การประเมินทรูพุทระบบโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีโดยวิธีสลีพคอนโทรล

SYSTEM THROUGHPUT EVALUATION FOR HETEROGENEOUS CELLULAR NETWORKS BY SLEEP CONTROL SCHEME

ประภัสสร ไพวิทยาพร
PRAPASSORN PHAIWITTHAYAPHORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561
KMITL-2018-EN-M-010-033

การประเมินทรูพุทระบบโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีโดยวิธีสลีพคอนโทรล

SYSTEM THROUGHPUT EVALUATION FOR HETEROGENEOUS CELLULAR NETWORKS BY SLEEP CONTROL SCHEME

ประภัสสร ไพวิทยาพร

PRAPASSORN PHAIWITTHAYAPHORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-010-033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYSTEM THROUGHPUT EVALUATION FOR HETEROGENEOUS CELLULAR NETWORKS BY SLEEP CONTROL SCHEME

PRAPASSORN PHAIWITTHAYAPHORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-EN-M-010-033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประเมินทรูพุทระบบโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีโดยวิธีสลีพคอนโทรล
Thesis Title System Throughput Evaluation for Heterogeneous Cellular Networks by Sleep Control Scheme
นักศึกษา นางสาวประภัสสร ไพวิทยาพร
รหัสประจำตัว 57601449
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-010-033

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กฤษณ์	อ่างแก้ว	
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวภาค	
ผศ.ดร.พิเชฐ	ม่วงนวล	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกูล	
รศ.ดร.พิสิฐ	บุญศรีเมือง	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินทรูพุทระบบโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี โดยวิธีสลีพคอนโทรล
นักศึกษา	นางสาวประภัสสร ไพวิทยาพร
รหัสนักศึกษา	57601449
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันแนวคิดโครงข่ายไร้สายที่มีความหลากหลายทางเทคโนโลยี Heterogeneous Networks (HetNets) ได้รับการนำเสนอเป็นวิธีทางเลือกในการให้บริการพื้นที่ที่ครอบคลุมมากกว่าและความจุที่มากกว่าสำหรับเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ ในแนวคิดของ HetNets สถานีฐานขนาดเล็ก (Small Base Station) จำนวนมากถูกใช้งานโดยทำการติดตั้งภายในพื้นที่ให้บริการของสถานีฐานมาโคร (Macro Base Station) อย่างไรก็ตามการใช้งานของสถานีฐานขนาดเล็กจำนวนมากในพื้นที่ให้บริการของสถานีฐานมาโครส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงาน (Power Consumption) และการลดลงของประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy Efficiency) ในดาวน์ลิงค์ของเครือข่ายเซลลูล่าร์ เพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีลดการใช้พลังงานโดยการจำลองสถานะการใช้งานของสถานีฐานขนาดเล็กให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน (Sleep Mode) บนพื้นฐานการพิจารณาจากทรูพุทของสถานีฐานขนาดเล็ก (Cell Throughput) ในโครงข่ายไร้สายที่มีความหลากหลายทางเทคโนโลยี วิธีที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ อัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็ก (Cell Capacity Ratio) ถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจสำหรับการจำลองสถานะการใช้งานของสถานีฐานขนาดเล็กให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน จากผลการจำลอง วิธีที่นำเสนอสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและทรูพุทของทั้งระบบได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิมคือการนับจำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานนั้นๆเป็นเกณฑ์ในการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	System Throughput Evaluation for Heterogeneous Cellular Networks by Sleep Control Scheme
Student	Miss Prapassorn Phaiwitthayaphorn
Student ID.	57601449
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Pisit Boonsrimuang

ABSTRACT

Recently, the concept of heterogeneous networks (HetNets) has been proposed as an alternative solution to provide higher coverage and capacity for cellular networks. In HetNets concept, many of small base stations (SBSs) are employed in the existing cell of macro base stations (MBSs) to increase the coverage and system capacity. However, the employment of many SBSs in the existing macro cells would causes the increase in power consumption with decreasing the energy efficiency in downlink cellular networks. To solve this problem, this paper proposes a cell throughput based sleep control scheme for the SBSs in HetNets. In the proposed scheme, the cell capacity ratio for the SBSs is employed as decision criteria to put the SBSs into sleep state. From various simulation results, the proposed scheme can achieve better energy efficiency and better system throughput than the conventional schemes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี เนื่องจากได้รับความกรุณา คำแนะนำและคำปรึกษาอย่างดียิ่งจาก รศ.ดร.พิสิฐ บุญศรีเมือง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

I would like to express my gratefulness and appreciation to Prof. Dr. Kazuo Mori in department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Mie University, Japan, for his valuable suggestions and constant support.

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้คำแนะนำต่างๆ ให้ข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งและกัลยาณมิตรคนสำคัญของข้าพเจ้าที่คอยสนับสนุนในทุกๆเรื่องและเป็นกำลังใจที่ดีให้ข้าพเจ้าเสมอมา

ประภัสสร ไพวิทยาพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	4
บทที่ 2 ระบบโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี และทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย	6
2.1 เครือข่ายเซลล์ลูลาร์	6
2.2 โครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี	8
2.2.1 สถานีฐานมาโคร	8
2.2.2 สถานีฐานไมโคร	9
2.2.3 สถานีฐานพิโค	9
2.2.4 สถานีฐานเฟมโต	9
2.2.5 อุปกรณ์ทวนสัญญาณ	10
2.3 พื้นฐานโครงข่ายแอลทีอี	10
2.3.1 โอเอฟดีเอ็ม	11
2.3.2 ชั้นกายภาพ	13
2.3.3 สัญญาณอ้างอิง	16
2.3.4 เฟรมย่อย MBSFN	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.5 แนวคิดการลดสัญญาณอ้างอิง 18
2.4 ทฤษฎีความจุของช่องสัญญาณ 18
2.4.1 ทฤษฎี Shannon..... 19
2.5 ทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุ..... 19
2.5.1 การแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง..... 20
2.5.2 การแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมใช้งานจริง..... 22
2.6 การจางหายของสัญญาณ..... 23
2.6.1 การจางหายขนาดใหญ่..... 24
2.6.2 การจางหายขนาดเล็ก..... 25
2.7 การสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณ..... 27
2.7.1 แบบจำลองโอคูมูระ..... 28
2.7.2 แบบจำลองฮาตะ..... 30
2.7.3 แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีอย่างง่าย..... 31
2.7.4 แบบจำลองรวมการสูญเสียเชิงวิถีและชาโดว์อิง..... 32
2.8 สัญญาณรบกวน 33
2.8.1 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิ 33
2.8.2 การแทรกสอดในช่องสัญญาณเดียวกัน..... 34
2.8.3 การแทรกสอดในช่องสัญญาณต่างกัน 36
2.9 การเลือกสถานีฐานเพื่อทำการเชื่อมต่อ..... 36
2.10 การแฮนด์โอเวอร์ 37
2.10.1 พื้นฐานการแฮนด์โอเวอร์ 38
2.10.2 การแฮนด์โอเวอร์แบบฮาร์ด 39
2.10.3 การแฮนด์โอเวอร์แบบซอฟท์ 40
2.11 แบบจำลองการใช้พลังงานในเครือข่าย..... 40
2.12. การกระจายของผู้ใช้งาน 42

บทที่ 3 การประเมินทรูพุทระบบโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีโดยวิธีสลีพคอนโทรล..... 43
3.1 แบบจำลองที่ใช้ในระบบ..... 43
3.2 การลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบเดิม..... 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 การลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบที่นำเสนอ..... 47

บทที่ 4 การหาค่าประสิทธิภาพของระบบ..... 52
4.1 วิธีการที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ..... 52
4.1.1 วิธีการที่ใช้ประเมินประสิทธิการใช้พลังงานทั้งหมดของระบบ..... 52
4.1.2 วิธีการที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพทรูพุททั้งหมดของระบบ..... 53
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ..... 53
4.3 อัตราการใช้พลังงานทั้งหมดของสถานีฐานขนาดเล็กในระบบ..... 54
4.4 ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในการรับส่งข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธีเดิม..... 55
4.5 ประสิทธิภาพของทรูพุททั้งหมดของระบบเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธีเดิม..... 56
4.6 ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานรวมทั้งหมดในระบบเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธีเดิม.... 57

บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 59

เอกสารอ้างอิง..... 60
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบ..... 63
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... 73
ประวัติผู้เขียน..... 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\mu_{\psi_{dB}}$) ของชาโดว์อิง	25
2.2 ค่ากำลังการสูญเสียเชิงวิถีที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม	32
2.3 ขนาดคลัสเตอร์และอัตราส่วนของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่	36
2.4 แบบจำลองกำลังไฟฟ้าในแต่ละประเภทของสถานีฐาน	41
4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบ	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงข่ายเซลล์ลูลาร์	6
2.2	โครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี	10
2.3	คลื่นพาห์ย่อยที่มีคุณสมบัติความเป็นอิสระต่อกัน	11
2.4	โครงสร้างของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มในแกนเวลา	12
2.5	โครงสร้างของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มในแกนความถี่	13
2.6	โครงสร้างของเฟรมวิทยุที่ถูกแบ่งเป็นเฟรมย่อยและช่องเวลา	14
2.7	โครงสร้างเฟรมวิทยุแบบ FDD	15
2.8	โครงสร้างเฟรมวิทยุแบบ TDD	15
2.9	ตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิงในเฟรมวิทยุแอลทีอี	17
2.10	เฟรมวิทยุแอลทีอีที่กำหนด 6 MBSFN ในเฟรมย่อย	18
2.11	การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดไอโซโทรปิก	21
2.12	ประเภทของสายอากาศ	22
2.13	ปรากฏการณ์แพร่กระจายของคลื่น	23
2.14	การประมาณกำลังเฉลี่ยของสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีการสูญเสีย	23
2.15	พารามิเตอร์ของช่องสัญญาณที่มีการสูญเสีย	24
2.16	การเดินทางของสัญญาณในช่องสัญญาณเฟดดิงหลายวิถี	26
2.17	การเกิดการกระจายดอปเปลอร์	26
2.18	ความสูงของเครื่องส่งสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ	28
2.19	การลดทอนสัญญาณในสภาพแวดล้อมบนพื้นดินของแบบจำลองโอคูมูระ	29
2.20	ความสูงของเสาอากาศและแฟคเตอร์อัตราขยาย	29
2.21	ลักษณะการสูญเสียของสัญญาณแบบต่างๆ	32
2.22	กราฟแสดงความหนาแน่นของสัญญาณรบกวน	34
2.23	การแทรกสอดสัญญาณ	34
2.24	การนำความถี่กลับมาใช้ใหม่สำหรับเซลล์ที่อยู่ติดกัน	35
2.25	การแฮนด์โอเวอร์หลังจากทำการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐาน	39
2.26	แบบจำลองการใช้กำลังไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับโหลด	41
2.27	พลังงานรวมสำหรับสถานีฐานประเภทต่างๆ	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แบบจำลองของระบบ	44
3.2 การลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบเดิม	46
3.3 การลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบที่นำเสนอ	47
3.4 โฟลว์ชาร์ตแสดงขั้นตอนการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบที่นำเสนอ	50
4.1 อัตราการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของสถานีฐานขนาดเล็กในระบบ	55
4.2 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมทั้งหมดต่อการเพิ่มจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็ก	56
4.3 ทรูพุทของระบบต่อการเพิ่มจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็ก	57
4.4 การใช้พลังงานทั้งหมดของระบบต่อการเพิ่มจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็ก	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์และความสำคัญของปัญหา

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ความต้องการในการใช้บริการสื่อสารแบบไร้สายมีเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่เพียงแต่การใช้บริการโทรศัพท์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงการใช้บริการแบบวิดีโอสตรีมมิ่งและดาต้าแอพพลิเคชั่นต่างๆ ทางผู้ให้บริการจึงได้มีการพัฒนาเครือข่ายเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อแก้ปัญหาปริมาณทราฟฟิกสูง ตามสถานที่ให้บริการในตึกหรืออาคารสำนักงาน ห้างสรรพสินค้าและสถานีรถไฟต่างๆ โดยสถานีฐานขนาดเล็ก (Small Base Stations: SBSs) จะถูกนำมาใช้งานเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะช่วยเสริมระบบเครือข่ายของสถานีฐานมาโคร (Macro Base Stations: MBSs) และแนวโน้มการใช้บริการเหล่านี้ได้มีการใช้งานมาอย่างกว้างขวางในเครือข่ายการเข้าถึงแบบไร้สาย อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวข้างต้นนี้ได้รับความสนใจจากสาธารณะชนเป็นอย่างมาก เนื่องจากส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานทั้งหมดในอุตสาหกรรมเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (ICT) สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมากเกินไป จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมการใช้พลังงานทั้งหมด และในขณะเดียวกันการคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครือข่ายก็มีความสำคัญมากขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการที่เพิ่มมากขึ้นและลดต้นทุนการดำเนินการ การติดตั้ง การบำรุงรักษา ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงความต้องการด้านทราฟฟิกที่เพิ่มสูงขึ้นเหล่านี้ไม่ควรส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานของเครือข่ายเพิ่มขึ้นจนเกินความจำเป็น [1] และเมื่อทำการพิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานในเครือข่ายไร้สายแบบเดิมนั้นพบว่า สถานีฐานมาโครเป็นอุปกรณ์หลักที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานสูงสุดในระบบเครือข่าย เนื่องจากบริเวณครอบคลุมนั้นจะมีการติดตั้งเฉพาะสถานีฐานมาโครเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังมีปัญหาในเครือข่ายไร้สายแบบดั้งเดิมที่จำเป็นต้องได้รับการพิจารณาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในเครือข่าย ประการแรกสถานีฐานมาโคร ได้รับการออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการในการเข้าถึงเครือข่ายสูงสุดและยังคงสถานะการใช้งานอยู่เสมอ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ยากที่จะประหยัดพลังงานโดยการเปลี่ยนสถานะการทำงานบางสถานีฐาน ประการที่สองสถานีฐานมาโคร มีการดำเนินงานแบบสแตติกและด้วยเหตุนี้จึงขาดความสามารถในการปรับตัวเมื่อมีทราฟฟิกน้อยเกิดขึ้น ประการที่สามปริมาณทราฟฟิกบนเครือข่ายมักจะเปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่และเวลาการให้บริการซึ่งทำให้เกิดปัญหาเรื่องความไม่สมดุลของโหลด

โครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี (Heterogeneous Cellular Network) ถือเป็นชื่อเรียกขานรวมของเทคโนโลยีสื่อสารที่ยกระดับการทำงานของอุปกรณ์สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครอบคลุมทั้งเทคโนโลยีสามจี สี่จีแอลทีอี ไวไฟ และมาพร้อมกับสถาปัตยกรรมโครงข่ายที่ประกอบด้วยสถานีฐานหลายประเภทใช้งานร่วมกัน เช่น สถานีฐานขนาดเล็กที่สามารถเพิ่มความสามารถและประสิทธิภาพของระบบได้ดีกว่าเครือข่ายไร้สายแบบดั้งเดิมที่มีการใช้งานเฉพาะสถานีฐานมาโครเพียงอย่างเดียว [2-3] ทั้งนี้สถานีฐานขนาดเล็กยังสามารถลดปริมาณการรับส่งข้อมูลจำนวนมากที่สถานีฐานมาโครด้วยกำลังส่ง(Transmission Power) ที่น้อยกว่า รวมถึงสามารถเพิ่มความจุของช่องสัญญาณและแก้ไขปัญหารัศมีการครอบคลุมของสัญญาณที่สถานีฐานมาโครเข้าไม่ถึงสำหรับผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม หากมองในด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน สถานีฐานขนาดเล็กยังไม่สามารถทำงานได้ดีเท่าที่ควร เนื่องจากการใช้งานหลายสถานีฐานในปริมาณมากเข้าด้วยกัน ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานมากขึ้น และสถานีฐานขนาดเล็กยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการในการเข้าถึงเครือข่ายได้ดีเท่าสถานีฐานขนาดใหญ่ ซึ่งหมายความว่าโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีสถานีฐานขนาดเล็กบางกลุ่มที่ไม่ได้ถูกใช้งานแต่ยังคงมีสถานะพร้อมให้บริการอยู่ ดังนั้นเพื่อตอบสนองความต้องการลดการใช้พลังงานของโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอวิธีการลดการใช้พลังงานโดยรวมของระบบ โดยใช้เทคนิคสลีพคอนโทรล (Sleep Control) เพื่อทำการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กที่ไม่ถูกใช้งานหรือมีความจำเป็นน้อยที่สุดในเครือข่ายจากสถานะพร้อมใช้งาน (Active State) เป็นสถานะประหยัดพลังงาน (Sleep State) โดยทำการพิจารณาทรูพุทของสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเงื่อนไขในการเปลี่ยนสถานะการทำงานเพื่อที่จะยังคงรักษาทรูพุทและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบให้ได้มากที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการใช้งานของสถานีฐานขนาดเล็กอยู่ในระดับต่ำ [4]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

การเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงานเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถตอบสนองความต้องการที่จะลดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมในระบบ เนื่องด้วยความต้องการในระบบสื่อสารมากขึ้น จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงทรูพุทและประสิทธิภาพการใช้พลังงานในขณะที่ระบบได้มีการใช้เทคนิคสลีพคอนโทรลเพื่อเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็ก โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาปัญหาที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มจำนวนสถานีฐานขนาดเล็ก นอกจากจะเป็นการเพิ่มความจุของช่องสัญญาณการสื่อสารในการใช้งานให้กับระบบแล้วนั้น การเพิ่มจำนวนสถานีฐานขนาดเล็กนี้ยังนำไปสู่การใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จึงได้หาวิธีการลดการใช้พลังงานโดยรวมทั้งหมดของระบบโดยที่ยังคงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและทรูพุทของระบบโดยการใช้วิธีสลีพคอนโทรลมาควบคุมสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็ก ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เนื่องจากระบบโทรคมนาคมในปัจจุบันมุ่งเน้นการสื่อสารและส่งผ่านข้อมูลแบบดาต้ามากขึ้น การพยายามเพิ่มจำนวนสถานีฐานขนาดเล็กจำนวนมากในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร เพื่อเพิ่มความจุของช่องสัญญาณ และพื้นที่ครอบคลุมจึงเป็นที่นิยม แต่เนื่องจากในทางปฏิบัตินั้น จะมีจำนวนการใช้งานสถานีฐานเหล่านี้ในแต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความแออัดของพื้นที่ที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งหากในช่วงเวลาที่สถานีฐานใดๆมีการใช้งานน้อย เราสามารถที่จะควบคุมการทำงานของสถานีฐานนั้นๆให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน (Sleep Mode) โดยมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคือในขณะที่การใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดลดลงนั้น ระบบต้องยังคงรักษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานและทรูพุทไว้เช่นกัน

วิธีการเลือกสถานีฐานขนาดเล็กให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน (Sleep Mode) แบบเดิมจะทำการพิจารณาจำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานนั้นๆ โดยมีเงื่อนไขว่า หากจำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กใดๆ N_{con} มีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ที่ถูกกำหนดไว้ N_{sleep} สถานีฐานขนาดเล็กนั้นๆจะถูกเปลี่ยนสถานะการทำงานให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานโดยรวมของระบบได้ [5]

ในการแก้ปัญหาการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบที่มากขึ้นโดยใช้วิธีพิจารณาจากจำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในวิธีเดิมนั้น ส่งผลให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy Efficiency) และค่าทรูพุท (System Throughput) ในระบบเป็นอย่างมาก จากปัญหานี้เองจึงได้มีแนวคิดในการเสนอวิธีการลดการใช้พลังงานของระบบโดยพิจารณาจากอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็ก R^i_{cell} ถ้าสถานีฐานขนาดเล็กใดๆมีอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการส่งข้อมูลทั้งหมดของสถานีฐานขนาดเล็กน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าเทรสโฮลด์ α (Threshold) สถานีฐานขนาดเล็กนั้นๆจะถูกเปลี่ยนสถานะการทำงานให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน จากนั้นผู้ใช้บริการเดิมที่เชื่อมต่ออยู่กับสถานีฐานขนาดเล็กที่อยู่ในสถานะประหยัดพลังงานนั้น จะถูกบังคับให้เกิดการแฮนด์โอเวอร์ (Handover) ไปเชื่อมต่อกับสถานีฐานใหม่ (อาจจะเป็นสถานีฐานขนาดเล็ก หรือสถานีฐานขนาดใหญ่) ขึ้นอยู่กับความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ โดยวิธีการนี้สามารถแก้ปัญหาการใช้พลังงานที่มากขึ้นของระบบ และยังคงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและค่าทรูพุทในระบบได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีแบบเดิม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

แนวคิดการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบในวิธีเดิมนั้น หากทำการพิจารณาเฉพาะจำนวนผู้ใช้งานที่ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็ก จะพบว่าจำนวนผู้ใช้งานบางรายที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กนั้นๆอาจอยู่ในตำแหน่งที่มีความสามารถในรับสัญญาณได้ดี ส่งผลให้ค่าทรูพุทของสถานีฐานนั้นๆสูง ในขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจมีจำนวนผู้ใช้งานเชื่อมต่ออยู่น้อยกว่าค่าคงที่ที่กำหนด N_{sleep} สถานีฐานนั้นๆจึงต้องถูกเปลี่ยนสถานะการทำงานให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน จากนั้นจำนวนผู้ใช้งานจะถูกบังคับให้เกิดการแฮนโอเวอร์ ไปเชื่อมต่อกับสถานีฐานใหม่ข้างเคียง ซึ่งอาจจะได้รับสัญญาณที่แย่กว่าเดิม ส่งผลให้ค่าทรูพุทโดยรวมของระบบลดลง

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยการใช้เทคนิคสลีพคอนโทรล ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน(Sleep Mode) โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็ก R^{i}_{cell} วิธีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบที่นำเสนอนี้มีประสิทธิภาพของการใช้พลังงานและมีค่าทรูพุทของระบบที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการลดการใช้พลังงานแบบวิธีเดิมภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกัน

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอวิธีการลดการใช้พลังงานของระบบ โดยพิจารณาความสำคัญของสถานีฐานขนาดเล็กแต่ละแห่งจากทรูพุทของสถานีฐานนั้นๆ แล้วใช้เทคนิคสลีพคอนโทรล มาควบคุมการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็ก ทั้งนี้ได้กำหนดค่าพลังงานของสถานีฐานเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อ แต่จะลดน้อยลงเมื่ออยู่ในสถานะสลีพ และสถานะที่ไม่มีผู้ใช้งานเชื่อมต่อ เพื่อประมวลผลประสิทธิภาพการทำงานของเทคนิคที่นำเสนอ ผู้เขียนได้ทำการใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองระบบในการจำลองรูปแบบของโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีและใช้เทคนิคสลีพคอนโทรล โดยผลที่ได้จากการจำลองแสดงถึงการเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมในระบบ (Power Consumption) และแสดงผลประสิทธิภาพทรูพุทของระบบ (System Throughput) รวมถึงแสดงผลประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบ (Energy Efficiency) เปรียบเทียบกับวิธีที่ไม่ได้ใช้เทคนิคสลีพคอนโทรลในระบบพื้นฐานและวิธีที่ใช้เทคนิคสลีพคอนโทรลแบบเดิม

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์เล่นนี้ได้จัดแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 จะกล่าวถึงวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารตั้งแต่อดีตจนถึงยุคปัจจุบัน โครงข่ายไร้-สายหลายเทคโนโลยีพื้นฐาน และทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย การรับส่งคลื่นสัญญาณใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบแอลทีอี ที่ประกอบด้วย การเลือกสถานีฐานที่จะติดต่อ ทฤษฎีการลดทอนของสัญญาณ การแฮนด์โอเวอร์รวมถึงแบบจำลองการใช้พลังงานในเครือข่าย เป็นต้น

บทที่ 3 จะกล่าวถึงการประเมินทรูพุทระบบโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีโดยวิธีสลีพคอนโทรล ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็ก R_{cell}^{i}

บทที่ 4 ผลของการหาประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ โดยกล่าวถึงบทสรุปของวิธีสลีพคอนโทรลที่นำเสนอเปรียบเทียบกับวิธีที่ไม่ได้ใช้เทคนิคสลีพคอนโทรลในระบบพื้นฐานและวิธีที่ใช้เทคนิคสลีพคอนโทรลแบบเดิม

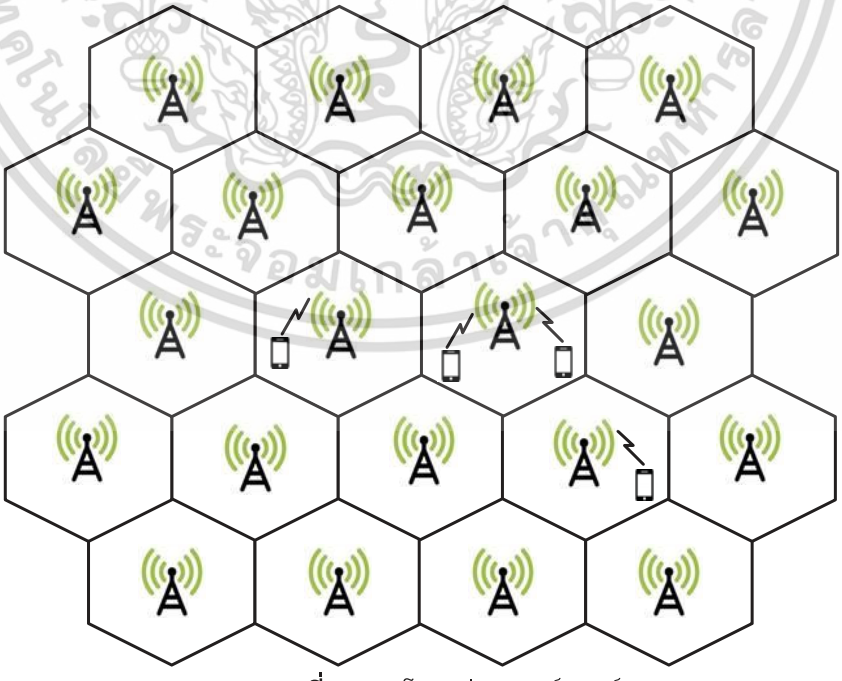
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

โครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีเป็นโครงข่ายที่ประกอบด้วยโหนดการเข้าถึงหลายประเภท โดยโหนดการเข้าถึงนี้มีความแตกต่างกันในเทอมของเทคโนโลยีการเข้าถึงเครือข่ายวิทยุ กำลังส่ง รวมไปถึงขนาดพื้นที่ครอบคลุมที่แตกต่างกัน นอกจากนี้โครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยียังแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเพิ่มขีดความสามารถของเครือข่ายแอลทีอี โดยในบทนี้จะทำการอธิบายถึงโครงสร้างของโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีแอลทีอี โดยมีโหนดการเข้าถึงที่แตกต่างกันในด้านของกำลังส่งและขนาดพื้นที่ครอบคลุม นอกจากนี้ยังอธิบายโครงสร้างทฤษฎีความจุของช่องสัญญาณ และทฤษฎีการแพร่กระจายของสัญญาณ รวมไปถึงทฤษต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 โครงข่ายเซลล์ลูลาร์

ปัจจุบันนี้ระบบไร้สายที่มีการใช้งานมากที่สุดคือเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ เครือข่ายโทรศัพท์มือถือประกอบด้วยผู้ใช้งานโทรศัพท์มือถือจำนวนมาก ที่สามารถใช้ได้ในรถ ตึก อาคาร บนท้องถนน รวมไปถึงแทบจะทุกพื้นที่ต่างๆ และยังมีสถานีฐานตามจุดต่างๆครอบคลุมพื้นที่ให้บริการกับผู้ใช้งาน พื้นที่ให้บริการที่สามารถติดต่อสื่อสารกับสถานีฐานได้เรียกว่าเซลล์ เซลล์ในที่นี้มักใช้อธิบายถึงพื้นที่หกเหลี่ยมที่มีสถานีฐานอยู่ตรงจุดศูนย์กลาง และพื้นที่นี้จะเรียงต่อกันเป็นตาข่ายดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงข่ายเซลล์ลูลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิวัฒนาการของเครือข่ายโทรศัพท์มือถือได้ดำเนินการมาถึงยุคที่สี่แล้ว ยุคสมัยของเครือข่ายอ้างอิงจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นฐานของการให้บริการ ยุคสมัยที่หนึ่ง ใช้ระบบส่งสัญญาณแบบอนาล็อก (Analog) เป็นการออกแบบช่วงแรกก่อนที่จะมีการเปลี่ยนมาใช้ระบบส่งสัญญาณแบบดิจิตอลอย่างกว้างขวาง

ในยุคสมัยที่หนึ่ง ช่องสัญญาณดาวน์ลิงค์ถูกใช้สำหรับส่งสัญญาณจากสถานีฐานไปสู่ผู้ใช้โทรศัพท์มือถือ โดยความถี่จะอยู่ในช่วง 869-894 MHz การส่งสัญญาณจากผู้ใช้โทรศัพท์มือถือไปสู่สถานีฐานเกิดบนช่องสัญญาณย้อนกลับ (ช่องสัญญาณอัพลิงค์) โดยใช้ความถี่อยู่ในช่วง 824-849 MHz ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเป็นแบบเอฟดีเอ็มเอ (Frequency Division Multiple Access : FDMA) โดยการแบ่งช่องความถี่ออกเป็นความถี่ย่อยหลายๆช่อง แล้วใช้สัญญาณวิทยุในการส่งคลื่นเสียงไปยังสถานีรับส่งสัญญาณ ผู้ใช้โทรศัพท์มือถือจะสามารถใช้บริการโทรศัพท์ได้เฉพาะในช่องความถี่ที่ว่างอยู่ และหลังจากที่มีผู้ใช้งานมากขึ้น ระบบก็ไม่รองรับสัญญาณได้

ในยุคสมัยที่สอง มีการพัฒนาระบบส่งสัญญาณแบบอนาล็อกเป็นดิจิตอลหลายรูปแบบเช่น ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบทีดีเอ็มเอ (Time Division Multiple Access : TDMA) โดยแบ่งช่องสัญญาณรวมออกเป็นช่วงเวลาเล็กๆ และการมัลติเพล็กซ์แบบซีดีเอ็มเอ (Code Division Multiple Access : CDMA) โดยการส่งสัญญาณของหลายๆข้อความออกไปพร้อมกันในช่วงความถี่ของคลื่นพาห์เดียวกันแบบการเข้ารหัสต่างๆ เป็นผลทำให้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีในยุคสมัยที่หนึ่งนั้น ยุคสมัยที่สอง มีความสามารถในการรับส่งสัญญาณมากขึ้น การให้บริการที่ดีขึ้นรวมไปถึงการโรมมิ่งที่ดีขึ้น

ในยุคสมัยที่สามนี้ ถือเป็นยุคสมัยที่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบโทรศัพท์พอสมควร โดยทำการพัฒนาบนพื้นฐานของมาตรฐาน IMT-2000 ภายใต้กลุ่มของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) เครือข่ายสามจีนี้ ช่วยให้ผู้ให้บริการสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้มากขึ้นในขณะเดียวกันยังสามารถเพิ่มความจุของเครือข่ายที่ดีขึ้นด้วยความสามารถในการรับชมภาพที่คมชัดและการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งข้อมูลอย่างน้อย 2 Mbps

ในยุคสมัยที่สี่ มีการทดลองใช้งานเครือข่ายสี่จีครั้งแรกประสบความสำเร็จในปี 2005 ในเครือข่ายสี่จี ผู้ใช้สามารถเลือกระบบไร้สายเพื่อใช้บริการสี่จีได้ ในระบบจีเอสเอ็ม สถานีฐานจะส่งข้อความไปยังโทรศัพท์มือถือเป็นระยะๆเพื่อการสมัครรับข้อมูล อย่างไรก็ตามขั้นตอนนี้จะซับซ้อนมากขึ้นในโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีแบบสี่จีเนื่องจากความแตกต่างทางเทคโนโลยี ดังนั้นความคล่องตัวของอุปกรณ์สื่อสารเป็นความต้องการในโครงสร้างขั้นพื้นฐานของเครือข่าย เพื่อที่จะสามารถให้บริการไร้สายได้ทุกที่ทุกเวลา การเคลื่อนย้ายอุปกรณ์สื่อสารช่วยให้ผู้ใช้บริการสามารถเดินทางข้ามขอบเขตการให้บริการของเครือข่าย มี2ประเด็นที่สำคัญเมื่ออุปกรณ์สื่อสารมีการเคลื่อนที่ การจัดการตำแหน่งและการจัดการแฮนด์โอเวอร์ ในการจัดการตำแหน่งนั้นอุปกรณ์สื่อสารจะถูกติดตามและรู้ตำแหน่งโดยระบบเครือข่ายจะทำการจัดการข้อมูลของสถานีฐานที่เชื่อมต่อปัจจุบันและก่อนหน้ารวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปถึงการตรวจสอบสิทธิ์การใช้งาน ในทางกลับกันการจัดการแฮนด์โอเวอร์จะควบคุมการสื่อสารให้ดำเนินต่อไปเรื่อยๆแม้จะมีการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง

โครงการ 3GPP (Third Generation Partnership) ได้กำหนดโครงสร้างพื้นฐานของแอลทีอีแอดวานท์ในอนาคต โดยตั้งเป้าหมายค่าความถี่สูงสุด 30 bps/Hz สำหรับช่องสัญญาณดาวน์ลิงค์ และ 15 bps/Hz สำหรับช่องสัญญาณอัพลิงค์ ปรับปรุงเทคนิคการส่งผ่านข้อมูลหลายช่องสัญญาณ (MIMO) และการรับส่งข้อมูลผ่านสถานีฐานที่หลากหลายและแตกต่างกัน (CoMP) ที่ถูกยอมรับเป็นกุญแจสำคัญสำหรับแอลทีอีพร้อมกับวิธีการเข้าถึงจากหลายแห่ง

2.2 โครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี

ในปัจจุบันโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก จากความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครือข่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเครือข่ายที่มีผู้ใช้งานไม่สม่ำเสมอและปริมาณทราฟฟิกกระจัดกระจาย โครงข่ายแอลทีอีมีพื้นฐานมาจากเครือข่ายที่ประกอบด้วยสถานีฐานมาโครเพียงอย่างเดียว (Homogeneous Networks : HoNets) ต่อมาได้มีการผสมผสานเทคโนโลยีและสถานีฐานแบบต่างๆเข้าด้วยกัน (Heterogeneous Networks : HetNets) ในที่นี้จะกล่าวถึงการผสมผสานสถานีฐานมาโครเข้ากับสถานีฐานขนาดเล็กๆ ที่กระจายสัญญาณด้วยพลังงานต่ำ ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาในเรื่องจุดอับสัญญาณ ช่วยเพิ่มโอกาสการแบ่งเบาภาระการใช้งานจากสถานีฐานมาโครมายังสถานีฐานขนาดเล็กในบริเวณที่มีความหนาแน่นของทราฟฟิก และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่าย โดยแต่ละประเภทของสถานีฐานจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน

2.2.1 สถานีฐานมาโคร (Macro Base Stations)

สถานีฐานมาโครเป็นสถานที่ติดตั้งเครื่องรับ-ส่งสัญญาณ เพื่อเชื่อมต่อสัญญาณวิทยุที่อยู่ระหว่างระบบสื่อสารไร้สายและอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย โดยทั่วไปมักใช้งานในกลุ่มของการกระจายสัญญาณแบบมุม 120 องศาต่อหนึ่งเซคเตอร์ (Three Sector-Antennas) ในพื้นที่ให้บริการเครือข่ายตามเงื่อนไขทางภูมิศาสตร์ ซึ่งส่วนใหญ่นั้นจะเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมแบบรวงผึ้งและโดยพื้นที่ให้บริการทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนเล็กๆเรียกว่า เซลล์ (Cell) แต่ละเซลล์จะมีระยะครอบคลุมโดยมาตรฐานทั่วไปที่นิยมใช้มีรัศมีตั้งแต่ 250 เมตร ถึง 30 กิโลเมตรขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการลดทอนสัญญาณและความหนาแน่นของการใช้บริการ มีกำลังไฟฟ้าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อยู่ในช่วง 5 ถึง 40 วัตต์ และระยะทางระหว่างเซลล์ (Inter-Site-Distance : ISD) อยู่ในช่วงประมาณ 200 เมตรไปจนถึงหลายกิโลเมตรในพื้นที่การใช้งานหนาแน่น สถานีฐานนี้มีกำลังส่งที่แรงและมีการติดตั้งสถานีฐานอย่างมั่นคงแข็งแรง มีเสาสัญญาณรวมทั้งตัวสถานีฐานที่มีขนาดใหญ่พอสมควร และต้องมีระบบสื่อสัญญาณในการเชื่อมต่ออย่างชัดเจน การลงทุนติดตั้งนั้นจึงต้องใช้เวลาและการลงทุนมากพอสมควร อย่างไรก็ตามพื้นที่ที่ให้บริการของสถานีฐานนั้นก็อาจจะมีบางจุดที่มีสัญญาณที่ไม่ดี เช่นอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในอาคารหรือมีบางสิ่งกีดขวาง และรอยต่อระหว่างสถานีฐานจะมีสัญญาณอ่อนเพื่อให้มีสัญญาณรบกวนระหว่างสถานีฐานให้น้อยที่สุด

2.2.2 สถานีฐานไมโคร (Micro Base Stations)

สถานีฐานไมโครเป็นสถานีฐานขนาดเล็ก ถูกนำมาใช้เพิ่มช่องสัญญาณในกรณีที่มีผู้ใช้งานจำนวนมากภายในพื้นที่จำกัด เช่นงานจัดการแข่งขันกีฬา หรืองานเปิดตัวสินค้าเป็นต้น สถานีฐานไมโครมักจะติดตั้งตามเสาไฟฟ้า ตามถนนหรือตามผนังกำแพงนอกตัวอาคาร สถานีฐานไมโครในทางเทคนิคนั้นไม่แตกต่างจากสถานีฐานมาโคร เพียงแต่มีความจุของสัญญาณที่น้อยกว่า โดยทั่วไปกำลังส่งในแต่ละสถานีฐานจะถูกออกแบบขึ้นตามปริมาณการใช้งานภายในบริเวณที่เพียงพอที่จะติดต่อกับสถานีฐาน หากพื้นที่บริการมีขนาดยิ่งกว้าง กำลังส่งยิ่งต้องสูงขึ้นตามขนาดของเซลล์ ตามข้อกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานมาโครนี้ต้องมีขนาดไม่เกิน 10 วัตต์ พื้นที่ครอบคลุมอยู่ในช่วงรัศมีประมาณ 200-2000 เมตรเป็นต้น และในบางครั้งสถานีฐานไมโครนี้จะมีการใช้ระบบเสาอากาศแบบกระจาย (Distributed Antenna System : DAS) เพื่อช่วยครอบคลุมพื้นที่ให้กับบริเวณนั้นมากขึ้น

2.2.3 สถานีฐานพิโค (Pico base Stations)

สถานีฐานพิโคเป็นสถานีฐานขนาดเล็กที่ใช้พลังงานต่ำ เดิมทีมีไว้เพื่อเติมสัญญาณที่ขาดหายไปในบางจุดในพื้นที่สัญญาณของสถานีฐานมาโคร ดังนั้นการติดตั้งจึงไม่ได้มีรูปแบบแน่นอนตายตัว ขึ้นอยู่กับจุดอับสัญญาณนั้นอยู่บริเวณไหนและเป็นอย่างไร สถานีฐานพิโคจึงเป็นสถานีฐานขนาดเล็ก ที่มีกำลังส่งต่ำโดยทั่วไปประมาณ 0.3 – 5 วัตต์ ในการใช้งานบริเวณกลางแจ้งและน้อยกว่า 300 มิลลิวัตต์สำหรับที่ตั้งภายในตึกหรืออาคาร ระยะครอบคลุมประมาณ 4-200 เมตรในพื้นที่ขนาดเล็กเช่นในอาคาร ห้างสรรพสินค้าหรือสถานีรถไฟ รวมไปถึงในสนามบิน สถานีฐานพิโคเน้นการติดตั้งได้ง่ายและยืดหยุ่น แต่เมื่อมาถึงยุคที่ปริมาณของทราฟฟิกมีมากในหลายๆจุด หลายๆพื้นที่ การใช้งานสถานีฐานพิโคเพื่อรองรับทราฟฟิกนั้นก็เกิดขึ้น บางจุดที่ติดตั้งสถานีฐานพิโคนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะต้องมีสัญญาณอ่อน แต่เป็นจุดที่ต้องการการใช้งานทราฟฟิกจำนวนมากแทน

2.2.4 สถานีฐานเฟมโต (Femto base Stations)

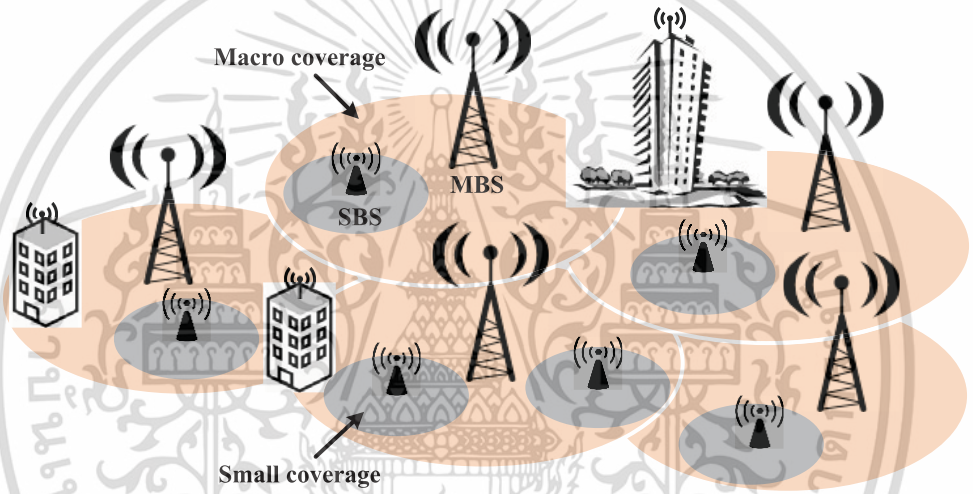
สถานีฐานเฟมโตเป็นแนวคิดสถานีฐานที่เพิ่งเกิดขึ้นในช่วงหลังเพื่อการรองรับทราฟฟิกโมบายล์บรอดแบนด์ที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก และส่วนใหญ่แล้วนั้นทราฟฟิกและการใช้งานจะเกิดขึ้นภายในตึกหรืออาคารบ้านเรือน ซึ่งมีสายโทรศัพท์(และเครื่องโทรศัพท์ประจำที่)อยู่แล้ว จึงมีแนวคิดที่จะให้สถานีฐานเป็นเพียงอุปกรณ์ของผู้ใช้บริการ (CPE) ขนาดเล็กที่ติดตั้งภายในอาคารหรือบ้านเรือนเช่นเดียวกับเร้าเตอร์ไวไฟ โดยทั่วไปแล้วสถานีฐานเฟมโตนี้จะมีระยะครอบคลุมประมาณ 10 เมตรด้วยกำลังส่งต่ำไม่เกิน 0.1 วัตต์ และเชื่อมต่อกับเครือข่ายเซลลูลาร์ด้วยเทคโนโลยีสื่อสารข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วสูงผ่านสายโทรศัพท์ (ADSL) เป็นหลัก เพื่อที่จะรองรับทราฟฟิกที่เกิดขึ้นภายในอาคารขนาดเล็กหรือบ้านเรือน มีกำลังส่งที่ต่ำเพียงพอที่จะจำกัดสัญญาณไว้เพียงภายในอาคารเท่านั้น และการติดตั้งก็ง่ายดายเช่นเดียวกับอุปกรณ์ของผู้ใช้บริการทั่วไป

2.2.5 อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Repeater Base Station)

อุปกรณ์ทวนสัญญาณเป็นสถานีฐานที่มีกำลังส่งต่ำอีกชนิดหนึ่ง โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างสถานีฐานกับอุปกรณ์สื่อสาร รับสัญญาณจากสถานีฐานหลัก แล้วนำมาขยายและส่งต่อให้กับพื้นที่ที่อับสัญญาณ ที่อยู่ในระยะไกล เพื่อให้สามารถที่จะใช้งานระบบเครือข่ายแบบไร้สายได้ ในพื้นที่นั้นจึงไม่มีระบบสื่อสัญญาณ แต่เป็นการรับสัญญาณเซลล์ลูล่าร์มาขยายหรือทวนสัญญาณเท่านั้น



รูปที่ 2.2 โครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี

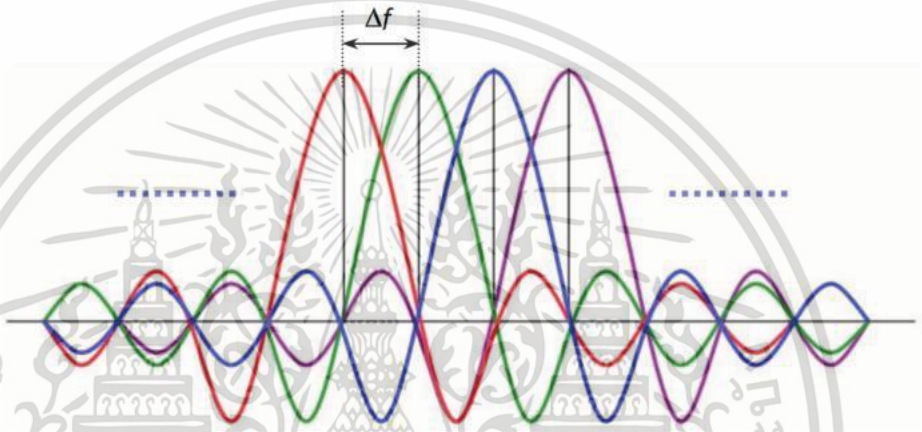
2.3 พื้นฐานของโครงข่ายแอลทีอี

แอลทีอีเป็นเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายความเร็วสูงเพื่อใช้กับอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์มือถือที่เป็นสมาร์โฟน แท็ปเล็ต หรือเครื่องที่รองรับสัญญาณได้ เทคโนโลยีนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยลดข้อจำกัดการรับส่งข้อมูลด้วยเทคโนโลยีเดิมๆซึ่งสามารถรับส่งข้อมูลแบบไร้สายได้ด้วยความเร็วสูงถึง 100 Mbps ในฝั่งดาวน์ลิงค์ และ 50 Mbps ในฝั่งอัพลิงค์ โดยมีความยืดหยุ่นของสเปกตรัมความถี่อยู่ในช่วงระหว่าง 1.4 ถึง 20 MHz สามารถให้บริการได้ถึง 200 ผู้ใช้งานในเซลล์เดียวกัน อีกทั้งด้วยโครงสร้างสถาปัตยกรรมโครงข่ายแบบแบนราบจึงสามารถช่วยลดความล่าช้าในการรับส่งข้อมูลโดยรวม (Latency) ซึ่งเป็นจุดอ่อนของเทคโนโลยีไร้สาย โดยเทคโนโลยีหลักที่เป็นจุดเด่นและเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้แอลทีอีนั้นมีความโดดเด่นและสามารถที่จะตอบสนองกับความต้องการหรือข้อกำหนดของมาตรฐานแอลทีอีได้ อาทิเช่น เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มเอ (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากโอเอฟดีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 โอเอฟดีเอ็ม (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

โอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์สัญญาณหลายๆสัญญาณโดยที่สัญญาณนั้นๆจะถูกแบ่งช่องสัญญาณด้วยความถี่เพื่อให้แต่ละช่องสัญญาณไม่มีการรบกวนซึ่งกันและกัน และทำการรับส่งข้อมูลกันได้อย่างราบรื่น แต่การที่จะทำให้มันไม่รบกวนกันนั้นไม่ได้ใช้วิธีการใช้แถบป้องกัน (Guard Band) เพื่อแยกแต่ละความถี่ออกจากกัน ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองความถี่โดยใช่เหตุ แต่จะใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การทำให้มันเป็นอิสระต่อกัน (Orthogonal)



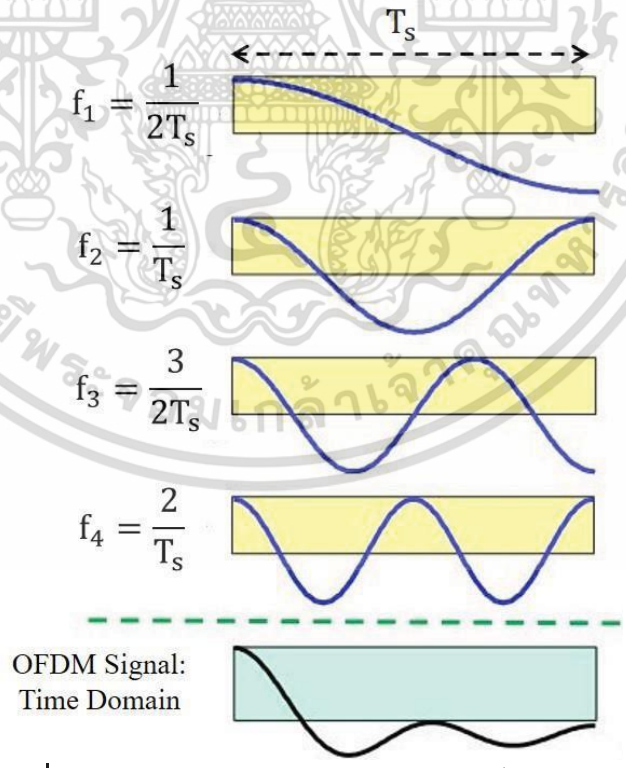
รูปที่ 2.3 คลื่นพาห์ย่อยมี่มีคุณสมบัติความเป็นอิสระต่อกัน

การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบโอเอฟดีเอ็มจะมีคุณสมบัติในการทำให้มันเป็นอิสระต่อกันหรือเกี่ยวข้องกันเป็นมุมฉากในแกนความถี่ โดยที่จะสามารถส่งสัญญาณข้อมูลข่าวสารต่างๆไปในคลื่นพาห์ย่อยที่ต่างกันและไม่เกิดการรบกวนกัน สัญญาณโอเอฟดีเอ็มสามารถสร้างจากผลรวมของสัญญาณไซนูซอยด์ (Sinusoid Signal) หลายสัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณนั้นก็คือคลื่นพาห์ย่อยแต่ละตัวนั่นเอง ความถี่เบสแบนด์ (Baseband Frequency) ของแต่ละคลื่นพาห์ย่อยจะกำหนดให้เป็นจำนวนเต็มของส่วนกลับของช่วงเวลา ของสัญลักษณ์หนึ่งสัญลักษณ์ (Symbol Time) โดยผลที่ได้จะทำให้แต่ละคลื่นพาห์ย่อยนั้นมีจำนวนของไซเคิล (Cycle) เป็นจำนวนเต็มในหนึ่งสัญลักษณ์ และผลที่ตามมาก็จะทำให้แต่ละคลื่นพาห์ย่อยนั้นๆ ตั้งฉากกัน

โดยพื้นฐานแล้วโอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์สัญญาณโดยการแบ่งความถี่ เมื่อช่องความถี่ถูกแบ่งออกเป็นความถี่ขนาดเล็กๆขนาด N ช่อง แต่ละช่องมีขนาดเท่ากับขนาดของอัตราบิต (Bit Rate) ดิจิตอล ซึ่งทำให้สัญญาณพาห์ย่อยเหล่านี้มีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ทางด้านส่งสัญญาณดิจิตอลความเร็วสูงที่ถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มข้อมูลที่ความเร็วต่ำลงจำนวนสิบหรือร้อยกลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มข้อมูลย่อยที่มีความเร็วต่ำกว่า จะถูกนำไปมอดูเลตกับสัญญาณพาห์ย่อยทั้งหมดส่งแบบขนานกันออกไป รูปแบบในการมอดูเลตสัญญาณพาห์ย่อยที่นิยมทั่วไปได้แก่ QAM, 16QAM, หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

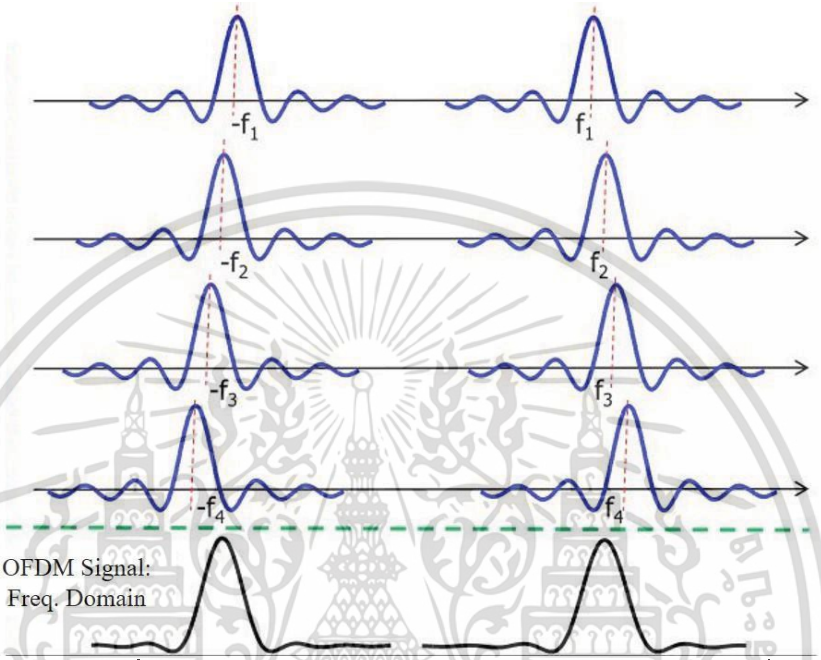
64QAM เป็นต้น ในโอเอฟดีเอ็มกลุ่มของข้อมูลจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปขนานกัน โดยการมอดูเลตกับสัญญาณพาห์ย่อย ดังนั้นพวกมันจะกลายเป็นสัญญาณบนแกนความถี่ ในการที่จะแปงกลับมาเป็นสัญลักษณ์บนแกนเวลาอีกครั้งนั้นทำได้โดย การใช้การแปลงกลับฟาสฟูเรียร์ (FFT) โดยที่สัญลักษณ์ทางแกนเวลาเหล่านี้จะถูกมัลติเพล็กซ์เข้าด้วยกันเป็นอนุกรมของสัญญาณ และสัญญาณที่ได้ทางเอาท์พุตของอินเวิร์สฟาสฟูเรียร์ (IFFT) จะถูกส่งบนความถี่ที่เหมาะสมในระบบสื่อสัญญาณ ในระบบโอเอฟดีเอ็มแต่ละสัญญาณพาห์ย่อยจะถูกทำให้รูปร่างมีความตั้งฉากซึ่งกันและกันกับสัญญาณพาห์ย่อยอื่นๆ ด้วยวิธีการจัดการสัญญาณในลักษณะที่ทำให้แม้แต่สัญญาณพาห์ย่อยที่อยู่ใกล้กันซ้อนทับกันก็ไม่ก่อให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน ดังนั้นในระบบนี้จึงไม่ต้องการแถบป้องกัน (Guard band) ระหว่างแต่ละช่องสื่อสารย่อย ทำให้ช่องสื่อสารระหว่างแต่ละสัญญาณพาห์ย่อยมีความแคบที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งในระบบนี้จะให้ประสิทธิภาพในการใช้แถบความถี่สูงสุด ความสัมพันธ์ระหว่างทุกสัญญาณพาห์ย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็ม จะต้องถูกควบคุมอย่างระมัดระวังเพื่อรักษาให้มีลักษณะของความตั้งฉากซึ่งกันและกัน และการแปลงกลับฟาสฟูเรียร์เป็นการแปลงที่มีประสิทธิภาพสูงมากและเป็นวิธีการขั้นตอนอย่างง่ายๆ ที่สามารถทำให้เรามั่นใจได้ว่าสัญญาณพาห์ที่สร้างขึ้นมามีความตั้งฉากซึ่งกันและกัน หลังจากการมอดูเลตแบบโอเอฟดีเอ็ม จะมีการสอดแทรกช่วงแถบป้องกันแคบๆ เพื่อลดสัญญาณรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ (Inter symbol Interference: ISI) ที่เกิดจากสัญญาณหลายเส้นทาง (Multipath) เราเรียกแถบป้องกันนี้ว่า การเสริมไซคลิก (Cyclic prefix)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มในแกนเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 แสดงคลื่นพาห์ย่อยของแต่ละสัญญาณซึ่งประกอบด้วยลูกคลื่นจำนวนต่างๆ ในช่วงเวลาหนึ่งสัญลักษณ์ตามลำดับ โดยที่คลื่นพาห์ย่อยแต่ละสัญญาณนั้นจะมีเฟสเป็นศูนย์และจะสังเกตได้ว่าแต่ละคลื่นพาห์ย่อย จะมีจำนวนลูกคลื่นเป็นจำนวนเต็มในช่วงเวลาของหนึ่งสัญลักษณ์ และยังแสดงการรวมกันของคลื่นพาห์ย่อยทั้ง 4 เข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสัญญาณโอเอฟดีเอ็มในแกนความถี่

รูปที่ 2.5 แสดงสัญญาณในแกนความถี่ของคลื่นพาห์ย่อยแต่ละสัญญาณตามลำดับ และแสดงสัญญาณเมื่อทำการรวมคลื่นพาห์ย่อยทั้ง 4 สัญญาณเข้าด้วยกันในแกนความถี่ [6]

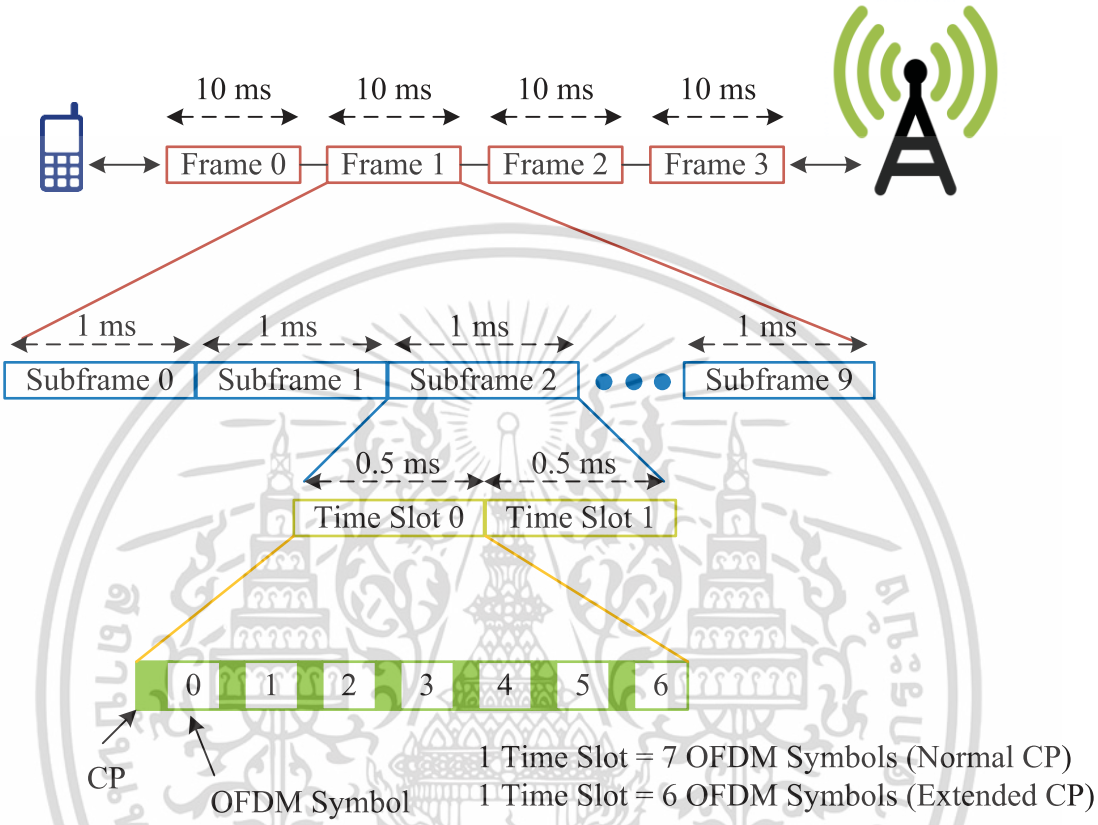
2.3.2 ชั้นกายภาพ

ในช่องสัญญาณดาวน์ลิงค์ของระบบแอลทีอีจะใช้เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มเอ (Orthogonal Frequency Division Multiple Access: OFDMA) โดยทำการแบ่งช่วงคลื่นความถี่ออกจากกันเพื่อให้แต่ละคลื่นความถี่นั้นไม่มีการรบกวนหรือซ้อนทับกันโดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้แถบป้องกัน (Guard Band) เพื่อแยกคลื่นความถี่ออกจากกัน หากแต่การแบ่งนั้นจะเป็นลักษณะเปลี่ยนแปลงคลื่นพาห์ความถี่ย่อยตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยจำนวนของช่องสัญญาณแต่ละผู้ใช้งานนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณภาพการให้บริการ

ในโครงสร้างของเฟรมสัญญาณดาวน์ลิงค์ขนาด 10 ms จะถูกแบ่งเป็นเฟรมย่อยๆจำนวน 10 เฟรมย่อย เฟรมย่อยละ 1 ms และทุกเฟรมย่อยจะถูกแบ่งออกเป็นสองช่องเวลา ช่องเวลาละ 0.5 ms และมีองค์ประกอบที่เล็กที่สุดที่สามารถจัดสรรให้ผู้ใช้บริการได้เรียกว่าเรียกว่า Physical Resource Blocks (PRB) แต่ละ PRB จะประกอบด้วย 6-7 สัญลักษณ์โอเอฟดีเอ็มขึ้นอยู่กับการขยายไซคลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหากไม่มีการขยายไซคลิก PRB จะประกอบด้วย 12 สัญญาณย่อย 7 สัญลักษณ์ และหากมีการขยายไซคลิก PRB จะมีเพียง 6 สัญลักษณ์ใน 12 สัญญาณย่อยเท่านั้น โดยรูปที่ 2.6 แสดงการแบ่งเฟรมย่อยและช่องเวลาในโดเมนเวลา

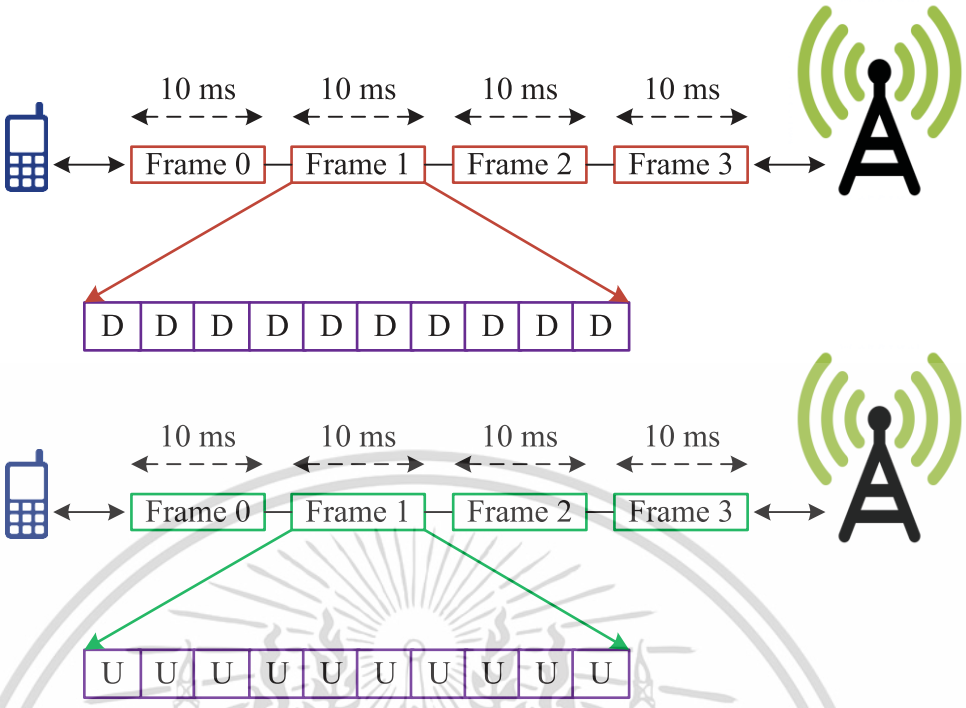


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเฟรมวิทยุที่ถูกแบ่งเป็นเฟรมย่อยและช่องเวลา

โครงสร้างเฟรมในมาตรฐานแอลทีอี แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการใช้ความถี่คือ Frequency Division Duplex (FDD) และTime Division Duplex (TDD) โดยสามารถอธิบายโครงสร้างทางกายภาพทั้งสองประเภทดังนี้

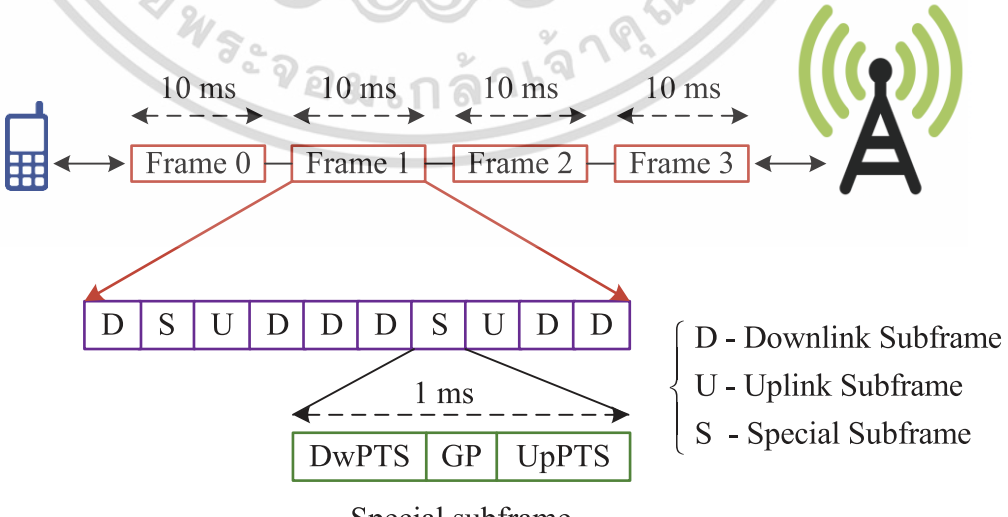
Frequency Division Duplex (FDD) คือการรับส่งสัญญาณข้อมูลดาวน์ลิงค์และอัพลิงค์โดยใช้ความถี่ที่แตกต่างกันทำให้สามารถรับและส่งข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน สามารถส่งได้อย่างต่อเนื่องและไม่มีเกิดการดีเลย์ โดยมีข้อจำกัดว่าคลื่นความถี่ที่นำมาใช้นั้นต้องมีขนาดดาวน์ลิงค์และอัพลิงค์อย่างละเท่าๆกันไม่สามารถแบ่งใช้อย่างใดอย่างหนึ่งมากกว่ากันได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างเฟรมวิทยุแบบ FDD

Time Division Duplex (TDD) คือการรับส่งสัญญาณข้อมูลดาวน์ลิงค์และอัพลิงค์โดยใช้ความถี่เดียวกัน เพียงแต่ทำการแบ่งช่วงเวลาในการรับส่งข้อมูลแทน และเนื่องจากมีการส่งข้อมูลบนคลื่นความถี่เดียวกันนั้น จึงจำเป็นต้องมั่นใจว่าการรับส่งข้อมูลนั้นต้องไม่เกิดการซ้อนทับกัน โดยการใช้วิธีการป้องกันด้วยการเพิ่มแถบป้องกัน (Guard Period) เข้าไปในเฟรมย่อยพิเศษ (Special Subframe) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะสังเกตว่า ใน 1 เฟรมนั้นประกอบด้วย 10 เฟรมย่อยที่มีขนาด 1 ms โดยแต่ละเฟรมย่อยสามารถเป็นได้ทั้งดาวน์ลิงค์ อัพลิงค์ และเฟรมย่อยพิเศษ ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าคอนฟิค



รูปที่ 2.8 โครงสร้างเฟรมวิทยุแบบ TDD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สัญญาณอ้างอิง

จากสัญญาณดาวน์ลิงค์ อุปกรณ์สื่อสารที่มีการรับสัญญาณนั้นจะต้องสามารถดีมอดูเลตสัญญาณรวมทั้งระบุสถานีฐานที่ให้บริการแก่อุปกรณ์ได้ ดังนั้นบางองค์ประกอบของทรัพยากรความถี่ (Resource Elements : REs) ในเฟรมวิทยุจะประกอบด้วยข้อมูลเฉพาะเพื่อให้อุปกรณ์สื่อสารสามารถจัดการข้อมูลและประเมินสภาวะของช่องสัญญาณได้ ซึ่งหมายความว่า บาง REs ในเฟรมวิทยุจะมีข้อมูลเฉพาะของอุปกรณ์สื่อสารและถึงแม้จะไม่มีการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน REs ยังทำการส่งสัญญาณอ้างอิงเหล่านี้ไปยังอุปกรณ์อื่นๆ

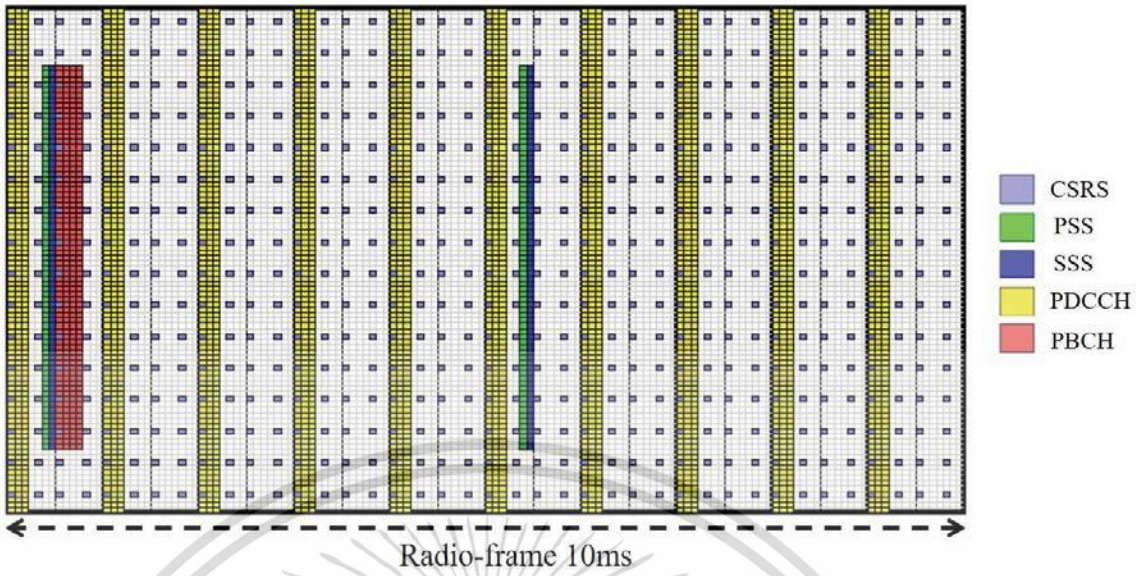
สำหรับการซิงโครไนซ์เวลาในแอลทีอี จะมีการซิงโครไนซ์สัญญาณหลัก (Primary Synchronization Signal : PSS) และการซิงโครไนซ์สัญญาณรอง (Secondary Synchronization Signal : SSS) โดยแต่ละเฟรมวิทยุจะประกอบด้วยสัญญาณ PSS และ SSS จำนวนสองชุดอยู่ในสัญลักษณ์โอเอฟดีเอ็มที่ 5 และ 6 ของเฟรมย่อยที่ 0 และ 5 ที่ถูกแสดงโดยบริเวณสีน้ำเงินและสีเขียวในรูปที่ 2.9 ชุดสัญญาณ PSS และ SSS แต่ละชุดจะมีความเฉพาะเจาะจงสำหรับ Physical layer Cell ID (PCI) ที่ระบุสถานีฐานที่ให้บริการ

มีสัญญาณอ้างอิงเฉพาะสถานีฐาน (Cell Specific Reference Signal : CSRS) อยู่ภายในเฟรมย่อย ที่อนุญาตให้อุปกรณ์สื่อสารประเมินคุณภาพของช่องสัญญาณได้ สำหรับ CSRS นั้นอยู่ในสัญลักษณ์โอเอฟดีเอ็มที่ 0, 4, 7,และ 11 แสดงในพื้นที่สีม่วงของรูปที่ 2.9

อุปกรณ์สื่อสารจากผู้ใช้งานนี้จำเป็นต้องมีการดีมอดูเลตสัญญาณและใช้เทคนิคการแก้ไขความผิดพลาด สำหรับการส่งข้อมูลดังกล่าวนั้น จะมีช่องสัญญาณควบคุมทางกายภาพ (Physical Downlink Control Channel : PDCCH) โดยจะอยู่ในส่วนเริ่มต้นของเฟรมย่อยแต่ละเฟรม ช่องสัญญาณนี้จะนำข้อมูลการควบคุมของดาวน์ลิงค์ (Downlink Control Information : DCI) ซึ่งประกอบไปด้วยทรัพยากรที่ถูกจัดสรรให้กับผู้ใช้งาน สอดคล้องกับบริเวณสีเหลืองในรูปที่ 2.9 สำหรับการกระจายข้อมูลไปยังอุปกรณ์สื่อสารทั้งหมดในแต่ละสถานีฐานนั้น จะมีช่องสัญญาณการกระจาย (Physical Broadcast Channel : PHBC) ที่มีการจัดสรรทรัพยากรไว้ในสัญลักษณ์โอเอฟดีเอ็มที่ 2 ของเฟรมย่อยที่ 0 สอดคล้องกับพื้นที่บริเวณสีแดงในรูปที่ 2.9

จากที่อธิบายข้างต้นแบนด์วิดท์ของเฟรมวิทยุโอเอฟดีเอ็มเอนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ สัญญาณ CSRS และ PDCCH จะถูกขยายออกไปเพื่อเติมเต็มแบนด์วิดท์ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม สัญญาณ PSS, SSS, และ PHBC จะถูกจัดสรรให้อยู่กึ่งกลางใน 72 คลื่นพาห์ย่อย ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



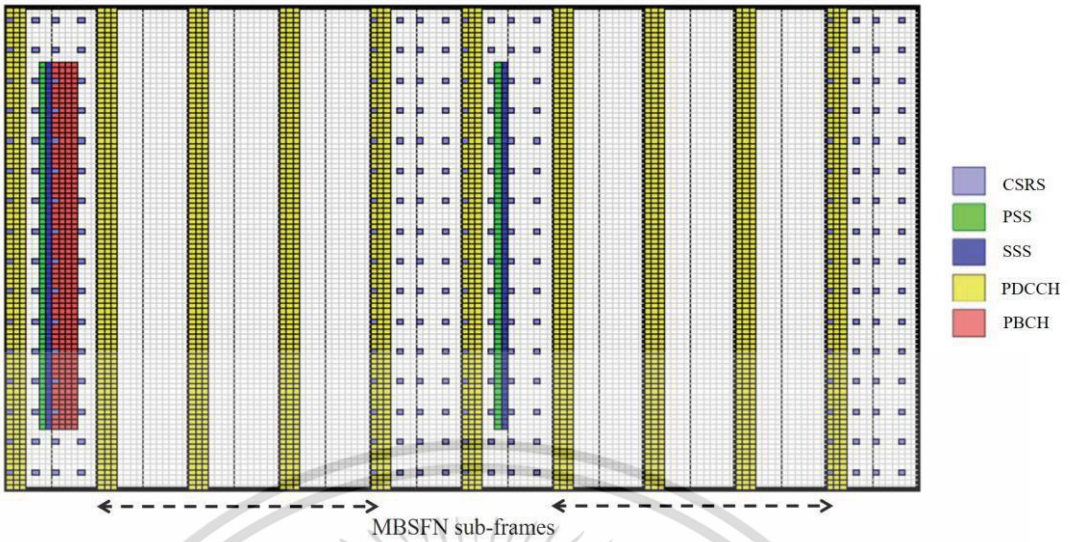
รูปที่ 2.9 ตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิงในเฟรมวิทยุแอลทีอี

2.3.4 เฟรมย่อย MBSFN

การคอนฟิคแบบปกติของเฟรมวิทยุ CSRS จะถูกส่งในทุกๆเฟรมย่อย แต่เนื่องจาก CSRS เป็นสัญญาณอ้างอิงเฉพาะสถานีฐานและอาจเป็นแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนกับสถานีฐานข้างเคียง จึงจำเป็นต้องคอนฟิคกำหนดเฟรมย่อยโดยไม่มี CSRS แต่ละเฟรมย่อยดังกล่าวเรียกว่าเฟรมย่อยแบบหลายผู้รับในระบบเครือข่ายความถี่เดียว (Multicast and Broadcast Single Frequency Network : MBSFN) เนื่องจากเฟรมย่อยนี้อนุญาตให้ทำการกระจายข้อมูลจากหลายสถานีฐานไปยังอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน

รูปที่ 2.10 แสดงเฟรมวิทยุแอลทีอีที่มีถูกคอนฟิคกำหนดให้มีจำนวนเฟรมย่อย MBSFN สูงสุด คือเฟรมย่อยที่ 2, 3, 4, 6, 7, และ 8 หากไม่มีอุปกรณ์สื่อสารใดๆเชื่อมต่ออยู่ 6 เฟรมย่อย MBSFN นี้จะว่างเปล่ายกเว้น PDCCH ในเฟรมย่อยแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 เฟรมวิทยุแอลทีอีที่กำหนด 6 MBSFN ในเฟรมย่อย

2.3.5 แนวคิดการลดสัญญาณอ้างอิง (Lean Carrier)

โดยปกติแล้วการส่งสัญญาณอ้างอิงของดาวน์ลิงค์นั้นจะมีข้อบกพร่อง ประการแรกคือ CSR และสัญญาณอ้างอิงเฉพาะสถานีฐานอื่นๆเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกับสถานีฐานข้างเคียง และยังสามารถลดการประมาณค่าช่องสัญญาณของผู้ใช้งานในบริเวณขอบพื้นที่อีกด้วย ประการที่สอง สัญญาณอ้างอิงที่ไม่ถูกใช้งานจะช่วยเพิ่มพลังงานการส่งสัญญาณที่ไม่จำเป็นต่อระบบ ส่งผลให้สถานีฐานที่ไม่ถูกใช้งานยังคงส่งสัญญาณอ้างอิงทำให้เกิดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็นและเกิดการรบกวนในเครือข่าย

แนวความคิดของผู้ให้บริการรายใหม่เพื่อทำการลดสัญญาณอ้างอิงถูกเรียกว่า Lean Carrier สำหรับการซิงโครไนซ์เวลาและการค้นหาสถานีฐานถูกตั้งค่าไว้ และมีการนำเสนอการขยายสัญญาณซิงโครไนซ์ ใน [13] ได้ทำการศึกษากายภาพของ Lean Carrier ทั้งในสถานีฐานขนาดเล็กและขนาดใหญ่แล้วสรุปได้ว่าเทคโนโลยีนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสเปกตรัมและลดการใช้พลังงานในโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี

2.4 ทฤษฎีความจุของช่องสัญญาณ

ความจุของช่องสัญญาณคือปริมาณการส่งข้อมูลต่อบิตสูงสุดที่สามารถส่งได้ภายในช่องสัญญาณเมื่อมีการใช้คลื่นความถี่เต็มแบนด์ และเนื่องจากเส้นทางการสื่อสารย่อมมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นจึงไม่สามารถส่งสัญญาณด้วยความเร็วไม่จำกัด ตามทฤษฎี Nyquist ได้ โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอทฤษฎีความจุของช่องสัญญาณของ Shannon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ทฤษฎี Shannon

ทฤษฎีของ Shannon เกี่ยวข้องกับอัตราการส่งข้อมูลต่อบิตสูงสุดที่สามารถส่งผ่านได้ในค่าหนึ่งรู้จักกันในนาม ความจุของช่องสัญญาณ (Capacity : C) ภายใต้ช่องสัญญาณที่มีความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด หากอัตราการรับส่งข้อมูล R มีค่าต่ำกว่าความจุของช่องสัญญาณ C ข้อมูลที่ถูกส่งนั้นจะเกิดความผิดพลาด แต่ยังสามารถลดความผิดพลาดนั้นได้โดยการใช้เทคนิคในการเข้ารหัส ถึงแม้ในช่องสัญญาณจะมีสัญญาณรบกวนอยู่ก็ตาม แต่ในทางกลับกันถ้าอัตราการรับส่งข้อมูลมีค่าสูงกว่าค่าความจุช่องสัญญาณแล้ว จะไม่มีทางที่จะสามารถหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดใดๆได้เลย สำหรับความจุของช่องสัญญาณในกรณีที่สัญญาณรบกวนแบบ AWGN สามารถคำนวณได้โดย

$$C = B\log_2\left(1+\frac{S}{N}\right) \tag{2.1}$$

โดยที่ C คือค่าความจุของช่องสัญญาณมีหน่วยเป็น bit/second B คือแบนวิดท์ของช่องสัญญาณมีหน่วยเป็นเฮิร์ต S คือกำลังสัญญาณมีหน่วยเป็นวัตต์ และ N คือกำลังของสัญญาณรบกวนมีหน่วยเป็นวัตต์เช่นกัน $\frac{S}{N}$ (Signal to Noise Ratio: SNR) คืออัตราส่วนของกำลังสัญญาณระหว่างสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณรบกวนมีหน่วยเป็นเดซิเบล หากค่า SNR สูง บอกถึงการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพ มีความเสถียร เกิดข้อผิดพลาดน้อยและคุณภาพของการใช้งานดี สมการของ Shannon นี้ไม่คำนึงถึงวิธีการเข้ารหัส ไม่ว่าจะใช้สัญญาณดิจิตอลกี่ระดับก็ตามจะให้ผลเหมือนกัน ถ้าช่องการสื่อสารที่ใช้ มีสัญญาณรบกวนคงที่ [7]

2.5 ทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นของสัญญาณวิทยุ

โดยทั่วไปแล้วช่องทางการสื่อสารสัญญาณวิทยุจะประกอบด้วย ภาคส่งที่ทำการส่งสัญญาณผ่านสายอากาศหรือตัวกลางต่างๆ และภาครับที่ทำการรับสัญญาณผ่านสายอากาศหรือตัวกลางนั้นๆ ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ พื้นที่บริการของระบบ ขึ้นอยู่กับการครอบคลุมพื้นที่ของสถานีฐาน การจัดวางเซลล์ในรูปแบบของเซลลูลาร์ ให้มีการครอบคลุมต่อเนื่องกันไป สิ่งสำคัญอย่างยิ่งคือ หลักการกระจายคลื่น เพื่อใช้ในการหาขนาดเซลล์และตำแหน่งของพื้นที่ในการติดตั้งสถานีฐานเพื่อให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการอย่างเหมาะสม

การสื่อสารไร้สายนั้นมีปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งที่มักเกิดขึ้นคือ การลดทอนของสัญญาณวิทยุที่เครื่องรับสามารถรับได้ เพราะนอกจากสัญญาณรบกวนเชิงความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวเครื่องรับเองแล้ว การแพรกระจายหลายวิถีอันเกิดจากการสะทอน การเลี้ยวเบน หรือการกระจายของคลื่นวิทยุกับสภาวะแวดลอมในชองสัญญาณเคลื่อนที่ระหวางเครื่องสงและเครื่องรับ ก็เปนสาเหตุสำคัญที่มีผลกระทบตอคุณภาพของสัญญาณ ดังนั้นการศึกษาลักษณะการแพรกระจายและผลกระทบดังกลาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงมีประโยชนอยางมากในการจำลองชองสัญญาณที่เหมาะสม เพื่อใชในการออกแบบระบบและเครื่องรับใหมีประสิทธิภาพ

2.5.1 การแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่าง

การแพร่กระจายคลื่นในอากาศว่างหมายถึงการสื่อสารที่สัญญาณไม่มีการสะท้อนกับพื้นผิวโลกก่อนเดินทางไปถึงด้านรับ ซึ่งเป็นลักษณะการส่งในอุดมคติ เสมือนกับว่า การสื่อสารเกิดขึ้นในช่องว่างอิสระไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ เช่นระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม (Satellite Communication) โดยสมมุติให้สถานีฐานมีกำลังส่ง P_{tx} (วัตต์) ใช้สายอากาศในอุดมคติ (ไอโซโทรปิก) มีพื้นผิวการกระจายคลื่นในอากาศว่าง เป็นทรงกลมดังรูปที่ 2.11 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานและโทรศัพท์เคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ d (หน่วยเป็นกิโลเมตร) การกระจายคลื่นจากจุดที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซโทรปิก จะมีกำลังการกระจายต่อหน่วยพื้นที่เป็น W_r หน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร ดังนี้

$$W_r = P_{tx} / 4\pi d^2 \tag{2.2}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใช้งานกับอัตราขยาย (gain) ของสายอากาศรับ G_{rx} คือ

$$G_{rx} = 4\pi S_{eff} / \lambda^2 \tag{2.3}$$

โดย S_{eff} คือขนาดพื้นที่ในหน่วยตารางเมตร ที่สายอากาศรับสามารถรับสัญญาณได้ และจะมีกำลังรับ P_{rx} คือ

$$P_{rx} = W_r S_{eff} = P_{tx} G_{tx} G_{rx} (\lambda / 4\pi d)^2 \tag{2.4}$$

เมื่อ G_{tx} คืออัตราขยายของสายอากาศส่ง มีหน่วยเป็นเดซิเบล λ คือความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

การกระจายคลื่นในทิศทางที่สายอากาศส่ง (ไอโซโทรปิก) มีอัตราขยายสูงสุดคือค่า EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) เท่ากับ $P_{tx}G_{tx}$ ในทางปฏิบัติ นิยมใช้ค่า ERP (Effective Radiated Power) แทน โดยเทียบกับสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่นจะได้ว่า

$$\text{EIRP=ERP+2.2=}P_{tx}G_{tx} + 2.2 \tag{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนกำลังส่งต่อกำลังรับคือ การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) หรือ P_L เป็นค่าที่แสดงการลดทอนของสัญญาณ จาก (2.5) จะได้

$$P_L = \frac{P_{tx}}{P_{rx}} = \frac{1}{G_{tx}G_{rx}}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \tag{2.6}$$

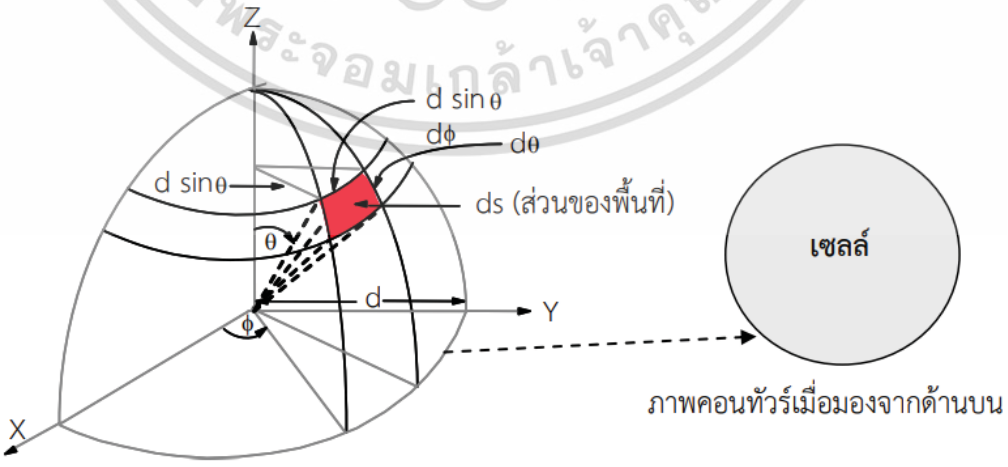
$$P_L(dB) = 10\log_{10}\frac{P_{tx}}{P_{rx}}(dB) = P_{tx}(dB) - P_{rx}(dB) \tag{2.7}$$

ในหน่วยเดซิเบล กำลังรับสัญญาณจะแปรผันตรงกับกำลังสองของความยาวคลื่น และแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทาง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่การรับสัญญาณของสายอากาศรับ เมื่อคลื่นพาห์มีความถี่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กำลังส่งเท่าเดิม กำลังรับจะลดลง ดังนั้น

$$\begin{aligned} P_L(dB) &= 10\log_{10}\frac{P_{tx}}{P_{rx}} = 10\log\frac{(4\pi)^2 d^2}{G_{tx}G_{rx}\lambda^2} \\ &= K + 20\log d + 20\log f_c - 10\log G_{tx} - 10\log G_{rx} \end{aligned} \tag{2.8}$$

เมื่อ K คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับ d (กิโลเมตร) และ f_c คือความถี่ของสัญญาณ (MHz) จะได้ค่า $K = 32.44$ เมื่ออัตราขยายของสายอากาศส่งและรับเป็น 1 จะได้

$$P_L(dB) = 32.44 + 20\log(d) + 20\log f_c \tag{2.9}$$

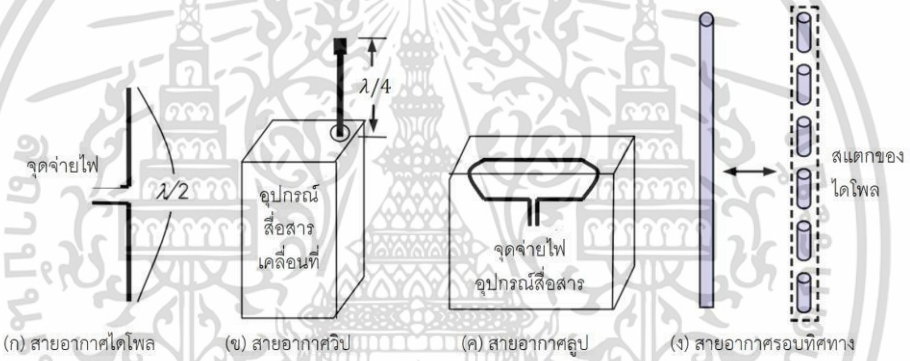


รูปที่ 2.11 การแพร่กระจายคลื่นจากแหล่งกำเนิดไอโซโทรปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การแพร่กระจายคลื่นในสภาพแวดล้อมใช้งานจริง

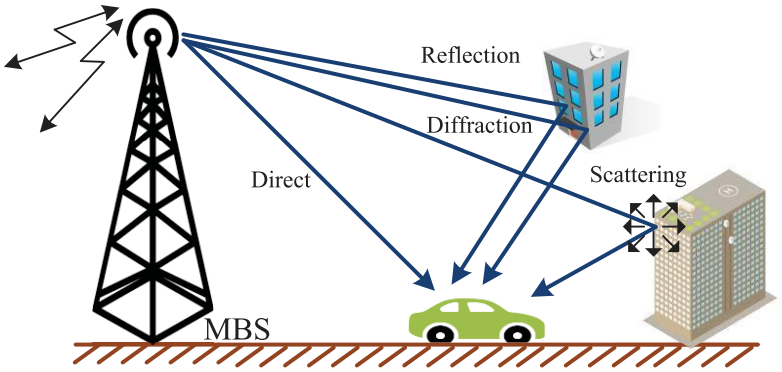
ในการใช้งานจริงนั้น สายอากาศที่ใช้งานจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.12 ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติการกระจายของคลื่นจะแตกต่างกันไปจากในอากาศว่าง รูปที่ 2.12 (ก) สายอากาศไดโพล (Dipole) มีลักษณะเป็นเส้นลวด 2 อิลิเมนท์ มีความยาวอิลิเมนท์ละ $\lambda/4$ มีไดเร็คทิวิตี้ (Directivity) เป็นรูปเลขแปด มีคุณสมบัติแพร่กระจายคลื่นได้ขนาดเท่ากันทุกทิศทาง รูปที่ 2.12 (ข) สายอากาศวิป (Whip) มีความยาวของอิลิเมนท์เท่ากับ $\lambda/4$ คุณสมบัติการรับส่งคล้ายกับสายอากาศไดโพล แต่มีโครงสร้างที่ง่ายกว่าและไม่ซับซ้อน รูปที่ 2.12 (ค) สายอากาศลูป (Loop) จะมีความยาวด้านนอกของลูปเท่ากับหนึ่งส่วนสิบของความยาวคลื่นหรือน้อยกว่า รูปร่างของสายอากาศนี้สามารถทำเป็นวงกลม สามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมก็ได้ โดยการจัดวางแบบวงกลมจะได้อัตราการขยายดีที่สุด รูปที่ 2.12 (ง) สายอากาศรอบทิศทาง (Omnidirectional) สามารถรับส่งคลื่นสัญญาณได้ในทุกทิศทางแนวราบเท่าๆกัน นิยมใช้กับสถานีฐาน



รูปที่ 2.12 ประเภทของสายอากาศ

สายอากาศรอบทิศทางสถานีฐาน สามารถกระจายคลื่นผ่านอากาศที่มีสิ่งกีดขวางไปยังสายอากาศรับของสถานีเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.13 โดยมีคลื่นที่เดินทางในแนวเส้นสายตา (Line-of-Sight : LoS) ที่มีระยะสั้นที่สุดและคลื่นที่เดินทางนอกแนวเส้นสายตา (Non-Line-of-Sight : NLoS) ที่เกิดจากคุณสมบัติการสะท้อน (Reflection) การกระจัดกระจาย (Scattering) และการเลี้ยวเบน (Diffraction) ของคลื่น โดยการสะท้อนจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเดินทางตกกระทบกับวัตถุที่มีความหนากว่าความยาวคลื่นมาก เช่น ผนัง กำแพง หรือพื้นอาคารเป็นต้น ทำให้คลื่นบางส่วนมีการสะท้อนกลับในขณะที่คลื่นบางส่วนจะเดินทางผ่านวัตถุ ปริมาณพลังงานที่สะท้อนกลับจะแปรผันกับความถี่และแปรผกผันกับความยาวคลื่น การกระจัดกระจาย เกิดเมื่อคลื่นเดินทางผ่านวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงหรือน้อยกว่าความยาวคลื่นจะเกิดปรากฏการณ์คลื่นกระจัดกระจายไปหลายทิศทาง ส่งผลให้คลื่นที่เดินทางไปถึงสายอากาศด้านรับมีพลังงานลดลงมาก การเลี้ยวเบน เกิดเมื่อคลื่นเดินทางใกล้ขอบของวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมากๆเช่น ตึกสูงหรือภูเขา ทำให้คลื่นเกิดการเลี้ยวเบนตรงขอบวัตถุนั้นๆ เสมือนกับว่าคลื่นเดินทางหักเหอ้อมขอบของสิ่งกีดขวางได้

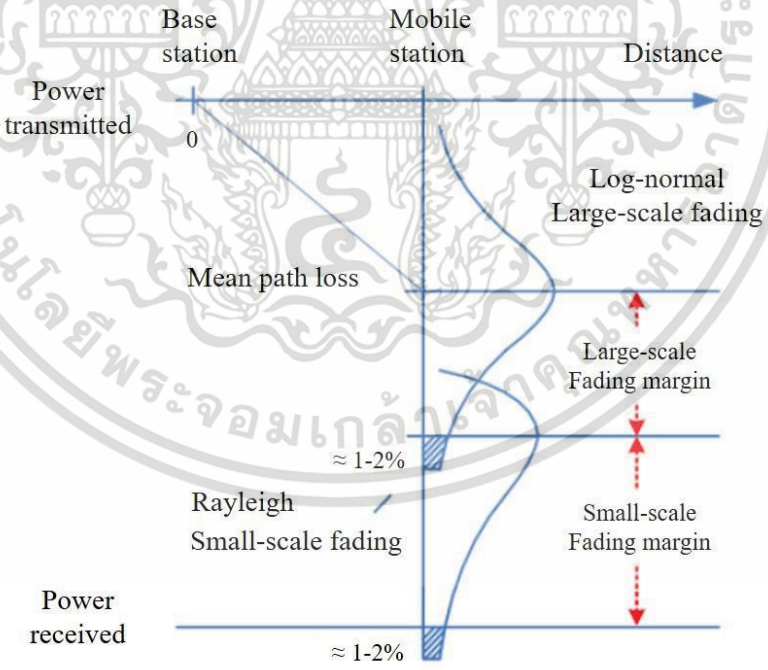
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ปรากฏการณ์แพร่กระจายของคลื่น

2.6 การจางหายของสัญญาณ

การจางหายของสัญญาณ (Fading) หมายถึง รูปแบบการลดทอนของสัญญาณที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางสภาพแวดล้อมในเส้นทางเดินของสัญญาณจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับ ทำให้สัญญาณเดินทางมาถึงเครื่องรับไม่พร้อมกัน ในขณะที่กำลังของสัญญาณก็ถูกลดทอนลงไปด้วย โดยการประมาณกำลังเฉลี่ยของสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีการสูญเสียนี้แสดงดังรูปที่ 2.14

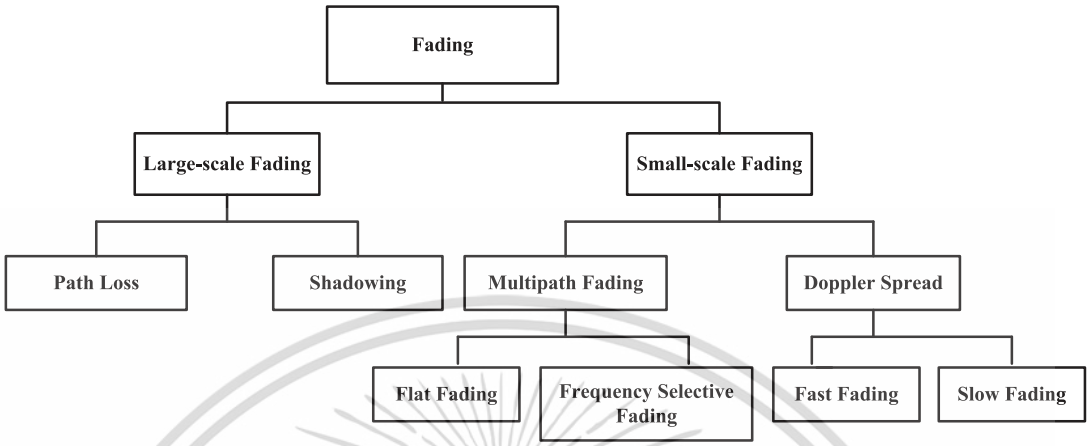


รูปที่ 2.14 การประมาณกำลังเฉลี่ยของสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีการสูญเสีย

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิจัยและพิจารณาถึงการจางหายของสัญญาณขนาดใหญ่ (Large-Scale Fading) เท่านั้น แต่ในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงการจางหายของสัญญาณซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแบงได 2 ประเภทคือ การจางหายขนาดใหญ (Large-Scale Fading) และการจางหายขนาดเล็ก (Small-Scale Fading) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 พารามิเตอร์ของช่องสัญญาณที่มีการสูญเสีย

2.6.1 การจางหายขนาดใหญ่ (Large Scale Fading)

การจางหายขนาดใหญ่ หมายถึง ลักษณะที่กำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับ (Average Received Power) มีการผันผวนอย่างช้าๆในระยะทางสั้นๆประมาณ 5 เท่า ถึง 40 เท่าของความยาวคลื่น และมักใช้ในการออกแบบขนาดเซลล์ในระบบโทรศัพท์เซลลูล่าร์ เพื่อประมาณพื้นที่ที่ความเข้มของสัญญาณสามารถครอบคลุมถึง โดยมีหลายปัจจัยที่ทำให้เกิดความสูญเสียนี้ เช่น ความถี่คลื่นพาห์ ระยะทาง ความสูงของเสาอากาศ สภาพอากาศรวมไปถึงสภาวะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการบดบังจากตึกหรืออาคารขนาดใหญ่เป็นต้น โดยการจางหายขนาดใหญ่นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การสูญเสียเชิงวิถีและชาโดว์อิง

การสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) มักอธิบายการสูญเสียกำลังของสัญญาณในอากาศว่าง (Free Space Path Loss) เกิดจากการที่คลื่นสัญญาณมีการแพร่กระจายออกไปเป็นมุมกว้างทำให้ความเข้มของสัญญาณลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นแบบกำลังสอง

ชาโดว์อิง (Shadowing) เกิดจากการที่สัญญาณเดินทางจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับและถูกบดบังโดยตึกอาคารสูงหรือวัตุถที่มีขนาดใหญ่ในเส้นทางนั้น ทำให้สัญญาณที่เดินทางมาถึงเครื่องรับเกิดจากสัญญาณที่เดินทางไม่เป็นเส้นตรง และความแรงของสัญญาณจะถูกลดทอนลงไป ยกตัวอย่างเช่นขณะที่มีการเคลื่อนที่ของโทรศัพท์มือถือ จะทำให้สัญญาณบางส่วนถูกบดบังจากสิ่งแวดล้อมไปชั่วขณะ และหากผู้ใช้งานเคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้นความแรงของสัญญาณจะกลับมาดีเช่นเดิม ดังนั้นระดับความแรงของสัญญาณที่ถูกบดบังด้วยสภาพแวดล้อมนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่สม่ำเสมอ ในลักษณะแรนดอม มีการกระจายแบบล็อกนอร์มอลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\psi_{dB}}} \exp\left[-\frac{(\psi_{dB} - \mu_{\psi_{dB}})^2}{2\sigma^2_{\psi_{dB}}} \right], \psi > 0 \qquad (2.10)$$

โดยที่ $\mu_{\psi_{dB}}$ คือค่ามีน มีหน่วยเป็นเดซิเบล, ψ_{dB} คือตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบเกาส์เซียน และ $\sigma_{\psi_{dB}}$ คือค่าความแปรปรวนหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอ้างอิงตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\mu_{\psi_{dB}}$) ของชาโดว์อิง

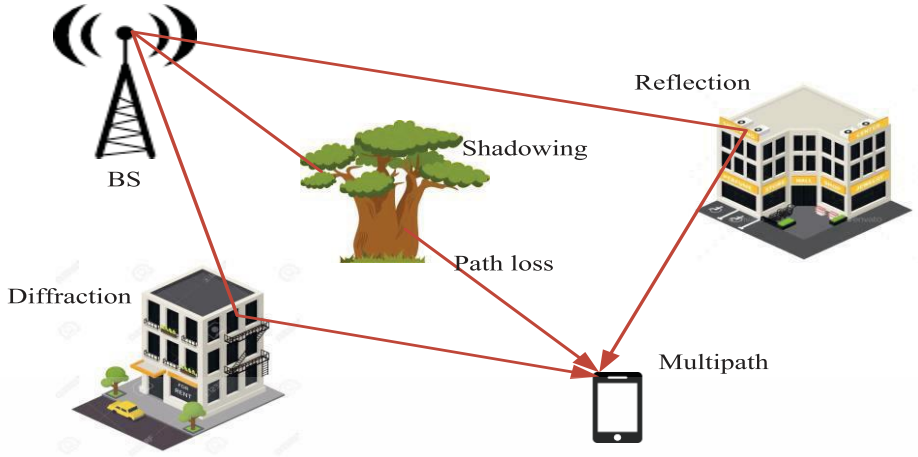
สภาพแวดล้อม	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\sigma_{\psi_{dB}}$)
พื้นที่เมืองหนาแน่น (Dense Urban)	10 เดซิเบล
พื้นที่เมือง (Urban)	8 เดซิเบล
พื้นที่ชานเมือง (Suburban)	6 เดซิเบล
พื้นที่ชนบท (Rural)	3 เดซิเบล

2.6.2 การจางหายขนาดเล็ก (Small Scale Fading)

การจางหายขนาดเล็ก หมายถึงลักษณะที่กำลังสัญญาณภาครับ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทั้งแอมปลิจูดและเฟสของสัญญาณในช่วงเวลาสั้นๆหรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ ซึ่งเป็นผลจากการแพร่กระจายสัญญาณหลายวิถี ในกรณีนี้กำลังของสัญญาณเครื่องรับจะมีความไวต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยรอบและเครื่องรับสูง สามารถเกิดขึ้นได้แม้ว่าระยะทางระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า แต่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมเช่นการเคลื่อนที่ของสิ่งกีดขวางในทางเดินของสัญญาณ โดยการจางหายขนาดเล็กนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ การจางหายหลายวิถี (Multipath Fading) และ การกระจายดอปเปลอร์ (Doppler Spread)

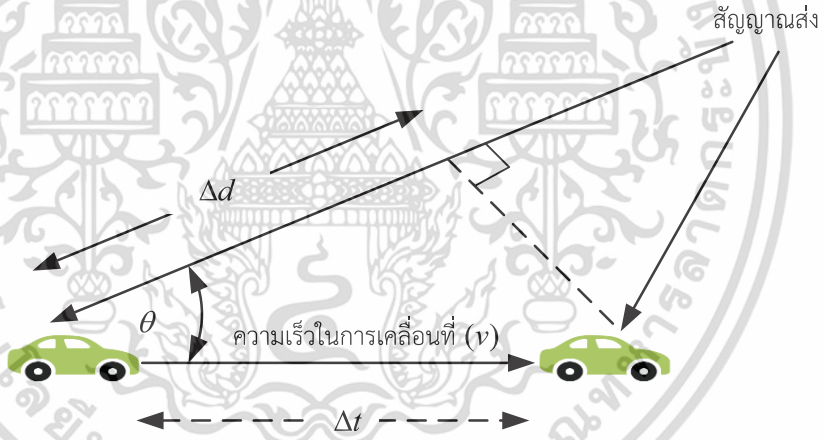
การจางหายหลายวิถี คือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เมื่อสัญญาณจากเครื่องส่งถูกส่งไปยังเครื่องรับนอกแนวเส้นสายตาด้วยเส้นทางที่แตกต่างกัน จนทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณ โดยสัญญาณที่ถูกส่งออกไปจะพบกับสิ่งกีดขวาง เช่นสิ่งปลูกสร้าง เนินเขา ต้นไม้ เป็นต้น ทำให้สัญญาณที่มาถึงเครื่องรับเป็นสัญญาณมากกว่าหนึ่งวิถีและมีความล่าช้าที่แตกต่างกัน ในสถานการณ์เช่นนี้สัญญาณที่เดินทางในแนวเส้นตรงจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับในแนวเส้นสายตา เรียกว่าสัญญาณทางตรง (Direct Signal) ส่วนสัญญาณที่มีการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทางด้วยการสะท้อน การเลี้ยวเบนและการกระจัดกระจาย เนื่องจากสิ่งกีดขวางต่างๆหรือวัตถุระหว่างทาง เรียกว่าสัญญาณทางอ้อม (Indirect Signal) โดยการแพร่กระจายของสัญญาณแบบหลายเส้นทางนี้เป็นลักษณะที่สำคัญของช่องสัญญาณแบบไร้สายในระบบที่เครื่องรับและเครื่องส่งตั้งอยู่ภาคพื้นดินดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การเดินทางของสัญญาณในช่องสัญญาณเฟดดิงหลายวิถี

การกระจายดอปเปลอร์ถือเป็นอีกหนึ่งปรากฏการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อกำลังสัญญาณเช่นกัน เนื่องจากผู้ใช้โทรศัพท์มือถือมีการเคลื่อนที่ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคลื่นสัญญาณที่มาถึง โดยมุมของสัญญาณที่มาถึงยังเครื่องรับ (θ) จะขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน ดังภาพที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การเกิดการกระจายดอปเปลอร์

เมื่อ $e_n(t)$ คือสัญญาณเชิงซ้อนของคลื่นวิถีที่ n ที่มายังเครื่องรับ และเมื่อครื่องรับมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v จะได้ว่า

$$e_n(t) = R_n\left[\exp j\left(\frac{-2\pi\left(L_m - vt\cos\theta_n\right)}{\lambda} + \phi_n\right)\right] \tag{2.11}$$

โดยที่ L_m คือ ขนาดของช่องสัญญาณ R_n และ ϕ_n คือเฟสและรูปร่างของคลื่นวิถีที่ n เมื่อเครื่องรับและเครื่องส่งมีการเคลื่อนที่ในช่วงเวลา Δt จะมีระยะทาง $\Delta d = v\Delta t\cos\theta$ โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงของเฟสนี้จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของ $\Delta\phi = 2\pi v \Delta t \cos\theta_n / \lambda$ และความถี่ดอปเปลอร์ของคลื่นสัญญาณวิถีที่ n คือ

$$f_d = \frac{1}{2\pi}\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = v\cos\theta_n / \lambda \tag{2.12}$$

หากเครื่องรับสัญญาณมีการเคลื่อนที่เข้าหาเครื่องส่งสัญญาณ $(-\pi/2 \le \theta \le \pi/2)$ ค่าความถี่ดอปเปลอร์นั้นจะเป็นบวก ในทางตรงข้าม หากเครื่องรับสัญญาณมีการเคลื่อนที่ออกจากเครื่องส่งสัญญาณ ค่าความถี่ดอปเปลอร์จะเป็นลบ

2.7 การสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณ

สัญญาณที่เกิดขึ้นมักจะมีการสูญเสียพลังงานในตัวเองเมื่อเดินผ่านสื่อกลาง จากเครื่องส่งมายังเครื่องรับ กล่าวคือ กำลังเฉลี่ยของสัญญาณที่เครื่องรับจะมีค่าน้อยกว่ากำลังสัญญาณที่ถูกส่งออกมาเสมอ โดยความสัมพันธ์ของกำลังเฉลี่ยสัญญาณจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับที่พิจารณาเฉพาะความสูญเสียของพลังงานจากการเดินทางผ่านตัวกลางนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$P_{rx} = \frac{P_{tx}}{L_p} \tag{2.13}$$

โดยที่ P_{rx} คือกำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาครับ มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt: W) P_{tx} คือกำลังเฉลี่ยของสัญญาณภาคส่ง มีหน่วยเป็นวัตต์ และ L_p คือความสูญเสียของสัญญาณระหว่างเดินทางจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับ

สังเกตได้ว่า $L_p = \frac{P_{tx}}{P_{rx}}$ เป็นอัตราส่วนของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณจากเครื่องส่งต่อกำลังเฉลี่ยของสัญญาณเครื่องรับ และเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย หากค่า $L_p > 1$ นั่นหมายถึงมีการสูญเสียของสัญญาณเกิดขึ้น โดยค่าของ L_p นี้ สามารถหาได้จากแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณ (Propagation Path Loss Model) ซึ่งแต่ละแบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณผ่านพื้นที่จากชานเมืองไปสู่บริเวณที่มีการใช้งานของทราฟฟิกหนาแน่นนั้นเป็นที่น่าสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโทรศัพท์มือถือ ทั้งนี้มีแบบจำลองมากมายเกี่ยวกับการแพร่กระจายของสัญญาณ แม้ว่าสภาพแวดล้อมในเมืองจะขึ้นอยู่กับคลื่นความถี่ การวางตัวของตึกอาคาร โครงสร้างของวัสดุที่ทำการกีดขวาง ความสูงและความหนาแน่น ในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการสูญเสียในการแพร่กระจายสัญญาณระหว่างสถานีฐานและเครื่องโทรศัพท์มือถือที่อยู่ในเขตเมืองและชานเมือง โดยการหาค่าเฉลี่ยของการสูญเสียในฟังก์ชั่นของระยะทาง ซึ่งค่าเฉลี่ยนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาแน่นของอาคาร และแบบจำลองการสูญเสียที่จะกล่าวถึงคือโอคูมูระ และ ฮาตะ ทั้งนี้ยังรวมไปถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

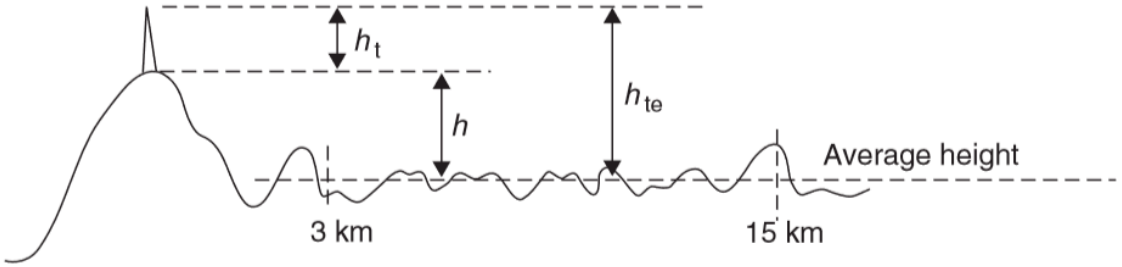
การพิจารณาแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีอย่างง่ายและแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีและชาโดว์อิง [8]

2.7.1 แบบจำลองโอคูมูระ (Okumura Model)

แบบจำลองโอคูมูระ คือแบบจำลองที่อ้างอิงจากเครื่องมือวัดที่กรุงโตเกียว ประเทศญี่ปุ่นในปี 1960 และได้มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยพื้นที่ที่ทำการพิจารณาจะแบ่งออกตามลักษณะภูมิประเทศ ได้แก่ พื้นที่แบบเปิดโล่ง พื้นที่ชานเมืองและพื้นที่ในเมือง พื้นที่แบบเปิดโล่งจะแสดงถึงพื้นที่บริเวณที่ไม่มีต้นไม้หรืออาคารสูงบดบังเส้นทางของสัญญาณ พื้นที่ชานเมืองจะแสดงถึงหมู่บ้านหรือทางหลวงที่กระจัดกระจายด้วยต้นไม้และบ้านเรือน มีวัตถุกีดขวางทางเดินของสัญญาณแต่ยังไม่แออัดมากนัก พื้นที่ในเมืองจะแสดงถึงเมืองที่มีอาคารหรือตึกขนาดใหญ่ หมู่บ้านขนาดใหญ่ที่มีต้นไม้เติบโตหนาแน่น เป็นต้น แบบจำลองของโอคูมูระ พิจารณาพื้นที่ในเมืองเป็นพื้นฐานแล้วใช้การแก้ไขปัจจัยบางอย่างสำหรับการพิจารณาภูมิประเทศบริเวณอื่น สำหรับค่าเฉลี่ยของการสูญเสียสามารถแสดงได้โดย

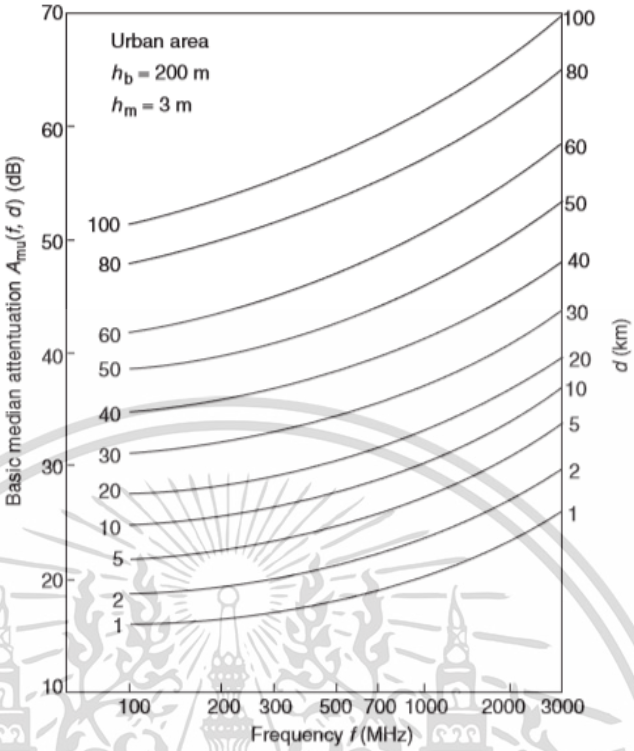
$$L_{50}(dB) = L_{FSL} + A_{mu} - H_{tu} - H_{ru} \tag{2.14}$$

โดยที่ L_{FSL} การสูญเสียสัญญาณในช่องว่างอิสระ (Free-Space Loss) A_{mu} คือ ค่าเฉลี่ยของการสูญเสียสัญญาณในช่องว่างอิสระในพื้นที่เขตเมือง โดยที่ความสูงของสถานีฐาน h_{te} = 200 เมตรและความสูงของเสาอากาศที่ตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ h_{re} =3 เมตร ค่าของ A_{mu} นี้คือฟังก์ชั่นของทั้งความถี่และระยะทาง H_{tu} คือค่าความสูงของเสาอากาศที่ตัวเครื่องส่งจากสถานีฐาน และ H_{ru} คือค่าความสูงของเสาอากาศที่ตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ รูปที่ 2.18 แสดงถึงความสูงของเสาอากาศในสถานีฐานเปรียบเทียบกับความสูงของพื้นที่ระหว่าง 3 ถึง 15 กิโลเมตรตามทิศทางของตัวรับสัญญาณ รูปที่ 2.19 แสดงถึงค่ามัธยฐานของการลดทอนสัญญาณที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่กระจายของสัญญาณในสภาพแวดล้อมบนพื้นดิน และรูปที่ 2.20 แสดงแฟคเตอร์อัตราขยายที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของเสาอากาศ

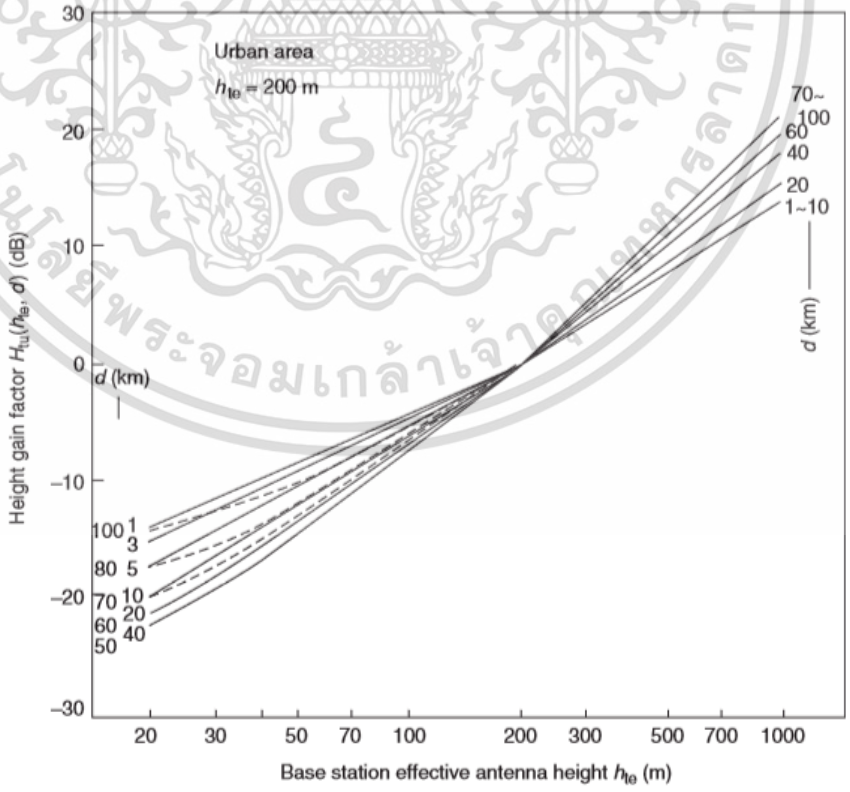


รูปที่ 2.18 ความสูงของเครื่องส่งสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การลดทอนสัญญาณในสภาพแวดล้อมบนพื้นดินของแบบจำลองโอคูมูระ



รูปที่ 2.20 ความสูงของเสาอากาศและแฟคเตอร์อัตราขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 แบบจำลองฮาตะ (Hara Model)

แบบจำลองฮาตะ (บางครั้งถูกเรียกว่าแบบจำลองโอคูมูระ-ฮาตะ) ถูกทำการพัฒนาจากแบบจำลองของโอคูมูระ เพื่อให้สามารถคำนวณการสูญเสียของสัญญาณได้ง่ายขึ้น ถึงแม้ว่ากราฟของโอคูมูระ จะสามารถใช้งานได้จริงในภาคปฏิบัติและมีประสิทธิภาพสูงเมื่อทำการออกแบบระบบ แต่ยังมีความซับซ้อนในการออกแบบระบบพอสมควร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแฟคเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ดังนั้นฮาตะ จึงได้ทำการแก้ไขพารามิเตอร์ต่างๆ จากกราฟให้อยู่ในรูปของสมการล็อกการิทึ่ม โดยแบ่งเป็น 3 แบบตามลักษณะภูมิประเทศคือ

แบบพื้นที่ในเขตเมือง

$$L_{50}(dB) = 69.55 + 26.16\log(f_c) - 13.82\log(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55\log(h_t)]\log(d) \quad (2.15)$$

โดยที่ f_c คือความถี่ที่ใช้งานจะอยู่ในช่วง150-1500 หน่วยเป็นเมกกะเฮิร์ต h_t คือ ค่าความสูงของเสาอากาศที่ตัวเครื่องส่งมีค่าตั้งแต่ 30-300 หน่วยเป็นเมตร h_r คือค่าความสูงของเสาอากาศที่ตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่หน่วยเป็นเมตร d คือระยะทางระหว่างเสาอากาศส่งถึงเสาอากาศรับมีหน่วยเป็นกิโลเมตร และ $a(h_r)$ คือแฟคเตอร์สำหรับแก้ไขค่าความสูงของเสาอากาศของตัวโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับเมืองที่มีขนาดเล็ก หรือปานกลางที่ความสูงของเสาอากาศที่ตัวเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ $1 \le h_r \le 10$ เมตร

$$a(h_r) = (1.1\log(f_c) - 0.7)h_r - (1.56\log(f_c) - 0.8) \quad (2.16)$$

และสำหรับเมืองที่มีขนาดใหญ่

$$a(h_r) = \begin{cases} 8.29(\log(1.54h_r))^2 - 1.1, & f_c \le 200 \text{ MHz} \\ 3.2(\log(11.75h_r))^2 - 4.97, & f_c \le 400 \text{ MHz} \end{cases} \quad (2.17)$$

แบบพื้นที่ในเขตชานเมือง

$$L_{50}(dB) = L_{50}(urban) - 4.78(\log(f_c))^2 + 18.33\log(f_c) - 40.94 \quad (2.18)$$

แบบพื้นที่เปิดโล่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_{50}(dB) = L_{50}(urban) - 2\left(\log\left(\frac{f_c}{28}\right)\right)^2 - 5.4 \quad (2.19)$$

แบบจำลองของฮาตะ นี้เกิดจากการดัดแปลงแบบจำลองของโอคูมูระ ให้ใช้งานได้ง่ายและสะดวกในการนำมาคำนวณ [9]

2.7.3 แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีอย่างง่าย (Log-distance Path Loss Model)

ในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลานั้น ทำให้การหาค่าการสูญเสียเชิงวิถีที่แม่นยำโดยใช้เพียงแบบจำลองเดียวเป็นไปได้ยาก แบบจำลองทั้งทางทฤษฎีและการวัดจากเครื่องมือนี้แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของกำลังสัญญาณที่ได้รับจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับระยะทางลอการิทึม โดยแบบจำลองดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางและจะแสดงเป็นฟังก์ชันของระยะทางโดยใช้เลขกำลังของการสูญเสียเชิงวิถี n

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (2.20)$$

หรือ

$$\overline{PL}(dB) = \overline{PL}(d_0) + 10n\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2.21)$$

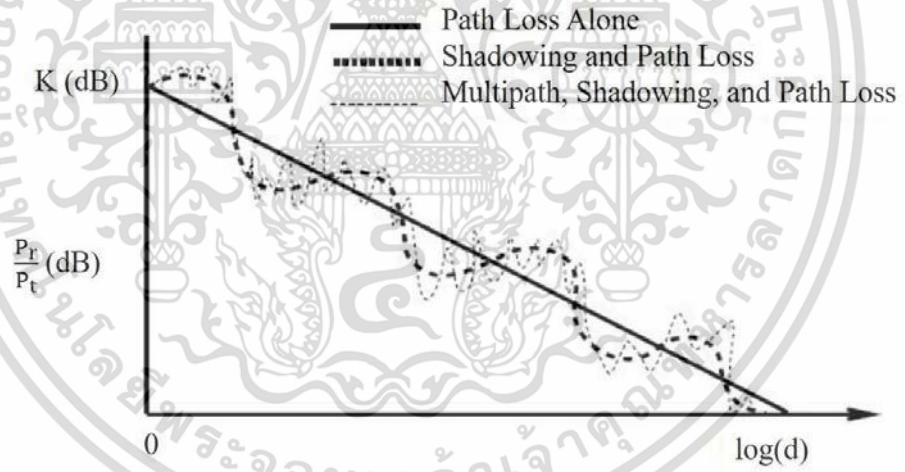
เมื่อ n คือเลขกำลังของการสูญเสียเชิงวิถีซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราการสูญเสียเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น d_0 คือระยะทางอ้างอิงจากเครื่องมือวัดไปยังเครื่องส่งสัญญาณที่ใกล้ที่สุด และ d คือระยะทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับสัญญาณ ค่าแถบในสมการที่ (2.20) และ (2.21) แสดงถึงค่าเฉลี่ยรวมของกำลังการสูญเสียที่เป็นไปได้ทั้งหมดของเส้นทางที่กำหนดค่า d เมื่อทำการพล็อตกราฟลอกสเกลจะเห็นว่า แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่ากำลังการสูญเสีย n และค่ากำลังการสูญเสียเชิงวิถีนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการแพร่กระจายของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่ากำลังการสูญเสียเชิงวิถีที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม

สภาพแวดล้อม	ค่ากำลังการสูญเสียเชิงวิถี (n)
พื้นที่โล่ง	2
พื้นที่ในเขตเมือง	2.7 ถึง 3.5
พื้นที่ในเขตเมืองที่มีเงา	3 ถึง 5
พื้นที่ในอาคาร	1.6 ถึง 1.8
พื้นที่ถูกบดบังจากอาคาร	4 ถึง 6
พื้นที่ถูกบดบังจากโรงงาน	2 ถึง 3

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือการเลือกระยะอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับสภาพแวดล้อมในการแพร่กระจายสัญญาณ ในระบบเครือข่ายเซลล์ลูลาร์ขนาดใหญ่โดยทั่วไปมักใช้ระยะอ้างอิง 1 กิโลเมตร ในขณะที่ระบบสถานีฐานไมโครมักใช้ระยะอ้างอิงที่น้อยกว่า (เช่น 100เมตร หรือ 1 เมตร) เป็นต้น



รูปที่ 2.21 ลักษณะการสูญเสียของสัญญาณแบบต่างๆ

2.7.4 แบบจำลองรวมการสูญเสียเชิงวิถีและชาโดว์อิง (Log-normal Shadowing)

แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีในสมการที่ (2.21) ไม่ได้ทำการพิจารณาถึงความแตกต่างของสภาพแวดล้อมโดยรอบซึ่งอาจมีความแตกต่างกันมากจากเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ ซึ่งนำไปสู่การวัดความเข้มของสัญญาณที่แตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยที่ทำนายไว้ตามสมการที่ (2.22) แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าที่ค่าใดๆของ d จะมีกำลังการสูญเสียเป็นแบบสุ่มและมีการกระจายแบบลอกนอร์มอล ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d) + \psi_{dB}$$
$$= \overline{PL}(d_0) + 10n\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + \psi_{dB} \quad (2.22)$$

เมื่อ ψ_{dB} คือตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบเกาส์เซียนตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.5.1 และในรูปที่ 2.22 การสูญเสียเชิงวิถีนี้จะมีกำลังของสัญญาณลดลงแบบเชิงเส้นสัมพันธ์กับ $\log(d)$ มีความชัน $10n$ dB/decade เมื่อ n คือเลขกำลังของการสูญเสียเชิงวิถี โดยความแปรปรวนของสัญญาณนี้จะขึ้นอยู่กับชาโดว์อิงที่มักมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ในระบบสื่อสารแบบไร้สายนี้จำเป็นต้องได้รับระดับของกำลังต่ำสุด $P_{\min}$ หากค่ากำลังนี้ต่ำกว่าค่า $P_{\min}$ ความสามารถของระบบจะต่ำลง จะต้องกำหนดด้วยความน่าจะเป็นเอาท์เตจ (Outage probability) $P_{out}(P_{\min,d})$ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดสัญญาณขาดหาย

2.8 สัญญาณรบกวน

ปัจจุบันมีผู้ใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่อยู่เป็นจำนวนมาก การรักษาระดับของสัญญาณและการปรับปรุงคุณภาพในแต่ละช่องสัญญาณของการติดต่อสื่อสารมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณ คือระดับความแรงของสัญญาณรบกวน โดยสัญญาณรบกวนในระบบการสื่อสารไร้สายมีอยู่สองประเภทหลัก คือ สัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งในงานวิจัยนี้ เราทำการพิจารณาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิและสัญญาณแทรกสอด (Interference) โดยทั่วไปสัญญาณทั้งสองประเภทนี้จะเกิดขึ้นในระบบตลอดเวลาทั้งที่มีอยู่ในระบบ และที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของระบบในการใช้งาน

2.8.1 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิ (Thermal Noise)

สัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุณหภูมิ เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ในเครื่องรับ โดยมาจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มตามอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านตัวนำ ที่มีความต้านทานภายในวงจร โดยสเปคตรัมกำลังของสัญญาณรบกวนนี้จะมีลักษณะที่เรียบ หรือกล่าวได้ว่าทุกๆฮาร์โมนิกของสัญญาณรบกวนจะมีค่าพลังงานเท่ากันอย่างต่อเนื่องตลอดย่านสเปคตรัมดังภาพที่ 2.22 บางครั้งจะเรียกสัญญาณรบกวนประเภทนี้ว่า สัญญาณรบกวนขาว (White Noise) โดยสมการทั่วไปสำหรับแรงดันไฟฟ้าภายในแบนด์วิดท์ที่กำหนดคือ

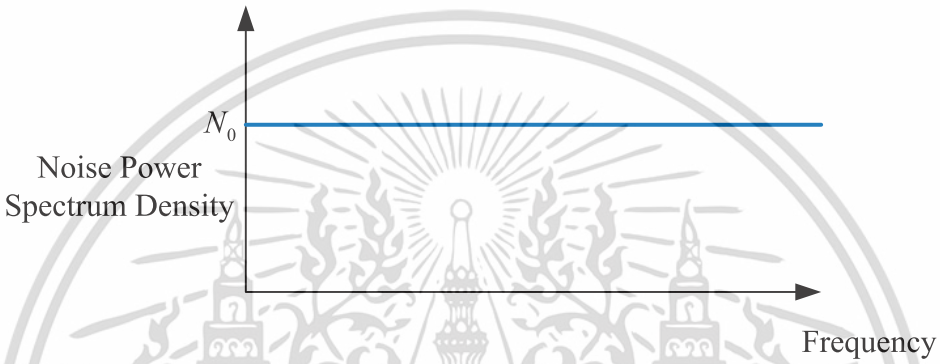
$$V = \sqrt{4kTBR_{\text{ohm}}} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ k คือค่าคงที่ของโบล์ทแมนน์ มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23}(J/K) T คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวิน B คือช่วงแบนด์วิดท์ที่พิจารณามีหน่วยเป็น Hz และ R_{ohm} คือความต้านทานของตัวนำมีหน่วยเป็น Ohm

ในขณะที่การคำนวณสัญญาณรบกวนดังกล่าวข้างต้นจะแสดงในรูปของแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถแสดงการคำนวณในรูปของระดับพลังงานได้เช่นกัน

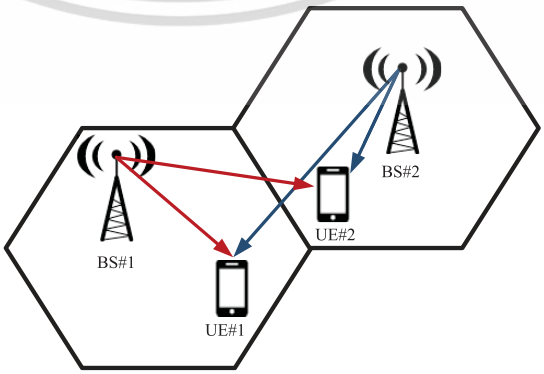
$$N_0(dBm) = 10\log_{10}(1000kTB) \tag{2.24}$$



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงความหนาแน่นของสัญญาณรบกวน

2.8.2 การแทรกสอดในช่องสัญญาณเดียวกัน (Co-channel Interference)

การแทรกสอดในช่องสัญญาณเดียวกัน เกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณมากกว่า 2 สัญญาณขึ้นไปกำลังใช้ช่องสัญญาณที่ความถี่เดียวกัน ซึ่งแตกต่างจากสัญญาณรบกวนโดยอุณหภูมิ (Thermal Noise) ที่สามารถลดทอนได้โดยการเพิ่ม SNR แต่การแทรกสอดในช่องสัญญาณเดียวกันนี้ไม่สามารถทำได้โดยการเพิ่มกำลังส่งสัญญาณจากเครื่องส่ง เนื่องจากการเพิ่มกำลังส่งจากเครื่องส่งสัญญาณนี้จะไปเพิ่มสัญญาณรบกวนต่อเซลล์ข้างเคียง ถือเป็นข้อบกพร่องหลักที่ทำให้เกิดการจำกัดประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในเครือข่าย



รูปที่ 2.23 การแทรกสอดสัญญาณ

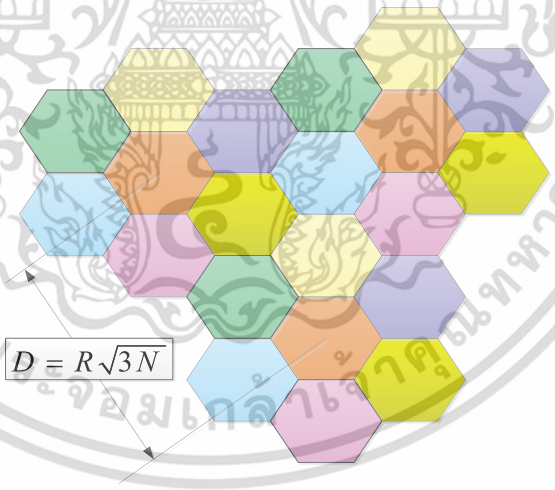
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อการลดการแทรกสอดในช่องสัญญาณเดียวกัน และแก้ไขข้อจำกัดของทรัพยากรด้านความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดของแต่ละผู้ให้บริการ จึงจำเป็นต้องมีการนำความถี่ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ในเซลล์ต่างๆที่อยู่ห่างไกลออกไป (Frequency Reuse) โดยกำหนดให้ความถี่ชุดเดิมที่ใช้งานในบริเวณหนึ่งไปใช้งานในอีกบริเวณหนึ่ง และไม่ส่งผลกระทบต่อกันหรือส่งผลกระทบน้อยให้ที่สุดในระดับที่ระบบยอมรับได้ และไม่ทำให้คุณภาพของระบบด้วยลง

ขอบเขตของกลุ่มความถี่เรียกว่า คลัสเตอร์ (Cluster) ซึ่งจะมีการใช้ความถี่ซ้ำและกระจายไปครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ หลักการออกแบบเซลล์นั้นกำลังสัญญานของแต่ละเซลล์จะถูกจำกัดอยู่ภายในรัศมี (R) ทำการของแต่ละเซลล์ และระยะทางระหว่างจุดศูนย์กลางของเซลล์ที่อยู่ใกล้กัน (D) ดังสมการ

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \tag{2.25}$$

เมื่อ Q คืออัตราส่วนของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ และ N คือขนาดคลัสเตอร์สำหรับเซลล์ที่มีรูปทรงหกเหลี่ยม



รูปที่ 2.24 การนำความถี่กลับมาใช้ใหม่สำหรับเซลล์ที่อยู่ติดกัน

จากภาพแสดงตัวอย่างขนาดคลัสเตอร์ N =7 (i=1, j=2) จะเห็นว่าเซลล์ที่มีสีเดียวกันจะใช้งานที่ความถี่เดียวกัน และหากขนาดของคลัสเตอร์ใหญ่แสดงว่าอัตราส่วนระหว่างรัศมีของเซลล์และระยะทางของเซลล์ที่ติดกันมีค่ามาก ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเรานิยมให้ขนาดคลัสเตอร์มีค่าน้อยเพราะจะทำให้จำนวนช่องสัญญาณสื่อสารของแต่ละเซลล์มีจำนวนมากขึ้น สามารถให้บริการผู้ใช้งานโทรศัพท์ได้มาก [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ขนาดคลัสเตอร์และอัตราส่วนของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่

	ขนาดคลัสเตอร์ (N)	อัตราส่วนของการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ (Q)
i=1, j=1	3	3
i=1, j=2	7	4.58
i=2, j=2	12	6
I=1, j=3	13	6.24

2.8.3 การแทรกสอดในช่องสัญญาณต่างกัน (Adjacent Interference)

การแทรกสอดของสัญญาณที่อยู่ติดกัน เกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณมากกว่า 2 สัญญาณขึ้นไปกำลังใช้ช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน โดยเกิดจากวงจรกรองสัญญาณที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งยอมให้มีสัญญาณที่ความถี่ใกล้เคียงกันลอดผ่านเข้ามาได้ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการใช้งานโทรศัพท์มือถือเป็นอย่างมาก เช่น ในกรณีที่มีโทรศัพท์ 2 เครื่อง ส่งสัญญาณโดยใช้ความถี่ใกล้เคียงกัน โทรศัพท์เครื่องแรกอยู่ใกล้สถานีฐานมากๆ ส่วนโทรศัพท์อีกเครื่องอยู่ห่างจากสถานีฐานออกไป ระดับสัญญาณที่รับได้ของสถานีฐานจากโทรศัพท์ทั้งสองเครื่องนี้ จะมีความแตกต่างกันมาก ส่งผลให้การแทรกสอดในช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกันนี้มีความรุนแรงมากขึ้น (Near-Far Effect)

เพื่อลดการแทรกสอดของสัญญาณในช่องสัญญาณใกล้เคียงกันนี้ มักแก้โดยการออกแบบวงจรกรองที่มีคุณลักษณะที่ดี สามารถกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการออกมาให้ได้มากที่สุด หรืออีกวิธีที่นิยมใช้กันคือการจัดสรรความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในแต่ละเซลล์นั่นเอง

2.9 การเลือกสถานีฐานเพื่อทำการเชื่อมต่อ

ในเครือข่ายแอลทีอีนั้น อุปกรณ์สื่อสารจำเป็นต้องวัดระดับความแรงและคุณภาพของสัญญาณจากสถานีฐานที่ตัวเองเชื่อมต่ออยู่รวมไปถึงสถานีฐานข้างเคียงอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าอุปกรณ์สื่อสารนั้นจะอยู่ในสถานะการเชื่อมต่อ แฮนด์โอเวอร์ หรือยังไม่มีการเชื่อมต่อก็ตาม เพื่อทำการเลือกสถานีฐานที่เหมาะสม รักษาคุณภาพของสัญญาณให้คงที่ในการเชื่อมต่อ โดยจะทำการวัด 2 พารามิเตอร์บนสัญญาณอ้างอิง สัญญาณอ้างอิงที่ได้รับ (Reference Signal Received Power : RSRP) และคุณภาพของสัญญาณอ้างอิงที่ได้รับ (Reference Signal Received Quality : RSRQ) [10]

RSRP คือค่าเฉลี่ยกำลังสัญญาณของ REs (มีหน่วยเป็นวัตต์) ที่ประกอบไปด้วย CSRS ในแบนด์วิดท์ที่กำหนด เป็นค่าที่สำคัญที่สุดสำหรับอุปกรณ์สื่อสารเพื่อทำการเลือกสถานีฐานที่จะทำการเชื่อมต่อและแฮนด์โอเวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการกำหนดค่า RSRP ต้องใช้สัญญาณอ้างอิงเฉพาะ (CSRS) R0 ตาม 3GPP TS.36.211 จะถูกนำมาใช้ หากอุปกรณ์สื่อสารสามารถตรวจพบว่า R1 สามารถใช้งานได้ดีกว่า อุปกรณ์สื่อสารจะเลือกใช้ R1 และให้ R0 เป็นตัวกำหนด RSRP เมื่อ R0 คือ CSRS สำหรับเสาอากาศพอร์ตที่ 0 และ R1 คือ CSRS สำหรับเสาอากาศพอร์ตที่ 1 ทั้งนี้ค่า RSRP นั้นสามารถคำนวณได้โดย

$$RSRP(dBm) = RSSI(dBm) - 10*\log(12*N) \quad (2.26)$$

โดยที่ $RSSI$ หรือ Received Signal Strength Indicator คือค่าที่ใช้บอกความแรงของสัญญาณที่ได้รับในเทอมของพลังงานซึ่งจะประกอบด้วยค่ากำลังสัญญาณและสัญญาณรบกวน และ N คือจำนวนของ RBs

RSRQ คือคุณภาพของสัญญาณอ้างอิงที่รับได้ เกี่ยวข้องกับคุณภาพการเชื่อมต่อโดยมีพื้นฐานมาจากค่า SINR โดยการวัด RSRQ นี้จะให้ข้อมูลเพิ่มเติมเมื่อค่าสัญญาณ RSRP ไม่เพียงพอต่อการตัดสินใจในการเลือกเชื่อมต่อสถานีฐาน สามารถคำนวนได้โดย

$$RSRQ = \frac{RSRP}{RSSI} * N \quad (2.27)$$

2.10 การแฮนด์โอเวอร์

แนวคิดของระบบโทรศัพท์มือถือคือ มีสถานีฐานจำนวนมากที่ให้บริการครอบคลุมพื้นที่ขนาดเล็ก และเป็นผลทำให้เกิดการนำความถี่กลับมาใช้ซ้ำได้ นอกจากนี้ระบบโทรศัพท์มือถือจำเป็นต้องออกแบบมาเพื่อรองรับการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน เป็นผลให้ความต้องการขั้นพื้นฐานของระบบคือต้องสามารถใช้งานโทรศัพท์ได้ในขณะที่ผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่จากเซลล์หนึ่งไปยังอีกเซลล์หนึ่งโดยไม่ทำให้คุณภาพของการใช้งานลดลงหรือหยุดชะงัก และมีสองคำที่ใช้อธิบายกระบวนการนี้ 1.แฮนด์โอเวอร์ ซึ่งมักใช้ในทวีปยุโรปและ 2.แฮนด์ออฟ ซึ่งมักใช้ในทวีปอเมริกาเหนือ

การแฮนด์โอเวอร์หรือแฮนด์ออฟ ถือเป็นสิ่งสำคัญในเครือข่ายโทรคมนาคม มีความจำเป็นต้องมีการตรวจสอบให้แน่ใจว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างน่าเชื่อถือและปราศจากการรบกวนจากสายอื่นๆ ความล้มเหลวในกระบวนการนี้จะทำให้เกิดการยกเลิกการโทร และเป็นปัจจัยสำคัญที่อาจนำไปสู่ความไม่พอใจของผู้ใช้บริการ ซึ่งจะทำให้พวกเขาเปลี่ยนไปใช้บริการจากผู้ให้บริการเครือข่ายรายอื่น ด้วยเหตุนี้การแฮนด์โอเวอร์จึงเป็นหนึ่งในตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่สำคัญในเครือข่ายมือถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1 พื้นฐานการแฮนด์โอเวอร์

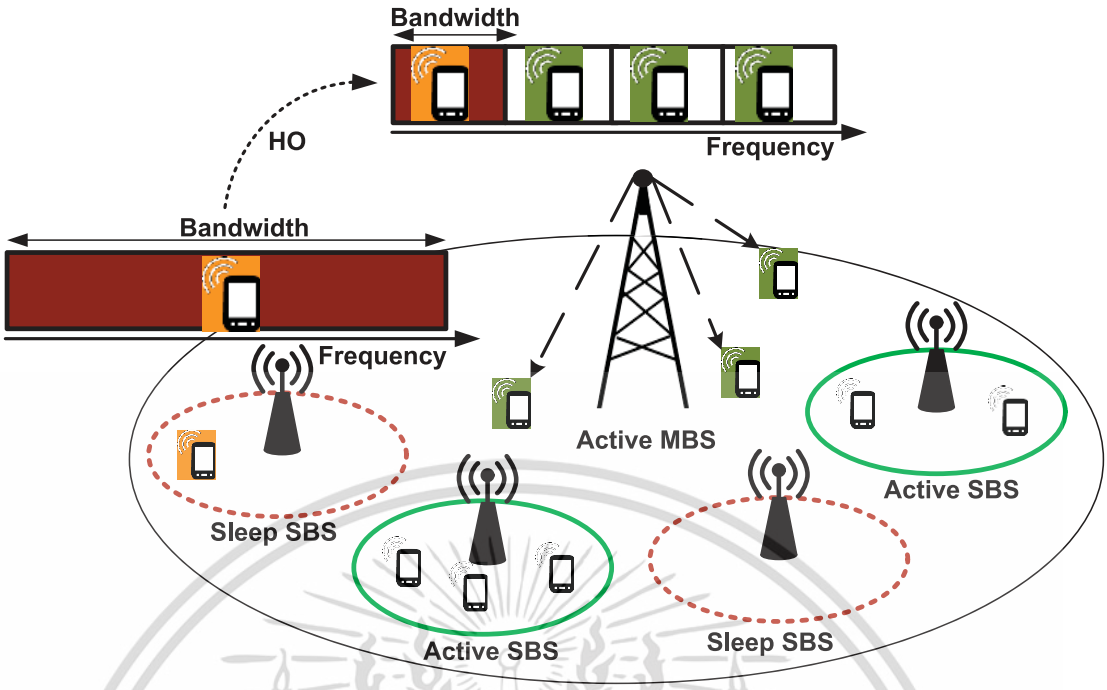
แม้ว่าแนวคิดของการแฮนด์โอเวอร์จะค่อนข้างตรงไปตรงมา แต่ในความเป็นจริง เครือข่ายโทรศัพท์มือถือจำเป็นต้องตัดสินใจว่าเมื่อไหร่ควรที่จะแฮนด์โอเวอร์ไปยังสถานีฐานใด นอกจากนี้เมื่อมีการแฮนด์โอเวอร์เกิดขึ้นจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนเส้นทางการสื่อสารไปยังสถานีฐานที่เหมาะสมควบคู่ไปกับการเปลี่ยนการสื่อสารระหว่างโทรศัพท์และสถานีฐานไปยังช่องสัญญาณใหม่ โดยกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนทั้งหมดนี้ต้องดำเนินการโดยไม่มีผลกระทบต่อการใช้งานโทรศัพท์ ซึ่งในช่วงเริ่มการแฮนด์โอเวอร์นั้นการใช้งานอาจขาดหายหากกระบวนการทำงานไม่ถูกต้อง

มีพารามิเตอร์จำนวนมากที่จำเป็นต้องทราบเพื่อกำหนดว่าเมื่อไหร่ควรมีการแฮนด์โอเวอร์ ความเข้มของสัญญาณจากสถานีฐานที่มีการสื่อสารอยู่รวมไปถึงความเข้มของสัญญาณจากสถานีฐานข้างเคียงมีมากน้อยเพียงใด และนอกจากนี้ความพร้อมของช่องสัญญาณยังจำเป็นที่ต้องทราบอีกเช่นกัน โทรศัพท์มือถือเหมาะสมที่จะมีคุณสมบัติคอยตรวจสอบความเข้มของสัญญาณจากสถานีฐาน แต่มีเพียงเครือข่ายโทรศัพท์มือถือเท่านั้นที่ทราบถึงสถานะความพร้อมใช้งานของช่องสัญญาณและเครือข่ายจะต้องตัดสินใจว่าเมื่อไหร่ควรที่จะแฮนโอเวอร์ไปยังเซลล์ใด

ดังนั้นโทรศัพท์มือถือจึงมีการตรวจสอบความเข้มของสัญญาณจากสถานีฐานที่เชื่อมต่ออยู่และส่งข้อมูลกลับมายังเครือข่ายอย่างต่อเนื่อง เมื่อความเข้มของสัญญาณจากสถานีฐานที่ทำการเชื่อมต่ออยู่นั้นมีกำลังอ่อนลงไปถึงระดับที่ต้องดำเนินการแฮนด์โอเวอร์ เครือข่ายจะตรวจสอบความเข้มของสัญญาณจากสถานีฐานโดยรอบที่ได้รับรายงานมาจากโทรศัพท์มือถือ จากนั้นจะตรวจสอบความพร้อมในการใช้งานของช่องสัญญาณ หากมีช่องสัญญาณใดว่างและพร้อมที่จะใช้งาน เครือข่ายจะทำการแจ้งให้สถานีฐานใหม่สำรองช่องสัญญาณไว้สำหรับการใช้งาน เมื่อพร้อมแล้วสถานีฐานที่เชื่อมต่ออยู่นั้นจะส่งข้อมูลสำหรับช่องสัญญาณใหม่ไปยังอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ จากนั้นโทรศัพท์มือถือจะส่งข้อความไปยังเครือข่ายบนช่องสัญญาณใหม่ หากการส่งและรับข้อความนี้สำเร็จเครือข่ายจะทำการปิดการสื่อสารกับโทรศัพท์มือถือบนช่องสัญญาณเดิมเพื่อเปิดโอกาสให้ผู้ใช้รายอื่นและการสื่อการทั้งหมดก็จะเกิดขึ้นบนช่องสัญญาณใหม่ [11]

ในทำนองเดียวกันนี้การแฮนด์โอเวอร์ในงานวิจัยที่นำเสนอนั้น เกิดขึ้นเมื่อสถานีฐานบางสถานีถูกเปลี่ยนสถานะการใช้งานให้อยู่ในโหมดประหยัดพลังงาน (Sleep Mode) ทำให้ผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่อยู่ในโหมดประหยัดพลังงานนั้น ต้องทำการย้ายไปเชื่อมต่อกับสถานีฐานใหม่ที่มีความเข้มของสัญญาณมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 การแฮนโอเวอร์หลังจากทำการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐาน

2.10.2 การแฮนด์โอเวอร์แบบฮาร์ด

การแฮนด์โอเวอร์แบบฮาร์ด แสดงถึงการแฮนด์โอเวอร์ที่อาจทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพการใช้งานและทำการเชื่อมต่อใหม่ แม้ว่าแฮนด์โอเวอร์แบบฮาร์ดนี้จะไม่ค่อยมีผลกระทบกับการใช้งาน แต่ยังมีความเป็นไปได้ที่ผู้ใช้อาจสังเกตเห็นการหยุดเชื่อมต่อเพียงชั่วคราว โดยมีขั้นตอนพื้นฐานในการแฮนด์โอเวอร์ดังนี้

1) เครือข่ายจำเป็นต้องรู้ระดับความเข้มของสัญญาณที่เชื่อมต่ออยู่และความเข้มของสัญญาณจากสถานีฐานข้างเคียง

2) การเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานกับสถานีฐานหยุดลง

3) มีการเชื่อมต่อใหม่เกิดขึ้นระหว่างผู้ใช้งานและสถานีฐานใหม่

กล่าวได้ว่าแฮนด์โอเวอร์แบบฮาร์ดจะอาศัยการส่งต่อสัญญาณโดยการ ตัดก่อนต่อ (break before make) ทำให้ในขณะนั้นอุปกรณ์สื่อสารสารสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานได้เพียงแห่งเดียวเท่านั้น

หนึ่งในปัญหาที่แฮนด์โอเวอร์แบบฮาร์ดเผชิญคือ เมื่อระดับผู้ใช้งานมีจำนวนมากขึ้น ความจุของสถานีฐานที่ผู้ใช้งานพยายามที่จะเชื่อมต่ออาจไม่เพียงพอต่อการรองรับผู้ใช้งานใหม่ เพื่อแก้ปัญหานี้ จำเป็นต้องสำรองความจุบางส่วนไว้สำหรับผู้ใช้งานใหม่ โดยการกระจายโหลดไปยังสถานีฐานข้างเคียงอื่นๆที่เป็นไปได้ ตัวอย่างเช่น ผู้ใช้งานที่สามารถรับสัญญาณที่แรงพอจากสถานีฐานข้างเคียงอาจถูกย้ายไปเชื่อมต่อสถานีฐานนั้นๆเนื่องจากสถานีฐานเดิมมีความจุไม่เพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 การแฮนด์โอเวอร์แบบซอฟท์

การแฮนด์โอเวอร์แบบซอฟท์ เกิดขึ้นเมื่อผู้ใช้งานโทรศัพท์มือถืออยู่ในพื้นที่ครอบคลุมซ้อนทับกันระหว่างสองสถานีฐาน สามารถเชื่อมต่อไปทั้งสองสถานีฐานได้ในเวลาเดียวกันและสามารถทำการสื่อสารได้ทั้งสองสถานีฐาน เมื่อมีการใช้งานการเชื่อมต่อมากกว่าหนึ่งการเชื่อมต่อในระหว่างดำเนินการแฮนด์โอเวอร์ เป็นประเภทการแฮนด์โอเวอร์ที่น่าเชื่อถือและให้ความราบรื่นมากที่สุดในการสื่อสาร

แฮนด์โอเวอร์แบบซอฟท์จะอาศัยการส่งต่อสัญญาณโดยการ ต่อก่อนตัด (make before break) โดยระบบจะสร้างช่องสัญญาณเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานกับอุปกรณ์สื่อสารไว้ให้เรียบร้อยก่อนแล้วจึงยุติการเชื่อมต่อกับสถานีฐานเดิม ดังนั้นช่วงเวลาดังกล่าวอุปกรณ์สื่อสารจะมีการเชื่อมต่อกับสถานีฐานได้มากกว่าหนึ่งแห่ง และสามารถเลือกช่องสัญญาณการสื่อสารที่มีคุณภาพดีที่สุดได้

เนื่องจากการแฮนด์โอเวอร์แบบซอฟท์จะทำการเชื่อมต่อหลายครั้งในเวลาเดียวกันนั่นหมายความว่าสถานีฐานที่อยู่ติดกันต้องดำเนินการบนความถี่หรือช่องสัญญาณเดียวกัน เมื่ออุปกรณ์โทรศัพท์และสถานีฐานตัดสินใจที่จะแฮนด์โอเวอร์ อุปกรณ์โทรศัพท์จะรับสัญญาณจากสองสถานีฐานและรวมสัญญาณเหล่านั้นและเลือกประมวลผลจากสัญญาณที่ชัดที่สุด

2.11 แบบจำลองการใช้พลังงานในเครือข่าย

อุตสาหกรรมการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่กำลังเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันมีผู้ใช้โทรศัพท์มือถือทั่วโลกกว่าสี่พันล้านราย มากกว่าครึ่งหนึ่งของประชากรทั้งหมดในโลก เห็นได้ชัดว่าการเติบโตนี้มาพร้อมกับการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นของเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ ภาวะโลกร้อนและความกังวลเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมทำให้ต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษกับความสามารถในการใช้พลังงานของระบบเหล่านี้ โครงการเอิร์ทวัน (EARTH1) พยายามที่จะบรรลุเป้าหมายโดยทำการพัฒนาออกแบบและนำเสนอวิธีต่างๆเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการใช้พลังงานของเครือข่ายการสื่อสารไร้สายเคลื่อนที่

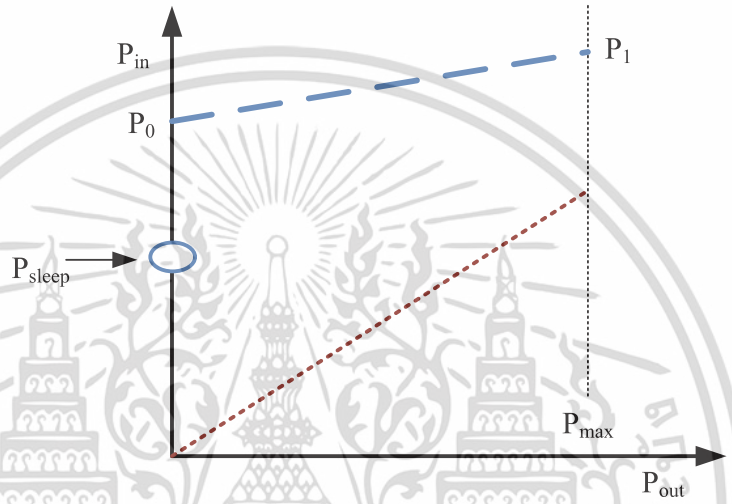
จากการสำรวจที่ผ่านมาพบว่าการใช้พลังงานทั้งหมดของเครือข่ายมือถือนั้นประกอบด้วยสถานีฐาน อุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ และศูนย์กลางเครือข่าย แสดงให้เห็นว่าประมาณ 80% ของพลังงานที่จำเป็นในการใช้งานเครือข่ายเซลล์ลูลาร์ถูกบริโภคโดยสถานีฐาน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเน้นการใช้พลังงานจากสถานีฐานเป็นหลัก

จากรูปที่ 2.26 แสดงลักษณะเฉพาะของการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าของสถานีฐานสำหรับเครือข่ายแอลทีอี จากรายละเอียดการศึกษาส่วนประกอบของสถานีฐานในโครงการ EARTH แสดงให้เห็นว่ามีออฟเซตกำลังไฟฟ้าสูงที่โหลดเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาท์พุต P_{out} และกำลังอินพุต P_{in} ที่ถูกประมาณโดยฟังก์ชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{in} = \begin{cases} N_{trx}(P_0 + \Delta_p P_{out}) & 0 < P_{out} \le P_{\max} \\ N_{trx} \cdot P_{sleep} & P_{out} = 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

โดยที่ N_{trx} คือจำนวนของเสาอากาศที่เครื่องส่ง/เครื่องรับต่อสถานีฐาน P_0 คือกำลังไฟฟ้าที่โหลดน้อยที่สุดที่ไม่ใช่ศูนย์ $P_{\max}$ คือกำลังส่งไฟฟ้าสูงสุดสำหรับแต่ละองค์ประกอบ P_{out} คือเศษส่วนของ $P_{\max}$ และ Δ_p คือค่าความชันของกำลังไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับโหลด



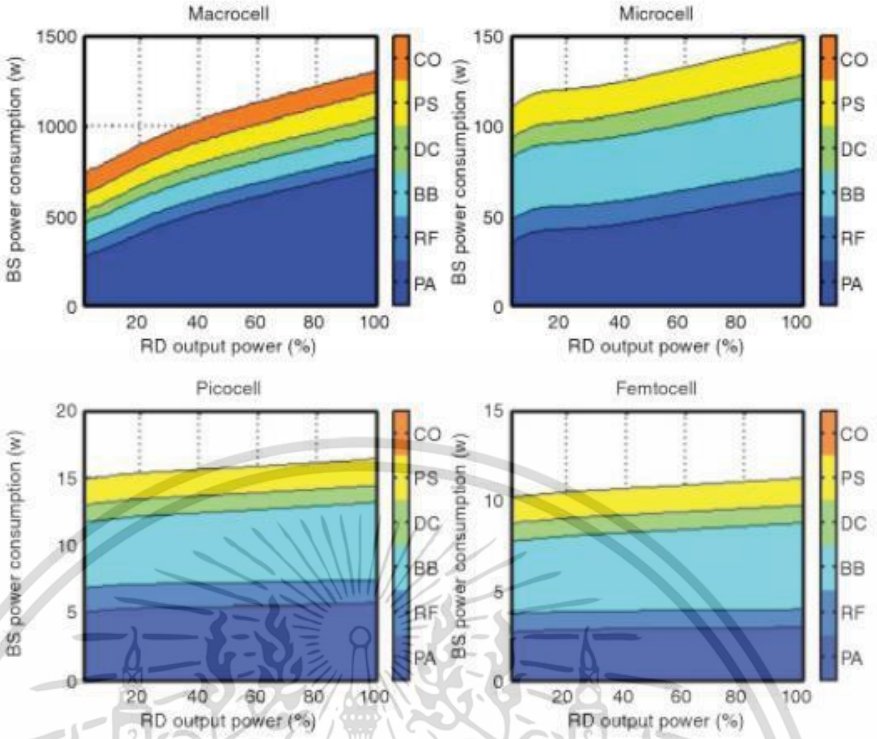
รูปที่ 2.26 แบบจำลองการใช้กำลังไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับโหลด

พารามิเตอร์ของแบบจำลองกำลังไฟฟ้าเชิงเส้นสำหรับสถานีฐานที่น่าสนใจนั้นคำนวณจากการประมาณค่ากำลังสองที่น้อยที่สุดและถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 และรูปที่ 2.27 โดยพารามิเตอร์จะพิจารณาบนพื้นฐานของระบบแอลทีอีที่มีแบนด์วิดท์ 2x10 MHz และ 2x2 MIMO

ตารางที่ 2.4 แบบจำลองกำลังไฟฟ้าในแต่ละประเภทของสถานีฐาน

BS Type	N_{trx}	$P_{\max}$ [W]	P_0 [W]	Δ_p	P_{sleep} [W]
Macro	6	20	130	4.7	75
Micro	2	6.3	56	2.6	39
Pico	2	0.13	6.8	4.0	4.3
Femto	2	0.05	4.8	8.0	2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 พลังงานรวมสำหรับสถานีฐานประเภทต่างๆ [12]

2.12 การกระจายของผู้ใช้งาน

สำหรับเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สายนั้น อุปกรณ์สื่อสารสามารถถูกกระจายภายในเครือข่ายได้ 2 ลักษณะคือ การกระจายแบบยูนิฟอร์ม และการกระจายแบบนอนยูนิฟอร์ม (ฮอตสปอต) สำหรับการกระจายแบบยูนิฟอร์ม อุปกรณ์สื่อสารจะถูกกระจายออกไปแบบสุ่มอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่ครอบคลุมทางภูมิศาสตร์ของสถานีฐานมาโคร ในขณะที่การกระจายแบบนอนยูนิฟอร์มอุปกรณ์สื่อสารบางส่วนจะกระจายตำแหน่งแบบสุ่มภายในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานขนาดเล็กและอุปกรณ์สื่อสารส่วนที่เหลือจะถูกกระจายออกไปแบบสุ่มอย่างสม่ำเสมอในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร [13] โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการพิจารณาการกระจายของผู้ใช้งานในลักษณะการกระจายแบบยูนิฟอร์ม เพื่อความสม่ำเสมอในทุกๆบริเวณของสถานีฐานที่จะทำการพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การประเมินทรูพุทระบบโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี โดยวิธีสลีพคอนโทรล

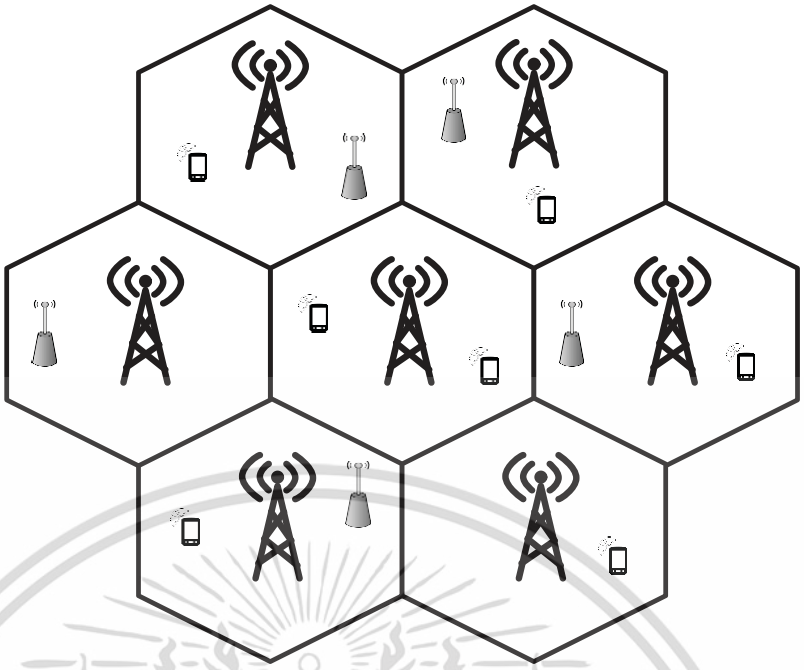
โครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี ได้ถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มความจุของเครือข่ายด้วยสถานี-ฐานที่กระจายสัญญาณด้วยกำลังส่งต่ำ สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มากขึ้น และแก้ไขปัญหาในเรื่องจุดอับสัญญาณได้ แต่ในขณะเดียวกัน ยังมีปัญหาบางประการที่เกิดขึ้นในการใช้งานโครงข่ายนี้ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนของสถานีฐานกำลังส่งต่ำมากขึ้นในระบบนั้น จะเป็นการเพิ่มการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะโลกร้อนอีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการลดการใช้พลังงานในระบบ โดยเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กโดยวิธีสลีพคอนโทรล ซึ่งทำการพิจารณาจากทรูพุทของสถานีฐานนั้นๆ เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็ก และเมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีดั้งเดิมคือการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กโดยพิจารณาจากจำนวนผู้ใช้งานที่ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐานนั้นๆ จะสังเกตุได้ว่า ภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกันวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ดีกว่าและยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทรูพุทการรับส่งข้อมูลในระบบ ในขณะที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เท่ากันในระบบ ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงแบบจำลองของระบบ การลดการใช้พลังงานจากสถานีฐานขนาดเล็กโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบเดิม การลดการใช้พลังงานจากสถานีฐานขนาดเล็กโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบที่นำเสนอโดยพิจารณาจากทรูพุทของสถานีฐานขนาดเล็ก ซึ่งประกอบไปด้วยวิธีการคำนวณทรูพุท วิธีการกำหนดค่าการใช้พลังงานในระบบ

3.1 แบบจำลองที่ใช้ในระบบ

ในโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีที่ประกอบไปด้วยสถานีฐานมาโครและสถานีฐานขนาดเล็กนั้น รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของเครือข่าย โดยมีสถานีฐานมาโครตั้งอยู่ที่จุดศูนย์กลางของพื้นที่ครอบคลุมรูปทรงหกเหลี่ยม และสถานีฐานขนาดเล็กจะมีการกระจายแบบสุ่มอย่างสม่ำเสมอในบริเวณโดยรอบ รวมถึงอุปกรณ์สื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1. แบบจำลองของระบบ

สถานีฐานมาโครถูกจัดสรรให้อยู่กึ่งกลางในบริเวณพื้นที่รูปหกเหลี่ยมจำนวน 7 เซลล์ โดยกำหนดรัศมีครอบคลุมพื้นที่ของสถานีฐานมาโครคือ 500 เมตร จำนวนของสถานีฐานขนาดเล็ก N_{SB} และจำนวนของผู้ใช้งาน N_{UE} มีการกระจายแบบยูนิฟอร์มซึ่งเป็นการกระจายแบบสุ่มอย่างสม่ำเสมอในแต่ละพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร ผู้ใช้งานในที่นี้ถูกกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ จำนวน 50 ยูเซอร์ต่อหนึ่งเซลล์ ในขณะที่จำนวนสถานีฐานขนาดเล็กนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นจาก 5 ไปจนถึง 50 สถานีต่อหนึ่งพื้นที่ครอบคลุมมาโคร เทคนิคการจัดการและการเข้าถึงสัญญาณคือ Orthogonal Frequency Division Multiple Accesses (OFDMA) ซึ่งสถานีฐานขนาดเล็กหรือสถานีฐานมาโครจัดแจงจำนวนความถี่ให้กับผู้ใช้งานที่มาเชื่อมต่อนั้นๆโดยแบ่งคลื่นความถี่ W (MHz) ในจำนวนเท่ากัน การแทรกสอดของสัญญาณร่วมกำหนดให้เกิดขึ้นระหว่างชนิดเดียวกันของสถานีฐานเนื่องจากมีการใช้แถบความถี่ของผู้ให้บริการที่แตกต่างกันระหว่างสถานีฐานขนาดเล็กและสถานีฐานมาโคร รูปแบบการส่งข้อมูลคือฟูลบัฟเฟอร์ (Full Buffer) ในรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Model) รูปแบบการสูญเสียพิจารณาการสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) และชาโดว์อิง (Shadowing) ดังนั้นกำลังสัญญาณภาครับ P_{rx}^{j} ของผู้ใช้ที่ $j-\mathrm{th}$ ที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ $i-\mathrm{th}$ แสดงได้โดย

$$P_{\mathrm{rx}}^{j} = P_{\mathrm{tx}}^{j} - (PL^{j} + \psi^{j}) \tag{3.1}$$

โดยที่ P_{tx}^{j} คือกำลังสัญญาณภาคส่งของสถานีฐานที่ $i-\mathrm{th}$, ψ^{j} คือการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากเงาหรือชาโดว์อิงซึ่งเป็นไปตามการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล (Log-normal) [6] และ PL^{j}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือการลดทอนเนื่องจากระยะทางจากสถานีฐานที่ถูกเชื่อมต่อด้วยผู้ใช้บริการ $j-\text{th}$ การลดทอน PL^j ในสมการที่ (3.1) ถูกจำลองโดยอ้างอิงจากกรณีศึกษาที่ 1 ของแบบจำลองจาก 3GPP [7] การลดทอน PL^j_{MB} สำหรับสถานีฐานมาโครมาถึงผู้ใช้งานแสดงได้โดย

$$PL^j_{\text{MB}} = 128.1 + 37.6 \log r^j \tag{3.2}$$

โดยที่ r^j คือระยะทางจากสถานีฐานที่ถูกเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการที่ $j-\text{th}$ และการลดทอน PL^j_{SB} สำหรับสถานีฐานขนาดเล็กมาถึงผู้ใช้งานสามารถแสดงได้โดย

$$PL^j_{\text{SB}} = 140.7 + 36.7 \log r^j \tag{3.3}$$

สำหรับ SINR ของผู้ใช้ที่ $j-\text{th}$ สามารถแสดงได้โดย

$$\gamma^j_{\text{UE}} = \frac{P^j_{\text{rx}}}{I^j + N_0 B^j_{\text{UE}}} \tag{3.4}$$

โดยที่ N_0 คือความหนาแน่นของสัญญาณรบกวน, I^j คือสัญญาณรบกวนที่ผู้ใช้ $j-\text{th}$ จากสถานีฐานอื่นที่ให้บริการยกเว้นสถานีฐานที่ผู้ใช้งานเชื่อมต่อ ซึ่งสามารถแสดงได้โดย

$$I^j = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq j}}^{N} P^n_{\text{rx}} \tag{3.5}$$

โดยที่ N คือจำนวนของสถานีฐานที่ให้บริการที่สร้างสัญญาณรบกวนและ P^n_{rx} คือกำลังสัญญาณภาครับจากสถานีฐาน $n-\text{th}$ ที่สร้างสัญญาณรบกวน

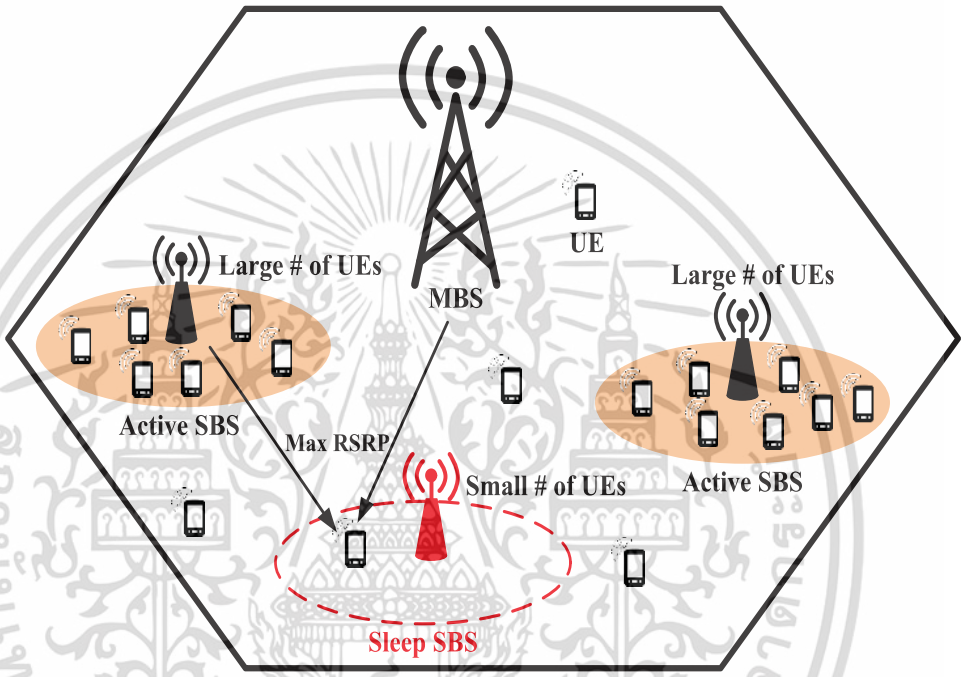
การใช้พลังงานชั่วขณะสำหรับสถานีฐานมาโคร P_{MB} กำหนดให้เป็นค่าคงที่และสำหรับสถานีฐานขนาดเล็ก P_{SB} กำหนดให้ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้งานที่มาเชื่อมต่อแต่จะขึ้นอยู่กับสถานะการทำงานโดยแบ่งเป็นสถานะพร้อมใช้งาน P_{ON}, สถานะพร้อมใช้งานโดยไม่มีสัญญาณส่ง P_{NTX} , และสถานะประหยัดพลังงาน P_{SL} ดังนั้นการใช้พลังงานรวมทั้งระบบ P_{all} [8] สามารถแสดงได้โดย

$$P_{\text{all}} = N_{\text{MB}} \cdot P_{\text{MB}} + N_{\text{ON}} \cdot P_{\text{ON}} + N_{\text{NTX}} \cdot P_{\text{NTX}} + N_{\text{SL}} \cdot P_{\text{SL}} \tag{3.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ N_{MB} คือจำนวนของสถานีฐานมาโครที่พร้อมให้บริการ, N_{ON}, N_{NTX}, และ N_{SL} คือจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กที่พร้อมใช้งาน, จำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กที่พร้อมใช้งานโดยไม่มีสัญญาณส่ง, และจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กที่อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน ตามลำดับ

3.2 วิธีการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบเดิม



รูปที่ 3.2. การลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบเดิม

รูปที่ 3.2 แสดงวิธีการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบดิม สำหรับดาวน์ลิงค์ในระบบสื่อสาร ในวิธีการสลีพคอนโทรลแบบเดิมนี้ จำนวนผู้ใช้งานที่ถูกเชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กนั้นๆ จะถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาตัดสินใจเพื่อเปลี่ยนสถานะการทำงานจากสถานะปกติให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน [5]

พื้นฐานของเกณฑ์การตัดสินใจข้างต้นนี้มีกระบวนการทำงานโดย เมื่อจำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กนั้น มีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าคงที่ที่กำหนดไว้ในสถานะประหยัดพลังงาน (Sleep Threshold) สถานีฐานขนาดเล็กนั้นจะต้องถูกควบคุมสถานะการทำงานให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงานดังเงื่อนไข

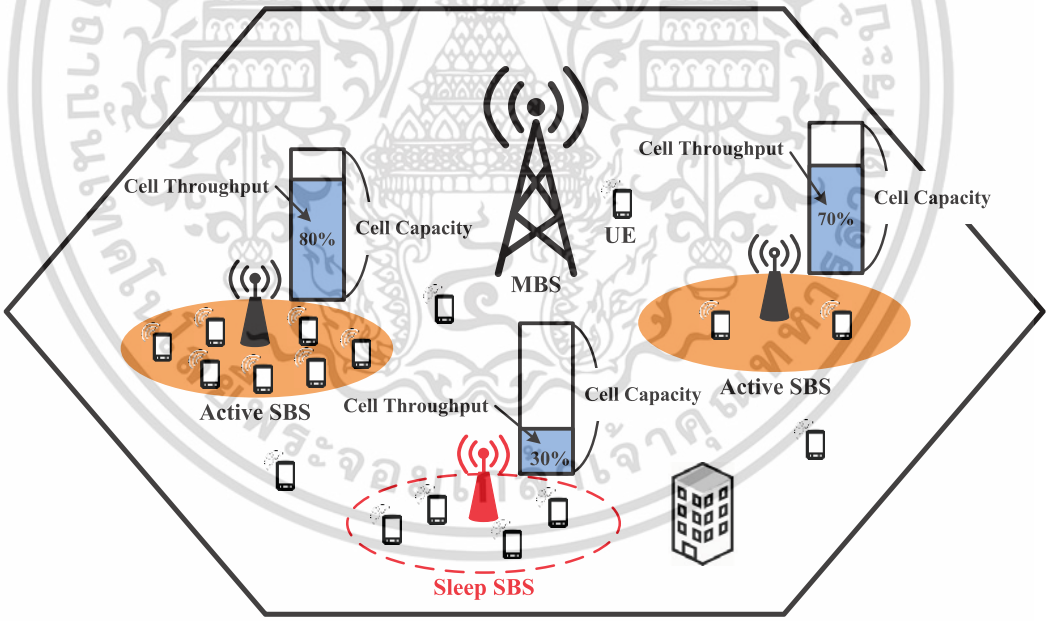
$$\begin{cases} N_{\text{con}}^{i} \le N_{\text{sleep}}; \ \text{For sleep state} \\ N_{\text{con}}^{i} > N_{\text{sleep}}; \ \text{For active state} \end{cases} \tag{3.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ N_{con}^{i} คือจำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กที่ $i-th$ และ N_{sleep} คือค่าคงที่ที่กำหนดไว้ในโหมดประหยัดพลังงาน

ถึงแม้ว่าวิธีการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบดิมนั้นสามารถลดการใช้พลังงานทั้งหมด (Power Consumption) ของระบบได้ แต่ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy Efficiency) ได้มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากบางสถานีฐานขนาดเล็กอาจมีอัตราการส่งข้อมูลหรือค่าทรูพุทที่สูงในขณะที่จำนวนของผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานนั้นๆมีจำนวนน้อย จึงถูกเปลี่ยนสถานะการทำงาน ส่งผลให้สถานีฐานขนาดเล็กที่ถูกควบคุมให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงานนั้นอาจมีทรูพุทที่สูงกว่าสถานีฐานที่ถูกใช้งานปกติ ดังนั้นวิธีการควบคุมสถานีฐานแบบเดิมจึงสามารถลดการใช้พลังงานทั้งหมดของระบบพร้อมกับการลดลงของประสิทธิภาพการใช้พลังงานสำหรับดาวน์ลิงค์ในระบบสื่อสาร จากปัญหาข้างต้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาเกณฑ์ในการตัดสินใจเพื่อควบคุมการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็ก

3.3 วิธีการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบที่นำเสนอ



รูปที่ 3.3. การลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบที่นำเสนอ

รูปที่ 3.3 แสดงวิธีการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบที่นำเสนอสำหรับดาวน์ลิงค์ของระบบสื่อสารในโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยี โดยในวิธีที่ถูกนำเสนอนี้อัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็ก จะถูกนำมาพิจารณาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจสำหรับการจำลองสถานะการใช้งานของสถานีฐานขนาดเล็กให้อยู่ในสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประหยัดพลังงานแทนที่จำนวนของผู้ใช้งานที่ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กในแบบวิธีเดิม อัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็กแสดงได้โดย

$$R_{\text{cell}}^{i} = \frac{S_{\text{cell}}^{i}}{C_{\text{cell}}} \tag{3.8}$$

โดยที่ R_{cell}^{i} คืออัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็กที่ $i-th$, C_{cell} คืออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานเมื่อมีการใช้แถบคลื่นความถี่ทั้งหมดที่กำหนดให้กับสถานีฐานขนาดเล็กสามารถแสดงได้โดย

$$C_{\text{cell}} = B\log_2(1+\frac{S}{N}) \tag{3.9}$$

เมื่อ $\frac{S}{N}$ คือค่า SNR และ S_{cell}^{i} คือทรูพุทปัจจุบันของสถานีฐาน สำหรับสถานีฐานขนาดเล็กที่ $i-th$ ซึ่งสามารถหาได้จากผลรวมของทรูพุทของผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กนั้นๆโดยค่าทรูพุทปัจจุบันของสถานีฐานนี้จะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ C_{cell} ซึ่งสามารถแสดงได้โดย

$$\begin{aligned} S_{\text{cell}}^{i} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{con}}^{i}} S_{\text{UE}}^{j} \\ &= \sum_{j=1}^{N_{\text{con}}^{i}} \left\{ B_{\text{UE}}^{j} \log_2(1+\gamma_{\text{UE}}^{j}) \right\} \end{aligned} \tag{3.10}$$

เมื่อ S_{UE}^{j} แสดงถึงทรูพุทปัจจุบันของผู้ใช้งานที่ $j-th$, B_{UE}^{j} แสดงถึงแถบคลื่นความถี่ที่ถูกจัดสรรให้กับผู้ใช้บริการที่ $j-th$, γ_{UE}^{j} คือค่า SINR ของผู้ใช้บริการที่ $j-th$ และ N_{con}^{i} คือจำนวนของผู้ใช้งานที่มีการเชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กที่ $i-th$

เนื่องจากวิธีที่นำเสนอนี้ได้มีการกำหนดการใช้พลังงานรวมทั้งหมดในระบบให้เท่ากับวิธีเดิม เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดไบแอสขึ้นในระหว่างการเปรียบเทียบ โดยทำการเก็บค่าเฉลี่ยของอัตราการใช้พลังงานทั้งหมดสำหรับสถานีฐานขนาดเล็กในระบบ (Operating Active Rate) ของทุกๆจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กแสดงได้โดย

$$OP_{\text{SB}} = Mean\left\{ \frac{N_{\text{SB}} - N_{\text{SL}}}{N_{\text{SB}}} \right\} \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

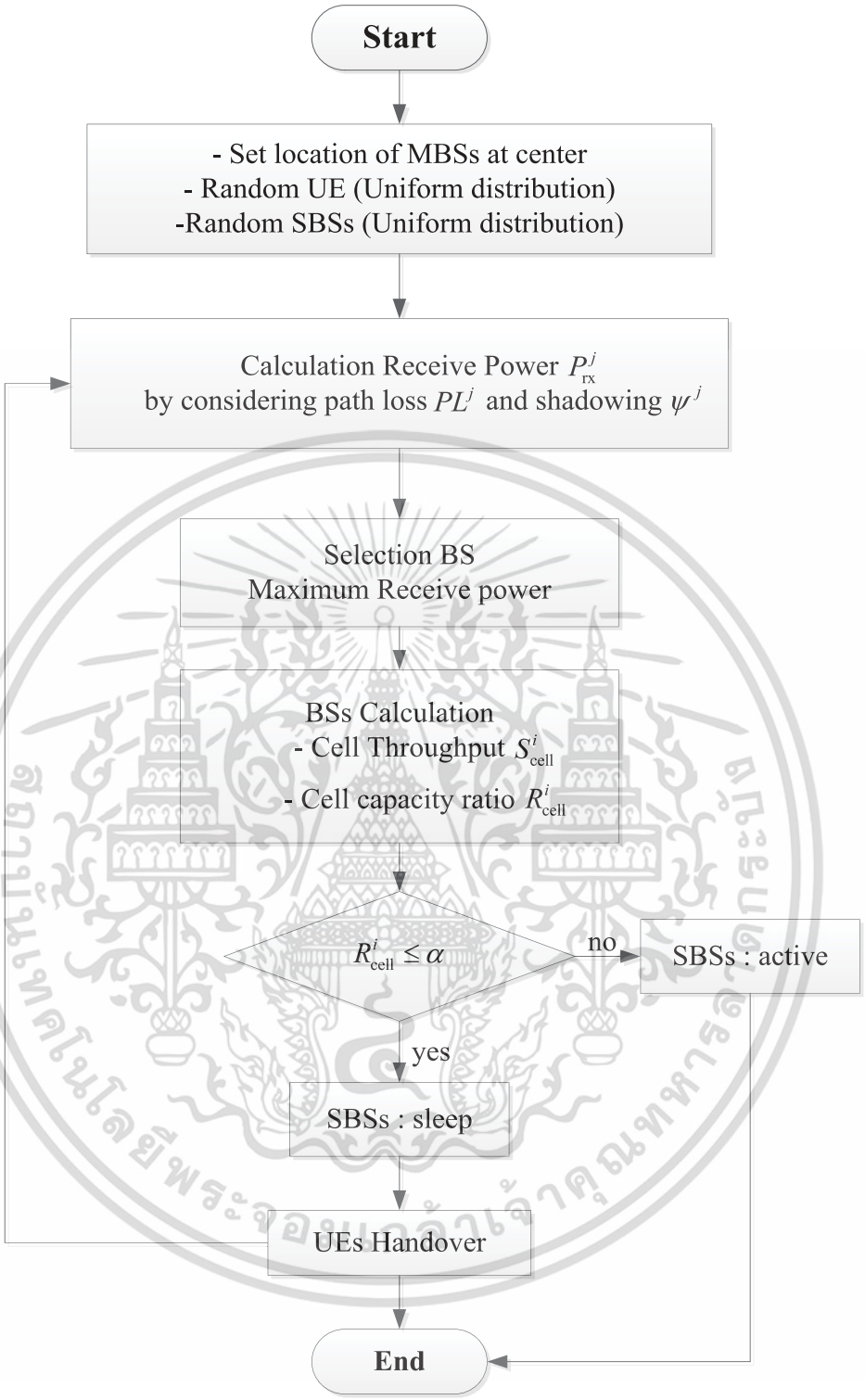
เมื่อ OP_{SB} คือค่าเฉลี่ยอัตราการใช้พลังงานทั้งหมดของสถานีฐานขนาดเล็กในระบบ N_{SB} คือจำนวนสถานีฐานขนาดเล็กทั้งหมด และ N_{SL} คือจำนวนสถานีฐานขนาดเล็กที่อยู่ในโหมดประหยัดพลังงาน

จากนั้นวิธีที่นำเสนอใช้เกณฑ์การควบคุมสำหรับอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็ก สถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กแสดงได้ตามเงื่อนไขโดย

$$\begin{cases} R_{\text{cell}}^{i} \le \alpha; \text{For sleep state} \\ R_{\text{cell}}^{i} > \alpha; \text{For active state} \end{cases} \tag{3.12}$$

เมื่อ α คือค่าที่น้อยที่สุดสำหรับอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็กเมื่อกำหนดการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบเท่ากับวิธีเดิม จากเงื่อนไขข้างต้นเมื่อ R_{cell}^{i} น้อยกว่าหรือเท่ากับค่า α สถานีฐานขนาดเล็กนั้นๆจะถูกควบคุมสถานะการทำงานให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน หาก R_{cell}^{i} มีค่ามากกว่า α สถานีฐานขนาดเล็กนั้นจะยังคงสถานะพร้อมใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4. โฟลว์ชาร์ตแสดงขั้นตอนการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบที่นำเสนอ

ขั้นตอนการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบที่นำเสนอนั้นพิจารณาจากอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็ก ดังแสดงไว้ในเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ (3.12) และรูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการทำงานและการพิจารณาตัดสินใจเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กโดยละเอียดอธิบายดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่หนึ่ง กำหนดตำแหน่งของสถานีฐานมาโครให้อยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของเซลล์หกเหลี่ยมและทำการแรนดอมตำแหน่งสถานีฐานขนาดเล็กและผู้ใช้งาน ที่มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอลงในบริเวณพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโครรัศมี 500 เมตร โดยกำหนดให้จำนวนผู้ใช้งานนั้นเท่ากับ 50 และจำนวนสถานีฐานขนาดเล็กเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 50

ขั้นตอนที่สอง คำนวณค่าพลังงานที่รับได้จากทุกๆสถานีฐานในระบบจากสมการที่ (3.1)โดยใช้แบบจำลองรวมการสูญเสียเชิงวิถีและชาโดว์อิงซึ่งพิจารณาตามขนาดของสถานีฐาน

ขั้นตอนที่สาม ผู้ใช้งานหรือยูเซอร์ทำการเลือกสถานีฐานที่จะทำการเชื่อมต่อโดยพิจารณาจากค่าพลังงานที่รับได้มากที่สุด (Maximum Receive Power)

ขั้นตอนที่สี่ หลังจากที่การเชื่อมต่อสมบูรณ์แล้ว สถานีฐานนั้นๆ จะทำการคำนวนทรูพุทของสถานีฐาน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.8) และคำนวณอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานด้วยเช่นกัน

ขั้นตอนที่ห้า พิจาณาเปรียบเทียบอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็กแต่ละสถานีกับค่าที่น้อยที่สุดสำหรับอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็กเมื่อกำหนดการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของระบบเท่ากับวิธีเดิม โดยถ้า R_{cell}^{i} มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า α สถานีฐานขนาดเล็กนั้นๆจะถูกเปลี่ยนสถานะการทำงานให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน และหากค่า R_{cell}^{i} มีค่ามากกว่าค่า α สถานีฐานขนาดเล็กนั้นจะยังคงสถานะการทำงานปกติต่อไป

ขั้นตอนที่หก ผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กที่ถูกเปลี่ยนสถานะการทำงานให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงานนั้น จะถูกทำการแฮนด์โอเวอร์ไปเชื่อมต่อกับสถานีฐานใหม่โดยพิจารณาจากค่าพลังงานที่ได้รับสูงสุดเช่นเดิม

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในบทที่ 3 นี้ ไม่ว่าจะเป็นการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบเดิม และการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรลแบบที่นำเสนอนั้น จะทำการแสดงผลของสมรรถนะของระบบการทำงานทั้งหมดต่อไปในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การหาค่าประสิทธิภาพของระบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการหาประสิทธิภาพของระบบจากวิธีการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรล และทำการเปรียบเทียบโดยการจำลองการทำงานของวิธีการที่ได้นำเสนอกับวิธีการแบบเดิม โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการลดการใช้พลังงานรวมของระบบโดยวิธีสลีพคอนโทรล ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐาน โดยวิธีการคำนวนในแบบที่นำเสนอได้ทำการอธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 และบทที่ 3 ผลการหาค่าประสิทธิภาพของการทำงานในด้านต่างๆในระบบจะถูกแสดงเป็นลำดับดังต่อไปนี้ ลำดับแรกคือ การเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานทั้งหมดของสถานีฐานขนาดเล็กในระบบ ลำดับสองคือ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบระหว่างวิธีสลีพคอนโทรลแบบเดิมโดยใช้จำนวนของผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กและการใช้อัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาซึ่งเป็นวิธีที่นำเสนอ ลำดับที่สาม ทำการเปรียบเทียบทรูพุทของระบบ ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดเนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบนั้นดีมากน้อยเพียงใด และลำดับสุดท้ายจะเป็นการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในระบบของวิธีที่นำเสนอและวิธีเดิม ดังจะแสดงเป็นลำดับดังต่อไปนี้

4.1 วิธีที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานทั้งหมดของระบบ EE, เปรียบเทียบทรูพุทโดยรวมทั้งหมดในระบบ S_{sys}, และทำการเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานรวมทั้งหมดในระบบ P_{all} โดยค่าทั้งหมดนี้ได้จากการจำลองระบบผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้สามารถเข้าใจระบบและวิธีการที่นำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบกับวิธีการที่นำเสนอมากขึ้น ผู้เขียนจึงได้ทำการอธิบายวิธีการและทฤษฎีที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบดังนี้

4.1.1 วิธีการที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานทั้งหมดของระบบ

การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ หรือในบางครั้งเรียกว่า ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน EE คือเป้าหมายของการลดปริมาณพลังงานที่จำเป็นสำหรับการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน มีหน่วยเป็น bits/W โดยทั่วไปจะเป็นการใช้กระบวนการหรือเทคโนโลยีต่างๆเข้ามาช่วยลดการสูญเสียพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในที่นี้ ถูกกำหนดโดยอัตราการส่งข้อมูลที่สำเร็จต่อการใช้พลังงานทั้งหมดของระบบ P_{all} ซึ่งสามารถแสดงได้โดย

$$EE = \frac{S_{\text{sys}}}{P_{\text{all}}} \tag{4.1}$$

โดยที่ S_{sys} คือทรูพุทท้งหมดของระบบ ซึ่งสามารถคำนวนได้จากผลรวมของทรูพุททั้งหมดของแต่ละสถานีฐาน

4.1.2 วิธีการที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพทรูพุททั้งหมดของระบบ

ทรูพุทท้งหมดของสถานีฐาน หมายถึงอัตราของข้อมูลที่ได้มีการส่งถ่ายจริงในเวลาหนึ่งๆ โดยในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทรูพุททั้งหมดของสถานีฐานนั้น ทำการพิจารณาผลรวมของทรูพุทสำหรับสถานีฐานขนาดเล็กและสถานีฐานมาโครในโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีนี้ S_{sys} สามารถแสดงได้โดย

$$S_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{MB}}} S^{i}_{\text{Mcell}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{SB}}} S^{i}_{\text{cell}} \tag{4.2}$$

โดยที่ S^{i}_{Mcell} คือทรูพุทของสถานีฐานมาโครที่ $i-\text{th}$, N_{SB} คือจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็ก, และ N^{i}_{MB} คือจำนวนของผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดใหญ่ $i-\text{th}$ ตามลำดับ

4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบทำงานด้วยโปรแกรม Code Blocks โดยทำการจำลองการทำงานเปรียบเทียบวิธีแบบเดิมกับวิธีการที่นำเสนอ ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน พารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบ [14]

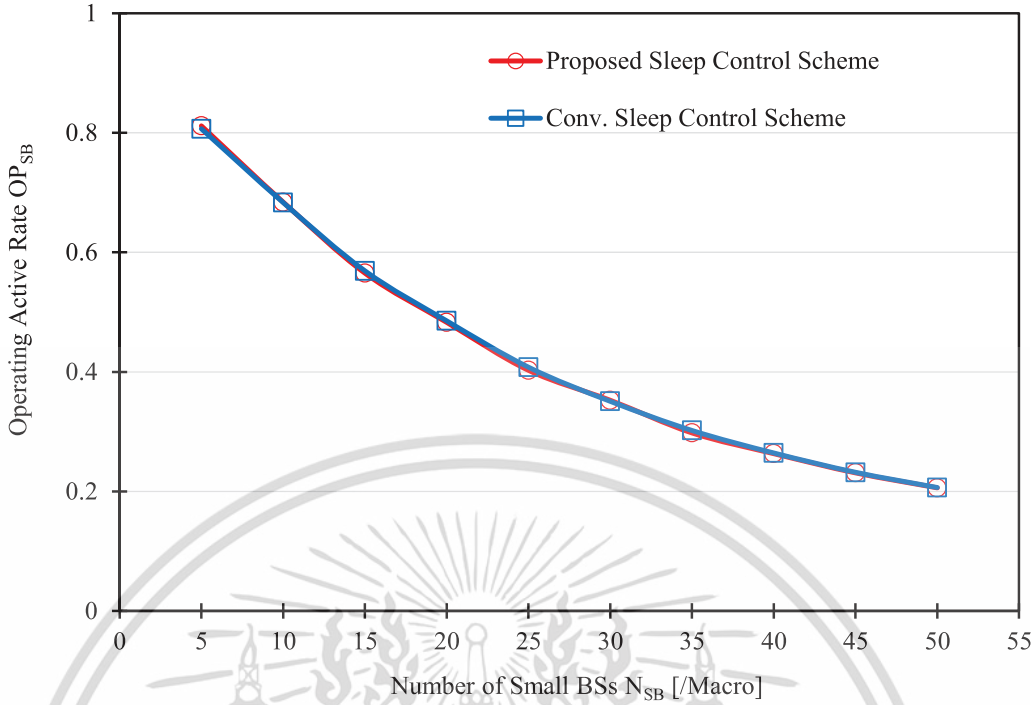
พารามิเตอร์		ค่าที่ใช้งาน
No. of small base stations per cell		5-50
No. of user equipments per cell		50
Macro cell radius		500 m
Frequency bandwidth		20 MHz
Carrier frequency	Macro base station	2.0 GHz
	Small base station	3.0 GHz
Transmit power	Macro base station	43 dBm
	Small base station	30 dBm
Noise power density		-174 dBm/Hz
Path loss	Macro base station	$PL^j_{\mathrm{MB}} = 128.1 + 37.6 \log_{10} r^j$
	Small base station	$PL^j_{\mathrm{SB}} = 140.7 + 36.7 \log_{10} r^j$
Log-normal Shadowing	Macro base station	8 dB
	Small base station	10 dB
Maximum throughput per frequency bandwidth		2.5 bps/Hz
Traffic model		Full buffer
Power consumption P_{MB}, P_{ON}, P_{NTX}, P_{SL}		150, 30, 25, 15 W

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานนี้ มีตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบเข้ามาร่วมวิเคราะห์หลายตัวแปร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ใช้อ้างอิงในการจำลองของระบบ โดยจะใช้พารามิเตอร์ทั้งหมดนี้สำหรับจำลองทุกระบบที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์

4.3 อัตราการใช้พลังงานทั้งหมดของสถานีฐานขนาดเล็กในระบบ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบระหว่างวิธีสลีพคอนโทรลแบบเดิมและวิธีสลีพตอนโทรลที่นำเสนอ จึงต้องทำการจำลองระบบโดยใช้พารามิเตอร์ชุดเดียวกันทั้งหมดเพื่อให้เสมือนว่าอยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน นอกจากนี้ หนึ่งในตัวแปรสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในงานวิจัยนี้คือ พลังงานรวมทั้งหมดของสถานีฐานขนาดเล็กที่ใช้ในระบบ โดยทำการกำหนดการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของสถานีฐานขนาดเล็กให้เท่ากันเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดไบแอสระหว่างการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1. อัตราการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของสถานีฐานขนาดเล็กในระบบ

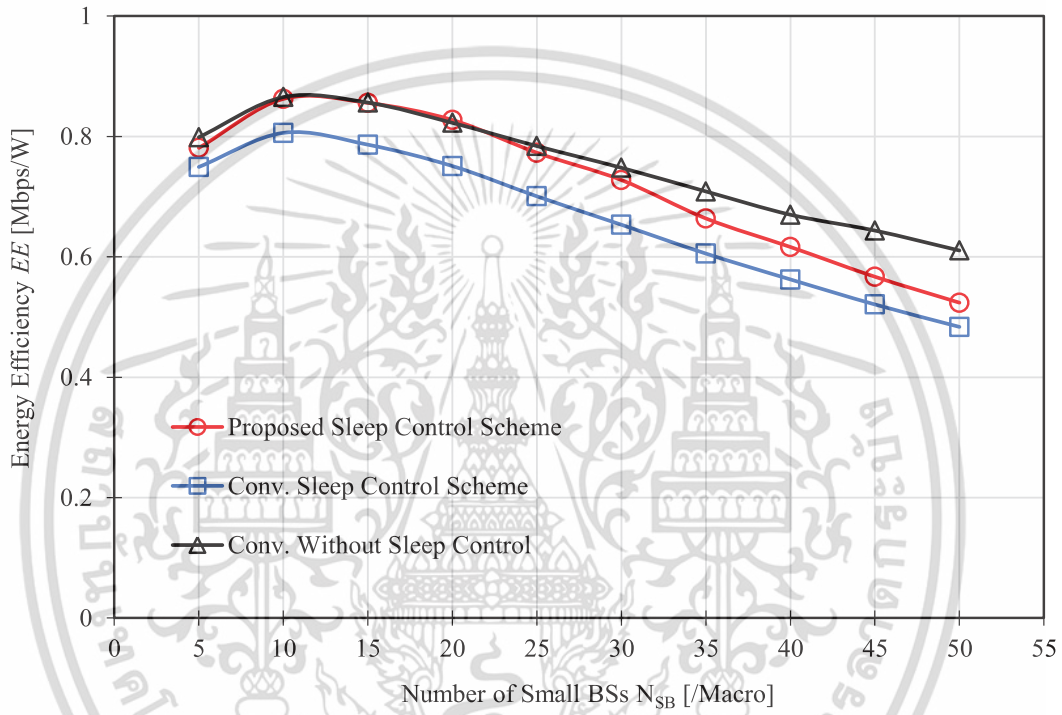
จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงค่าอัตราการใช้พลังงานรวมทั้งหมดสำหรับสถานีฐานขนาดเล็ก โดยแสดงให้เห็นผลจากการใช้พลังงานทั้งหมดของสถานีฐานขนาดเล็กในวิธีการใช้จำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กเปรียบเทียบกับวิธีการใช้อัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา เมื่อทำการเพิ่มจำนวนสถานีฐานขนาดเล็กไปจนถึง 50 สถานีฐาน ต่อพื้นที่ครอบคลุมหนึ่งสถานีฐานมาโคร จากรูปจะสังเกตได้ว่า อัตราการใช้พลังงานของสถานีฐานขนาดเล็กทั้งสองวิธีนี้มีค่าเท่ากัน และเมื่อทำการเพิ่มจำนวนสถานีฐานขนาดเล็กมากขึ้นในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร จะทำให้มีการใช้พลังงานจากสถานีฐานขนาดเล็กลดลง เนื่องจากจำนวนผู้ใช้งานมีการกระจายการเชื่อมต่อไปยังสถานีต่างๆมากขึ้น จนบางสถานีฐานขนาดเล็กไม่ได้รับการเชื่อมต่อจากผู้ใช้งานจึงต้องถูกเปลี่ยนสถานะการทำงานให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงานไปในที่สุด

4.4 ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในการรับส่งข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธีเดิม

จากรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมทั้งหมดในระบบสำหรับวิธีที่นำเสนอโดยใช้อัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในการพิจารณากับวิธีการใช้จำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาและระบบโครงข่ายแบบที่ปราศจากการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็ก ต่อการเพิ่มจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กในหนึ่งพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร จากรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวนี้สามารถสังเกตุได้ว่าวิธีที่นำเสนอนี้ แสดงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานได้ดีกว่าวิธีแบบเดิมสำหรับทุกจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กทั้งนี้สามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 8.8 เปอร์เซ็นต์ และสามารถให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้เท่ากับระบบที่ปราศจากการประหยัดพลังงานเมื่อจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กเพิ่มขึ้นถึง 25 อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการใช้พลังงานทั้งหมดของวิธีที่นำเสนอนี้จะมีค่าลดลงเช่นเดียวกันกับระบบปราศจากการประหยัดพลังงานเมื่อเพิ่มจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กมากกว่า 25 สถานีต่อหนึ่งพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร



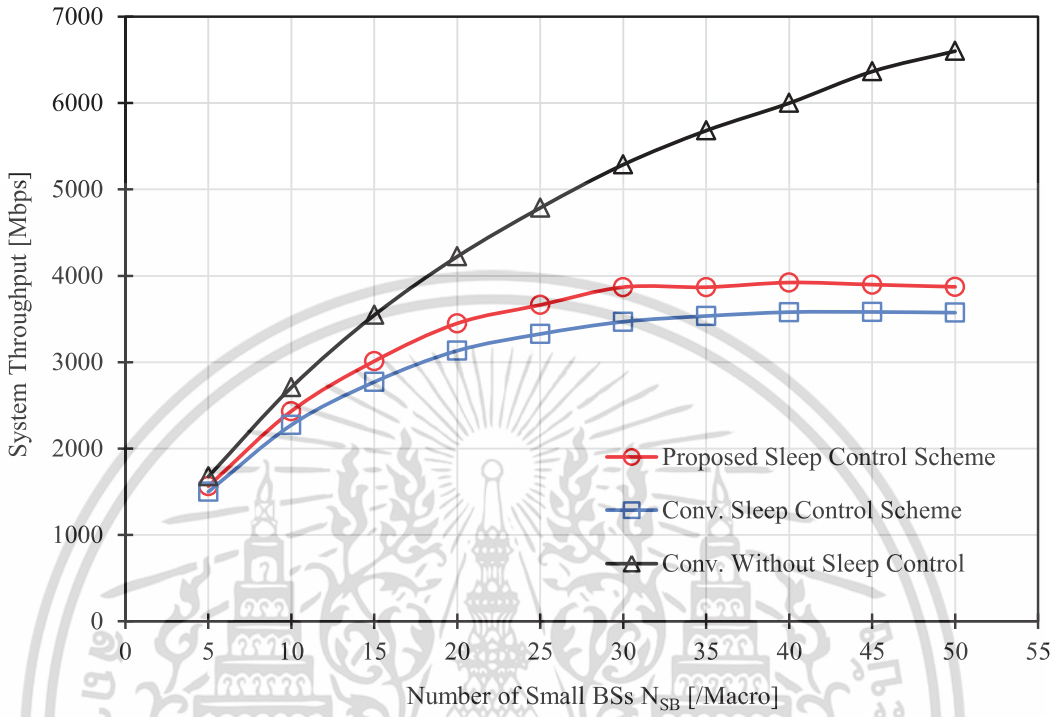
รูปที่ 4.2. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมทั้งหมดต่อการเพิ่มจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็ก

4.5 ประสิทธิภาพทรูพุทท้งหมดของระบบเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธีเดิม

จากรูปที่4.3 แสดงค่าทรูพุททั้งหมดของระบบ S_{sys} ต่อการเปลี่ยนจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กในหนึ่งพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีนำเสนอโดยใช้อัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในการพิจารณากับวิธีการใช้จำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาและระบบโครงข่ายแบบที่ปราศจากการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็ก จากรูปดังกล่าวสามารถสังเกตุได้ว่าระบบที่ปราศจากการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กนั้นสามารถให้ทรูพุทของระบบสูงที่สุด เนื่องจากทุกสถานีฐานขนาดเล็กอยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานตลอดจึงมีส่วนทำให้ทรูพุททั้งหมดเพิ่มขึ้น และเนื่องจากวิธีที่นำเสนอนั้นใช้อัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ ซึ่งมีการคำนึงถึงทรูพุทจึงทำให้ทรูพุทของระบบนั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีเดิมโดยสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 8.8 เปอร์เซ็นต์

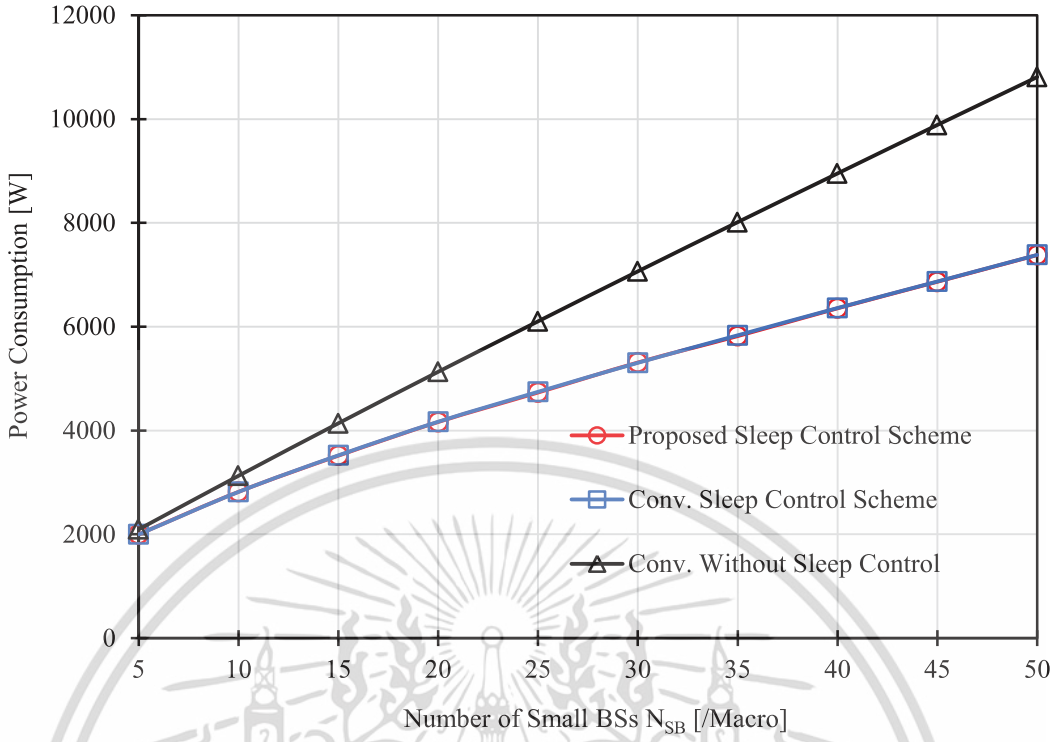


รูปที่ 4.3. ทรูพุทของระบบต่อการเพิ่มจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็ก

4.6 ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานรวมทั้งหมดในระบบเมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธีเดิม

จากรูปที่ 4.4 แสดงการใช้พลังงานทั้งหมดของระบบ P_{all} ต่อการเปลี่ยนจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กในหนึ่งพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีนำเสนอโดยใช้อัตราส่วนของทรูพุทต่ออัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดของสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในการพิจารณากับวิธีการใช้จำนวนผู้ใช้งานที่เชื่อมต่อกับสถานีฐานเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาและระบบโครงข่ายแบบที่ปราศจากการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็ก จากรูปดังกล่าวจะสังเกตได้ว่าระบบที่ปราศจากการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กใช้พลังงานทั้งหมดสูงสุดเนื่องจากทุกสถานีฐานขนาดเล็กอยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานตลอด และสามารถสังเกตได้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถลดการใช้พลังงานรวมทั้งหมดและใช้พลังงานเท่ากับวิธีเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4. การใช้พลังงานทั้งหมดของระบบต่อการเพิ่มจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครือข่ายและยังสามารถเพิ่มความจุมากขึ้นโดยการเพิ่มจำนวนสถานีฐานขนาดเล็กในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานมาโคร แต่ในขณะเดียวกันนั้น วิธีการเพิ่มจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กนี้ยังมีข้อด้อยในเรื่องของการใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้นในระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดก๊าซเรือนกระจกและภาวะโลกร้อน การลดค่าการใช้พลังงานในระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่จึงเป็นวิธีได้มีการศึกษาและทำการวิจัยกันอย่างต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐาน ในขณะที่ยังรักษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบให้คงที่

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการประเมินทรูพุทของระบบสำหรับดาวลิงค์ในโครงข่ายไร้สายหลายเทคโนโลยีและนำเสนอวิธีการลดค่าการใช้พลังงานในระบบเครือข่าย โดยวิธีสลีพคอนโทรล ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสถานีฐานขนาดเล็กให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน โดยจะทำการพิจารณาทรูพุทของสถานีฐานขนาดเล็กเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ เพื่อควบคุมสถานีฐานนั้นๆให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงาน เมื่อสถานีฐานขนาดเล็กใดๆที่มีค่าทรูพุทต่ำกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดสถานีฐานนั้นๆจะถูกเปลี่ยนสถานะการทำงานให้อยู่ในสถานะประหยัดพลังงานทันที เนื่องจากวิธีที่นำเสนอนี้มีผลกับทรูพุทของระบบอย่างมาก ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถเพิ่มทรูพุทของระบบได้และยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่กำหนดเช่นเดียวกันกับวิธีเดิม และจากการประเมินผลผ่านการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีประหยัดพลังงานที่นำเสนอนั้นเพิ่มทรูพุทของระบบเมื่อเทียบกับวิธีเดิมและยังสามารถให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่เท่ากับระบบที่ปราศจากการประหยัดพลังงานของสถานีฐานขนาดเล็กเมื่อในบริเวณนั้นมีจำนวนของสถานีฐานขนาดเล็กประมาณ 25 สถานีฐานและในขณะเดียวกันยังสามารถลดการใช้พลังงานทั้งหมดของระบบได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] G. P. Fettweis and E. Zimmermann, “**ICT energy consumption–trends and challenges**,” in Proc. 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Lapland, Finland, Sept. 2008

[2] J. Acharya, L. Gao, S. Gaur, “**Heterogeneous Networks in LTE-Advanced**,” Ltd. Published John Wiley & Sons, 2014.

[3] S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad, and M. Latva-aho, “**Opportunistic Sleep Mode Strategies in Wireless Small Cell Networks,**” in Proc. IEEE Inter. Conf. Commun. (ICC), pp 2707–2712. Jun. 2014.

[4] X. Zhang, S. Zhou, Y. Yan, C. Xing, and J. Wang, “**Energy Efficient Sleep Mode Activation Scheme for Small cell Networks,**” in Proc. IEEE 82nd Vehicular Tech. Conf. (VTC 2015-Fall), pp. 1–4, Sept. 2015.

[5] T. Maeno, K. Mori, K. Sanada, H. Kobayashi, “**Evaluation of Energy Efficiency for various Handover Methods in Heterogeneous Cellular Networks with Sleep Control,**” in Proc 6th International Symposium for Substainability, Engineering, Mie University, pp.9–10, Sep. 2016.

[6] A. Pandharipande, “**Principle of OFDM,**” IEEE Potentials, Vol.21, pp.16-19, April/May 2002.

[7] 3GPP TR 36.814, (V9.0.0.0), “**Further Advancement for E-UTRA Physical Layer Aspects,**” Mar. 2010.

[8] T. S. Rappaport, “**Wireless Communications: Principles and Practice Second Edition,**” Prentice Hall PTR Upper Saddle River, 2001.

[9] S. John, Seybold, “**Introduction to RF Propagation,**” Ltd. Published John Wiley & Sons, 2005.

[10] 3GPP TS 36.214, (V12.2.0), “**Technical Specification Group Radio Access Network,**” Mar. 2015.

[11] K. Dimou, M. Wang, Y. Yang, M. Kazmi, A. Larmo, J. Pettersson, W. Muller, Y. Timner, “**Handover within 3GPP LTE: Design Principles and Performance**,” in Proc IEEE 70th Vehicular Tech. Conf. (VTC 2009-Fall), Sept 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[12] V. Giannini, C. Desset, and I. Godor, "**How Much Energy is Needed to Run a Wireless Network?,**" IEEE Wireless Communications, vol. 18, Issue. 5, pp. 40–49, Oct. 2011.

[13] I. Aykm, "**Activity Management Algorithm for Improving Energy Efficiency of Small Cell Base Stations in 5G Heterogeneous Networks,**" Bilkent University, 2014

[14] 3GPP TR 36.417, (V9.0.0.0), "**Technical Specification Group Radio Access Network,**" Mar. 2010.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "math.h"
#include "time.h"
#include "float.h"

////////////////// Sleep Control Heterogeneous Networks //////////////////////
///// main parameters /////
#define CELL_R              500
#define SMALLBASE           50
#define SCELL_R             100
#define Power_MBS           20
#define Power_SBS           1
#define FREQ_BW             20
#define CAPA_MAX            50
#define NOISE               -174
#define USERPERMACRO        50
#define TOTALMACROBASE      7
#define TOTALSMALLBASE      SMALLBASE*TOTALMACROBASE
#define TOTALUSERS          USERPERMACRO * TOTALMACROBASE
#define POWERCON_MBS        150
#define POWERCON_SBS        30
#define POWERCON_SBS0       25
#define POWERCON_SBSSLEEP   15
#define TOTALTRIAL          300
#define FIXEDSMALLBASE      0
#define FIXEDUSER           0
#define HANDOVERMETHOD      3 // 1 = MACRO , 2 = SMALL , 3 = ALL //
#define MINIMUMUSER         1
#define RATIO               0.3
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
///// user parameters /////
struct users
{
    int numberMBS;
    int numberSBS[SMALLBASE];
    int baseSelection[2];
    double maximumReceivePower;
    double coordinateX;
    double coordinateY;
    double distanceMBS[TOTALMACROBASE];
    double distanceSBS[TOTALSMALLBASE];
    double shadowingMBS[TOTALMACROBASE];
    double shadowingSBS[TOTALSMALLBASE];
    double lossMBS[TOTALMACROBASE];
    double lossSBS[TOTALSMALLBASE];
    double noisePower;
    double receiveMBS[TOTALMACROBASE];
    double receiveSBS[TOTALSMALLBASE];
    double SINR;
    double SIR;
    double throughput;
    double interferencePower;
} user[TOTALUSERS];

///// small base station parameters /////
struct smallBaseStation
{
        double coordinateX;
        double coordinateY;
        double cellCapacity;
        double internalPowerCon;
        double distoMBS[TOTALMACROBASE];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        double minimumdistoMBS;
        double alpha;
        int numberMBS;
        int totalUser;
        int status;
        int coverageMBS;
}smallBS[TOTALSMALLBASE];

///// macro base station parameters /////
struct macroBaseStation
{
        double coordinateX;
        double coordinateY;
        double cellCapacity;
        int totalUser;
        double internalPowerCon;
        int status[3];
}macroBS[TOTALMACROBASE];

///// capacity parameters /////
struct systemCapacity
{
    double powerCon;
    double systemCapacity;
    double energyEfficient;
    double throughputMBS;
    double throughputSBS;
    double operateRate;
    double interference;
}systemCap[TOTALTRIAL],systemCapHO[TOTALTRIAL];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
///// random user and small base station in macro coverage /////
int main()
{
for(j=0;j<TOTALMACROBASE;j++)
        {
        if(FIXEDSMALLBASE){
        for(l=0;l<SMALLBASE;l++)
        {
        smallBS[l+(j*SMALLBASE)].coordinateX = fixedSmallBS[l+(j*SMALLBASE)]
        smallBS[l+(j*SMALLBASE)].coordinateY = fixedSmallBS[l+(j*SMALLBASE)]
        smallBS[l+(j*SMALLBASE)].numberMBS = j;
        }
        switch(j)
        {
        case 0: smallBS[l].coordinateX          = Sx;
                smallBS[l].coordinateY          = Sy;
                smallBS[l].numberMBS            = j;
                smallBS[l].status               = 1;
                macroBS[k+j].coordinateX        = 0;
                macroBS[k+j].coordinateY        = 0;
                break;
        case 1: smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateX = Sx+CELL_R*(sqrt(3)/2)*2;
                smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateY = Sy;
                smallBS[l+j*SMALLBASE].numberMBS = j;
                smallBS[l+j*SMALLBASE].status    = 1;
                macroBS[k+j].coordinateX         = CELL_R*(sqrt(3)/2)*2;
                macroBS[k+j].coordinateY         = 0;
                break;
        case 2: smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateX = Sx-CELL_R*(sqrt(3)/2)*2;
                smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateY = Sy;
                smallBS[l+j*SMALLBASE].numberMBS = j;
                smallBS[l+j*SMALLBASE].status    = 1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        macroBS[k+j].coordinateX          = -CELL_R*(sqrt(3)/2)*2;
        macroBS[k+j].coordinateY          = 0;
        break;
case 3: smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateX = Sx+CELL_R*(sqrt(3)/2);
        smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateY = Sy+(CELL_R+CELL_R/2);
        smallBS[l+j*SMALLBASE].numberMBS = j;
        smallBS[l+j*SMALLBASE].status      = 1;
        macroBS[k+j].coordinateX          = CELL_R*(sqrt(3)/2);
        macroBS[k+j].coordinateY          = CELL_R+CELL_R/2;
        break;
case 4: smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateX = Sx-CELL_R*(sqrt(3)/2);
        smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateY = Sy+(CELL_R+CELL_R/2);
        smallBS[l+j*SMALLBASE].numberMBS = j;
        smallBS[l+j*SMALLBASE].status      = 1;
        macroBS[k+j].coordinateX          = -CELL_R*(sqrt(3)/2);
        macroBS[k+j].coordinateY          = CELL_R+CELL_R/2;
        break;
case 5: smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateX = Sx+CELL_R*(sqrt(3)/2);
        smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateY = Sy-(CELL_R+CELL_R/2);
        smallBS[l+j*SMALLBASE].numberMBS = j;
        smallBS[l+j*SMALLBASE].status      = 1;
        macroBS[k+j].coordinateX          = CELL_R*(sqrt(3)/2);
        macroBS[k+j].coordinateY          = -(CELL_R+CELL_R/2);
        break;
case 6: smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateX = Sx-CELL_R*(sqrt(3)/2);
        smallBS[l+j*SMALLBASE].coordinateY = Sy-(CELL_R+CELL_R/2);
        smallBS[l+j*SMALLBASE].numberMBS = j;
        smallBS[l+j*SMALLBASE].status      = 1;
        macroBS[k+j].coordinateX          = -CELL_R*(sqrt(3)/2);
        macroBS[k+j].coordinateY          = -(CELL_R+CELL_R/2);
        break;
        } //end switch
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            } //end random small base station
          }
for(i=0;i<TOTALUSERS;i++)
            {
            user[i].maximumReceivePower = -1;
            user[i].baseSelection[0] = -1;
            user[i].baseSelection[1] = -1;
            for(l=0;l<TOTALSMALLBASE;l++)//loop for calculation distance small base
             {
            user[i].distanceSBS[l]   = sqrt(pow((user[i].coordinateX)-
smallBS[l].coordinateX,2)+pow((user[i].coordinateY)-smallBS[l].coordinateY,2))/1000;
            user[i].shadowingSBS[l]= pow(10,normal(0.0,10.0)/10);
            user[i].lossSBS[l]        =
user[i].shadowingSBS[l]*pow(10,(140.7+36.7*log10(user[i].distanceSBS[l]))/10);
            if(user[i].lossSBS[l]<=1.0) {
            user[i].lossSBS[l] = 1.0; }
            user[i].receiveSBS[l] =  Power_SBS/user[i].lossSBS[l];//propagation
            if(user[i].receiveSBS[l]>user[i].maximumReceivePower) {
            user[i].maximumReceivePower= user[i].receiveSBS[l];
            user[i].baseSelection[0]        = 1;
            user[i].baseSelection[1]        = l;
            }}
///// calculation interference power /////
            for(i=0;i<TOTALUSERS;i++) {
            user[i].interferencePower = -1;
            if(user[i].baseSelection[0]==0) // macro base
            {
            user[i].interferencePower = sum_array(user[i].receiveMBS,TOTALMACROBASE)-
user[i].maximumReceivePower;
            } else {
            user[i].interferencePower = sum_array(user[i].receiveSBS,TOTALSMALLBASE)-
user[i].maximumReceivePower; }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            for(k=0;k<TOTALMACROBASE;k++){
            if(user[i].baseSelection[0]==0 && user[i].baseSelection[1]==k) {
            macroBS[k].totalUser++; }
            for(l=0;l<TOTALSMALLBASE;l++) {
            if(user[i].baseSelection[0]==1 && user[i].baseSelection[1]==l) {
            smallBS[l].totalUser++;
            }}}
///// noise power /////
for(i=0;i<TOTALUSERS;i++)
             {
            user[i].SIR = user[i].maximumReceivePower/user[i].interferencePower;
            if(user[i].baseSelection[0]==0) // macro base
            {
            user[i].noisePower =
(pow(10,(NOISE+10*log10(20000000/macroBS[user[i].baseSelection[1]].totalUser))/10))/
1000;
            user[i].SINR =
user[i].maximumReceivePower/(user[i].interferencePower+user[i].noisePower);
            user[i].throughput =
((double)FREQ_BW/macroBS[user[i].baseSelection[1]].totalUser)*(log2(1+user[i].SINR));
            macroBS[user[i].baseSelection[1]].cellCapacity =
macroBS[user[i].baseSelection[1]].cellCapacity+user[i].throughput;
            macrocounter[user[i].baseSelection[1]]++;
            }
//// calculation cell throughput  and system throughput /////
for(k=0;k<TOTALMACROBASE;k++)
            {
            cellThroughputMC = cellThroughputMC+macroBS[k].cellCapacity;
            systemCap[trial].throughputMBS =
systemCap[trial].throughputMBS+macroBS[k].cellCapacity;
            }
for(l=0;l<TOTALSMALLBASE;l++)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            {
            cellThroughputSC = cellThroughputSC+smallBS[l].cellCapacity;
            systemCap[trial].throughputSBS =
systemCap[trial].throughputSBS+smallBS[l].cellCapacity;
            }
for(i=0;i<TOTALUSERS;i++)
            {
            if(user[i].baseSelection[0]==1)
            {
            interference = interference+user[i].interferencePower;
            systemCap[trial].interference =
systemCap[trial].interference+user[i].interferencePower;
            }
      }
/////  sleep control  /////
void handoverToAll ()
            {
            double sum_array(double a[], int num_elements);
            int i = 0, l = 0, k;
            // 1. set small BS on sleep mode //
            for(l=0;l<TOTALSMALLBASE;l++)
            {
            if (smallBS[l].cellCapacity <= smallBS[l].alpha*CAPA_MAX)
            {
            smallBS[l].status  = 0;
            }
            }
            //2. reassign UE to new BS //
            for(i=0;i<TOTALUSERS;i++)
            {
            for(l=0;l<TOTALSMALLBASE;l++) // set receive power from BS sleep = 0
            {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            user[i].receiveSBS[l] = user[i].receiveSBS[l]*smallBS[l].status;
            }
            if(user[i].baseSelection[0] == 1)
            {
            if(smallBS[user[i].baseSelection[1]].status == 0)
            { int sleep = user[i].baseSelection[1];
            user[i].receiveSBS[sleep] = 0.0;
            user[i].maximumReceivePower = 0.0;
            for(k=0;k<TOTALMACROBASE;k++)
            {
            if(user[i].receiveMBS[k]>user[i].maximumReceivePower)// && sleep != l &&
smallBS[l].status != 0)
            {
            user[i].maximumReceivePower = user[i].receiveMBS[k];
            user[i].baseSelection[0] = 0;
            user[i].baseSelection[1] = k;
            } }
for(l=0;l<TOTALSMALLBASE;l++)
            {
            if(user[i].receiveSBS[l]>user[i].maximumReceivePower && sleep != l &&
smallBS[l].status != 0)
            {
            user[i].maximumReceivePower = user[i].receiveSBS[l];
            user[i].baseSelection[0] = 1;
            user[i].baseSelection[1] = l;
                        }
                    }
                }
             }
          }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Prapassorn Phaiwitthayaphorn, Pisit Boonsrimuang, Pongsathorn. Reangsuntea, Takashi. Fujii, Kosuke Sanada, Kazuo Mori, Hideo Kobayashi, “Cell Throughput based Sleep Control Scheme for Heterogeneous Cellular Networks,” in Proc. of 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-Con 2017), pp.584-587, June 27-30, 2017.
2. Prapassorn Phaiwitthayaphorn, Kazuo Mori, Hideo Kobayashi, Pisit Boonsrimuang, “Cell Throughput based Sleep Control Scheme for Heterogeneous Cellular Networks,” ECTI Transactions on Communication, Vol.12, No.1, May 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวประภัสสร ไพวิทยาพร
วัน เดือน ปีเกิด	26 พฤษภาคม 2534
ที่อยู่	237 ถนนขนานทางรถไฟ ตำบลโพธาราม อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี 70120 โทรศัพท์มือถือ : 084-0116670
ประวัติการศึกษา	2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ดูแลระบบ IP Core Networks สำหรับโครงข่ายบรอดแบรนด์ 2.) ดูแลระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 2G 3G และ 4G
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2555	เข้ารับการฝึกงานบริษัท กสท.โทรคมนาคม จำกัด
พ.ศ. 2556-2558	เข้าทำงานบริษัททรูคอปเปอร์เรชั่น หน่วยงาน IP Core Networks
พ.ศ. 2559-2560	เข้าร่วมโครงการนักศึกษาวิจัยแลกเปลี่ยนกับมหาวิทยาลัยมิเอะ (Mie University) ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical and Electronic Engineering) ห้องปฏิบัติการวิจัยโทรคมนาคม (Laboratory) ประเทศญี่ปุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้