของสนามไฟฟ้างี้

$$I_p \propto (e_s + e_L)^2 \\ \propto [E_s \cos(\omega_s t + \phi_s) + E_L \cos(\omega_L t + \phi_L)]^2 \quad (3.65)$$

เมื่อกระจายเทอมทางด้านขวามือของสมการ (3.65) จะได้

$$[(E_s)^2 \cos^2(\omega_s t + \phi_s) + (E_L)^2 \cos^2(\omega_L t + \phi_L) + 2E_s E_L \cos(\omega_s t + \phi_s) \cos(\omega_L t + \phi_L)] \quad (3.66)$$

ดังนั้น

$$E_L^2 \cos^2(\omega_L t + \phi_L) = \frac{1}{2} E_L^2 \cos 2(\omega_L t + \phi_L) + \frac{1}{2} (E_L^2) \quad (3.67)$$

$$E_S^2 \cos^2(\omega_S t + \phi_S) = \frac{1}{2} E_S^2 \cos 2(\omega_S t + \phi_S) + \frac{1}{2} (E_S^2) \quad (3.68)$$

และได้  $2E_S E_L \cos((\omega_S t + \phi_S) \cos(\omega_L t + \phi_L)) = E_S E_L \cos(\omega_S t + \phi_S + \phi_L t + \phi_L)$   
 $+ E_S E_L \cos(\omega_S t + \phi_S - \omega_L t - \phi_L)$  (3.69)  
 $= E_S E_L \cos((\omega_S + \omega_L)t + (\phi_S + \phi_L)) + E_S E_L \cos((\omega_S - \omega_L)t + (\phi_S - \phi_L))$

แทนสมการ (3.67) (3.68) และ (3.69) ในสมการ (3.66) จะได้

$$\frac{1}{2} E_S^2 \cos(2\omega_S t + 2\phi_S) + \frac{1}{2} E_S^2 + \frac{1}{2} E_L^2 + \frac{1}{2} E_L^2 \cos(2\omega_L t + 2\phi_L)$$

$$+ E_S E_L \cos((\omega_S + \omega_L)t + (\phi_S + \phi_L)) + E_S E_L \cos((\omega_S - \omega_L)t + (\phi_S - \phi_L)) \quad (3.70)$$

จากสมการ (3.70) เทอมความถี่  $2\omega_S$   $2\omega_L$  และ  $\omega_S + \omega_L$  อยู่ในช่วงที่มากเกินไปที่ตัวตรวจจับแสงจะตอบสนองได้หรือน้อยมาก ดังนั้น

$$I_P \propto \frac{1}{2} E_S^2 + \frac{1}{2} E_L^2 + E_S E_L \cos((\omega_S - \omega_L)t + \phi) \quad (3.71)$$

เมื่อ  $\phi = \phi_S - \phi_L$  และ  $\omega_S - \omega_L$  คือความถี่บีทเมื่อกำลังแสงแปรผันกับกำลังสองเฉลี่ยของสนามไฟฟ้า

$$P \approx \langle e^2 \rangle \quad (3.72)$$

ดังนั้น  $\langle e_S^2 \rangle = \frac{1}{2} E_S^2$  และ  $\langle e_L^2 \rangle = \frac{1}{2} E_L^2$  (3.73)

หรือ  $P \approx \frac{1}{2} E_S^2$  และ  $P \approx \frac{1}{2} E_L^2$  (3.74)

และสามารถเขียนกระแสรูปกำลังแสงได้ดังนี้

$$I_p \propto P_S + P_L + 2\sqrt{P_S P_L} \cos((\omega_S - \omega_L)t + \phi) \quad (3.75)$$

และได้ความสัมพันธ์ในรูปทั่วไปคือ

$$I_p = R[P_S + P_L + 2\sqrt{P_S P_L} \cos((\omega_S - \omega_L)t + \phi)] \quad (3.76)$$

เมื่อ  $R$  คือความไวในการตอบสนองสัญญาณ และจะได้สมการเทอมสัญญาณเป็น

$$I_p = R[2\sqrt{P_S P_L} \cos((\omega_S - \omega_L)t + \phi)] \quad (3.77)$$

สำหรับการตรวจจับแบบเฮเทอโรไดน์ คือกรณี  $\omega_S \neq \omega_L$  จะเป็นมีผลต่างคือ  $\omega_{IF} = \omega_S - \omega_L$  ดังนั้นจะได้

$$I_p = 2R\sqrt{P_S P_L} \cos(\omega_{IF}t + \phi) \quad (3.78)$$

สำหรับการตรวจจับแบบโฮโมไดน์ คือกรณี  $\omega_S = \omega_L$  จะได้

$$I_p = 2R\sqrt{P_S P_L} \cos \phi \quad (3.79)$$

### 3.1.4 การส่งผ่านสายโคเอกเซียล

สายโคเอกเซียลเป็นอีกตัวกลางหนึ่งที่น่าสนใจใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ แม้อาจมีการรบกวนเกิดขึ้นได้เพราะส่งเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยตรง และมีอัตราการลดทอนที่มากขึ้นกับความถี่ที่เพิ่มสูงขึ้น แต่หากระบบได้ออกแบบไว้สำหรับค่าสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เพียงพอก็สามารถใช้ได้เป็นอย่างดี และเป็นระบบราคาถูกสำหรับการส่งที่ระยะทางสั้นกว่าระบบทางแสง

การเลือกสายโคเอกเซียลจะพิจารณาสิ่งสำคัญดังนี้คือ

- 1) คาเรคเตอร์สติกอิมพีแดนซ์
- 2) ความถี่คัทออฟ
- 3) การทนกำลังงานไฟฟ้าของสาย
- 4) ค่าแรงดันเบรคดาวน์
- 5) ค่าลดทอนกำลัง
- 6) พัลส์คาเรคเตอร์สติก
- 7) สภาพแวดล้อมที่ใช้งาน

### 1) คาเรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance)

คาเรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์หรือความต้านทานประจำตัวของสาย แสดงคาเรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์ของสายโคเอกเซียลด้วยความสัมพันธ์ของค่าคาปาซิแตนซ์  $C$  และค่าอินดักแตนซ์  $L$  ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสาย ซึ่งหาได้ง่ายจากการต่อตัวต้านทานที่เอาต์พุตเป็นค่าความต้านทานที่ทำให้ไม่มีพลังงานสะท้อนกลับ ค่าคาเรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์  $Z_0$  สัมพันธ์กับเส้นผ่าศูนย์กลางด้านในของตัวนำนอก  $D_{OC}$  เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของตัวนำใน  $d_{IC}$  และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก  $\epsilon$  ดังสมการ

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \left( \frac{D_{OC}}{d_{IC}} \right) \quad (3.80)$$

### 2) ความถี่คัทออฟ

ความถี่คัทออฟเป็นความถี่ต่ำสุดที่สามารถผ่านเข้าไปยังสายโคเอกเซียลได้ในโหมด TEM หรือโหมดหลักถ้าขนาดโคเอกเซียลใหญ่ขึ้น มันจะให้การเดินทางของคลื่นในโหมดเหนือโหมดหลัก (Principal mode) เมื่อความถี่ใช้งานเพิ่มขึ้นเส้นผ่าศูนย์กลางของโอเอกเซียลจะต้องลดลงเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการส่งในโหมดสูงกว่า ซึ่งสายเล็กลงก็ทำให้การทนกำลังไฟฟ้าลดลงและมีพื้นผิวตัวนำน้อยลงทำให้เกิดผลกระทบเรื่องสกินเอฟเฟค (skin effect) จึงเหมาะสำหรับใช้สายโคเอกเซียลส่งระยะใกล้กับความถี่สูง ความยาวคลื่นคัทออฟนี้สามารถหาได้จาก

$$\lambda_c = \pi(D_{OC} + d_{IC}) \quad (3.81)$$

เมื่อ  $D_{OC}$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางตัวนำนอก (เมตร)

$d_{IC}$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางตัวนำใน (เมตร)

จาก  $d_{IC}$  ในสมการ 3.80 และ  $D_{OC}$  3.81 จะได้ ขนาดสายโคเอกเซียลในเทอมเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น

$$D_{OC\_Max} = \frac{300}{\pi f \sqrt{\epsilon} \left[ 1 + 10 \left( \frac{Z_0 \sqrt{\epsilon}}{138} \right) \right]} \quad (3.82)$$

เมื่อ  $f$  คือความถี่ใช้งาน (Hz)

หรือขนาดของสายโคเอกเซียลที่ทราบสามารถหาในเทอมความถี่สูงสุดที่สามารถส่งในโหมดหลักได้เป็น

$$f_{\max} = \frac{300}{\pi D_{OC} \sqrt{\epsilon} \left[ 1 + 10^{-\left(\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon}}{138}\right)} \right]} \quad (3.83)$$

### 3) การลดทอนในเทอมความถี่ (Attenuation as a Function of Frequency)

อัตราการลดทอนของสายโคเอกเซียลมีสาเหตุหลัก 4 ประการคือ การกระจายของสัญญาณเนื่องจากตัวนำนอกไม่สมบูรณ์ ความต้านทานของตัวนำที่ใช้ทำ การดูดกลืนสัญญาณในไดอิเล็กทริก และ การสะท้อนพลังงานกลับเนื่องจากความไม่สมดุลของความต้านทานเอาท์พุทของสายหรืออิมพีแดนซ์ตลอดสายที่ไม่สม่ำเสมอ

สมมติให้เป็นสายที่มีการป้องกันการกระจายได้อย่างสมบูรณ์ มีอิมพีแดนซ์ที่สมดุล และอิมพีแดนซ์ตลอดสายสม่ำเสมอ ต่อมาจะมีเพียงความไม่สมบูรณ์ของไดอิเล็กทริกและความต้านทานสายเท่านั้นที่เป็นสาเหตุการสูญเสีย จะได้สมการการสูญเสียของสายโคเอกเซียลดังนี้

$$\alpha = 14.24 \left( \frac{R}{Z_0} \right) + 9.09 F_p \sqrt{\epsilon} f \quad (3.84)$$

เมื่อ	$\alpha$	เป็นอัตราการลดทอนของโคเอกเซียลในหน่วย dB/100 เมตร
	$R$	เป็นค่าความต้านทานจริงรวมของตัวนำในและตัวนำนอกต่อความยาว 100 ฟุตที่ความถี่ใช้งาน
	$F_p$	เป็นเพาเวอร์แฟคเตอร์ของไดอิเล็กทริกที่ใช้
	$f$	เป็นความถี่ใช้งานในหน่วย MHz

ปกติถ้าตัวนำของสายไม่มีความต้านทานกระแสดจะเดินทางอยู่ที่ผิวของตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่สูงมากขึ้นกระแสดจะเดินทางอยู่ที่ความลึกผิวตัวนำได้น้อยลงตามไปด้วย ผลกระทบนี้เรียกว่าสกินเอฟเฟกต์ (Skin effect) ที่ความลึกผิวตัวนำ (Skin depth) ซึ่งมีความหนาแน่นของกระแสลดลง  $1/e$  (36.8%) ซึ่งความลึกพื้นผิวนี้นี้มีค่าน้อยขึ้นอยู่กับความถี่ใช้งาน ค่าเพิมือะบิลิตีของตัวกลาง และสภาพความเป็นตัวนำ ดังสมการ(3.85)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f}} 0.6604 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_c}} \quad (3.85)$$

เมื่อ  $\delta$  เป็นความลึกพื้นผิวในหน่วยมิล (ไมโครเมตร)  
 $\rho/\rho_c$  เป็นความต้านทานของตัวนำสัมพันธ์กับชนิดของตัวนำ  
 $f$  เป็นความถี่ในหน่วย MHz

และค่าความต้านทานจริงรวมของตัวนำเปรียบเสมือนเป็นท่อเนื่องจากความหนาที่กระแสดำเนินทางผ่านเท่ากับความลึกผิว ดังนั้นความต้านทานของท่อต่อ 100 เมตร จะเป็น

$$R = 0.326 \frac{\sqrt{f}}{d} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_c}} \quad (3.86)$$

และนำสมการความต้านทานจริงในสมการ (3.86) แทนลงในสมการ (3.84) จะได้

$$\alpha = \frac{4.642}{Z_o} \left( \frac{\sqrt{\rho_d/\rho_c}}{d_{IC}} + \frac{\sqrt{\rho_D/\rho_c}}{D_{OC}} \right) \sqrt{f} + 0.909 F_p \sqrt{\epsilon f} \quad (3.87)$$

เมื่อ  $\sqrt{\rho_d/\rho_c}$  เป็นความต้านทานของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำในสัมพันธ์กับวัสดุ  
 $\sqrt{\rho_D/\rho_c}$  เป็นความต้านทานของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำนอกสัมพันธ์กับวัสดุ

จากสมการที่ (3.87) จะเห็นว่าอัตราการลดทอนของสายเทอมหนึ่งจะขึ้นอยู่กับรากที่สองของความถี่ และอีกเทอมหนึ่งเป็นเชิงเส้นกับความถี่ สายโคเอกเซียลทั่วไปเกิดการสูญเสียที่ตัวนำในเทอมหลักที่ การสูญเสียกับ ไดอิเล็กทริกที่เพิ่มขึ้นกับรากที่สองของความถี่

และสามารถนำสมการ (3.83) แทนลงในสมการ (3.87) จะเป็นผลที่ได้ สมการอัตราการลดทอนในเทอมของคาเรคเตอร์สติกอิมพีแดนซ์ ดังนี้

$$\alpha = \frac{4.642 \sqrt{f}}{D_{OC}} \left[ \frac{1.23 + 10 \left( \frac{Z_o \sqrt{\epsilon}}{138} \right)}{Z_o} \right] \quad (3.88)$$

## 3.2 สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารโดยทั่วไปอาจจำแนกออกได้เป็น 3 แบบด้วยกันคือ แบบที่เกิดจากภายนอกของระบบ เช่น สัญญาณรบกวนจากเครื่องใช้ไฟฟ้า แบบที่เกิดจากภายในของระบบคือเกิดจากอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งอาจไม่สามารถป้องกันได้ และแบบที่เกิดจากการทำงานของระบบโดยสัญญาณรบกวนที่สำคัญและที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายของการสื่อสาร โทรศัพท์เคลื่อนที่ในงานวิจัยมีดังนี้

### 3.2.1 สัญญาณรบกวนภายใน (Intrinsic noise)

#### 1) เทอร์มอลนอยส์ (Thermal noise)

เทอร์มอลนอยส์เกิดจากอุณหภูมิกับความต้านทานทำให้กระแสเกิดการแปรปรวนของอิเล็กตรอน ทำให้ความร้อนเกิดแรงดันทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณรบกวนขึ้น หาได้ในรูปค่ากำลังสองเฉลี่ยดังนี้

$$I_{th}^2 = \frac{4KTB}{R} \quad (3.89)$$

เมื่อ  $K$  คือ ค่าคงที่โบลท์สแมนมีค่าเท่ากับ  $1.381 \times 10^{23}$  จูล.เคลวิน<sup>-1</sup>  $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์หรือเคลวิน  $R$  คือ ความต้านทานโหลดของตัวตรวจจับสัญญาณหน่วยโอห์ม  $B$  คือ แบนด์วิดท์ของตัวตรวจจับสัญญาณมีค่าเท่ากับ  $1/2\pi RC$  เมื่อ  $C$  คือ ค่าประจุไฟฟ้าของตัวตรวจจับสัญญาณแสง

#### 2) ขอทนอยส์ (Shot noise)

ขอทนอยส์เกิดจากการไหลของกระแสผ่านกำแพงศักย์ (Potential barrier) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแสรอบๆค่าเฉลี่ย ซึ่งเป็นผลมาจากการปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลที่เป็นแบบสุ่ม ซึ่งเกิดขึ้นได้ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ผลของขอทนอยส์ได้ถูกวิเคราะห์โดย W. Schottky ได้แสดงค่าเฉลี่ยกำลังสองไว้คือ

$$I_{sh}^2 = 2qI_{dc}B \quad (3.90)$$

เมื่อ  $q$  คือค่าประจุของอิเล็กตรอนเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูโลมปี  $I_{dc}$  คือค่าเฉลี่ยกระแสตรง เช่น กระแสเฉลี่ยเอาท์พุทของโฟโตดีเทคเตอร์  $B$  คือนอยส์แบนด์วิดท์หรืออาจกล่าวว่าเป็นความกว้างแถบความถี่ที่ใช้งานก็ได้ ค่าขอทนอยส์มีค่าคงที่กับความถี่และเป็นฟังก์ชันของกระแสตรงที่ไหลผ่านอุปกรณ์เท่านั้นค่าที่ได้จึงเป็นค่าที่แม่นยำ

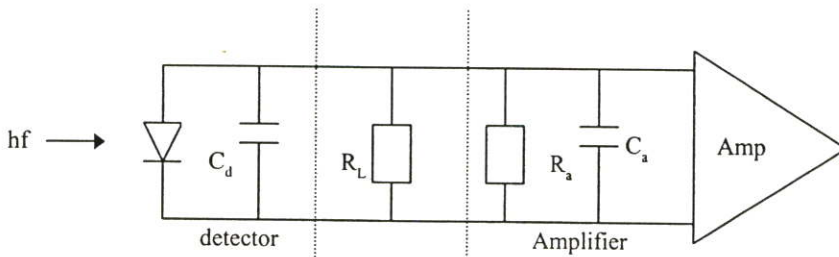
### 3) กระแสมืด (Dark current noise)

โดยปกติเมื่อไม่มีแสงตกกระทบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น โฟโตไดโอด จะเกิดกระแสค่าหนึ่งซึ่งเกิดจากอุณหภูมิภายในทำให้พาหะตัวนำถูกกระตุ้นให้กระโดดจากแถบอิเล็กตรอนอิสระไปยังแถบการนำ เกิดกระแสขึ้นเป็นสัญญาณรบกวน หาได้ดังนี้

$$I_d^2 = 2eBI_d \quad (3.91)$$

### 4) ภาขยายสัญญาณ (Amplifier noise)

เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณไฟฟ้าจาก โฟโตไดโอด สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรสมมูลด้านหน้าของภาขยายสัญญาณ

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ขยาย ทำให้นอกจากกำลังอินพุทเข้ามาถูกขยายออกไปด้วยอัตราขยาย  $G$  แล้วยังมีสัญญาณรบกวนรวมไปด้วยทำให้อัตราส่วนของ  $C_o / N_o$  ไม่เท่ากับ  $C_i / N_i$  และจะได้ว่าค่าที่เกินมามีอัตราเท่ากับ  $F$  หรือเรียกว่านอส์ฟีกเกอร์นั่นเอง ที่จะ เป็นค่าบอกถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ขยายต่อไป

สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$F = \frac{C_i / N_i}{C_o / N_o} \quad (3.92)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$F = \frac{C_i}{N_i} \times \frac{N_o}{C_o} \quad (3.93)$$

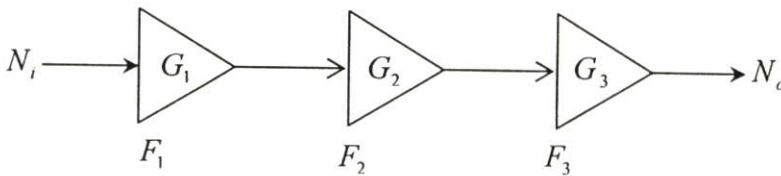
เมื่อ  $G = \frac{C_o}{C_i}$  และ  $\frac{C_i}{C_o} = \frac{1}{G}$  ฉะนั้นจากสมการ 3.93 เขียนในเทอมอัตราขยาย  $G$  ได้เป็น

$$F = \frac{N_o}{N_i} \left( \frac{1}{G} \right) \quad (3.94)$$

เมื่อ  $N_o = N_i(G) + N_a$  โดยที่  $N_a$  เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดภายในอุปกรณ์ขยาย ฉะนั้น

$$F = \frac{N_i(G) + N_a}{N_i(G)} = 1 + \frac{N_a}{N_i(G)} \quad (3.95)$$

และสำหรับ  $F_C$  ในกรณีคาสเคด (Cascade)



$$F_C = \frac{N_o}{N_i(G_C)} \quad (3.96)$$

ขนาดสัญญาณรบกวนที่ผ่านวงจรขยายสัญญาณหลายครั้งดังรูปจะเป็น

$$N_o = N_i(G_1)(G_2)(G_3) + N_{a1}(G_1)(G_2) + N_{a2}(G_3) + N_{a3} \quad (3.97)$$

ซึ่งมีอัตราขยายรวมทั้งหมดเป็น

$$G_C = (G_1)(G_2)(G_3) \quad (3.98)$$

ทำให้ได้สมการนอส์ฟิกเกอร์เป็น

$$F = \frac{N_i(G_1)(G_2)(G_3) + N_{a1}(G_2)(G_3) + N_{a2}(G_2)(G_3) + N_{a3}}{N_i(G_1)(G_2)(G_3)} \quad (3.99)$$

และจัดรูปสมการ (3.99) ใหม่ได้เป็น

$$F = 1 + \frac{N_{a1}}{N_i G_1} + \frac{N_{a2}}{N_i (G_1)(G_2)} + \frac{N_{a3}}{N_i (G_1)(G_2)(G_3)} \quad (3.100)$$

และหากคิดนอส์ฟีกเกอร์แต่ละช่วงจะได้  $F_1$   $F_2$  และ  $F_3$  ดังนี้

$$F_1 = 1 + \frac{N_{a1}}{N_i G_1}, F_2 = 1 + \frac{N_{a2}}{N_i G_2} \text{ และ } F_3 = 1 + \frac{N_{a3}}{N_i G_3}$$

ฉะนั้นสมการ (3.100) เขียนใหม่ได้เป็น

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} \quad (3.101)$$

ในทำนองเดียวกันก็สามารถหาสมการทั่วไปของนอส์ฟีกเกอร์สำหรับวงจรขยายкасцепได้เป็น

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{(G_1)(G_2)} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (3.102)$$

จากสมการทั่วไปที่ (3.102) ในเทอมหลังเมื่อตัวส่วนที่เป็นอัตราขยาย  $G$  ทวีขึ้น สรุปโดยประมาณว่า นอส์ฟีกเกอร์ของวงจรรคาศคคขึ้นอยู่กับนอส์ฟีกเกอร์วงจรรคาคคคค หรือ นอส์ฟีกเกอร์ประมาณเท่ากับภาคแรกถ้ามีอัตราขยายสูง

ในแต่ละช่วงของสายก่อนเข้าไปยังภาคขยายมีสัญญาณรบกวนดังนี้

$$N_{out,att} = \frac{N_{in}}{L} + (1 - \frac{1}{L})kTB \quad (3.103)$$

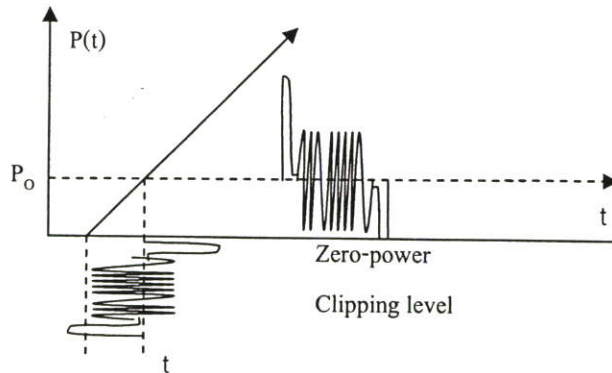
และเมื่อภาคขยายในระยะนั้นเป็น  $G$  นอส์ฟีกเกอร์เป็น  $F$  จะได้กำลังนอส์เป็น

$$N_{out,amp} = N_{in} G + (F - 1)kTBG \quad (3.104)$$

ทำให้สามารถหาระยะการเชื่อมโยงจาก CNR และใช้สำหรับประเมินราคาโครงข่ายผสม ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

### 5) การผิดเพี้ยนจากการคลิป์ (Clipping Distortion)

สัญญาณบางส่วนถูกตัดหรือคลิป์ไปเกิดขึ้นจากการขยายในช่วงมีอัตราขยายสูงเกินไปหรือมีสัญญาณอินพุตมากเกินไปที่อุปกรณ์ขยายสัญญาณจะทำให้การขยายเป็นเชิงเส้นได้ กรณีที่สัญญาณอินพุตมากเกินไปนั้นอาจมีสาเหตุจากได้รวมช่องสัญญาณหลายๆช่องสัญญาณทำให้มีขนาดมากขึ้น จึงเกิดการตัดสัญญาณในส่วนที่เกินนั้นไป ดังแสดงสัญญาณรวมเป็นอินพุตของ เลเซอร์ไดโอด ในรูปที่ 3.6 สัญญาณแสงหลายช่องสัญญาณที่รับ  $P(t)$  ได้เป็น



รูปที่ 3.6 สัญญาณถูกคลิป์ในช่วงที่ไม่อุปกรณ์ไม่สามารถจ่ายกำลังได้

$$P(t) = P_0 \left[ 1 + \sum_{i=1}^N m_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \right] \quad (3.105)$$

และสัญญาณเอาต์พุตส่วนที่เป็นกระแสดตรงเป็น

$$I(t) = \rho P(t) \quad (3.106)$$

เมื่อ	$P_0$	เป็นกำลังสัญญาณเฉลี่ยที่รับได้
	$N$	เป็นจำนวนช่องสัญญาณ
	$m_i$	เป็นดัชนีการมอดูเลตที่ช่องสัญญาณ $i$
	$\omega_i$	เป็นมุมของความถี่ที่ช่องสัญญาณ $i$
	$\phi_i$	เป็นเฟสของความถี่ที่ช่องสัญญาณ $i$
	$\rho$	เป็นค่าการตอบสนองของโฟโตไดโอด

จากสมการที่ (3.105) คำนีการมอดูเลทของแต่ละช่องสัญญาณต้องมีค่าไม่เกิน  $m \leq 1/N$  เพื่อที่จะได้สัญญาณรวมทุกช่องแล้วไม่เกิน 1 และจะไม่เกิดการคลิปปขึ้นและจากค่าเฉลี่ยของ Gaussian random ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงเป็น  $\sigma_I^2 = I_0^2 Nm^2 / 2$  และได้ค่ากำลังสองเฉลี่ยของส่วนที่ถูกคลิปปจาก  $I(t)$  ไปคือ

$$\overline{I_{clip}^2} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_I} \int_{-\infty}^0 I^2 \exp[-(I - I_0)^2 / 2\sigma_I^2] dI \quad (3.107)$$

$$\overline{I_{clip}^2} \approx \sqrt{(2/\pi)} I_0^2 \mu^5 \exp[-1/2\mu^2] \quad (3.108)$$

เมื่อ  $\mu = \sqrt{(Nm^2 / 2)}$  เป็นค่ารากที่สองของกำลังเฉลี่ย และค่าสำคัญต่อมาคืออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{C}{N_{clip}} = \sqrt{(\pi/2)} \mu^{-3} \exp(1/\mu^2) \quad (3.109)$$

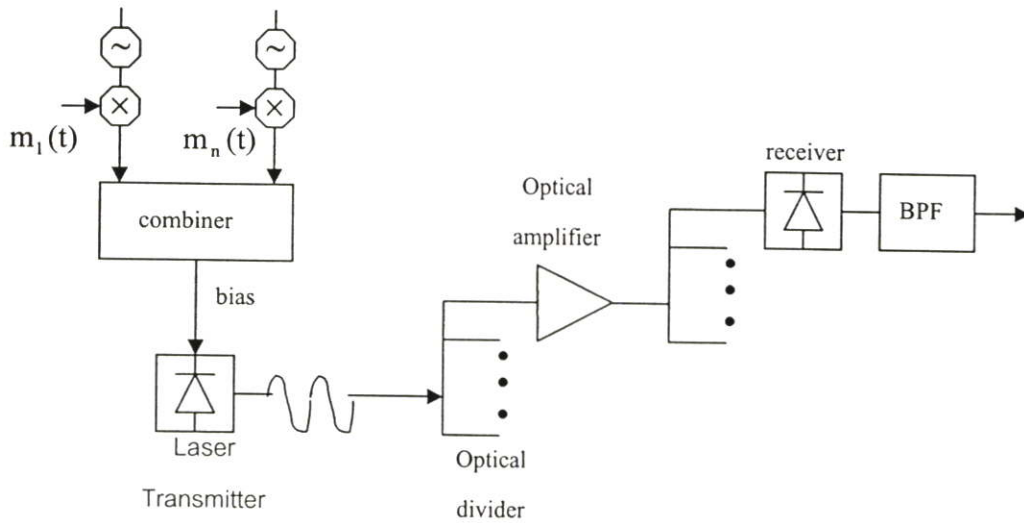
จากสมการเมื่อได้ขนาดของสัญญาณที่สูญเสียไปกับการถูกคลิปปแล้วเราก็สามารถกำหนด คำนีการมอดูเลทที่เหมาะสมได้ เช่น ให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนอยู่สูงที่สุดหรือภายในค่าที่กำหนด

#### 6) เทอมผลคูณหลายช่องสัญญาณ (Intermodulation distortion noise)

เมื่อสัญญาณอินพุตมีหลายช่องสัญญาณมาทางสายส่งสัญญาณเดียวกันผ่านไปยัง อุปกรณ์ประเภทแอกทีฟ (Active Device) ผลต่อสัญญาณเหล่านี้คือเกิดการคูณกันของสัญญาณ (Beat) ฉะนั้นสัญญาณรวมที่เอาท์พุทของอุปกรณ์แอกทีฟจึงเป็นผลรวมของสัญญาณจากพจน์ไฟตรง พจน์สัญญาณรวมกำลังที่หนึ่ง (First order) พจน์สัญญาณรวมกำลังที่สอง (Composite Second Order, CSO) กำลังที่สาม (Composite Triple Beat, CTB) และกำลังอื่นๆ ไปเรื่อยๆ ดังสมการ

จากสมการทั่วไปของสัญญาณรวมในสมการที่ (3.105) คือ  $P(t) = P_0(1 + m_i \cos t)$  แยก พิจารณาสัญญาณรวมถึงออร์เดอร์ที่ 3 จะได้

$$P(t) = P_0[1 + m \cos \omega t + C_2(m \cos \omega t)^2 + C_3(m \cos \omega t)^3] \quad (3.110)$$



รูปที่ 3.7 ผลการรวมหลายช่องสัญญาณทำให้เกิดเทอมอื่นๆขึ้น

$$P(t) = P_0 [1 + m \cos \omega t + \frac{1}{2} C_2 m^2 \cos 2\omega t + C_3 m^3 \cos 3\omega t + \dots] \quad (3.111)$$

จากสมการ (3.111) เมื่อแยกค่าสัมประสิทธิ์ออกมาพิจารณาขนาดสัญญาณในเทอมที่มีความถี่ต่างๆจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ตามทฤษฎีตรีโกณดังนี้

ความถี่	สัญญาณ	กำลัง
$2\omega_1, 2\omega_2$	$\frac{1}{2} C_2 m$	$\frac{1}{8} C_2^2 m^2$
$\omega_1 \pm \omega_2$	$C_2 m$	$\frac{1}{2} C_2^2 m^2$
$3\omega_1, 3\omega_2$	$\frac{1}{4} C_3 m$	$\frac{1}{32} C_3^2 m^4$
$2\omega_1 \pm \omega_2, \omega_1 \pm 2\omega_2$	$\frac{1}{3} C_3 m$	$\frac{9}{32} C_3^2 m^4$

หากความถี่  $2\omega_1$  และ  $2\omega_2$  เป็นความถี่ฮาร์โมนิคส์ที่สอง ซึ่งแถบความถี่อยู่ห่างจากความถี่อื่นพุดที่ต้องการและสามารถกรองออกไปได้โดยง่าย และที่  $\omega_1 \pm \omega_2$  เรียกว่าเป็น Composite second order (CSO) และ  $2\omega_1 \pm \omega_2$  กับ  $\omega_1 \pm 2\omega_2$  เรียกว่าเป็น Composite triple beat (CTB) สัญญาณในเทอมนี้จะอยู่ใกล้หรือทับกันกับแถบความถี่หลักและไม่สามารถกรองออกไปได้จึงเป็นสัญญาณรบกวนนั่นเอง อย่างไรก็ตามในเทอมที่ออคเตอร์สูงกวานี้ ก็เป็นปัญหาเรื่องสัญญาณในเทอมคี่นั่นเอง แต่จะเห็นว่าขนาดของสัญญาณและกำลังจะลดลงจนสามารถพิจารณาที่ CTB อย่างเดียวได้

ในการทำงานเดียวกันในเทอมของกระแสเกิดการคูณกับเทอมอื่นๆใน CTB 3 ครั้ง ได้ดัชนีการมอดุลเลทเป็น  $m^3$  เพราะฉะนั้นในเทอมกระแสของออเดอร์ทที่ 3 ( $I_{3rd}$ ) เป็น

$$I_{3rd} = I_o a_3 m^3 \cos \omega t \quad (3.112)$$

$$I_{3rd} = I_o a_3 m^3 \cos 2\pi(f_i + f_j - f_k)t \quad (3.113)$$

เมื่อ  $a_3$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของออเดอร์ทที่ 3 ตามข้อกำหนดของเลเซอร์ไดโอดและได้กำลังของออเดอร์ทที่ 3 ( $P_{3rd}$ ) เป็น

$$P_{3rd} = \frac{1}{2} I_o^2 a_3^2 m^6 \quad (3.114)$$

จำนวนเทอมที่เกิดจากการคูณกันของออเดอร์ทที่ 3 เท่ากับ

$$v_c = \frac{3(N^2 - 2N + 1)}{8} \quad (3.115)$$

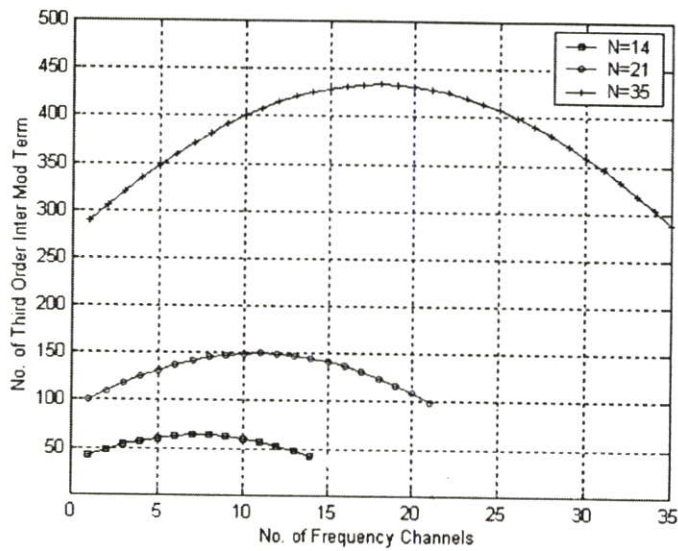
ได้ค่าเฉลี่ยกระแสกำลังสองสำหรับ 1 ช่องสัญญาณความถี่เป็น

$$\overline{I_{3rd}^2} = 3(N^2 - 2N + 1) \left( \frac{1}{2} I_o^2 a_3^2 m^6 \right) / 8 \quad (3.116)$$

จาก [8] จำนวนเทอมในแถบความถี่ของแต่ละช่องจะลดลงเนื่องจากการกรองความถี่ ได้ค่าเทอมในแต่ละช่องเป็น

$$v_i = v_c \sin\left(0.232\pi + \frac{0.536\pi}{N-1}(i-1)\right) \quad (3.117)$$

เห็นผลการคำนวณสมการ (3.115) และ (3.117) เทียบกับจำนวนช่องสัญญาณความถี่ทั้งหมด พิจารณาง่ายขึ้นจากรูป 3.8 ว่า ช่องช่วงเริ่มต้นและสุดท้ายจะมีเกิดสัญญาณรบกวนน้อยกว่ากลางแถบความถี่



รูปที่ 3.8 จำนวนเทอมของ CTB เทียบกับจำนวนช่องสัญญาณความถี่

#### 7) รีเลทีฟอินเทนซิตีโนอส์ (Relative Intensity Noise)

แสงจากเลเซอร์ไดโอดปล่อยขนาดออกมาเป็นแบบสุ่ม จึงเป็นสัญญาณรบกวน โดยธรรมชาติที่แสดงกำลังออกมาใน 1-Hz เทียบกับค่ากำลังเฉลี่ยแสง โดยปกติแล้วเลเซอร์ที่มีคุณภาพดี เช่น แบบ DFB มีค่าโดยประมาณเป็น  $-160$  dB/Hz หรือได้กำลังรวมเมื่อรู้แถบความถี่ ความถี่และกระแสเอาท์พุท

$$RIN = 10 \log_{10} \frac{d \langle P_m^2 \rangle}{dF} \quad (3.118)$$

เมื่อ RIN คือสัญญาณรบกวนรีเลทีฟของเลเซอร์ (dB/Hz)  $P_m$  เป็นกำลังสัญญาณรบกวนทางอินพุท (W)  $P$  เป็นกำลังเลเซอร์ (W) และคูณด้วยแถบความถี่ความถี่จะได้กำลังรีเลทีฟดังสมการ 3.119

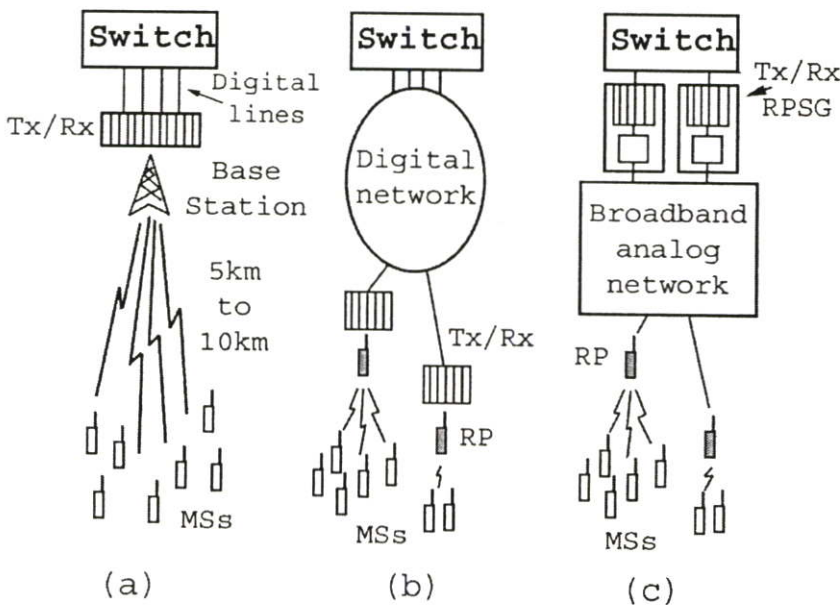
$$P_{RIN} = (RIN) I_o^2 B \quad (3.119)$$

## บทที่ 4

# วิเคราะห์การเชื่อมโยงสัญญาณ

เนื้อหาของบทนี้ได้วิเคราะห์การเชื่อมโยงสัญญาณ เริ่มต้นจากสัญญาณจากโทรศัพท์เคลื่อนที่มายังสถานีฐาน และจากสถานีฐานมายังสถานีควบคุมฐาน โดยเนื้อหาเน้นที่งานวิจัยเป็นหลัก คือการวิเคราะห์ถึงค่าตัวแปรแวดล้อมของโครงข่ายผสมแบบดับเบิลสตาร์สำหรับเซลล์ขนาดเล็กในระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ รวมถึงวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมของค่าตัวแปรเพื่อสนับสนุนต่อการใช้งานจริงให้มากที่สุด โดยมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM คือทางผ่านสัญญาณทั้งหมดจาก BTS ถึง MSC ซึ่งมีลักษณะการเชื่อมโยงซึ่งกันและกันในแต่ละหน่วยการทำงาน ดังรูปที่ 2.10 ในทางปฏิบัติ ตัวอย่างอุปกรณ์ของ NOKIA ที่ใช้ในประเทศไทย เช่น ความสามารถของ BSC จะสามารถรองรับได้ 25 BTSs และ 1 MSC รองรับได้ 4 BSC เป็นต้น โดยแบ่งพื้นที่กันประมวลผลสัญญาณ ส่วนไมโครเซลล์ของโทรศัพท์ส่วนบุคคลจะวางโครงข่ายให้สัญญาณข้อมูลทั้งหมดมาประมวลผลสัญญาณที่จุดศูนย์กลาง (Server) ซึ่งเป็นการง่ายต่อการดูแลรักษาเพราะอุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่รวมกันอยู่ที่เดียว



รูปที่ 4.1 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM

(a) ในช่วงเริ่มต้นบริการ พื้นที่ครอบคลุมเซลล์ (เมกโครเซลล์) จะมีขนาดใหญ่ (ทราฟฟิคน้อย) Base Station (BTS) ใช้เสาสูง (ประมาณ 25 เมตร) อุปกรณ์รับส่งเต็มรูปแบบ (Full-function) อยู่ที่ BTS และเชื่อมต่อสัญญาณพร้อมสัญญาณควบคุมผ่านสายส่งดิจิทัล (digital lines) ไปยังอุปกรณ์

Switching (Mobile Switching Center, MSC) โดยปกติแล้วโครงข่ายแบบนี้จะใช้ไมโครเวฟเป็น Digital lines ระหว่าง BTS หรือ BTS ถึง BSC (Base Station Controller) เนื่องจากระยะระหว่าง BTS ไกลกันมาก ไม่คุ้มกับการติดตั้งโครงข่ายสาย (สายทองแดง หรือ สายใยแก้วนำแสง)

(b) เมื่อทราฟฟิกสูงขึ้นอัตราการแบ่งเซลล์ต่อพื้นที่หนาแน่นมากขึ้น BTS แบบเต็มรูปแบบและส่งข้อมูลพร้อมสัญญาณควบคุมไปยังโครงข่ายดิจิทัล เนื่องจาก BTS หนาแน่น โครงข่ายดิจิทัลจึงหนาแน่นเชื่อมต่อทุก BTS เสาส่งไม่จำเป็นต้องสูงมากนัก โครงข่ายดิจิทัลหากติดตั้งไมโครเวฟทั้งหมดจะทำให้หนาแน่นและไม่มีเสถียรภาพ ค่าใช้จ่ายสูง จึงใช้วิธีการส่งดิจิทัลผ่านช่อง ISDN

(c) เมื่อทราฟฟิกสูงขึ้นถึงจำนวนหนึ่ง จนพื้นที่ครอบคลุมเซลล์น้อยลงมาก (ไมโครเซลล์) การติดตั้ง BTS เต็มรูปแบบ จะทำได้ยาก เนื่องจากต้องการพื้นที่และการดูแลรักษามาก อุปกรณ์รับส่งสัญญาณความถี่ (Radio Transceiver) จึงถูกนำมาใช้แทน โดย BTS จะกลายเป็นอุปกรณ์สนับสนุนสัญญาณความถี่ต่อสายอากาศและส่งผ่านสัญญาณผ่าน Broadband analog network ข้อดีคือ BTS ราคาประหยัด บำรุงรักษาง่าย และ ที่สำคัญคือง่ายต่อการติดตั้ง ส่วนที่เป็นหน้าที่ของ BTS เดิมส่วนสนับสนุนดิจิทัลสามารถ ติดตั้งที่จุดศูนย์กลางที่ MSC ได้ ส่วนโครงข่ายอนาล็อกก็จะยึดหยุ่นต่อการบริหารความถี่ และสามารถใช้กับสายใยแก้วนำแสงที่สามารถรองรับกับ ข้อมูลพร้อมแถบความถี่กว้างได้ทำให้เสถียรภาพของโครงข่ายดีกว่าไมโครเวฟและประหยัดกว่าโครงข่ายดิจิทัล



รูปที่ 4.2 พื้นที่ติดตั้งเมกโครเซลล์อย่างหนาแน่น ย่าน รัชดาภิเษก กรุงเทพฯ

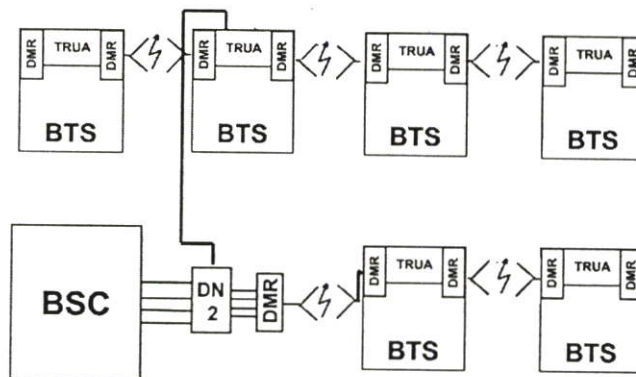
โครงข่ายที่มีจำนวนมากเพื่อสนับสนุน BTS (Radio Transceiver) จึงจำเป็นต้องทำการออกแบบให้เหมาะสมกับความต้องการ โดยเฉพาะไมโครเซลล์หรือพื้นที่ที่ต้องการทราฟฟิกสูง หรือ การออกแบบเพื่อรองรับกับความต้องการการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในอุดมคติคือโทรศัพท์ส่วน

บุคคลด้วย พร้อมทั้งสามารถบริหารความถี่ต่อช่องสัญญาณให้เหมาะสมและนำมาใช้ร่วมกับเมกโครเซลในประเทศไทยปัจจุบันได้ดียิ่งขึ้น

พื้นที่ติดตั้งเมกโครเซลอย่างหนาแน่นในปัจจุบัน (2544) เช่น ย่าน สีลม รัชดาภิเษก และ สุขุมวิท ดังรูปตัวอย่าง รูปที่ 5.1 เพื่อประกอบการพิจารณา เป็นพื้นที่ธุรกิจย่าน รัชดาภิเษก ที่ทำการแบ่งเซลโดยอุปกรณ์สถานีฐาน (BTS) และโครงข่ายดิจิทัล (ไมโครเวฟ และ โครงข่ายสายใยแก้วนำแสง) อยู่ในระบบเมกโครเซลเต็มรูปแบบ จนรัศมีครอบคลุมเซลมีขนาดเล็กมาก ประมาณ 300 ถึง 800 เมตร

#### 4.1 เชื่อมด้วยระบบไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นส่วนหนึ่งของโครงข่ายที่นำมาใช้ในช่วงการดำเนินงานเริ่มต้นสามารถทำได้ ที่ความจุกราฟฟิคน้อยๆ เมื่อเซลเล็กลงการเชื่อมโยงทุกจุดด้วยไมโครเวฟจะใช้ค่าใช้จ่ายมาก



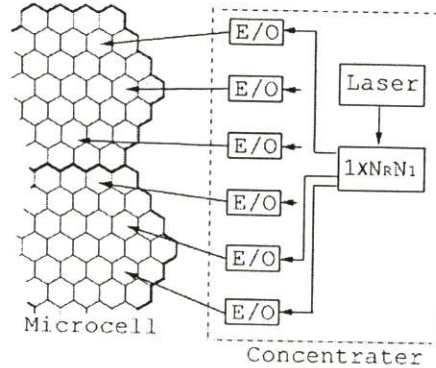
รูปที่ 4.3 ลักษณะการเชื่อมโยง จาก BTS – BSC ด้วยระบบไมโครเวฟ

ระบบไมโครเวฟของโทรศัพท์เคลื่อนที่มีรูปแบบหลากหลายตามการประยุกต์ใช้ คือ แบบ point-top-pint chain และ spur routes สิ่งหลักคือ พิจารณาที่ช่องสัญญาณไมโครเวฟว่างเพียงพอ สำหรับการส่งผ่านแต่ละ BTS และเสถียรภาพสัญญาณเมื่อทางผ่านข้อมูลบางจุดเกิดเสียหายในบางช่วง ซึ่งสำหรับ BTS ที่ใกล้กันมากๆ ก็สามารถเชื่อมโยงลักษณะเดียวกันด้วยสายเคเบิล

#### 4.2 เชื่อมโยงด้วยระบบแสง

ระบบทางแสงเชื่อมโยงด้วยสายใยแก้วนำแสงทุก BTS ทั้งหมดต้องวางโครงข่ายและอุปกรณ์ทางแสงให้ครอบคลุมพื้นที่บริการ ในระยะเริ่มแรกการให้บริการที่กราฟฟิคน้อยๆ โครงข่ายทางแสงจะถูกนำมาใช้ที่ BSC ถึง MSC เพราะต้องการเสถียรภาพสูง และส่งข้อมูลจำนวนมากได้

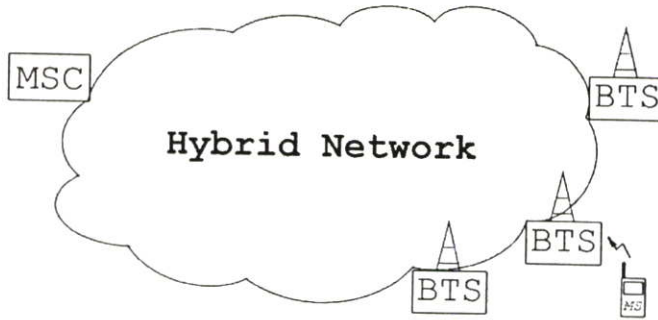
เมื่อกราฟฟิคสูงขึ้นสำหรับไมโครเซลสามารถใช้โครงข่ายแสงขยายออกไปถึง BTS ซึ่งจะพิจารณาในเรื่องค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมอีกครั้ง โครงสร้างส่วนการรับส่งสัญญาณคล้ายกับ CATV และมีข้อดี ที่ความยืดหยุ่นด้วย ความน่าเชื่อถือสูง



รูปที่ 4.4 โครงข่ายแสงทั้งหมดสำหรับไมโครเซลแบบ Radio port-Broadband

### 4.3 เชื่อมโยงด้วยโครงข่ายผสม

สื่อกลางเพื่อการเข้าถึงจาก BTS และ MSC สามารถเข้าถึงได้โดยผ่านตัวกลางหลายชนิด หากพิจารณาโครงข่ายไมโครเวฟแล้วก็ไม่เหมาะสมสำหรับกราฟฟิคสูงๆ เพราะใช้ค่าใช้จ่ายจำนวนมากต่อพื้นที่ ส่วนโครงข่ายทางแสงก็มีราคาแพงในช่วงเริ่มต้นแต่จะคุ้มค่าเมื่อใช้โครงข่ายอย่างเต็มที่ อย่างเช่นใช้ในไมโครเซล และเคเบิลที่เหมาะสมในย่านความถี่สูงอย่าง โทรศัพท์เคลื่อนที่ก็คือโครงข่ายสายโคเอกเซียลแต่มีราคาแพงสำหรับสายความถี่สูงและมีอัตราการลดทอนสูงเมื่อระยะทางมากขึ้น ที่จริงแล้วสามารถใช้สื่อกลางหลายอย่างรวมกันตามสภาพแวดล้อมความเหมาะสม จากรูป 4.1(c) หมายถึงเชื่อมโยงจาก RP (Radio Port) ของ BTS ผ่าน โครงข่ายอนาล็อกแบนด์กว้าง (Broadband analog network) ไปยังส่วน TX/RX ของ BTS ที่รวมกันอยู่ใกล้ตำแหน่ง MSC ดังรูป 4.4 การรวมทั้งสายใยแก้วนำแสงและสายโคเอกเซียลมารวมกัน โดยใช้สายโคเอกเซียลเชื่อมโยงในระยะ BTS ถึง BSC ดังรูปที่ 4.4 และสายใยแก้วนำแสงเชื่อมโยงที่ระยะ BSC ถึง MSC อย่างไรก็ตามในความเหมาะสมก็จะได้อะไรในเทอมของคุณภาพสัญญาณและราคาอุปกรณ์และเลือกชนิดของสื่อกลางของโครงข่ายผสมอย่างเหมาะสมในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.5 โครงสร้างทั่วไปของการเชื่อมโยงในระบบผสม (Hybrid Double Star Link)

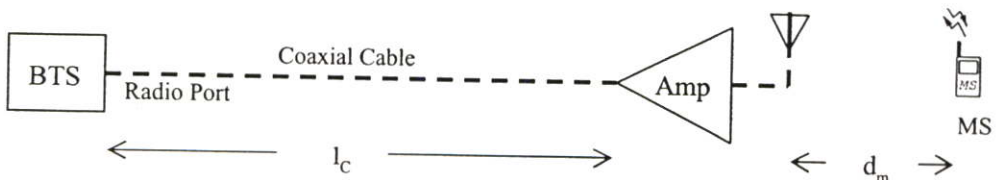
4.3.1 เชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียล

วิเคราะห์การเชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียลช่วงเดียวจาก BTS ไปยัง RTX ของ Radio Base Station ในเทอมของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Carrier-to-Noise Ratio, CNR) ซึ่งจะทำให้ได้ความจำกัดของสายโคเอกเซียลกับความถี่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาช่วงสัญญาณขาขึ้น สัญญาณจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ MS มายังเสาอากาศจะได้กำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (CNR) จาก และ (3.9) (3.89) จะได้ CNR เป็น

$$\frac{C}{N} = \left(\frac{P_t \lambda}{4\pi d_m}\right)^2 \left(\frac{1}{kT_o B}\right) \left(\frac{G}{F_1 G + 10^{\frac{\beta l_c}{10}} - 1}\right) \tag{4.1}$$

- เมื่อ  $G$  เป็นอัตราขยายของ RF-Amplifier
- $l_c$  เป็นระยะของสายโคเอกเซียล (km)
- $F_1$  นอยส์ฟีกเจอร์ของ RF-Amplifier



รูปที่ 4.6 เชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียลช่วงเดียว

เป็น CNR เมื่อคิดการสูญเสียจากสายเท่านั้น จะเห็นตัวแปรหลักคือ ระยะเวลาครอบคลุมเซลล์ และระยะสายโคเอกเซียล ซึ่งเราสามารถพิจารณาสัญญาณขาขึ้นอย่างเดียวได้ จาก MS ส่งสัญญาณความถี่ที่มี

กำลังส่งถูกควบคุมให้สัมพันธ์กับระยะทาง ดังตาราง 2.4 ตามรุ่นของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ปกติแล้ว สัญญาณความถี่ (ย่าน 900 MHz หรือ 1800 MHz) ส่งเข้าไปสายอากาศรับ (เซกเตอร์) และ BTS ที่มีพอร์ต (Port) ความถี่ และ ข้อมูล พอร์ตข้อมูลสามารถส่งผ่านได้ กับไมโครเวฟ หรือ ทางแสง แต่หากมีโครงข่ายแสงแล้วจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่าย BTS ไปได้โดยให้เป็นเพียงอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ตำแหน่งสายอากาศเท่านั้นจะให้ผลดีเมื่อเป็นไมโครเซลที่เป็นเรื่องสำคัญของ วิทยานิพนธ์นี้ สามารถเปรียบเทียบดังตาราง 4.1 จากรูปที่ 4.6 ความจำกัดของ CNR และระยะการเชื่อมโยงหลักอยู่ที่อัตราการลดทอนของสายโคเอกเซียล เพราะระยะ  $d_m$  เป็นระยะที่กำหนดโดย ความจุกราฟ พิคเป็นหลัก ความแรงกำลังส่งจำกัดเรื่อง CNI (Carrier-to-Interference-ratio) และ กำลังของอุปกรณ์ขยายก็ไม่มีผลนักเมื่อระยะ  $l_c$  เพิ่มมากขึ้นมากๆ ทำให้ชนิดของสายและราคาเป็นเรื่องที่ควรคำนึงถึง

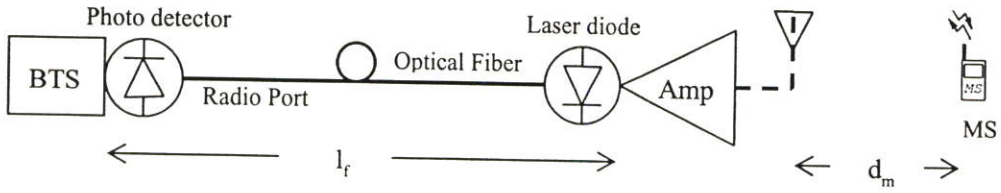
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบ BTS เดิม (เมกโครเซล) และ BTS ทวนสัญญาณ (ไมโครเซล)

BTS ที่เป็นอุปกรณ์ทวนสัญญาณ	BTS (เดิม) สนับสนุนถึงข้อมูล (data)
ราคาถูก – อุปกรณ์เท่าที่จำเป็น	ราคาแพงกว่า – อุปกรณ์เต็มหน้าที่ใช้งาน
ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย	ขนาดใหญ่ ต้องหาที่ติดตั้งในอาคาร โดยเฉพาะ
ส่งสัญญาณความถี่ได้ไกลเพราะสูญเสียสูง	ส่งได้ไกลเพราะเป็นข้อมูล (data) $\approx 1\text{km}$
สายส่งราคาแพงกว่า – สายโคเอกเซียล	สายส่งราคาถูกกว่า – โทรศัพท์
ดูแลรักษาง่าย	ดูแลรักษาเป็นพิเศษ – หรือมีเครื่องปรับอากาศ
ใช้กำลังไฟฟ้าน้อย	ใช้กำลังไฟฟ้ามาก
อุปกรณ์ส่วนใหญ่รวมอยู่ที่ศูนย์กลาง ดูแลง่าย	BTS กระจายทั่วไป ต้องดูแลรักษาหลายจุด

สรุปจากตารางเปรียบเทียบได้ว่า สำหรับการติดตั้ง BTS หนาแน่นอย่างไมโครเซลในเรื่องความ สะดวกนั้น BTS แบบ Radio Base Station จะให้ความสะดวกกว่าอย่างเห็นได้ชัด แต่การวิเคราะห์ ในเรื่องราคาก็เป็นส่วนหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง ในหัวข้อย่อยต่อไป

#### 4.3.2 เชื่อมโยงด้วยสายใยแก้วนำแสง

คล้ายกันกับรูป 4.5 แต่ใช้ระบบทางแสง ส่งผ่านสายใยแก้วนำแสง ดังรูป 4.6 สมมติของสัญญาณความถี่เดียวที่ผ่านการมอดูเลตเลเซอร์ไดโอด จากสมการ (3.61) (3.89) และ (3.90) จะได้อัตราส่วน CNR ของการเชื่อมโยงทางแสงเป็น



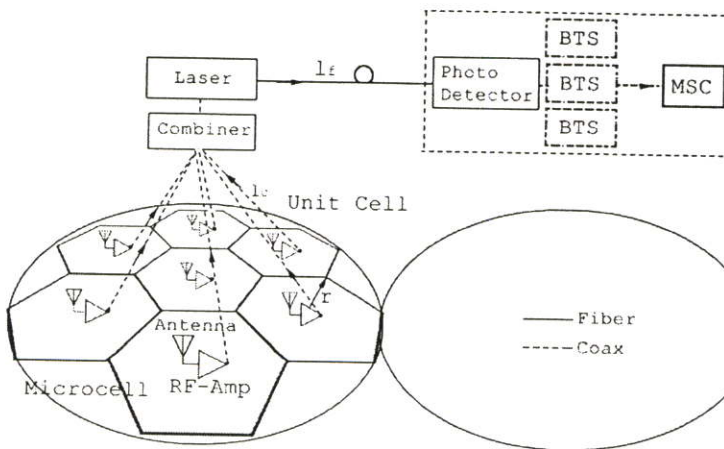
รูปที่ 4.7 เชื่อมโยงด้วยสายใยแก้วนำแสงช่วงเดียว

$$CNR = \frac{(0.5m^2 I_o^2)}{\langle t \rangle^2 B + 2q(I_p + I_d)B + (RIN)I_o^2 B} \quad (4.2)$$

จากสมการ 4.2 จะให้ CNR ที่มีระดับสูงเพียงพอที่ระยะทางไกลได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ

### 4.3.3 เชื่อมโยงด้วยโครงข่ายระบบผสม

เมื่อระยะครอบคลุมไมโครเซลล์ลดน้อยลง ทั้งสองกรณีที่กล่าวถึงคือ เพื่อขยายความจุกราฟฟิคให้มากขึ้น และ เพื่อ แก้ไขปัญหาเรื่องสัญญาณเฉพาะจุด โดยเฉพาะกรณีแรกและในกลุ่มเซลล์ที่หนาแน่นนี้สามารถใช้ในการเชื่อมโยงสัญญาณเป็นแบบผสมได้คือ สามารถใช้การเชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียลในระยะที่สั้นคือระยะจาก BTS ถึงสายอากาศแบบ Radio Base Station และรวมสัญญาณจากหลายไมโครเซลล์ที่มีระยะสายโคเอกเซียลสั้นสนับสนุนได้ด้วย Signal Combiner และใช้การเชื่อมโยงจากอุปกรณ์รวมสัญญาณด้วยสายใยแก้วนำแสงไปประมวลผลที่ MSC ครั่งเดียว



รูปที่ 4.8 โครงข่ายผสมแบบดับเบิลสตาร์สำหรับไมโครเซลล์ แสดงการเชื่อมโยงขาขึ้น (Up-Link)

ทำให้โครงข่ายมีลักษณะเป็นสตาตาร์ภายในเซลล์ที่รวมสัญญาณ (Unit Cell) หรือกลุ่มเซลล์เป็นศูนย์กลาง และเป็นสตาตาร์อีกครั้งโดย MSC เป็นศูนย์กลาง จึงได้ชื่อว่าเป็น โครงข่ายผสมแบบดับเบิลสตาตาร์ ซึ่งจะได้สรุปค่าต่างๆออกมาในบทที่ 5

แบ่งส่วนพิจารณาตามตัวแปรสำคัญได้ดังนี้

1) ช่องสัญญาณเสียง (TCF,  $N_T$ ) และพื้นที่ครอบคลุมไมโครเซลล์ ( $r$ ) : พื้นที่ครอบคลุมไมโครเซลล์นั้นจะต้องมีความจุกราฟฟิกเพียงพอกับความต้องการ ถ้า BTS เป็นแบบพื้นฐานที่สุดคือมีช่องสัญญาณความถี่ 1 ช่องสัญญาณจะสามารถให้บริการได้ 7 คนพร้อมกัน อีก 1 ช่องใช้สำหรับควบคุม จากสถิติสถิติการใช้งาน เออเลงของผู้ใช้ 1 คนเป็น 25 mEr1 ที่ GOS เท่ากับ 2 เปอร์เซนต์ จากสมการ (2.27)จะได้พื้นที่ครอบคลุมเซลล์พร้อมกับจำนวนผู้ใช้เฉพาะไมโครเซลล์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงรัศมีเซลล์กับความหนาแน่นผู้ใช้ ( $m^2/User$ ) ติดตั้ง 1TRX/2TRX

รัศมี (m)	ความหนาแน่นผู้ใช้	รัศมี	ความหนาแน่นผู้ใช้
500	81.78/46.7	150	24.53/14.01
300	49.07/28.02	100	16.35/9.34
200	32.71/18.6	50	8.17/4.67

เปรียบเทียบจากพื้นที่ที่มีการติดตั้งเมคโครเซลล์หนาแน่นที่สุดคือสีลม หรือ รัชดาภิเษก (รัศมีเมคโครเซลล์ 322 เมตร) สามารถให้บริการที่ความหนาแน่นต่อผู้ใช้ 1 คนได้ที่ 14.56 ตารางเมตร หรือทางกลับกันถ้าติดตั้งไมโครเซลล์เพียง 2 ช่องความถี่เซลล์จะมีรัศมีไปประมาณ 150 เมตรนั่นเอง อย่างไรก็ตามค่าความจุนี้ไม่ได้รวมกับเมคโครเซลล์เดิมด้วย ซึ่งในระยะเชื่อมโยงภายในกลุ่มเซลล์ (Unit Cell) สันนิษฐานจำเป็นต้องใช้โครงข่ายด้วยสายใยแก้วนำแสงทั้งหมด แต่สามารถใช้สายโคเคเชียลเชื่อมโยงสัญญาณความถี่สูงโดยไม่ต้องแปลงเป็นข้อมูล (data) ทำให้ปรับปรุงเปลี่ยนแปลงความถี่ในอนาคตได้ทันทีโดยไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์รับ-ส่ง

2) จำนวนไมโครเซลล์ต่อกลุ่มเซลล์ ( $n$ ) : จำนวนไมโครเซลล์ต่อกลุ่มเซลล์ที่ไม่มีการแปลงความถี่ก่อนส่งเข้ายังสายโคเคเชียลจะถูกจำกัดด้วยอัตราการลดทอนของสาย ระยะทาง และในเทอมของราคาคือ ราคาของสายโคเคเชียล และ อุปกรณ์ขยาย ซึ่งสรุปอีกครั้งจากผลในบทสรุปต่อไป

3) ระยะสายเชื่อมโยง ( $L_c, L_f$ ) : ระยะของ  $L_c$  จำกัดที่ CNR และ  $L_f$  พิจารณาที่ความเหมาะสมเรื่องราคา พิจารณาที่ระยะสายได้ดังนี้

รัศมีครอบคลุมกลุ่มเซลล์ ตามรูปจำลอง 6 เหลี่ยมเป็น  $\sqrt{nr}$  และคำนวณโดยประมาณตามรูปทรงเลขาคณิตได้พื้นที่ไมโครเซลล์เป็น  $3\sqrt{3}r^2/2$  และพื้นที่กลุ่มเซลล์เป็น  $3\sqrt{3}nr^2/2$

จากทฤษฎีความหนาแน่น สามารถหาระยะสายโคเอกเซียล  $L_C$  รวมภายในกลุ่มเซลล์ได้โดยอินทิเกรตหาระยะสายได้ดังนี้

$$L_C \approx \frac{2}{3\sqrt{3}r^2} \int_0^{\sqrt{nr}} 2\pi l_c l_c dl_c = \frac{4\pi}{9\sqrt{3}} n^{3/2} r \quad (4.3)$$

ระยะสายโคเอกเซียลรวมภายในกลุ่มเซลล์ทั้ง สี่ัญญาณขาขึ้นและขาลงได้เป็น  $2L_C$  หรือใช้สายโคเอกเซียลเส้นคู่

และในลักษณะเดียวกันเมื่อรู้รัศมีพื้นที่ให้บริการ ก็สามารถหาระยะสายใยแก้วนำแสงรวม  $L_F$  ได้ดังสมการ 4.4

$$L_F = \frac{2}{3\sqrt{3}nr^2} \int_0^R 2\pi l_f l_f dl_f = \frac{4\pi R^3}{9\sqrt{3}nr^2} \quad (4.4)$$

และจำนวนกลุ่มเซลล์ทั้งหมดเมื่อติดตั้งเต็มพื้นที่คือ

$$\frac{A_S}{A_U} = \frac{R^2}{nr^2} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $A_S$  คือพื้นที่ให้บริการ (หรือพื้นที่พิจารณาติดตั้งโครงข่ายผสม) และ  $A_U$  คือพื้นที่ของกลุ่มเซลล์ และระยะสายใยแก้วนำแสงรวมได้เป็น  $2L_F$  โดยเป็นการติดตั้งไมโครเซลล์แบบเต็มพื้นที่ให้บริการ (เช่น พื้นที่กรุงเทพมหานคร ประมาณ 45 กิโลเมตร) ขณะที่ทางปฏิบัติ อาจเลือกติดตั้งกลุ่มเซลล์บางพื้นที่เท่านั้นก็สามารถทำได้โดยการพิจารณาที่ราคาอุปกรณ์ประกอบด้วยในสรุปบทที่ 5 อย่างไรก็ตามการพิจารณาที่ขนาดของตัวเมือง (หรือพื้นที่ใช้โทรศัพท์หนาแน่น) ก็เป็นประโยชน์สำหรับการติดตั้งไมโครเซลล์อย่างหนาแน่นขึ้นได้ในอนาคต เพราะจะเห็นว่าทั้งสมการ 4.3 และ 4.4 ระยะรวมของสายที่จะให้สั้นที่สุดก็ขึ้นกับขนาดของตัวเมือง ที่จะแสดงให้เห็นทั้งรัศมีไมโครเซลล์ จำนวนไมโครเซลล์ต่อกลุ่มเซลล์ที่เหมาะสม และ สถานที่ติดตั้งอุปกรณ์รวมสัญญาณที่เหมาะสมอีกด้วย ในกรณีมีจุดรวมสัญญาณมากกว่า 1 จุด เช่น 4 จุดตามตำแหน่งของ MSC ทั่วกรุงเทพมหานครเป็นต้น

เปรียบเทียบกับโครงข่ายสายใยแก้วนำแสงทั้งหมด ดังรูป 4.4 ที่หาระยะของสายแบบจุดต่อจุด (Single star network)  $L_{SS}$  ได้เป็น

$$L_{SS} \approx \frac{2}{3\sqrt{3}r^2} \int_0^R 2\pi l_f l_f dl_f = \frac{4\pi R^3}{9\sqrt{3}r^2} \quad (4.6)$$

และจะได้สายเชื่อมโยจรวมของโครงข่ายผสม (Hybrid Double Star, HDS) เป็น

$$L_{HDS} = L_C \frac{A_S}{A_U} + L_F = \frac{4\pi}{9\sqrt{3}} \sqrt{n} \frac{R^2}{r} + \frac{4\pi R^3}{9\sqrt{3}nr^2} \quad (4.7)$$

และเปรียบเทียบกับอัตราส่วนระยะเชื่อมโยจแบบดับเบิลสตาร์ต่อสตาร์เดี่ยวได้เป็น

$$\frac{L_{HDS}}{L_{SS}} = \sqrt{n} \frac{r}{R} + \frac{1}{n} \quad (4.8)$$

สามารถหา  $r$  และ  $n$  ที่ทำให้ระยะสายรวมที่น้อยที่สุดของสายรวมแต่ละกรณีได้ โดยใช้วิธีดิฟเฟอเรนเชียล จะได้ว่า

$$n_o = \left( \frac{2R}{r} \right)^{2/3} \quad (4.9)$$

4) คำนีการมอดูเลท OMI: จำนวนช่องสัญญาณจะบอกขนาดของคำนีการมอดูเลท หรือ Optical Modulation Index, OMI ที่เหมาะสม OMI เพิ่มจำทำให้ขนาดของสัญญาณเพิ่มขึ้นด้วย และสัญญาณรบกวน จากอุณหภูมิ ซอร์ทนอสส์ และ รีเลทีฟอินเทนซิตีนอสส์ เพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้น แต่สัญญาณรบกวนพจน์ของ สัญญาณคลิบ และ ผลคูณของหลายช่องสัญญาณ จะมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นเมื่อ OMI สูงขึ้น

5) ราคา : ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ สิ่งหลักที่ต้องพิจารณาในการออกแบบคือ ให้สามารถรองรับกับความต้องการของผู้ใช้ได้เพียงพอและสามารถสนับสนุนกับการขยายระบบในอนาคตได้ ต่อมา เรื่องราคาก็จำเป็นสำหรับการบริการ ความเหมาะสม และการตัดสินใจ และสามารถนำสมการเหล่านี้มาประมาณราคาของระบบเพื่อตัดสินใจเลือกตัวแปรที่เหมาะสม

มีการผลิตสายโคเอกเซียลขนาดเดียวกันที่มีอัตราการลดทอนต่ำเช่นเดียวกันแต่ราคาก็สูงขึ้นมาก ด้วยจากสมการ 4.7 ถ้าคิดระยะเชื่อมโยจระยะเดียว ไม่คิดการสูญเสียอุปกรณ์เชื่อมต่อ จะได้ว่าราคาของโครงข่ายเฉพาะส่วนของการเชื่อมโยจของระบบผสมเป็น

$$\frac{C_{HDS}}{C_{SS}} \approx \frac{C_C \cdot L_C \cdot \frac{R^2}{nr^2} + \frac{R^2}{r^2} \cdot [\frac{C_{TFO}}{n} + C_A + C_{TRX}] + C_f \cdot L_f}{C_f \cdot L_{SS} + \frac{R^2}{r^2} [C_A + C_{TRX} + C_{TFO}]} \quad (4.10)$$

จากสมการ 4.10 เทียบเศษและส่วน จะเห็นว่าอุปกรณ์ของระบบที่ลดลงคือ สายเชื่อมโยง และ อุปกรณ์ทางแสง

ตารางที่ 4.3 ราคาโดยประมาณเฉพาะส่วนของอุปกรณ์โครงข่าย

รายการ	ราคา[US\$]	รายละเอียด
สายใยแก้วโหมคเดี่ยว	1.18/m	เส้นผ่าศูนย์กลาง 2x2.7 mm น้ำหนัก 14kg/km loss 0.4 dB/km
โคเอกเซียต RG223U เส้นคู่	2.57/m	เส้นผ่าศูนย์กลาง 2x5.4mm น้ำหนัก 110kg/km loss 26 dB/100 m
โคเอกเซียต 3/8 นิ้ว เส้นคู่	4.2/m	Loss 12.5dB/100 m
โคเอกเซียต 1/2 นิ้ว แบบโฟม เส้นคู่	6.31/m	เส้นผ่าศูนย์กลาง 2x16mm น้ำหนัก 700 kg/km loss 8 dB/100 m
โคเอกเซียต 1 1/4 นิ้ว แบบโฟม เส้นคู่	41/m	เส้นผ่าศูนย์กลาง 2x39mm น้ำหนัก 1980 kg/km loss 3 dB/100 m
เครื่อง รับ-ส่ง (RF- Transceivers)	220.00	GSM ทุกย่านความถี่
เครื่องรับ-ส่ง แสง (FO-Transceivers)	350.00	เลเซอร์ไดโอด และ PIN โฟโตดีเทคเตอร์
เครื่องขยาย สองทาง	110.00	$OIP_3 = 40\text{dBm}$ $NF = 7\text{dB}$

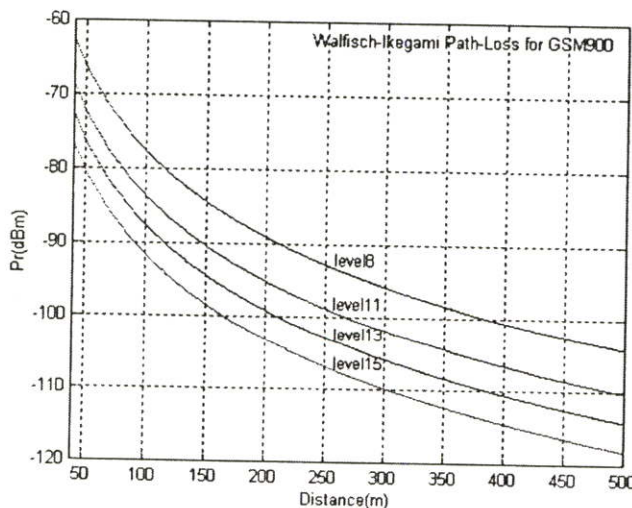
## บทที่ 5

# ผลการคำนวณและการวิเคราะห์การออกแบบโครงข่าย HDS

เนื้อหาในบทนี้ ได้แสดงผลการคำนวณและการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ได้ค่ากำหนดที่ชัดเจนขึ้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป จากจุดประสงค์ของโครงข่ายคือเพื่อรองรับกับการขยายตัวของ การสื่อสารโทรศัพท์ เคลื่อนที่ รองรับกับกลุ่มไมโครเซลล์เพื่อประหยัดในส่วนของอุปกรณ์ทางแสง และส่งผลให้ราคาของโครงข่ายประหยัดขึ้น เพื่อความสะดวกในการติดตั้งเซลล์ไซต์และรองรับกับทราฟฟิกสูงในปัจจุบันและมากขึ้นในอนาคตด้วยโครงข่ายบรอดแบนด์ (Broadband Network) แบบ HDS (Hybrid Double Star Network)

### 5.1 รัศมีไมโครเซลล์และระยะเชื่อมโยงสัญญาณ

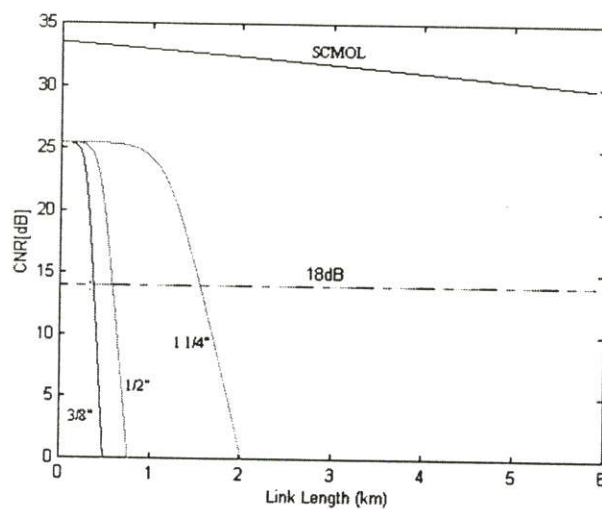
องค์ประกอบ 4 สิ่งหลักสำหรับพิจารณาในหัวข้อข้อย่อยนี้คือ ระยะครอบคลุมเซลล์กับกำลังส่ง ระยะโครงข่ายภายในไมโครเซลล์ ราคากับระยะของโครงข่าย และ ระยะครอบคลุมเซลล์กับความจุทราฟฟิก ระยะสายโคเอกเซียลจะสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดครอบคลุมของไมโครเซลล์โดยเฉพาะสายอากาศไมโครเซลล์ที่เป็นแบบรอบทิศทาง (omni-directional antenna) ถ้าขนาดเซลล์ใหญ่ระยะสายโคเอกเซียลจากศูนย์กลางกลุ่มไมโครเซลล์ (unit cell) ก็มาก สามารถพิจารณาขนาดไมโครเซลล์ในเทอมกำลังส่งของ MS และระยะสายโคเอกเซียลได้ ดังรูป 5.1 และ 5.2



รูปที่ 5.1 แสดงกำลังที่รับได้จากกำลังส่งหลายระดับเทียบกับระยะทาง

จากตารางกำลังส่งของ MS ดังตารางที่ 2.4 และสมการลดทอนที่ทดสอบในย่านความถี่ GSM 900 ในระยะเมกโครเซลและไมโครเซลของ Walfisch-Ikegami แสดงผลคำนวณดังรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าที่ระดับกำลังในกลุ่มเกือบต่ำสุดของ MS สามารถที่จะให้ระยะครอบคลุมเซลล์ได้ 300 เมตร และ 342 เมตร สำหรับกำลังส่งระดับ 11 (ในการวิเคราะห์ต่อไปใช้ระยะ 300 เมตร และ 150 เมตรในทอมพื้นที่ครอบคลุมเซลล์) ที่สามารถให้ความไวตอบสนองกับกำลังที่รับได้ (Receive Sensitivity) เกิน -104 dBm

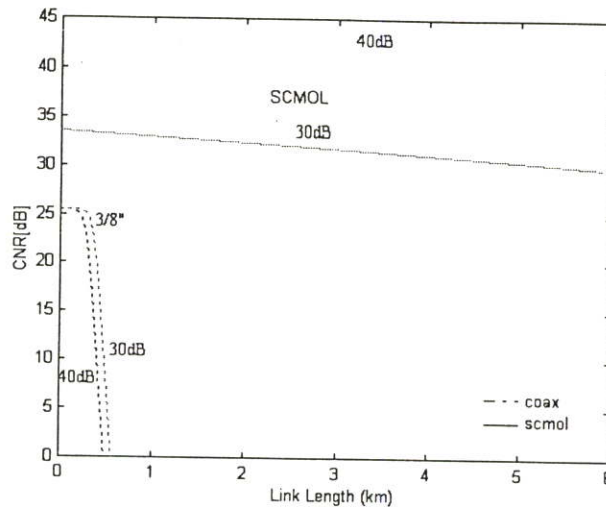
ต่อมากำลังที่รับได้ที่สายอากาศของ BTS ถูกขยายด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณความถี่ (RF-Amplifier) 1 ตัว ใช้สมการ 4.1 แสดงผลดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงระยะการเชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียลและสายใยแก้วนำแสงเทียบระหว่างระยะเชื่อมโยงและ CNR

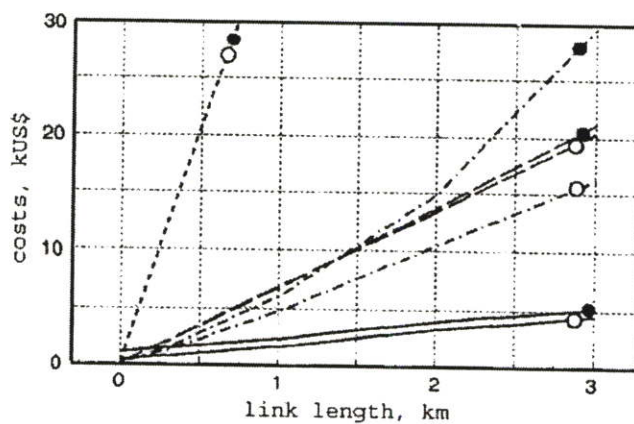
ผลดังรูปที่ 5.2 ได้ระยะเชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียลในระยะที่ให้ CNR เกิน 18 dB ที่ 320 เมตร สำหรับสายโคเอกเซียล 3/8 นิ้ว 550 เมตร สำหรับ สายโคเอกเซียล 1/2 นิ้ว และ 1386 เมตรสำหรับสายโคเอกเซียล 1 ¼ นิ้ว ถ้าเมื่อระยะการวางสายกับมุมถนน ระยะเชื่อมโยงที่เพียงพอกับไมโครเซลรัศมีต่ำกว่า 220 เมตร (ในทอมไมโครเซลใช้รัศมี (r) เป็น 150 เมตร) ก็สามารเลือกสายขนาด 3/8 นิ้วได้ อย่างไรก็ตามสายโคเอกเซียลที่มีอัตราการลดทอนต่ำ(ขนาดใหญ่ขึ้น)ราคาของระบบก็จะแพงมากขึ้น ซึ่งจะพิจารณาต่อราคาต่อไป

อีกทางหนึ่งถ้าใช้อัตราขยายของอุปกรณ์ขยายความถี่ที่มีอัตราการขยายสูงขึ้นก็จะสามารถเพิ่มระยะทางได้จากรูป 5.3 ทดสอบเพิ่มอัตราการขยายของเครื่องขยายสัญญาณ การเปรียบเทียบจะเห็นว่าที่อัตราการขยายเพิ่มขึ้นเท่ากัน ระยะสายเอกเซียลที่ให้ CNR ที่ระดับ 18 dB ขึ้นไป เพิ่มขึ้นไม่มากนักขณะที่ส่งผ่านด้วยสายใยแก้วนำแสงสามารถให้ระยะทางเชื่อมโยงหลายกิโลเมตรโดยใช้อุปกรณ์ขยายที่มีอัตราขยายไม่สูงนักเพียงหนึ่งตัว



รูปที่ 5.3 แสดง CNR กับระยะการเชื่อมโยงด้วยสายโคเอกเซียลและสายใยแก้วนำแสงที่อัตราขยายของ RF-Amp ต่างกัน

หรือใช้อุปกรณ์ขยายมากกว่า 1 ตัว ซึ่งในทางปฏิบัติอาจจะยากสำหรับการดูแลรักษาและเสถียรภาพของระบบโครงข่าย อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ได้แสดงระยะการเชื่อมโยงเปรียบเทียบในเทอมของราคาเพื่อสามารถพิจารณาในการเลือกใช้ได้ชัดเจนขึ้น โดยใช้สมการ (3.61) (3.89) (3.90) (3.91) (3.107) และ (3.114) กับราคาในตารางที่ 4.3 ให้ผลดังรูป 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงราคาเชื่อมโยงกับระยะเชื่อมโยง

● SFDR=76dB ○ SFDR=76dB — SM fiber - - Coax 1 1/4 in  
 - · - Coax 1/2 in · · · · Coax RG223U

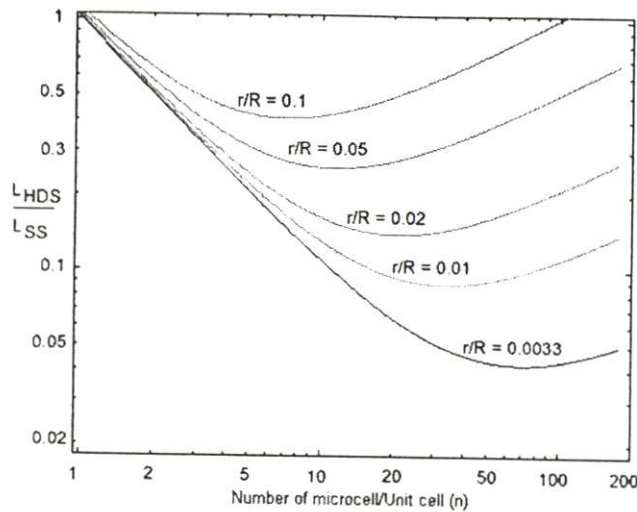
แสดงผลการเชื่อมโยงต่อหนึ่งไมโครเซลด้วยสายโคเอกเซียลหลายขนาดและระบบแสงผ่านสายใยแก้ว จากรูป 5.4 สรุปได้ว่า ราคาอุปกรณ์แสงกับสายใยแก้วจะมีราคาแพงเนื่องจากอุปกรณ์รับส่งแสงเป็นหลักที่ทำให้ราคาแพงสูงเมื่อหน่วยระยะเชื่อมโยงน้อย แต่เมื่อระยะโครงข่ายมากขึ้นโครงข่ายโคเอกเซียลจะมีราคาแพงเนื่องจากราคาเป็นเชิงเส้นโดยตรงกับสายโคเอกเซียลที่สูงกว่า

และต้องติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณอนุกรมเพิ่มเพื่อให้ CNR เพียงพอ และสุดท้ายคือตัดสินใจเลือกใช้โครงข่ายโคเอกเซียลในหัวข้อราคาเมื่อระยะเชื่อมโยงน้อยกว่า 320 เมตร สำหรับสาย RG223U โดยใช้เครื่องขยาย 1 ตัว (ใช้เครื่องขยายมากกว่า 1 ตัวในระยะทางมากกว่า) และสายโคเอกเซียลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะใช้ค่าใช้จ่ายสูงมากเมื่อเทียบกับระบบแสงแม้ว่าจะใช้เครื่องขยาย 1 ตัวได้ในระยะทางเกิน 500 เมตรก็ตาม ซึ่งการคำนวณในเทอมราคานี้อ้างอิงจากตารางที่ 4.3 ที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ อย่างไรก็ตามก็สามารถนำสมการไปประยุกต์ใช้ต่อไป

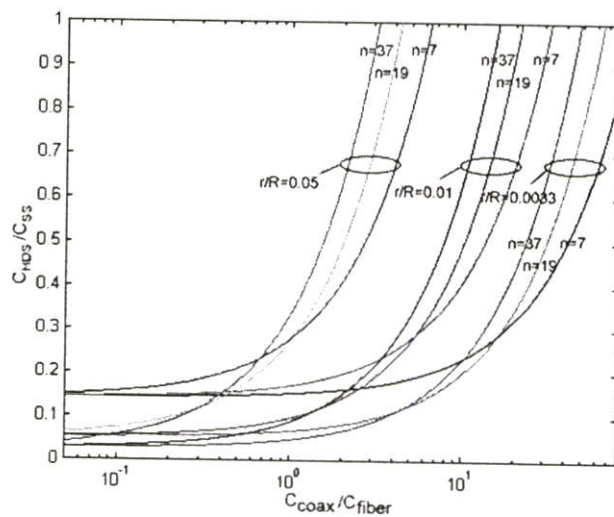
สุดท้ายคือระยะครอบคลุมเซลล์สัมพันธ์โดยตรงกับความจุทราฟฟิก ดังสมการความจุเออร์แลง (Erl) ที่ (2.27) แสดงความหนาแน่นผู้ใช้ ( $m^2/\text{User}$ ) ดังตารางที่ 4.2 เพื่อเห็นการเปรียบเทียบชัดเจนขึ้นโดยเทียบกับพื้นที่ติดตั้งเมกะโครเซลล์หนาแน่นในกรุงเทพมหานครดังรูปที่ 4.2 ที่เดิมติดตั้งเมกะโครเซลล์ในรูปแบบการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่แบบ 4/3 แต่ละเซลล์มี 2 TRX และ 1 BCCH ทำให้ได้ความจุต่อผู้ใช้ 1 คน ด้วยการส่งแบบ FR (Full-Rate) ที่ 14.56 ตารางเมตร กับรัศมีเมกะโครเซลล์เดิม 322 เมตร ในทางกลับกันจะต้องติดตั้งไมโครเซลล์ประกอบด้วย 2 TRX ด้วยความถี่สำรองสำหรับไมโครเซลล์หรือนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ (ตารางที่ 2.5) ที่รัศมีไมโครเซลล์ 150 เมตร โดยยังไม่รวมกับความจุของเมกะโครเซลล์ หรือ หมายถึงสามารถติดตั้งเฉพาะไมโครเซลล์ก็สามารถรองรับกับผู้ใช้จำนวนดังกล่าวนี้ได้

## 5.2 โครงสร้างโครงข่ายผสมแบบ HDS

เมื่อนำค่าตัวแปรของไมโครเซลล์ในระบบ GSM ได้ในหัวข้อ 5.1 ต่อมานำระยะที่ได้มาคำนวณในโครงข่ายผสม HDS ซึ่งจะมี 3 ส่วนพิจารณาหลักคือ ระยะสายเชื่อมโยงที่น้อยที่สุดของสัญญาณรวมของโครงข่าย HDS และราคาของระบบ ระยะเชื่อมโยงที่น้อยที่สุดทำให้สัญญาณมี CNR สูงมีเวลาหน่วงสัญญาณน้อย ประหยัดเครื่องขยายสัญญาณ และประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนอุปกรณ์เชื่อมต่อ จากสมการ (4.6) (4.7) และ (4.8) นำแสดงในรูป 5.5 เห็นชัดเจนขึ้นถึงอัตราส่วนขนาดไมโครเซลล์ต่อพื้นที่บริการ  $r/R$  กับอัตราส่วนระยะของสายเชื่อมโยงรวม  $L_{HDS}/L_{SS}$  และจำนวนไมโครเซลล์ต่อกลุ่มเซลล์  $n_0$  ที่เหมาะสม จากรูปจะสรุปได้ว่า ถ้าพื้นที่ให้บริการมากๆ แล้วจำนวนไมโครเซลล์ต่อกลุ่มเซลล์มีจำนวนมากจะทำให้ระยะโครงข่ายรวมมากขึ้น ตัวเมืองใหญ่อย่างเช่น  $r/R$  ที่ 0.0033 แสดง  $n_0$  ต่ำสุดที่  $n$  มากกว่า 50 ไมโครเซลล์ [13] [14]

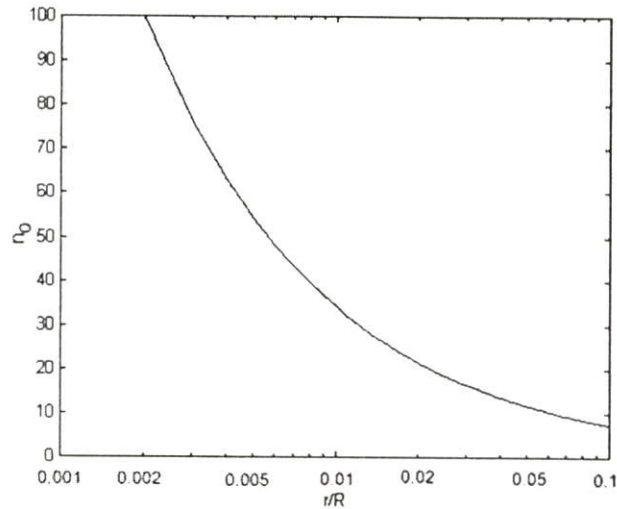


รูปที่ 5.5 แสดงผลอัตราส่วนระยะเชื่อม โยจรวม กับจำนวน โครเซลล์ต่อกลุ่มเซลล์



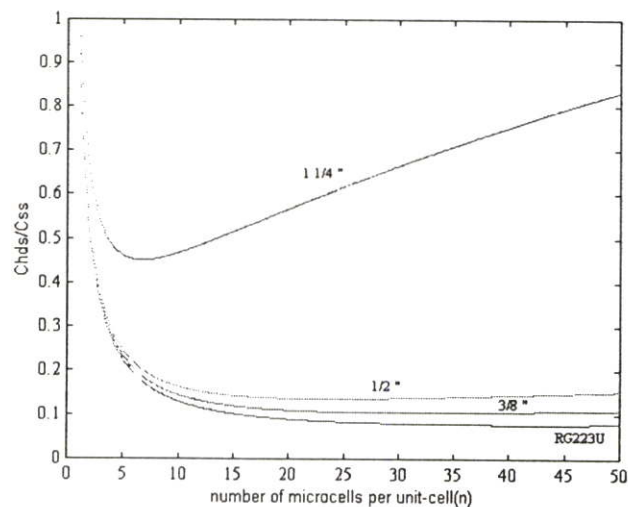
รูปที่ 5.6 อัตราส่วนของราคาสายโคเอกเซียลต่อสายใยแก้วนำแสง  $C_{coax}/C_{fiber}$  กับอัตราส่วนราคา โครงข่ายผสมแบบ HDS และแบบทั่วไป

จากรูป 5.6 ที่สามารถใช้พิจารณาในรูปราคาทั่วไป เนื่องจากราคาที่สามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ตามตลาด ซึ่งสรุปจากรูปนี้ได้ว่า ถ้าอัตราส่วนราคาของเอกเซียลต่อสายใยแก้วนำแสงมากต้องเลือกจำนวนไมโครเซลล์ต่อกลุ่มเซลล์น้อยลง และถ้าพื้นที่ให้บริการที่จำเป็นต้องติดตั้งไมโครเซลล์มากก็ต้องเลือกกลุ่มเซลล์ให้ใหญ่ขึ้นซึ่งสามารถแสดงค่าที่สมมูลนี้ในรูปที่ 5.7 โดยใช้สมการ (4.9) ซึ่งให้เห็นว่า ยิ่งพื้นที่ติดตั้งไมโครเซลล์มากขึ้นจะต้องใช้จำนวนกลุ่มเซลล์ที่ประกอบด้วยจำนวนไมโครเซลล์มากขึ้นสรุปในกรณีนี้ได้ว่า ภายในกลุ่มเซลล์จะจำกัดอยู่ที่ระยะครอบคลุมของกลุ่มเซลล์กับสายโคเอกเซียลภายในกลุ่มเซลล์นั้น



รูปที่ 5.7 แสดงอัตราส่วน  $r/R$  กับจำนวนไมโครเซลล์ที่เหมาะสม

จากรูป 5.5 5.6 และ 5.7 เป็นกราฟจากสมการทั่วไปของระยะโครงข่ายและราคา ต่อมาเมื่อสามารถระบุราคาอุปกรณ์อื่นๆ ในโครงข่าย GSM ก็สามารแยกพิจารณาราคาของโครงข่ายในแต่ละส่วน และรวมถึงราคารวมของระบบที่ชัดเจนขึ้นนั่นเอง ในรูปที่ 5.8 เป็นการใช้อุปกรณ์ตามตารางที่ 4.3 และใช้สมการ (4.6) (4.7) (4.8) และ (4.10)

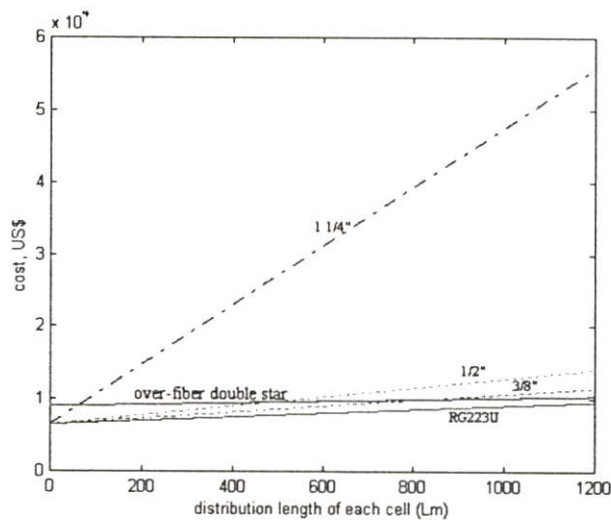


รูปที่ 5.8 อัตราส่วนราคาของโครงข่ายกับชนิดสายโคเอกเซียลและขนาดกลุ่มเซลล์

จากรูปที่ 5.8 จะเห็นความชันของกราฟเปลี่ยนไปจากรูปที่ 5.5 เนื่องจากการกำหนดราคาของอุปกรณ์และชนิดของสาย จะเห็นว่าถ้าราคาของสายโคเอกเซียลต่ำจะสามารถลดค่าใช้จ่ายรวมจากระบบโครงข่ายแบบสตาร์เคียวได้ประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ แม้ขนาดกลุ่มเซลล์จะมากก็ตาม แต่ถ้า

ราคาสายโคเอกเซียลสูง เช่นสายชนิด 1 ¼” จะให้ราคาของระบบรวมน้อยที่สุดที่จำนวน 6 และ 7 ไมโครเซลล์ต่อกลุ่มเซลล์เท่านั้นที่ราคาเฉลี่ย 45 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 5.8 จะเห็นชัดเจนว่าที่สายโคเอกเซียลราคาถูก (สายขนาดเล็กและอัตราลดทอนสูง) จะถูกจำกัดจำนวนกลุ่มเซลล์ที่ระยะการเชื่อมโยงเป็นหลัก ที่ให้ระยะการเชื่อมโยงไม่เกิน 320 เมตร (3/8 นิ้ว) ซึ่งหมายถึงให้จำนวนกลุ่มเซลล์ไม่เกินวงรอบที่ 1 หรือ 7 ไมโครเซลล์นั่นเอง และสังเกตว่าถ้า  $n$  เป็น 1 โครงข่ายก็จะกลายเป็นโครงข่ายผสมแบบสตาร์เดี่ยวซึ่งจะมีราคาของระบบเกินกว่าระบบสตาร์เดี่ยวเมื่อใช้สายใยแก้วนำแสงทั้งหมด ได้แสดงค่าละเอียดในช่วงพิจารณาในตารางในภาคผนวก ก.

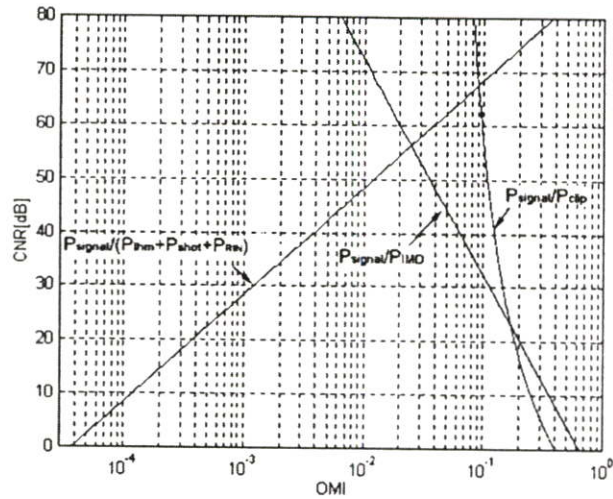
ในการวิจัยได้ทดสอบในเทอมราคาโดยกำหนดให้เป็น โครงสร้างโครงข่ายแบบดับเบิลสตาร์แต่ใช้สายใยแก้วนำแสงทั้งหมดภายในกลุ่มเซลล์ด้วยและใช้อุปกรณ์รวมและแยกสัญญาณแบบพาสซีฟ (passive splitter) แสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการพื้นฐานของโครงข่ายผสมแบบ HDS



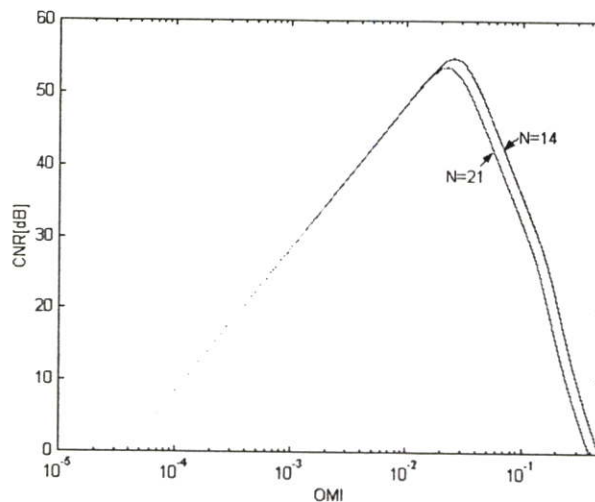
รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบราคาโครงข่ายดับเบิลสตาร์แบบผสมและระบบแสงทั้งหมด

ในเทอมราคา เมื่อไม่คิดอุปกรณ์ รวม-แยกแสงแบบพาสซีฟจะได้ระยะที่ทำให้ราคาเท่ากันคือ 60 เมตร 468 เมตร 795 เมตร และ 1728 เมตร สำหรับสายโคเอกเซียล 1 ¼ นิ้ว 1/2 นิ้ว 3/8 นิ้ว และ RG223U ได้สรุปไว้ใน บทที่ 6 อีกครั้ง

ที่จุดรวมสัญญาณ (Concentrator) ในเทอมของสัญญาณและสัญญาณรบกวนจากสมการสัญญาณ จะเห็นว่าดัชนีการมอดูเลทของกำลังสัญญาณเป็น  $m^2$  ส่วนสัญญาณรบกวนจากอุณหภูมิ (Thermal Noise) ซอร์ทนอยส์ (Shot Noise) และ รีเลทีฟอินเทนซิตีโนยส์ (Relative



รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน CNR แยกแยะพิจารณาดัชนีมอดูเลต



รูปที่ 5.11 CNR สูงสุดกับดัชนีการมอดูเลตที่เหมาะสม

Intensity Noise) ขึ้นกับแถบความถี่ (Bandwidth) และ กระแสตามลำดับ แต่ สัญญาณรบกวนจากการคลิป์ (Clipping) และเทอมผลคูณ (Intermodulation Distortion Noise) จะผูกพันกับดัชนีการมอดูเลต (กำลัง 5 และกำลัง 6 ตามลำดับ) โดย CNR จะตกลงอย่างรวดเร็วเมื่อดัชนีมอดูเลต OMI (Optical Modulation Index) สูงขึ้นระดับหนึ่ง ดังรูปที่ 5.10 ได้แสดงสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน CNR โดยแยกพิจารณา แต่ละเทอมของสัญญาณรบกวน

สรุปผลรวมสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจากรูป 5.11 จากอุปกรณ์รวมสัญญาณของโครงข่าย HDS จะเห็นว่า ดัชนีการมอดูเลต OMI ที่เหมาะสมที่ 0.0256 และ 0.0222 สำหรับ ช่องความถี่ของกลุ่มเซตรวมเท่ากับ 14 และ 21 ช่องความถี่ จะให้ CNR สูงสุดที่ระยะทาง 0 เมตร หรือ CNR สูงสุดที่ระยะเชื่อม โยงใดๆ

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

ระบบไมโครเซลจะมีข้อดีคือ สามารถรองรับทราฟฟิกสูงๆอย่างในตัวเมืองได้ เป็นระบบที่ง่ายและประหยัด ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย ใช้กำลังไฟน้อย การดูแลรักษาเป็นไปได้ง่าย แต่ไมโครเซลก็มีข้อเสียที่ มีรอยต่อเซลมาก ทำให้สัญญาณขาดหายได้ง่าย และเดินทางขณะใช้การสื่อสารด้วยความเร็วต่ำ และยากต่อการติดตั้งไมโครเซลให้ครอบคลุมพื้นที่กว้างทุกพื้นที่ให้บริการ ระบบเมคโครเซล จะมีข้อดีที่สัญญาณมีเสถียรภาพ กับการเคลื่อนที่สูงด้วยพื้นที่เซลครอบคลุมกว้าง ข้อเสียเปรียบคือ ทราฟฟิกต่ำ มี โอกาสเกิดจุดอับสัญญาณ ใช้กำลังไฟมาก ใช้พื้นที่ติดตั้งสถานีฐานมาก ต้องการการบำรุงรักษาเป็นพิเศษ โดยเฉพาะในประเทศไทย ระบบเมคโครเซลและไมโครเซลอย่างสมบูรณ์เป็นระบบและการบริการที่แยกกัน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอ ไมโครเซลในระบบเมคโครเซลหรือโทรศัพท์เคลื่อนที่ บนพื้นฐานของระบบ GSM (Global System for Mobile Communication) ด้วยเหตุที่ปัจจุบันเริ่มมีการแบ่งเมคโครเซลจนพื้นที่ครอบคลุมเล็กกลงมาก โดยเฉพาะในพื้นที่ธุรกิจ เพื่อรองรับกับทราฟฟิกที่สูงขึ้น และนำข้อดีของระบบไมโครเซลมาใช้ทำให้ข้อบกพร่องของเมคโครเซลหายไป และเนื้อหาหลักการศึกษาวิจัย อยู่ที่โครงข่ายของระบบไมโครเซลของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่หากใช้ระบบเดิมในการเชื่อมโยงที่ใช้คือ ไมโครเวฟเชื่อมโยงทุกจุดสถานีฐานหรือ โครงข่ายสายใยแก้วนำแสงทุกสถานีฐาน จะเกิดค่าใช้จ่ายของโครงข่ายสูงมาก เพราะมีไมโครเซลเป็นจำนวนมาก แม้ปัจจุบันจะติดตั้งไมโครเซลบางพื้นที่ แต่อนาคตก็มีแนวโน้มที่จะติดตั้งไมโครเซลหนาแน่นมากขึ้น คือเข้าใกล้การสื่อสารส่วนบุคคลนั่นเอง

โครงข่ายที่นำเสนอ เป็นโครงข่ายแบบผสมแบบดับเบิลสตาร์ ที่นำสายโคเอกเซียล และสายใยแก้วนำแสง มาใช้ร่วมกัน ในส่วนที่เหมาะสม และพยายามเสนอค่าตัวแปรของระบบในการคำนวณและแสดงผลการคำนวณให้เห็นชัดเจนขึ้น คือ ขนาดไมโครเซล ขนาดกลุ่มเซล รูปแบบความถี่นำกลับมาใช้ใหม่ ขนาดพื้นที่ให้บริการ กำลังส่งและระยะเชื่อมโยงที่เหมาะสม เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาวิเคราะห์ และประยุกต์ใช้งานต่อไป

สรุปการคำนวณได้ดังนี้คือ กลุ่มเซล (Unit Cell) ประกอบด้วยไมโครเซล 7 ไมโครเซล จะสามารถใช้สายโคเอกเซียลเชื่อมโยงภายในกลุ่มเซลโดยใช้เครื่องขยายความถี่ (Radio-Frequency Amplifier) 1 ตัว จะให้ระยะเชื่อมโยงเป็นโครงข่ายโคเอกเซียล (3/8 นิ้ว) จากอุปกรณ์รวม-แยกสัญญาณถึงแต่ละไมโครเซล โดยมี CNR (Carrier-to-Noise Ratio) เกินกว่าข้อกำหนดคือ 18 dB ขึ้น

ไป โดยใช้รัศมีไมโครเซลล์ 150 เมตร พร้อมกับมีระยะเผื่อการเดินสายตามมุมถนนได้สูงสุดที่ 260 เมตร ( $\sqrt{3}r$ ) โดยเปรียบเทียบความจุกราฟฟิคกับพื้นที่ที่ติดตั้งเมกโครเซลล์อย่างหนาแน่น ดังรูปที่ 4.2 เดิมติดตั้งในรูปแบบการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่แบบ 4/3 โดยติดตั้งไมโครเซลล์รัศมี 150 เมตร จำนวนเครื่องรับส่งสัญญาณความถี่ 2 TRX แทนจะสามารถให้ความจุกราฟฟิคได้เพียงพอ คือเกินกว่าเมกโครเซลล์ในพื้นที่ตัวอย่าง ด้วยความจุแบบเต็มอัตราการส่ง (FR) โดยที่ให้ราคาโครงข่ายแบบผสม HDS ที่ประกอบด้วยโครงข่ายโคเอกเซียลเชื่อมโยงในระยะใกล้ภายในกลุ่มเซลล์และโครงข่ายสายใยแก้วนำแสงเชื่อมโยงจากกลุ่มเซลล์ถึง MSC ประหยัดกว่าโครงข่ายสายใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่เชื่อมโยงแบบจุดต่อจุดหรือแบบสตาร์เดี่ยวเหลือเพียง 13 เปอร์เซนต์ และ ประมาณ 45 เปอร์เซนต์สำหรับสายโคเอกเซียลราคาสูง ก็เลือก  $n$  เท่ากับ 7 และ ใช้ OMI เท่ากับ 0.0256 เมื่อใช้จำนวนช่องสัญญาณความถี่ 14 ช่องสัญญาณ (2 TRX 7 ไมโครเซลล์) จะให้ CNR สูงสุดที่ระยะเชื่อมโยงทุกระยะ

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกพัฒนาไมโครเซลล์บนพื้นฐานของเมกโครเซลล์เพื่อนำจุดดีไมโครเซลล์เสริมเมกโครเซลล์เดิมที่มีบริการครอบคลุมอยู่แล้ว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งช่วงเริ่มต้นเฉพาะบางพื้นที่ที่ต้องการติดตั้งไมโครเซลล์หรือติดตั้งไมโครเซลล์มากขึ้นครอบคลุมบริเวณกว้างในอนาคตได้ และอาจเป็นไปได้ว่า สามารถใช้ระบบเมกโครเซลล์ (GSM) ระบบเดียว เป็นระบบสื่อสารทั้งโทรศัพท์เคลื่อนที่และโทรศัพท์ส่วนบุคคลในอนาคต ทั้งในการสื่อสารด้วยเสียง และ โครงข่ายไร้สาย หรือ มัลติมีเดีย เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากค่าบริการต่ำลงอยู่ในราคาของโทรศัพท์ส่วนบุคคลสำหรับพื้นที่ของไมโครเซลล์อย่าง กรุงเทพมหานคร เป็นต้น

สัญญาณในส่วนของการเชื่อมโยงสามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ให้ต่ำลงเป็นความถี่กลาง (Intermediate Frequency) หรือ ส่งในระดับบิทได้ ทำให้ส่งได้ที่ความถี่ต่ำลงราคาของส่วนโคเอกเซียลที่จะลดน้อยลง หรือส่งผ่านสายโทรศัพท์ในระบบ ISDN ซึ่งจะต้องใช้สถานีฐานที่เข้าถึงเลเซอร์เชื่อมโยงข้อมูล (Data link layer) รูปแบบการจัดทิศทางของสายอากาศของไมโครเซลล์และอัตราส่วนอินเตอร์เฟอเรนซ์ สำหรับการศึกษาวิจัยต่อไป

สามารถใช้ระบบแสงทั้งหมดเชื่อมโยงแบบดับเบิลสตาร์โดยประยุกต์จากผลการคำนวณและเปลี่ยนอุปกรณ์ในกลุ่มเซลล์ให้เป็นอุปกรณ์แสงทั้งหมดซึ่งจะให้ราคาเท่ากับโครงข่ายผสมที่ระยะ 60 เมตร 468 เมตร และ 795 เมตร สำหรับสายโคเอกเซียล 1 ¼ นิ้ว 1/2 นิ้ว และ 3/8 นิ้ว ตามลำดับ(สาย RG มีอัตราการลดทอนที่สูงเกินไป) ที่อาจพิจารณาเป็นโครงข่ายสายใยแก้วนำแสงแบบดับเบิลสตาร์ทั้งหมดเพื่อเสถียรภาพของสัญญาณที่ดีกว่า

สุดท้ายคือความจุกราฟฟิคของไมโครเซลล์ที่จะต้องพิจารณาให้เข้าใกล้กับโทรศัพท์ส่วนบุคคลมากขึ้นคือช่องสัญญาณใกล้เคียงกับผู้ใช้ดังรูปในภาคผนวก ก. เพื่อไม่ให้เกิดการบดบัง

## บรรณานุกรม

- [1] V. Prahatheesan and Jiangzhou Wang, "Approximate interference of a microcellular spread spectrum system," *Electron. Lett.*, Vol. 34, pp. 1717, Sep. 1998.
- [2] P.S. Rha, "Frequency reuse scheme with reduced co-channel interference for fixed cellular systems" *Electron. Lett.*, Vol. 34, No.3 pp. 237-238, 5<sup>th</sup> Feb 1998
- [3] V. Wille, S.M. Irons, A.J. King, "Capacity Increase In Cellular Radio Networks Using Existing Base Station Sites" *IEE Colloquium*, pp. 4/1 – 4/8, 1996
- [4] Brendan C. Jones, "Cochannel and Adjacent Channel Reuse Ratio Distributions in Dynamic Channel Assignment Microcellular Sytems" *IEEE TENCON*, pp. 338 – 346, 1996
- [5] R. Bose and A. Kumar, "Reducing frequency reuse distance in cellular communications using trellis coded modulation" *IEEE Proc. Commun.*, pp. 149
- [6] F. Hiroshi and A. Yoshihiko, "A Microcell Overlaid with Umbrella Cell System" *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 1455-1459, 1994
- [7] S. Hunziker and W. Baechtold, "Cellular remote antenna feeding: Optical fiber or coaxial cable?" *Electron. Lett.*, Vol. 34, No.11 pp. 1038-1039, 28<sup>th</sup> May 1998
- [8] O.K. Tonguz and H.Jung, "Personal Communications access networks using subcarrier multiplexed optical links." *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, no.6, June 1996
- [9] Jorg Eberspacher and Hans-Jorg Vogel, "GSM Switching, Services and Protocols" - -u2 traffic
- [10] Deissner J, Barreto A.N, Barth U and Fettweis G, "Interference Analysis of a Total Frequency Hopping GSM Cordless Telephony System" *IEEE International Symposium on*, Vol. 3, pp.1525 – 1529, 1998
- [11] W.C.Y. Lee, "Mobile Cellular Telecommunications Systems" McGraw-Hill, 1989
- [12] Jerry D. Gibson, "The Mobile Communications Handbook," A CRC Handbook Published in Cooperation with IEEE Press, Inc., 1996
- [13] T. Banlue, P. Mruetusatom and S. Noppanakeepong, "Hybrid Double Star Network for Microcellular Mobile Communication System" *Malaysia, Student Conference Research and Development (SCOReD2001).*, February 20-21, 2001.

- [14] ทศนัย บรรลือ สมสุดา เกิดศิษฐ์ สุทธิชัย นพนาตีพงษ์ “โครงข่ายผสมแบบสตาร์สำหรับ  
เซลล์ขนาดเล็กในระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับ  
บัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 1 หน้า 39 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 10-11 มิถุนายน 2543
- [15] A. Kuurne, “Mobile Measurement based frequency planning in GSM Networks” Master’s  
Thesis, Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University Technology,  
2001
- [16] R.C.V. Macario, “Cellular Radio Principles and Design” Department of Electronic and  
Electrical Engineering, University of Wales, Swansea, Second Edition, 1997

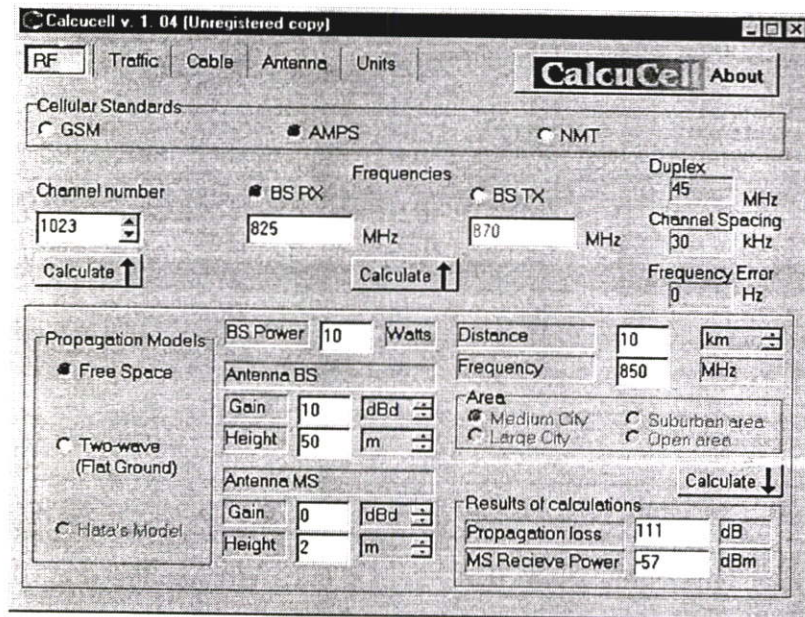
## ภาคผนวก ก.

ข้อมูลและสถิติที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์

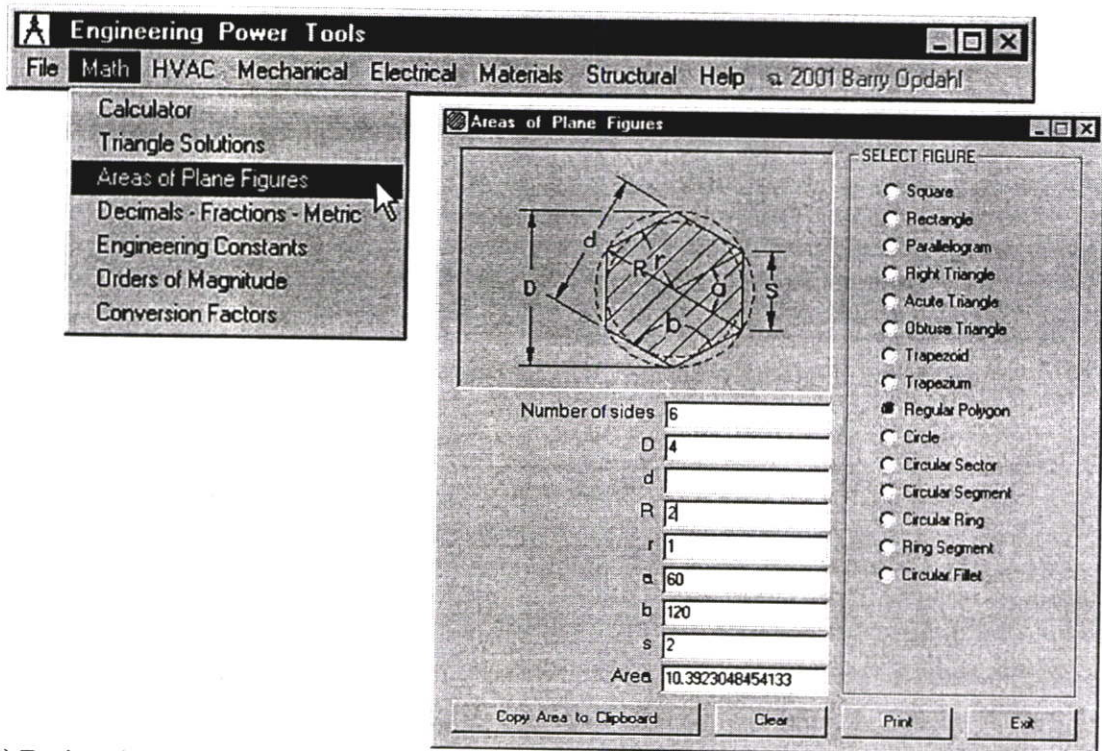
ตัวอย่างสถิติการเรียกของ BSC04 ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ GSM วันที่ 4 เมษายน 2540

เวลา	เรียก	เชื่อมต่อ	จำนวนรับ	จำนวนผิดพลาด	ความจุ BSC	ความจุ / ผู้ใช้	GOS
00:00 - 01:00	32159	30480	17320	883.6	883.6	0.0290	5.22
01:00 - 02:00	20029	19013	10898	506.9	506.9	0.0267	5.07
02:00 - 03:00	14780	13936	8122	347.6	347.6	0.0249	5.71
03:00 - 04:00	9785	9211	5318	206.6	206.6	0.0224	5.87
04:00 - 05:00	7234	6760	4096	163.7	163.7	0.0242	6.55
05:00 - 06:00	7794	6994	4175	138.6	138.6	0.0198	10.26
06:00 - 07:00	18825	17567	10555	308.1	308.1	0.0175	6.68
07:00 - 08:00	38058	36169	22302	658.2	658.2	0.0182	4.96
08:00 - 09:00	65370	63519	39917	1238	1238	0.0195	2.83
09:00 - 10:00	95110	83295	50778	1675	1675	0.0201	12.42
10:00 - 11:00	113463	79701	49397	1642	1642	0.0206	29.76
11:00 - 12:00	133393	83923	52256	1743	1743	0.0208	37.09
12:00 - 13:00	123352	86183	54913	1741	1741	0.0202	30.13
13:00 - 14:00	141990	87883	57007	1739	1739	0.0198	38.11
14:00 - 15:00	144492	80340	54310	1750	1750	0.0218	44.40
15:00 - 16:00	146612	84998	52983	1758	1758	0.0207	42.03
16:00 - 17:00	141990	87883	57007	1739	1739	0.0198	38.11
17:00 - 18:00	123352	86183	54913	1741	1741	0.0202	30.13
18:00 - 19:00	133393	83923	52256	1743	1743	0.0208	37.09
19:00 - 20:00	130010	88584	58017	1739	1739	0.0198	38.11
20:00 - 21:00	95110	83295	50778	1675	1675	0.0201	12.42
21:00 - 22:00	65370	63519	39917	1238	1238	0.0195	2.83
22:00 - 23:00	38058	36169	22302	658.2	658.2	0.0182	4.96
23:00 - 00:00	28717	27493	16138	649.4	649.4	0.0236	4.26

## โปรแกรมเครื่องมือที่ใช้อำนวยความสะดวกในการคำนวณ



1) โปรแกรม CalcuCell ver1.04(กราฟฟิคใช้กับเฉพาะเฉพาะเมคโครเซลล์ตามสมการ(2.27))



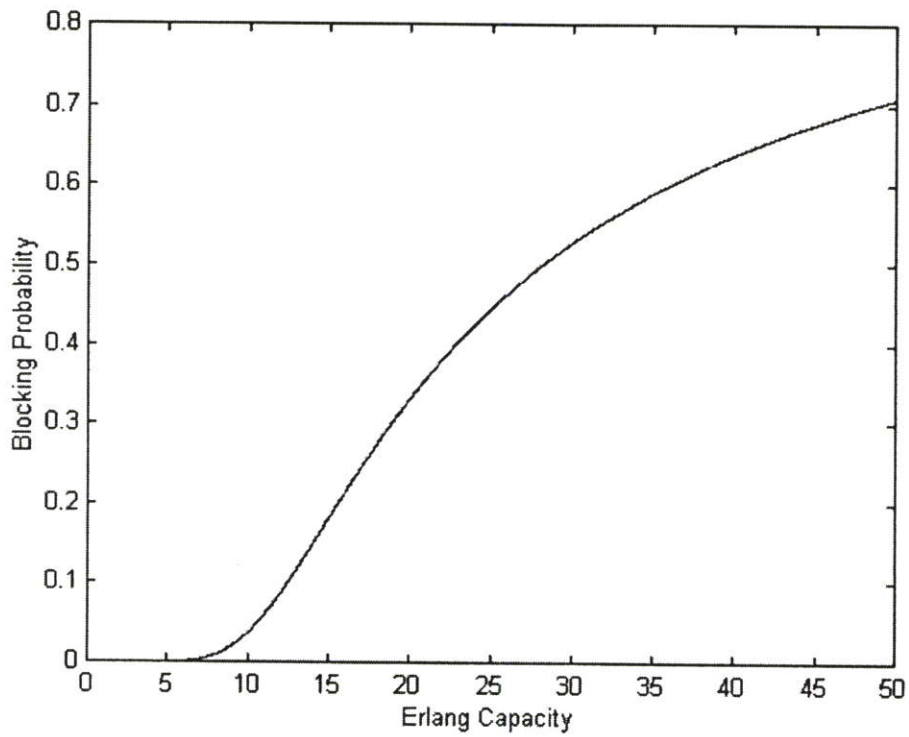
2) Engineering Power Tools

คุณภาพสัญญาณเสียงกับกำลังที่รับได้และความเร็วในการเคลื่อนที่ [15]

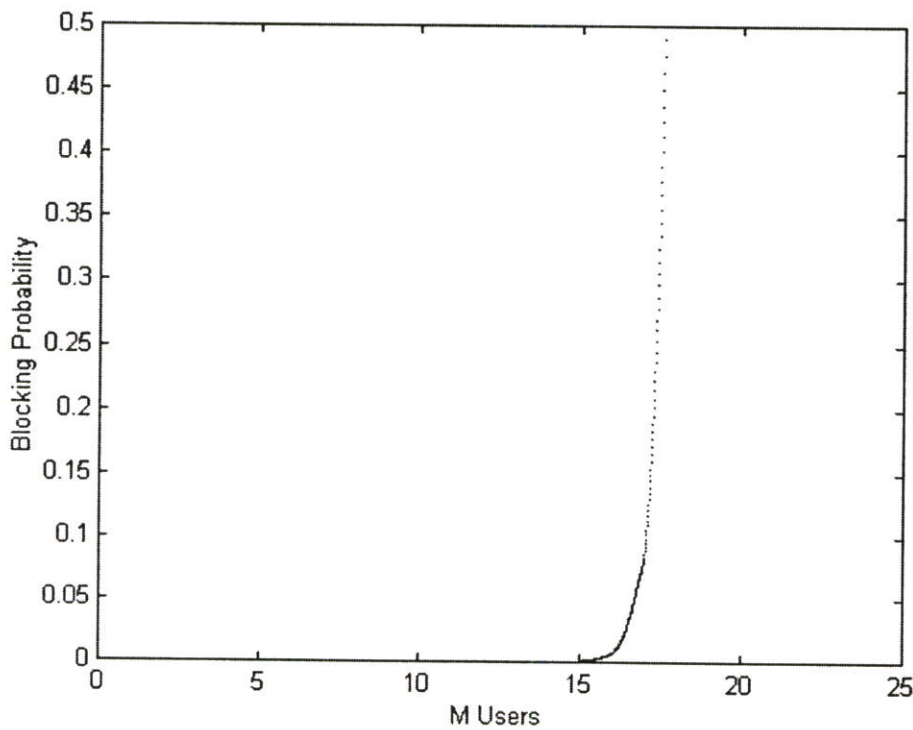
Pr-Level (dBm)	TU50		TU3	
	Rx Qual	Speech Quality	Rx Qual	Speech Quality
-95	2	Good	1	Good
-102	2	Acceptable	5	Borderline
-104	5	Borderline	5	Not acceptable
-106	6	Bad	6	Bad

ตารางอัตราส่วนราคากับขนาดกลุ่มเซลล์ จากรูป 5.8

$n$	RG	3/8 "	1/2 "	1 1/4 "	$n$	RG	3/8 "	1/2 "	1 1/4 "
<b>1</b>	0.007	1.001	1.017	1.114	<b>12</b>	0.121	0.131	0.151	0.485
<b>2</b>	0.514	0.520	0.286	0.665	<b>13</b>	0.121	0.136	0.156	0.476
<b>3</b>	0.351	0.359	0.369	0.536	<b>14</b>	0.105	0.122	0.144	0.505
<b>4</b>	0.270	0.279	0.291	0.484	<b>15</b>	0.101	0.119	0.141	0.515
<b>5</b>	0.222	0.232	0.245	0.461	<b>16</b>	0.110	0.116	0.140	0.526
<b>6</b>	0.190	0.202	0.216	<b>0.452</b>	<b>17</b>	0.109	0.114	0.138	0.536
<b>7</b>	0.168	0.180	0.196	<b>0.451</b>	<b>22</b>	0.086	0.107	<b>0.135</b>	0.587
<b>8</b>	0.152	0.165	0.181	0.454	<b>27</b>	0.081	<b>0.105</b>	<b>0.135</b>	0.636
<b>9</b>	0.139	0.153	0.170	0.460	<b>33</b>	0.079	<b>0.105</b>	0.138	0.693
<b>10</b>	0.129	0.144	0.162	0.467	<b>36</b>	<b>0.078</b>	<b>0.105</b>	0.140	0.720
<b>11</b>	0.121	0.136	0.156	0.476	<b>38</b>	<b>0.078</b>	0.106	0.142	0.736



ความจุกราฟฟิค (Erl) และอัตราการบล็อก (Pb) เมกโครเซล จากสมการ (2.27) 
$$P_B = \frac{A^N / N!}{\sum_{i=0}^N A^i / i!}$$



จำนวนผู้ใช้ (M) และ อัตราการบล็อก (Pb) ไมโครเซล จากสมการ (2.29) 
$$P_B = \frac{\binom{M-1}{n}}{\sum_{i=0}^n \binom{M-1}{i} a^i}$$

## ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้รับการตีพิมพ์



DATE: 20<sup>th</sup> & 21<sup>st</sup> FEBRUARY 2001

VENUE: KUALA LUMPUR,  
MALAYSIA.

## Call for paper for SCOREd 2001

### INTRODUCTION -

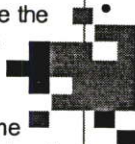
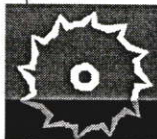
Marching into the dawn of the millennium, Asia Pacific is geared to be the leading force of electrical and electronics industries in this region. With this in mind, SCOREd 2001 is formulated to provide a unique platform for students all across the Asia Pacific region, to share their experience and view in their latest research and breakthroughs. SCOREd 2001 is created upon the ideas to promote Asia Pacific as the center of electrical and electronics excellence in the world, to promote Asia Pacific as the upcoming leader in research and development in this region and to promote the research and development activities among students.

In accordance with the theme "Soaring into an Infinite World of Electrical and Electronics", various and countless inspiring researches by students will be center-staged in SCOREd 2001.



### CONFERENCE SCOPE

- Control Techniques and Systems
- Robotics and Automation
- Energy and Power System
- Digital Signal Processing
- Telecommunications
- Information Technology
- Power electronics and motion control
- Fault Detection and Diagnosis
- Industrial applications of Intelligent Systems
- Microelectronics



### IMPORTANT DEADLINES

Submission of Abstract:  
15<sup>th</sup> August 2000  
Notification of Acceptance:  
15<sup>th</sup> October 2000  
Submission of full paper:  
15<sup>th</sup> November 2000

### REGISTRATION FEES

IEEE student:  
USD 70  
Non-IEEE student:  
USD 90  
IEEE member non-student:  
USD 100  
Others:  
USD 130

### TARGETED PARTICIPANTS

Final Year Student and  
Postgraduate (Degree  
Holder, Master and Phd)

### PAPER SUBMISSION - ABSTRACT

Authors are invited to submit 4 copies of abstract which consist of about 500 words, single-spaced and written in English. The abstract should include the followings:

- Full title of paper
- Corresponding authors (Name, postal & email addresses, phone and fax)

Submissions by email are accepted. All submissions will be acknowledged by electronic or postal mail. All papers accepted must be presented. Papers that are not presented will not be included in the conference proceedings.

### International Advisory Committee

Prof. Dr. Imre J. Rudas  
- Hungary

Prof. Gurvinder S. Virk  
- Portsmouth, Hampshire

Albert Y. Zomaya  
Associate Professor  
- Western Australia

Prof. Malik Elbuluk  
- Ekron

Dr. Tan Leng Seow,  
Associate Professor  
- Singapore

Ho Hooi Chee  
- Singapore

Prof. Robert N.K. Loh  
- USA

Dr. Marcelo H. Ang Jr.  
- Singapore

Prof. Marzuki Khalid  
- Malaysia

Prof. Shamsuddin M. Amin  
- Malaysia

Prof. Abdul Halim Yatim  
- Malaysia

Prof. R.G. Green  
- Sheffield, UK

Prof. Muhammad H. Rashid  
- Malaysia



### CONTACT

Secretariat SCOREd 2001,  
IEEE Student Chapter, UTM,  
C/O Professor Abdul Halim b. Mohd Yatim,  
Fakulti Kejuruteraan Elektrik,  
Universiti Teknologi Malaysia,  
81310 Skudai,  
Johor, Malaysia.  
Phone: 607-5505006  
Fax: 607-5566272  
Email: scored2001@nadi.fke.utm.my

URL : <http://nadi.fke.utm.my/~scored2001>



Cairo's FAX and PHONE  
Phone: +6-03-2913710  
+6-03-2904816  
Fax: +6-03-2970815  
Mobile: +6-019-3844814

# Hybrid Double Star Network for Microcellular Mobile Communication System

Tassanai Banlue, Prachya Mruetusatorn, and Suthichai Noppanakeepong

Research Center for Communications and Information Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
Phone: (662) 3268-509 Fax: (662) 326-9086 E-mail: s1061060@kmitl.ac.th

**Abstract** — This paper presents the Hybrid Double Star (HDS) network. By described as an access link of Mobile Communications System between Base Transceiver Station (BTS) in microcell and Base Station Controller (BSC). This network architecture used Subcarrier Multiplexed Optical Fiber (SCMOL) and coaxial cable. By develop from point-to-point SCMOL link to several groups or unit cell of microcellular. The reduced total link length, number of laser diodes and photodetector in the unit cell structure based on the HDS network. The link length-dependent costs are compared for two reasonable values of the dynamic range. Analysis shows that network can use in small cell coverage or microcells and picocell the network cost would decrease proportionally.

*key words:* hybrid network, microcellular system

## I. Introduction

When the call traffic begins to increase, the main alternatives available to a system designer in this environment are to change the frequency reuse pattern, antenna sectorization and/or to resort to cell splitting, become the coverage range of macrocell are compressed as shown in Fig. 1. In this range we can replace by the microcellular system, composed of small size cells with several hundred-meter diameter coverage range, have to be used to increase the user capacity. Microcellular system is not only increased erlang capacity but also used for weak radio signal and/or low carrier-to-interference ratio (C/I) area, low-cost base transceiver station (BTS), very low loss signal received and low transmitting power.

The problem in implementing for very small cell network is the enormous investment required for construction of the fiber-optic infrastructure. The cost of the optical devices connected to each end of an optical fiber also becomes a burden. BTS-BSC point-to-point SCMOL link, which may be an expensive network.

In this paper, we propose a hybrid double star using both SCMOL and coaxial cable. A unit cell structure is introduced into the access portion of microcellular mobile communication systems. The reduced total fiber length in the unit cell structure based on the HDS network is discussed in comparison with the conventional architecture. Calculations show that there is an optimum splitting ratio that minimizes the total link length cost.



Fig.1 Macrocell coverage are compressed on business area (Bangkok, Thailand)

This paper estimates the reduction in the link lengths count and evaluates user density performance with HDS architecture is applied to the access network of microcellular mobile communication systems. The reduction in coax/fiber count with HDS architecture is analyzed in term of the splitting ratio, the coverage radius, received CNR, Erlang capacity radius and costs of cable.

## II. Link Analysis

Radio signals from mobile station are received at the antenna of the base transceiver station in microcell, then amplified by a radio frequency amplifier and subsequently transmitted over a short coaxial cable to the signal combiner. The

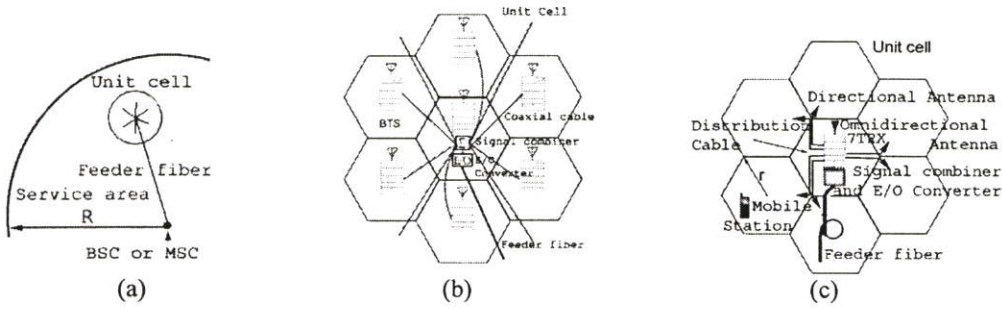


Fig. 2 Hybrid double star architecture (a) service area (b) simply unit cell (c) developed unit cell

combined signals with other microcell in the same unit cell are converted to optical signals, are then transported via optical fiber to base station controller or mobile switching center (MSC).

This the following subsections are compared in terms of carrier-to-noise ratio (CNR) they can provide at the BSC as a function of the link length when the cell coverage is 150 meters.

#### A. Cell Coverage

The received radio signal is dependent on the distance between the antennas of BTS and the Mobile Station (MS). Up link transports carriers from MS to an antenna of the BTS. The variation of received power and the fact that path loss-distance relationship in a microcell is quite different from that of a conventional macrocell environment. The distances of MS transmitters can range from several meters to about 300 meters (at the edge of a microcell, show in Fig. 2 (c)). The path loss, varies according to  $d^{-2}$  for short distances with no obstructions, and varies according to  $d^{-4}$  for congested areas with obstructions. The received power with difference

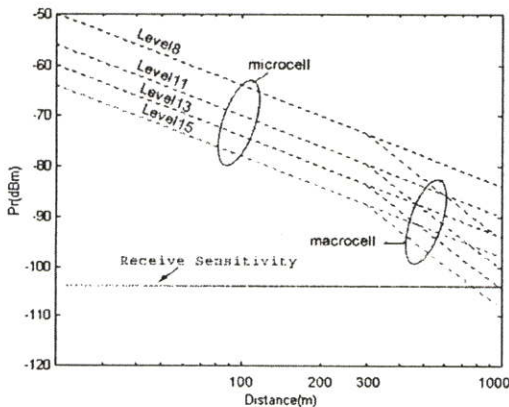


Fig. 3 Received power at the BTS versus the distance with difference power transmitter levels.

transmitting power level and difference degrees of propagation path loss are illustrated in Fig. 3, that results indicate that the cell coverage (in terms of cell radius) will be less than about 700 meters at least transmitting power level in the Global System for Mobile Communications (GSM), it is clear that increasing the transmitting power will be increase the cell coverage which, in turn, will increase cochannel interference, becomes unacceptable.

#### B. Coaxial Cable Link

The CNR at the output of coaxial cable at the BSC will be [1]

$$(CNR)_o = \left( \frac{P_r}{kT_o B} \right) \left( \frac{G}{F_1 G + 10^{\beta l_c / 10} - 1} \right) \quad (1)$$

When  $P_r$  is the received signal power at the antenna of BTS,  $kT_o B$  is the thermal noise power,  $G$  is the gain of RF amplifier for coax and subcarrier multiplexed optical fiber link,  $F_1$  is the noise figure of the RF amplifier,  $\beta$  is the signal attenuation of coaxial cable (dB/km), and  $l_c$  is the length of coaxial cable (km), where  $k$  is Boltzmann constant ( $1.37 \times 10^{-23}$  J/K),  $T_o$  is temperature (300K),  $B$  is the bandwidth of a channel (200KHz).

#### C. SCMOL Link

The subcarrier multiplexed optical fiber is a good system performance, will be suitable for long link lengths by the received CNR at the output of the photodetector at BSC is [2]

$$(C/N)_o = \frac{P_{signal}}{P_{shm} + P_{shot} + P_{RIN} + P_{chp} + P_{IMD}} \quad (2)$$

where  $P_{signal}$  is signal power,  $m_o$  is the optical modulation index (OMI) defined as the ratio of the amplitude measured from the peak to the mean value of the optical signal emitted by the laser diode. The OMI will be determined by the

applied signal power of the radio channel at the input of laser diode.

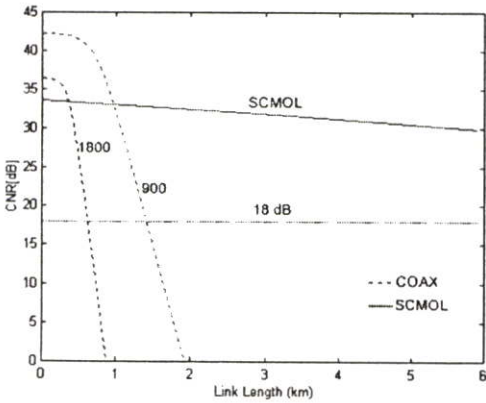
$$I_o = \rho P_o 10^{(al_f + 2L_{coupler})/10} \quad (3)$$

$I_o$  is the current at the output of photodetector, where  $l_f$  is the length of fiber link,  $L_{coupler}$  is the loss of couplers (dB) at both BTS and BSC,  $\rho$  is the photodetector responsivity (A/W),  $P_{thm} = \langle t \rangle^2 B$  is thermal noise power. For example, the equivalent input noise current density,  $\langle t \rangle = 5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  is the effective RMS receiver noise current,  $P_{shot} = 2qI_o B$  is shot noise power,  $P_{RIN} = (RIN)I_o^2 B$  is relative intensity noise power and

$$P_{clip} = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{2}{\pi}} I_o^2 \mu^5 \exp\left(-\frac{1}{2\mu^2}\right) \quad (4)$$

is clipping noise power per channel (W), where  $\mu = \sqrt{Nm_o^2/2}$  is the RMS modulation index of  $N$  multiple signals (dimensionless). When all the  $N$  channels are assumed to have the same modulation index,  $m_o$ , which means that the received signal power levels at the antenna of BTS are equal for all the frequency channels. This can be achieved if the transmission powers of users' handsets are controlled via a suitable power control

Fig. 4 Received carrier-to-noise ratio at the BTS



versus the distance with difference frequency band.

scheme.  $P_{IMD}$  is the noise power due to intermodulation distortion (IMD) caused by the non-linearity of the laser diode. The total IMD power of the center channel, on which the largest

number of the deleterious third order IMD terms fall, is

$$P_{IMD} = (3/8)(N^2 - 2N + 1)(I_o^2 a_3^2 m_o^6 / 2) \quad (5)$$

Note that  $(3/8)(N^2 - 2N + 1)$  is the number of third order IMD terms on the center channel, while  $I_o^2 a_3^2 m_o^6 / 2$  is the noise power of each third order IMD term. The results in Fig. 4 are illustrated the received CNR using equation (1) and (2). The CNRs at the BSC for two different techniques. CNR with coaxial cable decreases sharply as the length of the link, Length, increases, whereas CNR with SCMOL decreases very slowly, it is almost constant over 6km link length. Therefore, for short distance, coaxial cable must be used in the access network for links shorter than 0.618/1.4 km for 1800/900 system band with CNR > 18dB (depending on the loss of coaxial cable used). The results suggest that the access network of future microcellular may consist of coaxial cable for short links (distribution cable) and fiber for longer links (feeder fiber).

### III. Dynamic range and costs

Total coax/fiber count depends on microcell radius  $r$ , splitting ratio  $n$  and service area radius  $R$ . as shown in Fig. 2, the radius of a unit cell is

$\sqrt{nr}$  since an  $n$  microcell forms a unit cell. The area of a microcell and a unit cell are  $3\sqrt{3}r^2/2$

and  $3\sqrt{3}nr^2/2$ , respectively. Provided a signal combiner is located in the center of a unit cell and microcells are distributed continuously in a unit cell, the total length of distribution cable in a unit cell  $L_d$  is calculated approximately as [3]

$$L_d \approx \frac{2}{3\sqrt{3}r^2} \int_0^{\sqrt{nr}} 2\pi l_d l_d dl_d = \frac{4\pi}{9\sqrt{3}} n^{3/2} r \quad (6)$$

Assuming the BSC/MSC located in the center of the service area and unit cells are distributed continuously in a service area, the total length of feeder fiber in a service area  $L_f$  is obtained approximately as

$$L_f \approx \frac{2}{3\sqrt{3}nr^2} \int_0^R 2\pi l_f l_f dl_f = \frac{4\pi R^3}{9\sqrt{3}nr^2} \quad (7)$$

Since the number of unit cells in the service area is  $(R/r)^2/n$ , the total length of distribution cable and feeder fiber in the service area is  $L_{HDS} = L_d + L_f$  For the single star architecture, the total length of optical fiber  $L_{SS}$  is obtained approximately as

$$L_{SS} \approx \frac{2}{3\sqrt{3}r^2} \int_0^R 2\pi l_f l_f dl_f = \frac{4\pi R^3}{9\sqrt{3}r^2} \quad (8)$$

The calculated  $L_{HDS}/L_{SS}$  show in Fig. 5 that the ratio decreases as splitting ratio  $n$  increase. On the other hand, when  $r/R$  is large, the contribution of distribution cable becomes dominant for a large splitting ratio  $n$ . As a result  $L_{HDS}/L_{SS}$  decreases for a small splitting ratio and increases for a large splitting ratio. It noted that there exists an optimum splitting ratio  $n$  that will minimize the  $L_{HDS}/L_{SS}$ . The optimum splitting ratio  $n_o$  is obtained from Eq. (9) as

$$n_o = \left( \frac{2R}{r} \right)^{2/3} \quad (9)$$

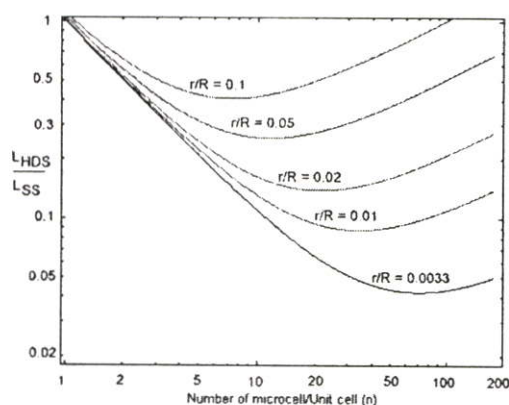


Fig. 5 Reduction ratio of total link length for the splitting ratio.

Fig. 6 Optimum splitting versus  $r/R$  ratios

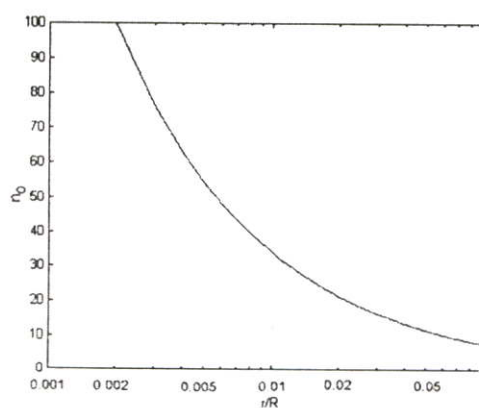
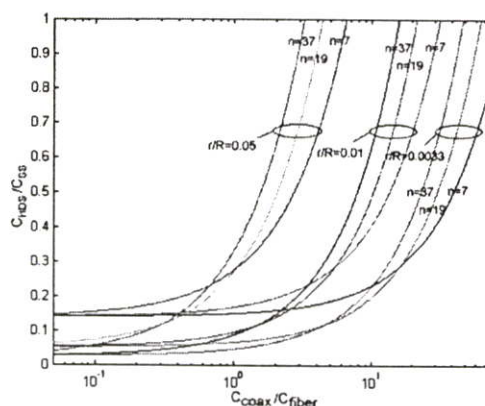


Fig. 7 The link length cost ratio versus the cost of coax to fiber ratios with difference  $n$ .



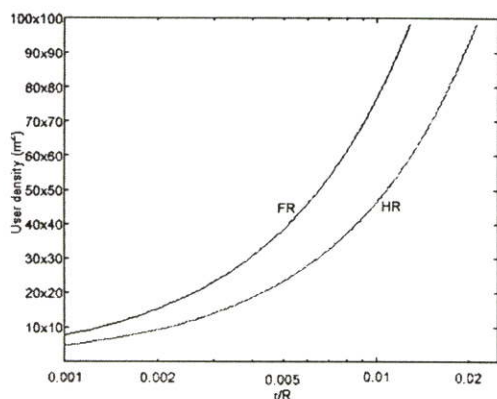
Where the ratio of microcell radius to service area radius  $r/R$ , is small, the contribution of feeder fiber becomes dominant in the total length. The  $n_o$  are shown in Fig. 6 can be computed using Eq. (9)

The link length cost, it is not only depend on the length of both linking type but also the cost ratio. Fig. 7 are depicted in this term to show more clearly.

Fig. 7 shows three different  $r/R$ 's computed with three different  $n$  term. It should be noted that from these curves is that a large number  $n$  for big cities, corresponded with Fig. 5, but increasing the  $C_{coax}/C_{fiber}$  ratio, then an optimum  $n$  will require less number of microcell per unit cell for giving lower link cost. This is because the distribution cable cost becomes the dominant component. Only link length cost comparison is considered. However, it is an alternative for network planning where all of components are including by the cost of repeater amplifier, fiber optic transceivers, radio frequency transceivers, connectors, and other installation device, these are major detail in further research.

#### IV. User Requirements

Link length costs, it does not seem to be an only major limitation, however, since the erlang capacity of the proposed network seems more than enough for the currently envisioned cost. The 200 KHz band of each cell gives 1 frequency channel and provides 8/16 traffic channels with half rate/full rate transmission. The Erlang capacity of each cell will be 3.62/9.82 Erlang for 2% blocking probability. When the average erlang of each mobile station is 0.033 Erlang, then the number of total mobile Fig. 8 User density per meters square versus  $r/R$  ratios with two different transmission rate(half rate/full rate transmission)



subscribers who can be served by each microcell is 110/297 users. The mobile subscriber density in  $r$  meter radius cell of this 110/297 users is one subscriber per every square meters. When the service area radius,  $R$ , is 45 km, as show in Fig. 8. In this Figure for define an optimize microcell radius  $r$  with user requirements and growing user demand in the future.

## V. Conclusion

An access network architecture is proposed for business areas and future network on the capabilities and limitations of coax and fiber optics technologies in an effort to minimize the cost of access network, with the optimum conditions, Erlang capacity, number of microcell per unit cell when the cell size is small. The results indicate that the required number of laser diodes, photodetectors and amount of total link length will be reduced by  $n$  times proportionally with Hybrid Double Star network. For example, when microcell radius and service area radius are 150 m and 45 km,  $n$  is 7, then coaxial cable does provide sufficiently CNR, the total link length is reduced to only 15.17% and 50% of distribution cable reduced with Fig.2 (c) unit cell structure, the available traffic increases from 659.9/1292.1 Erlang (with old macrocells in Fig. 1) to 1016.2/2056.3 Erlang for 2% blocking probability. The result of integrated microcell and macrocell in the instance area, the system allows the user with higher speed moving than individual microcellular systems.

## Acknowledgement

This research was supported by the National Science and Technology Development Agency (NSTDA) under the career development award and local graduate scholarship program.

## References

- [1] H. Jung and Ozan K.Tonguz "Coax/Fiber Hybrid Access Network for Microcellular Personal Communication Systems," IEICE Trans, Commun, vol. E79-B, no. 7, pp. 932-938, July 1996
- [2] Shibutani. M. et al, "Optical fiber feeder for microcellular mobile communication systems," IEEE J. Selected Areas in Communications, Sep. 1993
- [3] K. Kumozaki "A Fiber-Optic Passive Double Star Network for Microcellular Radio Communication Systems Applications," IEICE Trans, Commun, vol. E76-B, no. 9, Sep 1993

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย ทศนัย บรรลือ
วัน เดือน ปี เกิด	30 มกราคม พ.ศ. 2519
สถานที่เกิด	จังหวัด อุบลราชธานี
อายุ	26 ปี
การศึกษา	สำเร็จการศึกษา อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา เทคโนโลยีโทรคมนาคม จาก พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2541 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. T. Banlue, P. Mruetusatorn and S. Noppanakeepong, "Hybrid Double Star Network for Microcellular Mobile Communication System" Malaysia, Student Conference Research and Development (SCORed2001)., February 20-21, 2001.
2. ทศนัย บรรลือ สมสุดา เกิดดิษฐ์ สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ "โครงข่ายผสมแบบสตาร์สำหรับ เซลขนาดเล็กระบบการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่" การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 1 หน้า 39 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 10-11 มิถุนายน 2543