

การเปรียบเทียบสมรรถนะระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลของการใช้
ความถี่ซ้ำแบบอ่อนในการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ

A COMPARISON OF DIFFERENT TRANSMISSION POWER PERFORMANCE IN
SOFT FREQUENCY REUSE BASED OFDMA CELLULAR COMMUNICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2555

KMITL-2012-EN-M-010-170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A COMPARISON OF DIFFERENT TRANSMISSION POWER PERFORMANCE IN
SOFT FREQUENCY REUSE BASED OFDMA CELLULAR COMMUNICATION



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
2012

KMITL-2012-EN-M-010-170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเปรียบเทียบสมรรถนะระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลของการใช้ความถี่ซ้ำแบบอ่อน
ในการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ

Thesis Title A Comparison of Different Transmission Power Performance in Soft
Frequency Reuse Based OFDMA Cellular Communication

ศึกษา นายบรรจง โยสภา

สปรประจำตัว 51060915

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวิมล สิริชีวะภาค

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-010-170

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.ยุทธพงษ์	รังสรรค์เสรี	
ดร.เกรียงไกร	วงศ์โรจนภรณ์	
ดร.พีระพล	ยุวภูษิตานนท์	
ดร.พิสิฐ	บุญศรีเมือง	
ดร.สุวิมล	สิริชีวะภาค	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบสมรรถนะระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล ของการใช้ความถี่ซ้ำแบบอ่อนในการสื่อสารแบบเซลลูลาร์ โอเอฟดีเอ็มเอ
นักศึกษา	นายบรรจง โยสภา
รหัสประจำตัว	51060915
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิมล สิริชีวะภาค

บทคัดย่อ

สัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกันเป็นปัญหาหลักของการสื่อสารแบบเซลลูลาร์ที่ใช้ระบบโอเอฟดีเอ็มเอ ในบทความนี้ได้ศึกษาถึงวิธีการใช้งานทรัพยากรคลื่นความถี่ซ้ำด้านข้างที่จะแก้ไขปัญหานี้ โดยการใช้ช่องสัญญาณวิทยุทางด้านข้างที่มีการยืดหยุ่นได้และเปลี่ยนระดับกำลังสัญญาณให้มีความเหมาะสม เนื่องด้วยสมรรถนะของโครงข่ายระบบสื่อสารดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับการจัดความถี่ใช้งานและระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่เหมาะสม ในบทความนี้จึงศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมรรถนะในแต่ละรูปแบบของระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนที่เหมาะสมในมุมมองของการกระจายกำลังส่งและการจำกัดของทรัพยากรคลื่นความถี่จากการใช้งานของผู้ใช้งานในระบบ ด้วยเหตุนี้การจัดการดังกล่าวเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดของระบบสื่อสารสามารถแสดงถึงค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่แตกต่างกันเป็นอย่างดีชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	A Comparison of Different Transmission Power Performance in Soft Frequency Reuse based OFDMA Cellular Communication
Student	Mr. Bunjong Yosapa
Student ID.	51060915
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Suvepon Sittichivapak

ABSTRACT

Co-channel interference problem is a key issue in OFDMA-based cellular communication networks. In order to deal with this problem, several flexible radio resource reuse schemes for the downlink are examined in this paper. The performance of such networks significantly depends on the configuration of the transmission power formats of the soft frequency reuse pattern. In this paper, we investigate the performance of different transmission power format of the soft frequency reuse pattern of configurations against the optimal case, in which a central entity optimally distributes power and resource blocks among the users of the network. It is shown that large differences exist between the block error rates and throughput of different transmission power formats.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ รศ.ดร.สุวิพล สิริชีวะภาค อาจารย์ที่เป็นอาจารย์ปรึกษา ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาและตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบและทำการจำลองระบบขึ้นมา และขอขอบคุณพี่และน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณบิดาและมารดาของข้าพเจ้าคือ พ่อแฉล้ม และแม่สง โยสภา และพี่ชาย คือ พี่สุรพงศ์ โยสภา ที่คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

บรรจง โยสภา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ความเป็นมาของการสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์.....	4
2.3 วิวัฒนาการของระบบเซลลูลาร์.....	5
2.3.1 ระบบเซลลูลาร์ยุคแรก (1G).....	5
2.3.2 ระบบเซลลูลาร์ยุคที่ 2 (2G).....	5
2.3.3 ระบบเซลลูลาร์ยุคที่ 2.5 (2.5G).....	6
2.3.4 ระบบเซลลูลาร์ยุคที่ 3 (3G).....	6
2.3.5 ระบบเซลลูลาร์ยุคที่ 4 (4G).....	7
2.4 หลักการสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์.....	8
2.4.1 เซลล์รูปทรงหกเหลี่ยม.....	10
2.4.2 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน.....	12
2.4.3 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน ด้วยการแบ่งเซลล์ออกเป็น 3 เซกเตอร์.....	16
2.5 กลไกพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น.....	18
2.5.1 การแพร่กระจายในทิศทางตรง (Line-of-sight: LOS propagation).....	18
2.5.2 การสะท้อน (Reflection).....	18
2.5.3 การเลี้ยวเบน (Diffraction).....	18
2.5.4 การกระเจิง (Scattering).....	18
2.6 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น.....	18
2.6.1 การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss).....	18
2.6.2 การถูกบดบัง (Shadowing หรือ Large-Scale Fading).....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.6.3 การจางหายแบบหลายวิถี (Multipath Fading หรือ Small-Scale Fading.....	19
2.7 เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มเอ	
(Orthogonal Frequency-Division Multiple Accesses: OFDMA)	20
2.7.1 หลักการของโอเอฟดีเอ็มเอ	20
2.7.2 การเสริมสร้างไซคลิก (Add cyclic prefix: Add CP)	25
บทที่ 3 แบบจำลองระบบและวิธีการจำลอง.....	28
3.1 บทนำ.....	28
3.2 แบบจำลองระบบ.....	28
3.2.1 แบบจำลองการนำเข้าข้อมูลและแบบจำลองการนำออกข้อมูล (Data Input and Data Out).....	29
3.2.2 แบบจำลองการแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนาน และแบบจำลองการแปลงข้อมูลขนานเป็นข้อมูลอนุกรม (S/P and P/S).....	30
3.2.3 แบบจำลองการมอดูเลชัน และ แบบจำลองการดีมอดูเลชัน (Modulation and Demodulation)	30
3.2.4 แบบจำลองการแปลงกลับเร็วแบบฟูริเยร์ และแบบจำลองการแปลงเร็วแบบฟูริเยร์ (IFFT and FFT)	32
3.2.5 แบบจำลองนำเข้าสัญญาณป้องกันและแบบจำลองลบออกสัญญาณป้องกัน (Add CP and Remove CP)	33
3.2.6 แบบจำลองการจำกัดพลังงานที่ใช้สำหรับส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย และแบบจำลองการชดเชยพลังงานที่ใช้ในการส่งของช่องสัญญาณย่อย (Add Mask Power Control and Remove Mask Power Control)	34
3.2.7 แบบจำลองการควบคุมระดับพลังงานภาคส่ง-ภาครับ (Tx Power and Rx Power Control)	34
3.2.8 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบเซลลูลาร์.....	35
3.3 วิธีการจำลอง.....	39
บทที่ 4 ผลการจำลองแบบ.....	42
4.1 บทนำ.....	42
4.2 ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของ การจัดความถี่ใช้งานในรูปแบบต่างๆ.....	42
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจัดความถี่ใช้งานในรูปแบบต่างๆ.....	44
4.4 ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของ การจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนในแต่ละระดับของพลังในการส่งข้อมูล.....	46
4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนใน แต่ละระดับของพลังงานในการส่งข้อมูล.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 บทนำ.....	50
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	53
ประวัติผู้เขียน.....	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง i, j และจำนวนเซลล์ในคลัสเตอร์.....	12
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง i, j และ S/I	15
3.1 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	33
3.2 ระดับพลังงานในการส่งข้อมูลแต่ละรูปแบบ.....	39
4.1 ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของแต่ละรูปแบบการจัดความถี่ใช้งาน.....	45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปร่างเซลล์แบบต่างๆ (a) สี่เหลี่ยม (b) สามเหลี่ยม (c) วงกลม (d) หกเหลี่ยมโดยที่ R เป็นรัศมี ของหกเหลี่ยม.....	10
2.2 แนวคิดของเซลล์แบบหกเหลี่ยม คู่อันดับของจุดกึ่งกลางเซลล์คือ (u, v)	11
2.3 รูปแบบการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ของเซลล์ ซึ่งตัวอักษรจะแทนช่องสัญญาณที่แตกต่างกันและ D เป็นระยะระหว่างเซลล์ที่มีความถี่เดียวกัน.....	12
2.4 ขยายมุมมองของโครงสร้างเซลล์ซึ่งแสดงรูปแบบการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ 7 เซลล์.....	13
2.5 แสดงโครงสร้างเซลล์ที่มีจำนวนเซลล์ในคลัสเตอร์ (a) เท่ากับ 3 (b) เท่ากับ 1 และจำนวน CCI cell เท่ากับ 6 ทั้งสองรูปแบบ.....	16
2.6 แนวคิดของสายอากาศแบบ 3 ทิศทาง.....	17
2.7 การกวนกันของเซลล์สามารถพิจารณาได้จากรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของเซกเตอร์ของสายอากาศ.....	17
2.8 การผสมสัญญาณที่มีคุณสมบัติตั้งฉากซึ่งกันและกัน.....	21
2.9 สัญญาณฮาร์โมนิกที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่.....	21
2.10 การสร้างสัญญาณโอเอฟดีเอ็มแบบดั้งเดิม.....	22
2.11 การสร้างสัญญาณโอเอฟดีเอ็มด้วยการแปลงการแปลงผกผันฟูริเยร์แบบเร็ว.....	22
2.12 การแบ่งช่องสัญญาณของโอเอฟดีเอ็มเอ.....	23
2.13 ผลกระทบที่เกิดจาก Narrow Band Interference.....	24
2.14 หลักการโอเอฟดีเอ็มเอ.....	24
2.15 รูปแบบการเพิ่ม cyclic prefix เข้าไปในสัญลักษณ์ โอเอฟดีเอ็ม.....	26
3.1 แบบจำลองระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ.....	28
3.2 แบบจำลองการนำเข้าข้อมูลและแบบจำลองการนำออกข้อมูล.....	29
3.3 แบบจำลองแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนานและแบบจำลองการแปลงข้อมูลขนานเป็นข้อมูลอนุกรม.....	30
3.4 แบบจำลองมอดูเลชัน และ แบบจำลองดีมอดูเลชัน.....	31
3.5 แบบจำลองการแปลงกลับเร็วแบบฟูริเยร์ และแบบจำลองการแปลงเร็วแบบฟูริเยร์.....	32
3.6 แบบจำลองนำเข้าสัญญาณป้องกันและแบบจำลองลบออกสัญญาณป้องกัน.....	33
3.7 แบบจำลองการจำกัดพลังงานที่ใช้ในการส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย และแบบจำลองการชดเชยพลังงานที่ใช้ในการส่งของช่องสัญญาณย่อย.....	34
3.8 แบบจำลองการควบคุมระดับพลังงานภาคส่ง-ภาครับ.....	35
3.9 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบเซลลูลาร์.....	35
3.10 รูปแบบระบบสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์.....	36
3.11 การจัดความถี่แบบเอกรูป.....	37
3.12 การจัดความถี่แบบแข็ง.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 การจัดความถี่แบบอ่อน.....	38
4.1 ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูล และตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่แบบเอกรูป, การจัดความถี่แบบแข็งและการจัดความถี่แบบอ่อน.....	43
4.2 ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูล และตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่แบบเอกรูป, การจัดความถี่แบบแข็งและการจัดความถี่แบบอ่อน.....	44
4.3 ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูล และตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน.....	46
4.4 ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูล และตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน.....	47
4.5 การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลที่ลดลง ของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน.....	48
4.6 การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการส่งข้อมูลข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากระบบการสื่อสารไร้สายสามารถอำนวยความสะดวกต่อการเข้าใช้งานระบบ โดยสามารถเข้าใช้งานได้ในทุกพื้นที่ และแนวโน้มความต้องการใช้งานระบบการสื่อสารไร้สายในปัจจุบัน และอนาคต เพื่อการรับ-ส่งข้อมูลด้วยความเร็วที่สูงมีเพิ่มมากขึ้น ภายใต้ทรัพยากรด้านความกว้างของความถี่ยังใช้งานยังคงมีเท่าเดิม ดังนั้น การศึกษา ค้นคว้า พัฒนาเทคนิคการรับ-ส่งข้อมูลต่างๆ ขึ้นมา อาทิเช่น ระบบการเข้าถึงแบบแบ่งหลายความถี่ (FDMA), การเข้าถึงแบบแบ่งหลายเวลา (TDMA), การเข้าถึงแบบแบ่งหลายรหัส (CDMA) , โอเอฟดีเอ็มเอ (OFDMA) เป็นต้น ซึ่งระบบการสื่อสารไร้สายในยุคต่อไปที่สามารถรองรับการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูงได้อย่างเหมาะสมนั้นมีอยู่หลายระบบด้วยกัน

การสื่อสารแบบเซลล์ลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access: OFDMA) สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงได้เป็นอย่างดี แต่ก็มีปัญหาที่เกี่ยวข้องสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน (Co-Channel Interference : CCI) ซึ่งจำเป็นต้องจะมีการจัดการความถี่ที่ใช้งาน (Frequency Reuse) และกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล (Mask Power control) ของแต่ละตัวรับส่งสัญญาณที่เป็นแบบเซลล์ลูลาร์ เพื่อลดการเกิดสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกัน ดังนั้น การจัดการความถี่ใช้งานและการกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูลจึงมีความสำคัญมากกับการสื่อสารแบบเซลล์ลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน ถ้าการจัดการความถี่ใช้งานและการกำหนดระดับพลังงานในการส่งข้อมูลได้ไม่เหมาะสมและดีเพียงพอ จะส่งผลกระทบต่อบางพื้นที่ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้และอาจมีบางพื้นที่ที่คุณภาพของการใช้งานจะไม่ดีเท่าที่ควรจะเป็น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ทำการศึกษาการสื่อสารแบบเซลล์ลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ ด้วยความสามารถของเทคโนโลยีนี้ทำให้ประสิทธิภาพการรับ-ส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงได้ดี โดยการศึกษาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้มุ่งเน้นไปที่การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารไร้สายแบบเซลล์ลูลาร์ที่ใช้เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มเอ ด้วยการพิจารณารูปแบบการจัดการความถี่ใช้งานและระดับพลังงานในการส่งข้อมูลของตัวส่งข้อมูลที่เปลี่ยนไป ซึ่งรูปแบบของการจัดการความถี่ใช้งานจะเป็นการจัดการเกี่ยวกับความกว้างของช่องสัญญาณและระดับพลังงานที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูลในระบบการสื่อสารแบบเซลล์ลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอของตัวส่งสัญญาณ ภายใต้เงื่อนไขที่ตัวส่งสัญญาณแต่ละตัวเป็นตัวส่งสัญญาณแบบเซลล์ลูลาร์ ทำให้ความกว้างของช่องสัญญาณตัวส่งและพลังงานในการส่งสัญญาณของแต่ละตัวส่งสัญญาณมีผลต่อการเกิดความผิดพลาดของข้อมูล ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการจัดการเกี่ยวกับความกว้างของช่องสัญญาณและพลังงานในการส่งสัญญาณของแต่ละตัวส่งให้มีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ปัญหาของระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ คือ ปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน จากปัญหาดังกล่าว วิธีการที่จะสามารถแก้ปัญหาสัญญาณรบกวน คือ การจัดความถี่ใช้งานและการกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณนั่นเอง เมื่อพิจารณาจากรูปแบบการจัดความถี่ใช้งานที่แตกต่างกันแล้วจะพบว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบแข็งสามารถแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนได้ ด้วยแนวโน้มของค่าผิดพลาดของระบบมีค่าลดลง และดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดความถี่ใช้งานแบบอื่น แต่เมื่อพิจารณาค่าความเร็วในการส่งข้อมูล การจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนสามารถทำแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนได้และให้ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงที่สุด ดังนั้นการศึกษการจัดความถี่ใช้งานและการกำหนดระดับพลังงานในการส่งข้อมูลของระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ นั้น ที่มุ่งเน้นปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบจำเป็นต้องพิจารณาทั้งค่าความผิดพลาดของบล็อกและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลร่วมด้วย

1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ เป็นการสื่อสารที่ใช้เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มเอ ร่วมกับการสื่อสารแบบเซลลูลาร์ ซึ่งเทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มเอ เป็นเทคนิคการส่งข้อมูลแบบขนานโดยข้อมูลจะถูกส่งออกแบบขนานไปพร้อมกันในหลายความถี่ แต่ละความถี่ต้องมีคุณสมบัติความถี่ต่างกันและกัน เพื่อป้องกันปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้งานความถี่เดียวกัน และปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบด้วยการจัดความถี่ใช้งาน (Frequency Reuse) และการกำหนดระดับพลังงานในการส่งข้อมูล (Mask Power control) โดยแต่ละรูปแบบของการจัดความถี่ใช้งานจะมีความแตกต่างกันไป อาทิเช่น การจัดความถี่แบบเอกรูป (Uniform Frequency Reuse : FR) การจัดความถี่แบบแข็ง (Hard Frequency Reuse : HFR) และการจัดความถี่แบบอ่อน (Soft Frequency Reuse : SFR)

1.5 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ ซึ่งพิจารณาค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วของการส่งข้อมูลที่มีการจัดความถี่ใช้งานแบบแข็ง , การจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูป และการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน ด้วยการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในการส่งข้อมูล 2 ระดับที่แตกต่างกัน และเพิ่มการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในการส่งข้อมูลเป็น 6 ระดับโดยการใช้การจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน เพื่อคำนวณหาค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูล เปรียบเทียบสรุปหารูปแบบการจัดความถี่ใช้งานและระดับกำลังส่งข้อมูลที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพของระบบดีที่สุด

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. สร้างจำลองแบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ
2. คำนวณหาค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลในแต่ละระยะห่างระหว่างตัวส่งข้อมูลที่แตกต่างกันไป ของรูปแบบการจัดความถี่ใช้งานแบบแข็ง โดยที่ระดับพลังงานในการส่งข้อมูลคงที่ตลอดอยู่ที่ระดับที่ 1 และทำการทดลองซ้ำในการจัดความถี่ใช้งานแบบแข็งแต่เปลี่ยนระดับพลังงานในการส่งข้อมูลไปเป็นระดับที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 2 แต่เปลี่ยนการจัดความถี่ใช้งานเป็นแบบเอกรูป
4. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 2 แต่เปลี่ยนการจัดความถี่ใช้งานเป็นแบบอ่อน
5. ทำการสร้างกราฟค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการจัดความถี่ใช้งานแบบต่างๆ
6. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 2 แต่เปลี่ยนการจัดความถี่ใช้งานเป็นแบบอ่อนและเพิ่มระดับของพลังงานในการส่งข้อมูลเป็น 6 ระดับ
7. ทำการสร้างกราฟค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการระดับพลังงานในการส่งข้อมูลในแต่ละระดับของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน
8. ทำการสร้างกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระดับพลังงานในการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้น
9. สรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การสื่อสารบนเครือข่ายไร้สายแบบเซลลูลาร์จากอดีตถึงปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากการสื่อสารด้านเสียงเพียงอย่างเดียวในยุคแรกๆ จนมาถึงการหลอมรวม (Convergence) ด้านข้อมูลเสียง และมัลติมีเดียเข้าด้วยกัน เพื่อเป็นไปตามนวัตกรรมของเทคโนโลยีและสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค โดยการนำเทคโนโลยีที่หลากหลายมาผสมผสาน และเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่ยอมรับอยู่ขณะนี้ คือ เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มเอ (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access : OFDMA) คือ เทคนิคการจัดการการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ซึ่งเทคโนโลยีใหม่ี่เป็นการนำเอาคุณสมบัติของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก มาช่วยในการจัดการการเข้าใช้ช่องสัญญาณให้กับผู้ใช้บริการอย่างเหมาะสม

2.2 ความเป็นมาของการสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์

อเล็กซานเดอร์เกรแฮม เบล เป็นผู้วางรากฐานระบบโทรศัพท์ไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1879 หรือประมาณร้อยปีเศษแล้ว โทรศัพท์มีพัฒนาการค่อนข้างช้า เริ่มจากการสวิตช์ด้วยคน มาเป็นการใช้ระบบสวิตช์แบบอัตโนมัติด้วยกลไกทางแม่เหล็กไฟฟ้าจำพวกกรีเลย์ จนในที่สุดเป็นระบบครอสบาร์ (Crossbar System)

ครั้นเข้าสู่ยุคดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ระบบโทรศัพท์ที่ใช้ได้เปลี่ยนแปลงวิธีการสวิตช์มาเป็นแบบดิจิทัล มีการแปลงสัญญาณเสียงให้เป็นดิจิทัล โดยแถบเสียงขนาด 4 กิโลเฮิร์ตซ์ต่อวินาที (kHz/s) ใช้อัตราสุ่ม (Sampling) 8,000 ครั้งต่อวินาที ได้สัญญาณดิจิทัลขนาด 64 กิโลบิตต่อวินาที (kbps) แถบเสียงแบบดิจิทัลจึงเป็นข้อมูลที่มีการรับส่งกันมากที่สุดในโลกอยู่ขณะนี้

จนประมาณปี ค.ศ. 1983 ระบบเซลลูลาร์เริ่มพัฒนาขึ้นใช้งาน ระบบแรกที่พัฒนามาใช้งาน เรียกว่า ระบบ AMPS (Analog Advance Mobile Phone Service) ระบบดังกล่าวส่งสัญญาณไร้สายแบบอะนาล็อก ที่คลื่นความถี่ 824-894 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้หลักการแบ่งช่องสัญญาณทางความถี่ (Frequency Division Multiple Access: FDMA)

ต่อมาประมาณปี ค.ศ. 1990 กลุ่มผู้พัฒนาระบบเซลลูลาร์ได้พัฒนามาตรฐานใหม่โดยให้ชื่อว่า ระบบ GSM-Global System for Mobile Communication เน้นระบบเชื่อมโยงติดต่อกันได้ทั่วโลก ระบบดังกล่าวนี้ใช้วิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณด้วยระบบการเข้าถึงแบบแบ่งช่องสัญญาณทางเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) โดยใช้ความถี่ในการติดต่อกับสถานีฐานที่ 890-960 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)

สำหรับในสหรัฐอเมริกาเองก็มีการพัฒนาระบบของตนเองขึ้นมาใช้ในปี 1991 โดยให้ชื่อว่า IS - 54 - Interim Standard - 54 ระบบดังกล่าวใช้วิธีการเข้าสู่ช่องสัญญาณด้วยระบบ TDMA เช่นกัน แต่ใช้ช่วงความถี่ 824-894 เมกะเฮิร์ตซ์ และในปี 1993 ก็ได้พัฒนาต่อเป็นระบบ IS-95 โดยใช้ระบบ CDMA ที่มีช่องความถี่มากขึ้นคือ 824-894 และ 1,850-1,980 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ร่วมกับ

ระบบ AMPS เดิมได้ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วิวัฒนาการของระบบเซลลูลาร์

ระบบเซลลูลาร์มีวิวัฒนาการเริ่มตั้งแต่ยุคของการส่งสัญญาณแบบอนาล็อก และพัฒนามาเป็นยุคของการส่งสัญญาณแบบดิจิทัล โดยแบ่งออกเป็นยุคตามรูปแบบการพัฒนาเทคโนโลยี ดังนี้

2.3.1 ระบบเซลลูลาร์ยุคแรก (1G)

เป็นยุคแรกของการพัฒนาระบบไร้สายแบบเซลลูลาร์ รับส่งสัญญาณด้วยวิธีการมอดูเลตสัญญาณอนาล็อกเข้าช่องสื่อสารโดยใช้การแบ่งความถี่ออกมาเป็นช่องเล็กๆ ที่คลื่นความถี่ระหว่าง 800 ถึง 900MHz แต่เนื่องจากวิธีการนี้มีข้อจำกัดในเรื่องจำนวนช่องสัญญาณ และการใช้ความถี่ไม่เต็มประสิทธิภาพ จึงได้มีการพัฒนาต่อยอดเทคโนโลยีที่ใช้กับ 1G ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีการเพิ่มเทคโนโลยีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (FDMA : Frequency Division Multiple Access) เข้าไปจะทำให้สามารถเปลี่ยนการส่งสัญญาณแบบอนาล็อกเดิมไปเป็นดิจิทัลได้ และยังแบ่งคลื่นความถี่ออกเป็น 30 ช่องทาง เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลอื่นๆ ที่ไม่ใช่เสียงออกไปได้ [1]

2.3.2 ระบบเซลลูลาร์ยุคที่ 2 (2G)

ระบบเซลลูลาร์ยุคแรกที่ใช้สัญญาณอนาล็อกยังมีปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนจึงมีการพัฒนามาใช้สัญญาณดิจิทัลในการส่งแทน ซึ่งระบบโทรศัพท์ในยุคดิจิทัลจะให้เสียงที่คมชัดกว่าเดิมมาก แต่จะไม่มีสัญญาณรบกวนด้วยซ้ำ โดยยุค 2G นี้สามารถ รับ-ส่งข้อมูลต่างๆ และติดต่อเชื่อมโยงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดการกำหนดเส้นทางการเชื่อมกับสถานีฐาน หรือที่เรียกว่า CELL SITE ในยุคนี้จะมีอยู่ 3 ระบบ ได้แก่ [1]

1. ระบบ D-AMPS (The Digital Advanced Mobile Phone System) เป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับ AMPS ได้ ทำให้สามารถให้บริการพร้อมกันทั้ง 2 ระบบในเขตพื้นที่เซลล์เดียวกัน ซึ่งระบบนี้มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและบีบอัดข้อมูลที่ตัวเครื่องโทรศัพท์ซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก ทำให้ผู้ใช้บริการโทรศัพท์ 3 เครื่องบนความถี่เดียวกันได้

2. ระบบ GSM (Global System for Mobile communication) ก่อกำเนิดขึ้นมา และมีความคล้ายคลึงกับระบบ D-AMPS แต่ระบบ GSM มีช่องสัญญาณที่กว้างกว่า (D-AMPS มีความกว้าง 30 kHz ส่วน GSM มีความกว้าง 200 kHz) มีจำนวนผู้ใช้บริการต่อคู่ความถี่ต่างกัน (D-AMPS มีจำนวน 3 คน ส่วน GSM มีจำนวน 8 คน) ผลทำให้ระบบ GSM มีความสามารถในการสื่อสารที่มีความเร็วสูงกว่ามาก

3. ระบบ CDMA (Code Division Multiple Access) คือ แทนที่จะทำการแบ่งคลื่นสัญญาณที่ได้รับออกเป็นช่องสัญญาณแคบๆ CDMA อนุญาตให้แต่ละสถานีฐานสามารถใช้คลื่นสัญญาณทั้งหมดได้ในเวลาเดียวกัน เพื่อเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นการทำงาน ลองนึกถึงห้องโถงขนาดใหญ่ที่มีผู้คนอยู่จำนวนมาก ต่างกำลังสนทนากันอยู่เป็นคู่ๆ วิธีการแบบ TDM คือการแบ่งช่วงเวลาให้แต่ละคู่ในการพูดคุยซึ่งจะต้องผลัดเปลี่ยนกันแต่ละคู่ FDM คือการแบ่งคลื่นความถี่ออกเป็นช่องและกำหนดให้คู่สนทนาแต่ละคู่ใช้ช่องสัญญาณที่ต่างกันทำให้สามารถพูดคุยพร้อมกันได้

ยุค 2G ถือเป็นยุคเริ่มต้นแห่งการเฟื่องฟูของโทรศัพท์มือถือ ราคาของโทรศัพท์มือถือเริ่มต่ำลง (กว่ายุค 1G) ทำให้ปริมาณผู้ใช้โทรศัพท์มือถือมีมากขึ้น ซึ่งการส่งข้อมูลของยุค 2G นี้ เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่เขียนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยุคที่มีการเริ่มนิยม Download Ring tone , Wallpaper, Graphic ต่างๆ แต่ก็จำกัดอยู่ที่การ Download Ring tone แบบ Monotone และ ภาพ Graphic ต่างๆ ก็เป็นเพียงแค่ภาพขาว-ดำที่มีความละเอียดต่ำเท่านั้น

2.3.3 ระบบเซลลูลาร์ยุคที่ 2.5 (2.5G)

การนำเทคโนโลยีเชื่อมต่อวงจรแบบแพ็กเกตสวิตช์ (Packet Switched) ซึ่งอนุญาตให้ผู้ใช้บริการหลายรายสามารถรับส่งข้อมูลได้บนวงจรเดียวกัน ลักษณะคล้ายกับหลักการของเครือข่ายอินเทอร์เน็ตมาใช้งาน มีการพัฒนาเทคโนโลยี GPRS (Generic Packet Radio Service) ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาไปเป็นเทคโนโลยี EDGE (Enhanced Data rate for GPRS Evolution) สำหรับใช้เพิ่มขีดความสามารถของเครือข่าย GSM ให้สามารถรองรับการสื่อสารข้อมูลได้ดีขึ้น แต่ก็ยังนับว่าเครือข่าย GPRS หรือ EDGE ไม่สามารถตอบสนองความต้องการใช้งานแบบ BWA (Broadband Wireless Access) ได้ เนื่องจากอัตราเร็วสูงสุดในการรับส่งข้อมูลทั้ง 171.2 (GPRS) และ 384 (EDGE) กิโลบิตต่อวินาที เป็นความเร็วในการส่งข้อมูลรวมของความเร็วใช้งานแต่ละช่องสัญญาณในทางปฏิบัติย่อมไม่สามารถเปิดใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ [2]

2.3.4 ระบบเซลลูลาร์ยุคที่ 3 (3G)

ระบบสื่อสารไร้สายที่ได้รับความนิยมทั่วโลก สามารถรองรับระบบสื่อสารไร้สายแบบเก่าได้ และเรียกว่า Universal Mobile Telecommunication Systems (UMTS) โดยมุ่งหวังว่า การเข้าถึงเครือข่ายแบบไร้สายสามารถกระทำได้ด้วยอุปกรณ์หลากหลาย เช่น จากคอมพิวเตอร์ จากเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ระบบยังคงใช้การเข้าช่องสัญญาณเป็นแบบ CDMA ซึ่งสามารถบรรจุช่องสัญญาณเสียงได้มากกว่า แต่ใช้แบนด์วิดท์กว้าง (wideband) ในระบบนี้จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า WCDMA ซึ่งคุณสมบัติและความสามารถของ 3G มีดังนี้ ใช้คลื่นความถี่ 2 GHz สามารถเชื่อมต่อเข้าสู่เครือข่ายได้ตลอดเวลา สามารถส่งข้อมูลที่เป็นมัลติมีเดียได้ รองรับการใช้งานประเภทดิจิทัลคอนเทนต์ มีค่าความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุด 14.4 เมกะบิตต่อวินาที (ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม) สามารถทำโรมมิ่ง (roaming) ได้ทั่วโลก ในยุคนี้จะมีอยู่ 3 ระบบ ได้แก่ [2]

1. ระบบ CDMA 2000 1x EV-DO (First Evolution Data Optimized) เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนามาจากเทคโนโลยี CDMA 2000 และเป็นเทคโนโลยีที่ได้มาตรฐานการสื่อสารไร้สายยุค 3G จากการอนุมัติของสมาพันธ์โทรคมนาคมระหว่างประเทศ หรือ ITU ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งผ่านข้อมูลแบบ packet switching ด้วยประสิทธิภาพและความเร็วสูง ประกอบกับต้นทุนต่ำ จึงนับได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่ผู้บริโภคให้ความสนใจเป็นอย่างมากในการเข้าถึงข้อมูลต่าง ๆ บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง หรือ บรอดแบนด์ เนื่องจากสามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยค่าความเร็วในการส่งข้อมูลสูงถึง 2.4 เมกะบิตต่อวินาที พร้อมทั้งรองรับกับอุปกรณ์เคลื่อนที่ได้หลากหลายรูปแบบ อาทิเช่น โทรศัพท์มือถือ โน้ตบุ๊ก และพีดีเอ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีในการที่เป็นระบบการทำงานเครือข่ายแบบ Always On ซึ่งทำให้สามารถโรมมิ่งสัญญาณได้ตลอดเวลา และช่วยให้เกิดการส่งผ่านข้อมูลผ่านระบบไร้สายเพิ่มมากขึ้น สามารถทำงานร่วมกับระบบปฏิบัติการและซอฟต์แวร์ยอดนิยมต่างๆ ได้อย่างดีเยี่ยม ทำให้ผู้ใช้สามารถรับ-ส่งข้อมูลทางอินเทอร์เน็ตและอินเทอร์เน็ตภายในองค์กรได้แบบไร้สายในทุกที่ทุกเวลาที่ต้องการ CDMA 2000 1x EV-DO ใช้ช่องสัญญาณคลื่นความถี่ 1.25 MHz ที่แยกจากกันเพื่อรับ-ส่งสัญญาณเสียงและข้อมูลแบบแพคเกจ (packet) ซึ่งจะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดียิ่งขึ้น ทำให้การดูแลระบบทำได้ง่ายลดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยุ่งยากในการปรับสมดุลในการกระจายการทำงาน (load balancing) ผสมผสานการสื่อสารทางเสียงและข้อมูลให้ทำงานอย่างราบรื่นบนระบบเดียว ทำให้อุปกรณ์สามารถรองรับการใช้งานได้ทั้งทางเสียงและข้อมูล รวมทั้งผนวกการทำงานของระบบ CDMA 2000 และ CDMA 1x EV-DO ไว้ในอุปกรณ์เดียว

2. ระบบ WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) เป็นเทคโนโลยี CDMA ที่มีข้อกำหนดตามข้อตกลงที่กำหนดของ ITU และเป็นที่ยอมรับอย่างเป็นทางการในชื่อว่า IMT-2000 WCDMA เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารระบบไร้สายในยุคที่ 3 มีประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายผ่านโทรศัพท์มือถือและอุปกรณ์ไร้สายความเร็วสูง โดยมีประสิทธิภาพการทำงานเหนือกว่าเทคโนโลยีทั่วไป เป็นอุตสาหกรรมโทรศัพท์ไร้สาย ที่มีความก้าวหน้ามากที่สุดและมีความสลับซับซ้อนของ Air Interface ผู้วิจารณ์ส่วนใหญ่มีความเชื่อว่า WCDMA จะเป็นเทคโนโลยีจะเสริมสร้างโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 Air Interface ของ W-CDMA เป็นส่วนหนึ่งของสถาปัตยกรรมโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ได้จัดเตรียมการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ใช้งานกับโครงข่ายหลัก

3. ระบบ HSPA (High-Speed Packet Access) ถูกพัฒนามาจาก UMTS (WCDMA) HSPA เป็น Packet หรือ Protocol ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งข้อมูล HSPA มีสองมาตรฐานคือ HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) และ HSUPA (High Speed Uplink Packet Access)

HSDPA คือ ช่องสัญญาณข้อมูล Packet ความเร็วสูงทางด้าน downlink ใหม่ ซึ่งเป็นส่วนขยายต่อของเทคโนโลยี WCDMA ซึ่งเป็นส่วนบนสุดของช่องสัญญาณปกติของ WCDMA ซึ่ง HSDPA รองรับความสามารถในการส่งผ่านข้อมูล 1.8 เมกกะบิตต่อวินาที , 3.6 เมกกะบิตต่อวินาที , 7.2 เมกกะบิตต่อวินาที และความเร็ว 14.4 เมกกะบิตต่อวินาที

HSUPA คือ ช่องสัญญาณข้อมูล Packet ความเร็วสูงทางด้าน uplink ใหม่ เป็นโหมดที่ใช้สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของ HSDPA ซึ่งสำคัญในการก่อให้เกิดชุดของการส่งเสริมการเพิ่มประสิทธิภาพ uplink สูงสุด HSUPA จะทำให้อัตรารับส่งข้อมูลได้สูงสุดถึง 5.76 เมกกะบิตต่อวินาที และยังสามารถลดระยะเวลาดีเลย์แพ็คเก็ตลงอย่างมาก สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมของ QoS สำหรับการให้บริการระบบ uplink ที่ดีขึ้น

2.3.5 ระบบเซลลูลาร์ยุคที่ 4 (4G)

ระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 หรือ 4G เป็นการสื่อสารที่นำเอาเทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มเอ (OFDMA) มาใช้งานร่วมกับระบบเซลลูลาร์ และสามารถใช้แถบความกว้างของความถี่ใช้งานได้มากที่สุดถึง 20 MHz จึงสามารถส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สายด้วยระดับค่าความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุดที่เพิ่มขึ้นถึง 100 เมกกะบิตต่อวินาที และสามารถทำให้ผู้ใช้งานระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 นี้สามารถส่งผ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น เมื่อผู้ใช้งานสามารถส่งผ่านข้อมูลได้เร็วมากยิ่งขึ้น จึงเกิดการให้บริการใหม่ ๆ ขึ้นมามากมาย ยกตัวอย่างเช่น สามารถสนับสนุนการให้บริการมัลติมีเดียในลักษณะที่สามารถโต้ตอบได้ เช่น อินเทอร์เน็ตไร้สาย และ เทเลคอนเฟอเรนซ์ เป็นต้น โดยที่การสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 ได้นำเทคโนโลยี โอเอฟดีเอ็มเอ มาใช้งานโดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ แอลทีอี (LTE) และไวแมกซ์ (Wimax)

1. ระบบ LTE (Long Term Evolution) เป็นหนึ่งมาตรฐานจากกลุ่ม The Third Generation Partnership Project (3GPP) ที่สามารถตอบสนองการใช้งานบรอดแบนด์ไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเอกสารได้รับแจ้งข้อผิดพลาดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วสูง ซึ่งตามทฤษฎีนั้น LTE แบ่งเป็น 2 ชื่อมาตรฐาน คือ 4G LTE อัฟโหลด 50 เมกะบิตต่อวินาที ดาวโหลด 100 เมกะบิตต่อวินาที และ LTE Advance อัฟโหลด 500 เมกะบิตต่อวินาที ดาวโหลด 1 จิกะบิตต่อวินาที ส่วนอุปกรณ์ที่จะสามารถใช้งานเครือข่าย 4G ได้นั้น มีความคล้ายคลึงกับอุปกรณ์ที่ใช้ 3G ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต แอร์การ์ด เป็นต้น แต่จะมีสัญลักษณ์ที่บอกว่ารองรับ 4G LTE หลายประเทศที่เริ่มให้บริการ 4G LTE กันแล้ว คลื่นความถี่ 4G LTE ในแต่ละประเทศจะใช้อย่างคลื่นความถี่แตกต่างกันไป เช่น อเมริกาเหนือ ใช้ LTE คลื่นความถี่ 700 , 800 , 1700 และ 1900 MHz ทวีปยุโรป ใช้คลื่นความถี่ 800, 900 , 1800 และ 2600 MHz แต่ก็สามารถใช้งานคลื่นความถี่ 2100 MHz ได้เช่นกัน

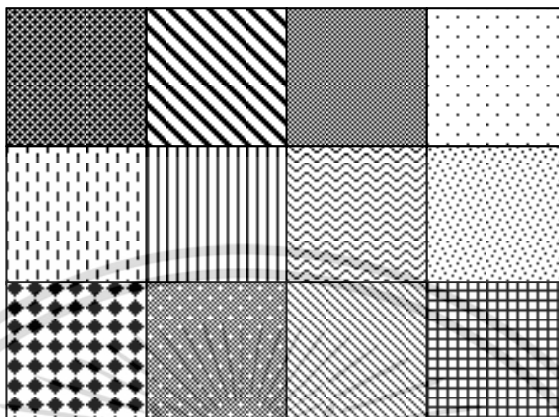
2. ระบบ Wimax (Worldwide Interoperability for Microwave Access) เป็นเทคโนโลยีบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงที่ถูกพัฒนาขึ้นมาบนมาตรฐาน IEEE 802.16 และได้พัฒนามาตรฐาน IEEE 802.16d ให้รองรับการทำงานแบบจุดต่อจุด ขึ้นโดยได้เผยแพร่เอกสารมาตรฐานฉบับสมบูรณ์เมื่อเดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2004 โดยสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers) ในช่วงแรกมาตรฐาน IEEE802.16 ได้ออกแบบให้ส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุด(Point-to-Point) จึงทำให้ส่งข้อมูลได้ระยะไกลส่งข้อมูลได้ระยะห่าง 50 กิโลเมตร ด้วยค่าความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที

2.4 หลักการสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์

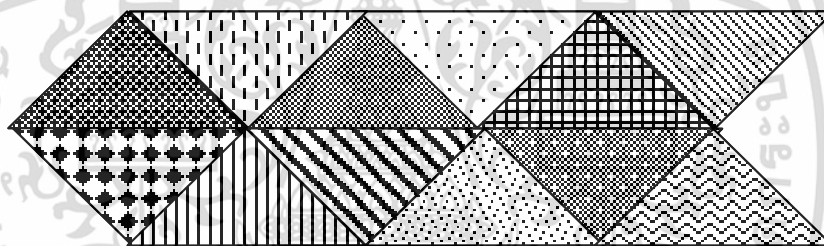
การสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์ [3] ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในบริเวณพื้นที่กว้างๆ ด้วยแบนด์วิดท์ของคลื่นที่จำกัด ผู้ให้บริการจะใช้วิธีการการแบ่งบริเวณภูมิประเทศออกเป็นเซลล์ขนาดเล็ก เพื่อให้สามารถนำช่องสัญญาณหรือความถี่ที่มีขนาดแบนด์วิดท์ที่จำกัดกลับมาใช้ซ้ำใหม่และดำเนินการที่กำลังงานต่ำๆ ได้ การนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ผ่านการใช้เซลล์ ช่วยให้ผู้ใช้บริการสามารถเพิ่มความจุของระบบได้ภายใต้แบนด์วิดท์ของคลื่นที่จำกัด ซึ่งวิธีการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน (co-channel interference :CCI) โดยสัญญาณประเภทนี้เกิดจากการรบกวนกันระหว่างช่องสัญญาณที่เหมือนกัน (ความถี่เหมือนกัน) ปัญหาการรบกวนกันจากช่องสัญญาณร่วม (co-channel) จะขึ้นกับระยะห่างระหว่างเครื่องรับกับสถานีฐานของตัวเอง และระยะห่างระหว่างเครื่องรับกับสถานีฐานที่มีช่องสัญญาณร่วม สัญญาณที่ไม่ต้องการจะถูกสร้างจากสถานีฐานตัวอื่นที่ดำเนินการที่แถบความถี่เดียวกันทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน ดังนั้น จำนวนของผู้ใช้บริการเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการกำหนดขนาดเซลล์ เมื่อจำนวนผู้ใช้เพิ่มจะต้องลดขนาดเซลล์เพื่อที่ว่าช่องสัญญาณจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้บ่อยยิ่งขึ้น การแบ่งเซลล์ (cell splitting) จะลดขนาดเซลล์รวมถึงจะลดกำลังงานส่งสูงสุดของสถานีฐานได้ด้วย

การลดกำลังงานจำเป็นต้องทำเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน จากช่องสัญญาณที่ทำงานอยู่ที่ระยะไกลออกไป เพื่อความเข้าใจในแนวคิดเหล่านี้ จะพิจารณาโครงสร้างซึ่งครอบคลุมบริเวณภูมิประเทศด้วยเซลล์ที่มีรูปร่างสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 2.1 รูปร่างที่เป็นอุดมคติคือ วงกลมที่สามารถกำหนดขอบเขตในแนวรัศมีได้ แต่แบบนี้จะมีโซนที่อยู่ภายนอกพื้นที่ครอบคลุม ดังนั้น รูปร่างเซลล์ที่ดีที่สุดคือ หกเหลี่ยมดังในรูปที่ 2.1 (d) รูปร่างที่เป็นเหลี่ยมแบบอื่นเช่น สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมจะไม่เหมาะสมเนื่องจากระยะทางจากจุดศูนย์กลางของเซลล์ไปยังจุดต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการฉ้อโกงทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

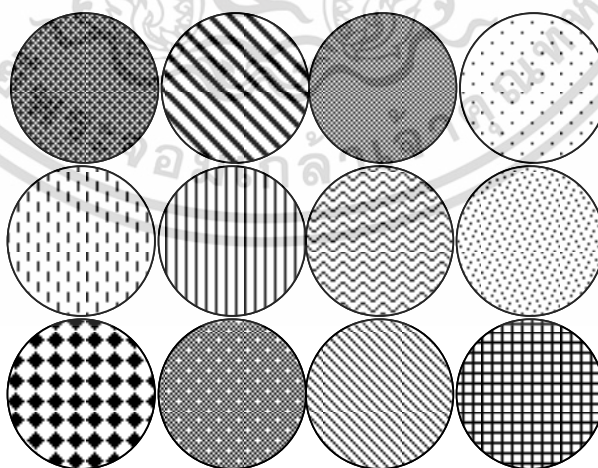
บนเส้นรอบวงแตกต่างกัน รูปร่างหกเหลี่ยมใกล้เคียงแบบอุดมคติและไม่มีช่องว่างอีกทั้งระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไปยังจุดต่างๆ บนเส้นรอบวงแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย รูปแบบเซลล์หกเหลี่ยมจึงเป็นที่นิยม และเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบเซลล์ลูลาร์



(a)

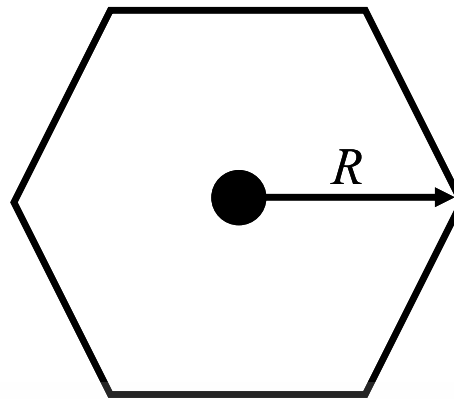


(b)



(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d)

รูปที่ 2.1 รูปร่างเซลล์แบบต่างๆ (a) สี่เหลี่ยม (b) สามเหลี่ยม (c) วงกลม (d) หกเหลี่ยมโดยที่ R เป็นรัศมีของหกเหลี่ยม [4]

2.4.1 เซลล์รูปทรงหกเหลี่ยม

เซลล์รูปทรงหกเหลี่ยม [3] (geometry of a hexagonal cell) คือ การวางเซลล์แบบหกเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.2 ให้อยู่ตามพิกัด uv โดยที่ระยะ R คือ การวัดจากจุดศูนย์กลางของเซลล์ไปยังจุดยอดของเซลล์จะถูกกำหนดให้เป็นรัศมีของเซลล์ ระยะที่วัดจากจุดศูนย์กลางของเซลล์ถึงจุดศูนย์กลางระหว่างเซลล์ที่อยู่ติดกันจะมีเท่ากับ $2R \cos(\pi/6)$ หรือ $3R$ ระยะที่วัดจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางระหว่างสองเซลล์ (D) ที่มีคู่อันดับ (u_1, v_1) และ (u_2, v_2) คือ

$$D = \{(u_2 - u_1)^2 \cos^2(\pi/6) + [(v_2 - v_1) + (u_2 - u_1) \sin(\pi/6)]^2\}^{1/2} \cdot \sqrt{3R} \quad (2.1)$$

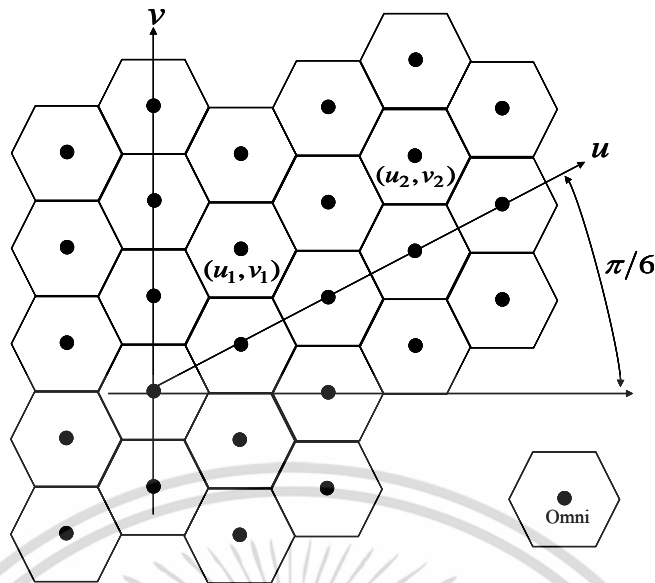
สมการนี้สามารถทำให้อยู่ในรูปแบบง่ายๆ ได้ดังนี้

$$D = \sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2 + (u_2 - u_1)(v_2 - v_1)} \cdot \sqrt{3R} \quad (2.2)$$

จากสมการ (2.2) เรายังไม่ได้ใช้ข้อมูลของรัศมีเซลล์ (R) การที่จะนำข้อมูลนี้รวมเข้าด้วยกันจึงจำเป็นต้องสมมติให้เซลล์แรกมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด (origin) ($u = 0, v = 0$) สมการสำหรับระยะทางระหว่างสองเซลล์ใดๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$D = \sqrt{i^2 + j^2 + ij} \cdot \sqrt{3R} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แนวคิดของเซลล์แบบหกเหลี่ยม คู่อันดับของจุดกึ่งกลางเซลล์คือ (u, v) [4]

โดยที่ (i, j) จะแทนจุดศูนย์กลางของเซลล์ในระบบคู่อันดับ (u, v) สำหรับเซลล์ที่อยู่ติดกัน i หรือ j สามารถเปลี่ยนแปลงค่าไปได้ทีละ 1 เท่านั้น และก็ยังจะไม่สามารถเปลี่ยนค่าดังกล่าวทั้งคู่พร้อมกันได้ด้วย ดังนั้น เมื่อ N_c แทนจำนวนเซลล์ที่อยู่ในพื้นที่รัศมี D

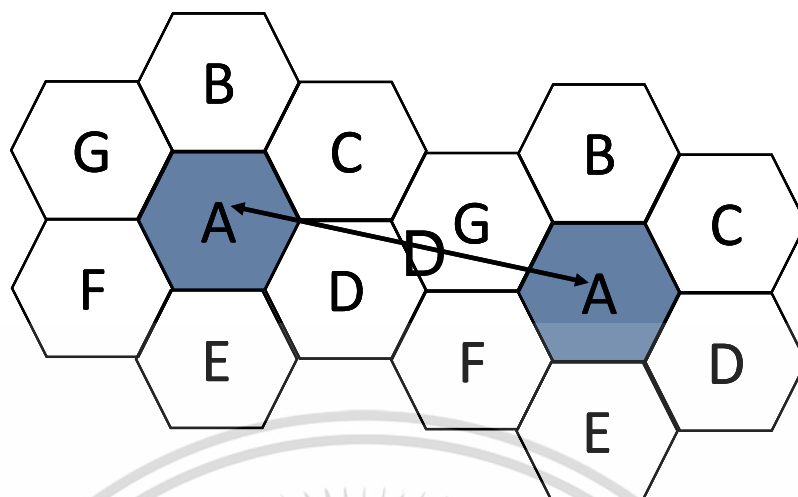
$$N_c = D_R^2 \tag{2.4a}$$

โดยที่

$$D_R = \sqrt{i^2 + j^2 + ij} \tag{2.4b}$$

โดยที่ปริมาณของ D_R คือ ระยะทางระหว่างสองเซลล์ใดๆ ที่ทำการเทียบเป็นจำนวนเท่าของระยะห่างระหว่างเซลล์ที่ติดกัน : $\sqrt{3}R$ แล้ว (Normalize) และขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์ที่นับจากเซลล์ที่จุดกำเนิดหรือเซลล์อ้างอิงเท่านั้น ดังนั้นจำนวนของเซลล์สามารถที่จะเป็น 1, 3, 4, 7, 9, 12 และอื่นๆ รูปที่ 2.3 ได้แสดงการวางเซลล์จำนวน 7 เซลล์ ($N_c = 7$) ไว้ในหนึ่งคลัสเตอร์ (cluster) เซลล์ที่ทำการแรงงาจึงเป็นเซลล์ช่องสัญญาณร่วม (co-channel cell) ซึ่งใช้ช่องสัญญาณที่เหมือนกัน คือ แถบความถี่ A นั้น และสามารถสร้างตารางที่ 2.1 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง i, j และจำนวนเซลล์ในคลัสเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



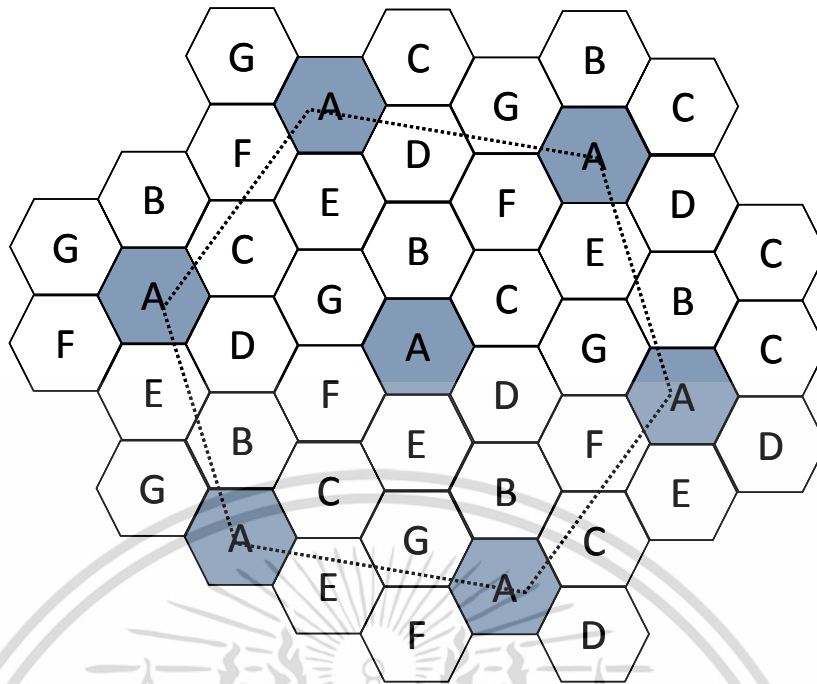
รูปที่ 2.3 รูปแบบการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ของเซลล์ ซึ่งตัวอักษรจะแทนช่องสัญญาณที่ต่างกัน และ D เป็นระยะระหว่างเซลล์ที่มีความถี่เดียวกัน [4]

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง i, j และจำนวนเซลล์ในคลัสเตอร์ [4]

i	j	N_c	$q = D/R$
1	0	1	1.73
1	1	3	3
2	0	4	3.46
2	1	7	4.58
3	0	9	5.2
2	2	12	6

2.4.2 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน

การรบกวนกันหรือการสอดแทรกของสัญญาณที่เกิดจากความถี่เดียวกัน [4] หรือที่เรียกว่า Co-Channel Interference : CCI เป็นผลมาจากการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency Reuse) ในเซลล์ของแต่ละคลัสเตอร์ ถ้าขนาดเซลล์ถูกกำหนดตายตัวแล้วสัญญาณรบกวน (interference) จากช่องสัญญาณอื่นซึ่งใช้ความถี่เดียวกันจะถูกกำหนดจากตำแหน่งของการรบกวนเซลล์โดยอ้างอิงจากเซลล์หลัก (primary cell)



รูปที่ 2.4 ขยายมุมมองของโครงสร้างเซลล์ซึ่งแสดงรูปแบบการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ 7 เซลล์ [4]

จากรูปที่ 2.4 แสดงการวางเซลล์จำนวน 7 เซลล์ ไว้ในหนึ่งคลัสเตอร์ โดยตัวอักษรที่สอดคล้องกันจะแทนช่องสัญญาณที่เหมือนกันและมันจะแสดงให้เห็นว่าความถี่ที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกในเซลล์ที่ห่างออกไปเป็นระยะที่แน่นอน การนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ จึงสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio : S/N) ซึ่งสามารถเขียนสมการ S/N ได้ดังนี้

$$\frac{S}{N} = \frac{S}{N_s + I} \quad (2.5)$$

โดยที่

- S = กำลังงานสัญญาณ
- N = กำลังงานสัญญาณรบกวน
- I = กำลังงานสัญญาณที่มากวน
- N_s = สัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ

หรือเฉพาะเจาะจงกว่านั้นคือ อัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน (signal-to-CCI ratio : S/I) โดยที่ถ้าสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ (N_s) สามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละเอียดได้ เราจะได้ว่าค่าอัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวน กับ อัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน คือค่าเดียวกัน

$$\frac{S}{N} = \frac{S}{I} \quad (2.6)$$

กำลังงานสัญญาณจะเป็นสัดส่วนกับ $R^{-\nu}$ ขณะที่กำลังงานของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกันเป็นสัดส่วนกับ $D^{-\nu}$ โดยที่ ν เป็นตัวประกอบการสูญเสีย (loss factor) ถ้าเราสมมติให้เซลล์ที่กวนกันนี้ (interfering cell) อยู่ที่ระยะไกลเท่ากัน ค่าอัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกันสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-\nu}}{\sum_{k=1}^{N_I} D_k^{-\nu}} = \frac{R^{-\nu}}{N_I D^{-\nu}} \quad (2.7)$$

โดยที่จำนวนเซลล์ที่กวนกัน คือ N_I ถ้าคิดเพียงผลจากชั้นแรกของเซลล์ที่รบกวนกัน จะได้ว่า $N_I = 6$ และค่า D_k แทนระยะเซลล์ที่กวนกันตัวที่ k และจะเท่ากับ D ในกรณีอุดมคติซึ่งเซลล์ที่กวนกันอยู่ระยะเดียวกัน จากสมการ (2.4a) และ (2.7) จะได้ S/I เป็นดังนี้

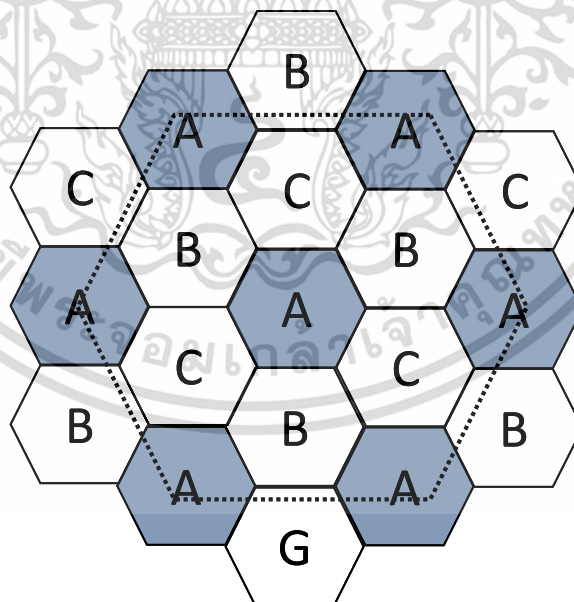
$$\frac{S}{I} = \frac{1}{6} \left(\frac{D}{R} \right)^{\nu} = \frac{1}{6} (3N_c)^{\nu/2} \quad (2.8)$$

สำหรับรูปแบบเซลล์หกเหลี่ยมนั้น จะมีจำนวนเซลล์ที่กวนกัน ในชั้นแรก 6 เซลล์ และไม่ขึ้นกับขนาดของคลัสเตอร์ว่าจะมีขนาดเท่าใดจำนวนเซลล์ที่กวนกันในชั้นแรกก็ยังมี 6 เซลล์ เช่นเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.6 ดังนั้นค่าอัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนในกรณีอุดมคติของคลัสเตอร์ที่มีจำนวนเซลล์เท่ากับ 7 เซลล์ จึงเท่ากับ $(1/6)(21)^{\nu/2}$ สำหรับ $\nu = 4$ ค่าอัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนจะมีค่าเท่ากับ 73.1 หรือประมาณ 18.6 dB

ดังนั้นปริมาณของ D/R จึงเป็นการวัดสัญญาณรบกวน ที่เกิดเนื่องจากเซลล์ที่กวนกันยิ่งระยะทางระหว่างเซลล์มีค่าไกลกันเท่าไรค่ากำลังงานของสัญญาณที่กวนกันก็จะยิ่งน้อยลงไป เนื่องจากสาเหตุดังกล่าว ค่า $q = D/R = \sqrt{3N_c}$ จึงถูกเรียกว่า อัตราส่วนนำมาใช้ใหม่ของช่องสัญญาณที่รบกวนกัน (Co-channel reuse ratio)

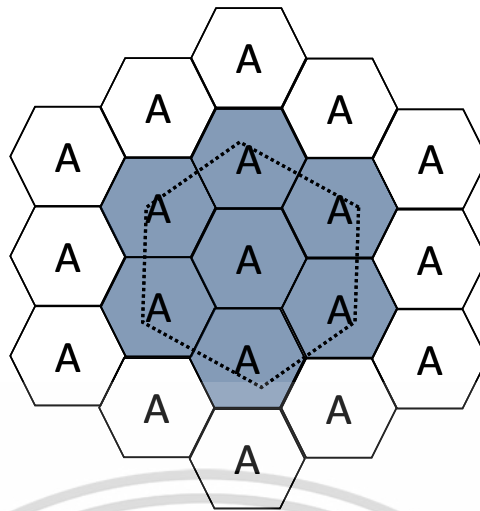
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง i, j และ S/I [4]

i	j	N_c	$q = D/R$	S/I (dB)
1	0	1	1.73	1.76
1	1	3	3	16.1
1	2	7	4.6	18.7
2	0	4	3.5	16.8
2	1	7	4.6	18.7
2	2	12	6	20.7
3	0	9	5.2	19.6
3	1	13	6.2	21
3	2	19	7.5	22.6
3	3	27	9	24
4	0	16	6.9	21.9
4	1	21	7.9	23
4	2	28	9.2	24.2
4	3	37	10.5	25.3



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างเซลล์ที่มีจำนวนเซลล์ในคลัสเตอร์ (a) เท่ากับ 3 (b) เท่ากับ 1 และจำนวน CCI cell เท่ากับ 6 ทั้งสองรูปแบบ [4]

จะสังเกตว่าจำนวนเซลล์ที่รบกวนกันนั้นไม่ได้แปรตามจำนวนเซลล์ในคลัสเตอร์ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.6 (a) และ 2.6 (b) ซึ่งมีจำนวนเซลล์ในคลัสเตอร์เพียง 3 และ 1 เซลล์แต่มีจำนวนเซลล์ที่รบกวนกันในชั้นแรกถึง 6 เซลล์เทียบเท่ากับรูปแบบโครงสร้างเซลล์ในที่มีจำนวนเซลล์ในคลัสเตอร์เป็น 7

2.4.3 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน ด้วยการแบ่งเซลล์ออกเป็น 3 เซกเตอร์

เทคนิคการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกันด้วยการแบ่งเซลล์ออกเป็น 3 เซกเตอร์ [3] (Directional Antenna Using Three Sectors) แสดงในรูปที่ 2.7 ด้วยการแบ่งเซลล์ออกเป็น 3 เซกเตอร์ แต่ละเซกเตอร์จะมีกลุ่มความถี่ของมันเอง สำหรับคลัสเตอร์แบบ 7 เซลล์ เครื่องรับหลักจะได้รับสัญญาณรบกวน (interfering signal) จากเซลล์อื่นๆ เพียงสองเซลล์เท่านั้น แทนที่จะเป็น 6 เซลล์เหมือนกรณีสายอากาศแบบรอบตัว (omni directional Antenna) เนื่องจากรูปแบบของสายอากาศแบบทิศทาง (directional Antenna) เป็นดังแสดงในรูปที่ 2.8 อัตราส่วนอัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกัน เมื่อพิจารณาสถานการณ์ที่แย่ที่สุดได้ดังนี้

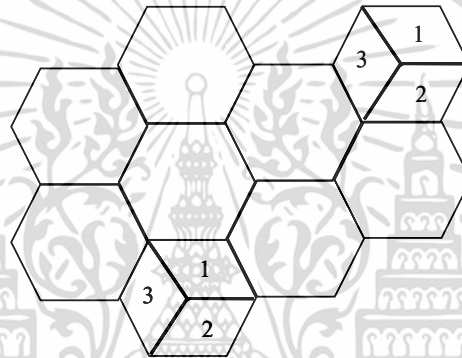
$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-\nu}}{D^{-\nu} + (D + .7R)^{-\nu}} \quad (2.9)$$

และเมื่อพิจารณาสถานการณ์ที่แย่ที่สุด เซลล์ที่เป็นสัญญาณรบกวน (interferer) 2 ตัวจะอยู่ที่ระยะ D และ อัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกันไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

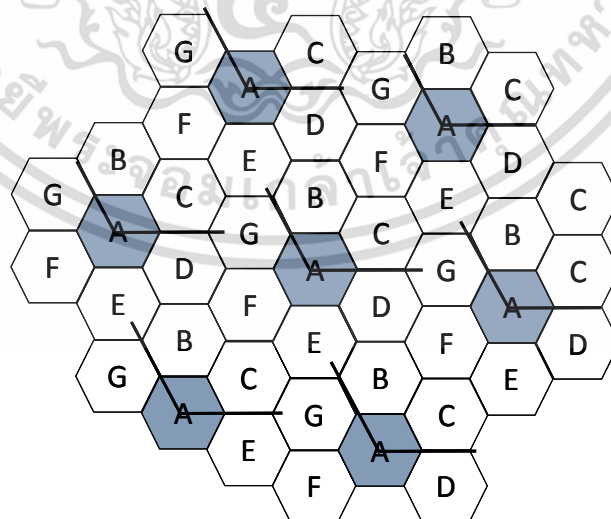
สำหรับสายอากาศแบบทิศทางที่มีความกว้างขนาด 120° สามารถหาได้จากอัตราส่วนที่สัมพันธ์กับสายอากาศแบบรอบตัว โดยที่สายอากาศแบบรอบตัวมีสัญญาณรบกวน (interferer) 6 ตัว

$$\left[\frac{S}{I} \right]_{120^\circ} = \left[\frac{S}{I} \right]_{\text{omni}} + 10 \log 3 = \left[\frac{S}{I} \right]_{\text{omni}} + 4.77 \text{ dB} = 23.4 \text{ dB} \quad (2.10)$$

ดังนั้นเมื่อเทียบสมรรถนะของสายอากาศแบบรอบตัว กับสายอากาศแบบทิศทางที่มีความกว้างขนาด 120° จะได้ว่าสายอากาศแบบทิศทางที่มีความกว้างขนาด 120° ให้ค่าอัตราส่วนกำลังเฉลี่ยสัญญาณต่อกำลังเฉลี่ยสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกันเพิ่มขึ้น 4.77 dB



รูปที่ 2.6 แนวคิดของสายอากาศแบบ 3 ทิศทาง [4]



รูปที่ 2.7 การกวนกันของเซลล์สามารถพิจารณาได้จากรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของเซกเตอร์ของสายอากาศ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กลไกพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น

กลไกพื้นฐานที่มีผลกระทบต่อลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น คือการแพร่กระจายในทิศทางตรง (Line-of-sight : LOS propagation) การสะท้อน (Reflection) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และการกระเจิง (Scattering) [3]

2.5.1 การแพร่กระจายในทิศทางตรง (Line-of-sight: LOS propagation) ซึ่งเป็น การแพร่กระจายของคลื่นที่ไม่ผ่านสิ่งกีดขวางใด ๆ จากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ เรียกอีกอย่างว่า Free space propagation โดยทั่วไปรูปแบบการกระจายแบบนี้เกิดขึ้นในระบบสื่อสารดาวเทียม

2.5.2 การสะท้อน (Reflection) เกิดเมื่อการแพร่กระจายของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระทบกับสิ่งกีดขวางที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของสัญญาณมาก เหตุการณ์แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณวิ่งเข้าชนอาคาร การสะท้อนกลับของสัญญาณนี้อาจจะเกิดขึ้นที่กำแพงอาคาร เป็นต้น

2.5.3 การเลี้ยวเบน (Diffraction) ของคลื่นเกิดขึ้นในกรณีที่มีวัตถุบางอย่างที่มีขอบกีดขวาง (Sharp Edge) อยู่ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ทำให้ไม่มีเส้นทางตรง (Line of Sight) ระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองที่คลื่นสามารถผ่านไปได้ สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ คลื่นสัญญาณจะเลี้ยวอ้อมวัตถุ นั้น ๆ การเลี้ยวเบนของสัญญาณนี้เองที่ทำให้สามารถรับสัญญาณได้บางส่วนถึงแม้ว่าเครื่องรับสัญญาณจะถูกบดบังด้วยสิ่งกีดขวาง ด้วยเหตุนี้การเลี้ยวเบนของคลื่นจึงมีประโยชน์ต่อการส่งผ่านสัญญาณในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

2.5.4 การกระเจิง (Scattering) เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปตกกระทบกับวัตถุหรือพื้นผิวที่มีขนาดเล็ก (ความยาวคลื่นน้อยกว่า) เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสัญญาณ ทำให้คลื่นสัญญาณเกิดการกระเจิงไปในทุกทิศทาง ตัวอย่างวัตถุเช่น ป้ายจราจร เสา โคมไฟตามถนน ใบไม้ และพื้นผิวที่ขรุขระ เป็นต้น

2.6 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่น

ในการสื่อสารไร้สายนั้นเมื่อสัญญาณถูกส่งผ่านช่องสัญญาณ สัญญาณนั้นจะได้รับผลกระทบจากการเดินทางผ่านช่องสัญญาณอันเนื่องมาจากทั้ง ต้นไม้ ตึก อาคาร และสิ่งแวดล้อมจากภูมิประเทศต่าง ๆ จะส่งผลให้เกิดการจางหาย (Fading) ของสัญญาณ ซึ่งจะพิจารณาได้ 3 ประเภท คือ การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) การบดบัง (Shadowing) และการหลายวิถี (Multipath) [5]

2.6.1 การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) เป็นการลดทอนของสัญญาณที่แปรตามระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณ โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณจะลดลงตามค่า d^{-n} หรือ กฎของกำลังการสูญเสียตามระยะทางโดยที่ d คือ ระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ ส่วน n เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งที่มีขนาดแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมของบริเวณที่สัญญาณส่งผ่าน หรือ n คือตัวชี้กำลังของกฎการสูญเสียตามระยะทาง เมื่อสภาพแวดล้อมเป็นอากาศว่าง (Free Space) n จะมีค่าเท่ากับ 2 และในสภาพแวดล้อมของระบบเซลลูลาร์ในเมืองที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติก และเกิดการถูกบดบังค่าของ n จะมีค่าอยู่ในช่วง 3-6 โดยจะเห็นได้จากสมการว่าเมื่อระยะ d มากขึ้นจะส่งผลให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณลดลงไปตามกฎการสูญเสียตามระยะทางจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ใกล้-ไกล (Near-Far effect) ขึ้นในระบบ โอเอฟดีเอ็มเอ

2.6.2 การถูกบดบัง (Shadowing หรือ Large-Scale Fading) เกิดจากการที่สัญญาณบางส่วนถูกบดบังไปชั่วขณะจากสภาพแวดล้อมรอบข้าง เช่น อาคาร และเนินเขาเป็นต้น ส่งผลให้กำลังเฉลี่ยของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างช้า ๆ เมื่อผู้ใช้บริการเคลื่อนที่ออกจากบริเวณนั้น สัญญาณที่รับได้ก็จะมีกำลังแรงคั้งเดิม ดังนั้นระดับของสัญญาณที่รับได้มักจะเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเท่า ๆ กับขนาดของสิ่งกีดขวาง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ประมาณหลายสิบเมตรจากการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการสูญเสียตามระยะทาง ในทางทฤษฎีนั้นพบว่า ณ ตำแหน่งที่ห่างจากเครื่องส่งสัญญาณเท่า ๆ กันก็จะได้รับสัญญาณที่มีกำลังเท่ากันด้วย แต่ในทางปฏิบัตินั้นสัญญาณที่รับได้ในแต่ละบริเวณอาจจะมีกำลังที่ไม่เท่ากันก็ได้ ถึงแม้ว่าจะอยู่ห่างจากสถานีส่งด้วยระยะทางที่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะกำลังของสัญญาณที่รับได้นั้นขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในบริเวณที่สัญญาณส่งผ่านด้วย ดังนั้นในสภาพความเป็นจริงสัญญาณเหล่านี้จะมีการกระเพื่อมขึ้นและลงบนค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการสูญเสียตามระยะทาง

2.6.3 การจางหายแบบหลายวิถี (Multipath Fading หรือ Small-Scale Fading) เกิดจากการที่สายอากาศของเครื่องรับสัญญาณอยู่ใกล้พื้นผิวมาก เช่น การใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ใช้บริการมักจะอยู่สูงจากพื้นผิวประมาณไม่เกิน 3 เมตร ดังนั้นในการแพร่ของสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่เป็นสภาวะแวดล้อมที่มีวัตถุต่าง ๆ ที่เป็นสิ่งกีดขวางรอบข้างจึงส่งผลให้เกิดการสะท้อน การหักเห และการกระเจิง ของสัญญาณในหลายทิศทาง ส่งผลให้สัญญาณที่รับได้ประกอบด้วยจำนวนสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณเดินทางมาจากทิศทางที่ต่างกันและโดยทั่วไปแล้วสัญญาณเหล่านี้มักจะเดินทางมาถึงเครื่องรับด้วยเวลาที่แตกต่างกัน และมีทั้งขนาดและเฟสที่ต่างกันแปรเปลี่ยนตามระยะทาง ซึ่งในบางระยะทางสัญญาณที่มาจากหลายทิศทางอาจจะมีเฟสที่ทำให้สัญญาณที่รับได้มีการหักล้างกัน แต่ในบางช่วงการรวมกันของสัญญาณที่รับได้ก็จะเป็นแบบเสริมกัน จึงส่งผลให้สัญญาณที่รับได้มีการลดทอนของสัญญาณและเมื่อสัญญาณเหล่านี้มารวมเข้าด้วยกันจะได้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดแปรเปลี่ยนได้มาก รวมถึงทำให้ระดับของสัญญาณที่รับได้มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างบ่อยครั้ง (ระดับของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว) เพียงเครื่องโทรศัพท์มีการเคลื่อนที่ด้วยระยะทางสั้น ๆ ไม่ก็ความยาวคลื่นในการลดทอนของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจะสามารถพิจารณาเป็น 2 ลักษณะ คือ Large-Scale Fading และ Small-Scale Fading เมื่อมีการลดทอนกำลังของสัญญาณเฉลี่ย หรือ Path Loss เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ใหญ่ ๆ จะเป็นในลักษณะที่รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมตามภูมิประเทศระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ แล้วจะส่งผลให้เกิด Large-Scale Fading จะให้ผลการลดทอนของกำลังเฉลี่ยที่เป็นฟังก์ชันของระยะทาง (d^{-n}) ดังนั้นในลักษณะนี้จะเป็นการอธิบายโดยการสูญเสียเฉลี่ยตามระยะทาง (Mean-Path Loss) และการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยที่มีการแจกแจงแบบล็อกนอร์มอล ส่วนการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการหลายวิถีที่มีการจางหายแบบเร็วนี้ จะส่งผลให้เกิดการเพดดิ้งแบบ Small-Scale Fading

2.7 เทคโนโลยีโอเอฟดีเอ็มเอ

(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access: OFDMA)

ในปี 1966 R.W. Chang ซึ่งทำงานอยู่ที่ Bell Labs ได้ทำการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ว่าการทำเทคนิคมอดูเลชันแบบแยกสัญญาณออกจากกันหรือที่เรียกว่า Multi-Carrier Modulation (MCM) นั้น สามารถช่วยแก้ไขปัญหาสัญญาณรบกวนที่มาจากหลายทิศทาง (Multi-Path Interference) ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้ และตอนนั้นนับว่าเป็นครั้งแรกที่มีการนำเทคนิคการมอดูเลชันแบบแยกสัญญาณออกจากกันมาใช้กับระบบการสื่อสารแบบไร้สาย และนี่ถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก (Orthogonal Frequency Division Multiplex: OFDM) ที่เป็นหนึ่งในเทคนิคของการมอดูเลชันแบบแยกสัญญาณออกจากกัน

ในปี 1971 เทคนิคการทำมอดูเลชันแบบแยกสัญญาณออกจากกัน เริ่มที่จะเกิดขึ้นได้จริงด้วยการใช้เทคนิคของการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) และใช้ CP (Cyclic Prefix) ในการทำมอดูเลชันแบบแยกสัญญาณออกจากกันที่ตั้งฉาก ด้วยฝีมือของคุณ Weinstein และ Elbert ทำให้สิ่งที่เคยเป็นเพียงทฤษฎีเริ่มเป็นรูปเป็นร่างขึ้นมา จากนั้น มีการพัฒนาปรับปรุงขึ้นมาตามลำดับ จนกระทั่ง การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก (OFDM) เริ่มเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ได้จริง ไม่ใช่เพียงความฝันอีกต่อไปในปี 1993 นั้นเอง เทคโนโลยี DSL ก็ได้นำเอาการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก หรืออีกชื่อว่า Discrete Multi-Tone มาใช้งาน และนี่เป็นการเปิดตัวกับเทคโนโลยีการสื่อสารใหม่

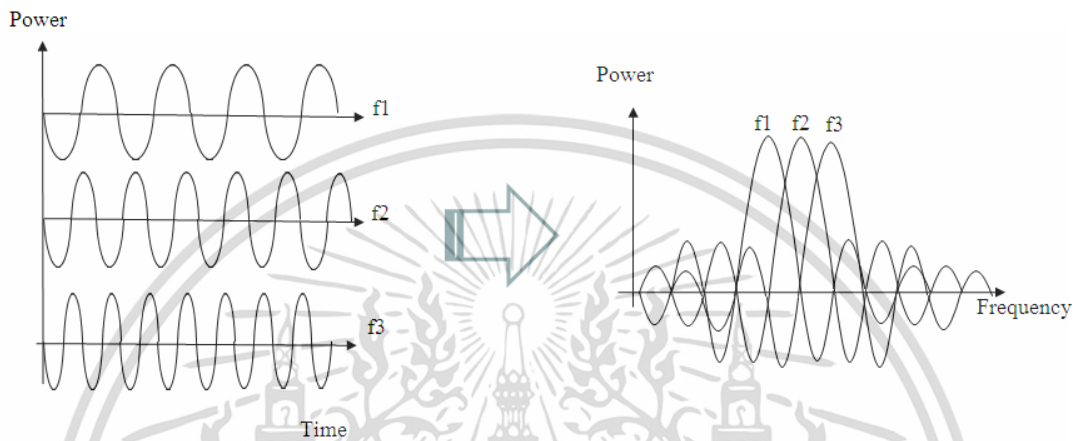
ในปี 1999 IEEE ได้กำหนดให้ 802.11a (ไม่มีใช้ในบ้านเรา) ใช้เทคนิค โอเอฟดีเอ็มเอ ในย่านความถี่ 5GHz และอีก 2 ปีถัดมา IEEE ก็ได้กำหนดให้เทคโนโลยีไวแมกซ์ใช้งานการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก และกลายเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาไวแมกซ์ต่อมา และปี 2003 802.11g กำหนดให้ใช้งาน การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉากด้วยอีกเช่นกัน ปัจจุบันเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉากได้รับการพัฒนามาเป็นโอเอฟดีเอ็มเอ OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplex Access) และนำมาใช้กันมาก

2.7.1 หลักการของโอเอฟดีเอ็มเอ

เทคนิคโอเอฟดีเอ็มเอ (OFDMA) ถูกพัฒนามาจากเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก (OFDM) ที่มีพื้นฐานมาจากการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplex : FDM) คือ การมัลติเพล็กซ์สัญญาณหลายๆ สัญญาณ ด้วยวิธีการการแบ่งสัญญาณความถี่ออกจากกัน ส่วนความแตกต่างของการมัลติเพล็กซ์แบบ โอเอฟดีเอ็มเอ กับการมัลติเพล็กซ์แบบเดิม คือ สัญญาณความถี่ที่ถูกแบ่งออกจากกันแต่ละช่องสัญญาณไม่มีการรบกวนกัน และทำการรับส่งข้อมูลกันได้อย่างราบรื่น แต่การที่จะทำให้ช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณไม่เกิดการรบกวนกันนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการมี Guard band ที่เป็นช่องว่างความถี่ที่ไม่สามารถใช้งานได้ และกลายเป็นความสูญเปล่าที่ไม่เกิดประโยชน์อะไร ดังนั้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำมัลติเพล็กซ์บนความถี่ จึงมีการคิดค้นใหม่ว่าถ้าสัญญาณตั้งฉากกัน (Orthogonal) จะเป็นการทำให้แต่ละช่องสัญญาณนั้นเป็นอิสระต่อกัน และสัญญาณที่มีคุณสมบัติความถี่ตั้งฉากกันนั้นเมื่อผ่านการมอดูเลชันทำให้เกิดสัญญาณ Sideband รอบข้างขึ้นนั้นจะไม่มีผลต่อช่องสัญญาณข้างๆ ซึ่งจะสังเกตได้จากความถี่กลางของช่องสัญญาณนั้นจะไม่มีสัญญาณรบกวนใด ๆ (สังเกตจากตรงกลางของ f_2 ไม่มีสัญญาณอะไรเป็นค่าศูนย์) เนื่องจากช่องสัญญาณนั้นมีคุณสมบัติความถี่ตั้งฉากกันดังรูปที่ 2.8 ซึ่งทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่จำเป็นต้องใช้ Guard Band มาช่วยป้องกันและเกิดการสูญเสียสเปกตรัมความถี่ไปบางส่วนไปอย่างเปล่าประโยชน์ ทำให้การรับส่งสัญญาณความถี่นี้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงกว่ำนั่นเองและเมื่อได้ช่องสัญญาณที่ตั้งฉากกัน เช่น ที่ความถี่ X, 2X, 3X kHz ดังรูปที่ 2.9 เราก็สามารถที่จะย้ายความถี่ไปด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การมอดูเลชันให้ไปยังความถี่อื่นที่ใช้รับส่งออกอากาศ เช่น ที่ Y MHz สัญญาณ Y MHz + X kHz, Y MHz + 2X kHz เป็นต้น ก็ยังคงเป็น Orthogonal ต่อกันอยู่ และยังคงช่วยให้การใช้งานความถี่มีประสิทธิภาพสูงเช่นเคย



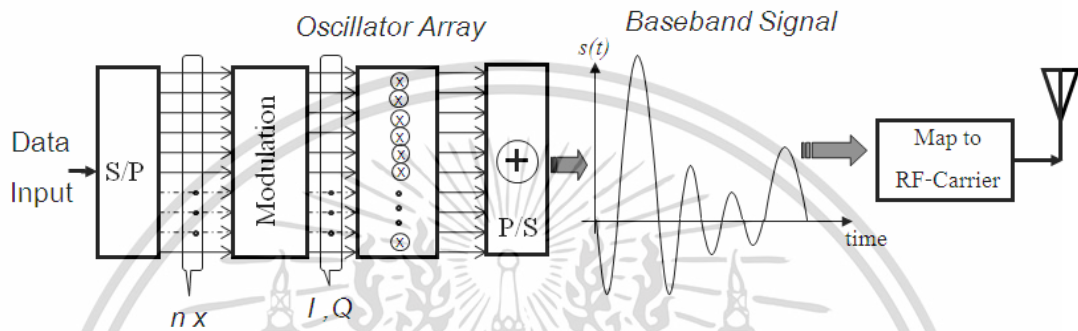
รูปที่ 2.8 การผสมสัญญาณที่มีคุณสมบัติตั้งฉากซึ่งกันและกัน [6]



รูปที่ 2.9 สัญญาณฮาร์โมนิกที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ [6]

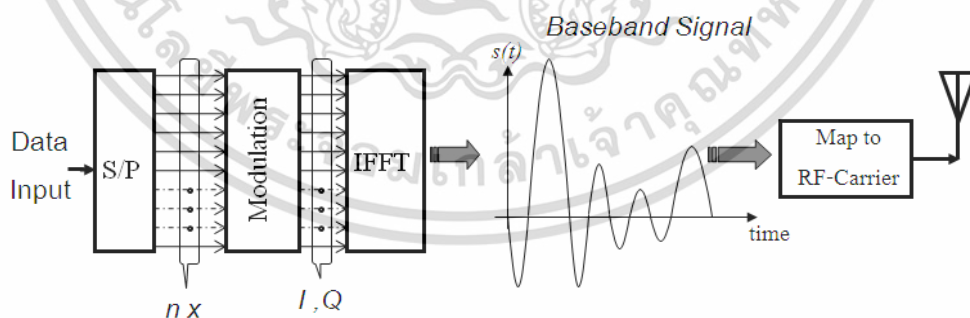
ดังนั้น เมื่อทราบหลักการสร้างสัญญาณด้วยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบหลายความถี่ที่ตั้งฉาก (OFDM) มาแล้ว สามารถที่จะทำการสร้างสัญญาณที่แต่ละช่องสัญญาณเป็นอิสระต่อกันขึ้นหรือมีคุณสมบัติตั้งฉากกันได้ โดยการใช้งานเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบหลายความถี่ที่ตั้งฉาก (OFDM) ที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะของการสื่อสารแบบหลายคลื่นพาห้ (Multi-carrier Communication) ซึ่งช่วยในเรื่องของสัญญาณรบกวนต่างๆ ได้ดีกว่า เนื่องจากมีการกระจายสัญญาณออกเป็นหลายๆ สายและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งเข้าไปในแต่ละช่องสัญญาณเพื่อส่งออกอากาศอีกทีหนึ่ง ทำให้สัญญาณที่ออกไปมีคุณภาพดี และ ประหยัดความถี่จากประสิทธิภาพของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก แต่ในทางปฏิบัตินั้น หากพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการสร้างสัญญาณ โอเอฟดีเอ็ม นั้น จำเป็นที่จะต้องใช้ความถี่ หลายๆ ชุดด้วยกัน และจำเป็นจะต้องใช้ Oscillator หลายชุด ดังรูปที่ 2.10 วิธีนี้เรียกว่า Discrete Technology เป็นวิธีที่ค่อนข้างสิ้นเปลืองและมีขนาดใหญ่ ยากที่จะนำมาใช้งานในอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่หรือการ์ด PCMCIA ได้ หากใช้วิธีนี้โอกาสที่จะเห็นอุปกรณ์การสื่อสารขนาดเล็ก เช่น LTE หรือ WiMAX 802.16e ที่สามารถจะพกพาไปไหนได้สะดวกก็ยากที่จะเกิดขึ้น



รูปที่ 2.10 การสร้างสัญญาณ โอเอฟดีเอ็ม แบบดั้งเดิม [6]

ดังนั้น จึงมีการคิดค้นหาวิธีที่จะทำให้การใช้การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉาก เป็นจริงขึ้นมาได้ และวิธีที่ว่ามันก็คือการใช้งาน การแปลงผกผันฟูริเยร์แบบเร็ว (IFFT : Inverse Fast Fourier Transform) ซึ่งเป็นการใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ ดังรูปที่ 2.11 กระทั่งได้สัญญาณสุ่ม (Sampling signal) ที่ความถี่ต่างๆ ที่ตั้งฉากกันออกมา จากนั้นจึงค่อยส่งออกอากาศไปนั่นเอง

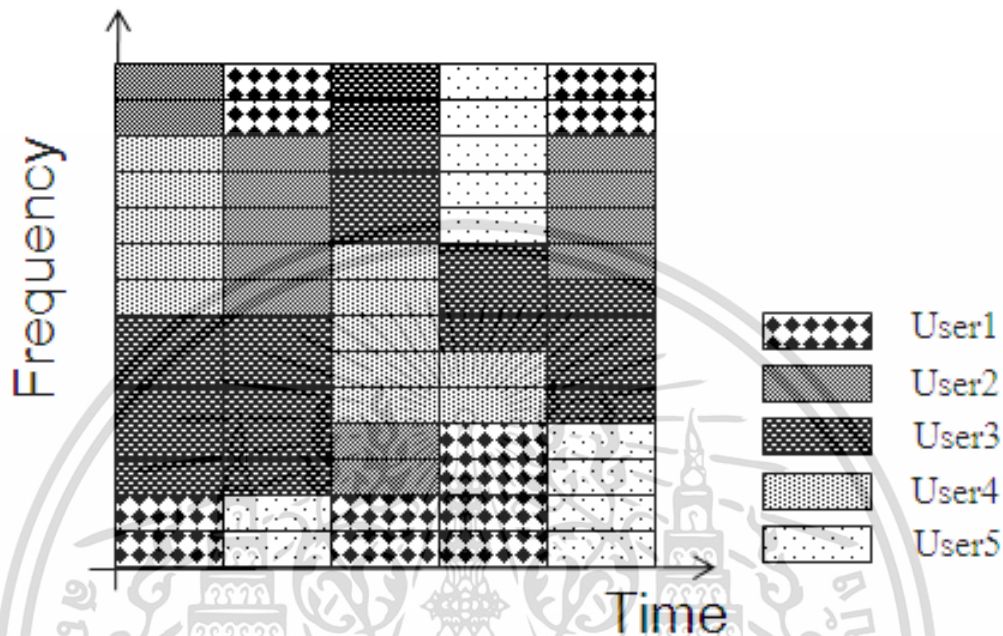


รูปที่ 2.11 การสร้างสัญญาณ โอเอฟดีเอ็ม ด้วย การแปลงการแปลงผกผันฟูริเยร์แบบเร็ว [6]

ซึ่งวิธีนี้จะประหยัดทั้งพลังงาน ขนาดเล็ก และง่ายต่อการออกแบบมากกว่า ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้งานมีขนาดเล็กและประหยัดพลังงานมากกว่า จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้งานกันในปัจจุบันและเมื่อต้องการที่จะใช้งาน โอเอฟดีเอ็ม สำหรับการรับ-ส่งคลื่นวิทยุสำหรับหลายๆ ผู้ใช้งานเช่นเดียวกับที่ FDM เคยเป็นมาแล้ว นั่นคือ การพัฒนา FDM ก็กลายเป็น FDMA และ โอเอฟดีเอ็ม ก็กลายเป็น โอเอฟดีเอ็มเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของ โอเอฟดีเอ็มเอ จะเป็นการแบ่งช่องสัญญาณย่อย (Sub carrier) ให้กับแต่ละผู้ใช้งาน ดังรูปที่ 2.12 หากแต่การแบ่งนั้นจะเป็นลักษณะเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณความถี่ย่อยตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยจำนวนของช่องสัญญาณแต่ละผู้ใช้งานนั้นจะขึ้นกับคุณภาพการให้บริการหรือ QoS (Quality of Service) ที่ให้บริการนั้น

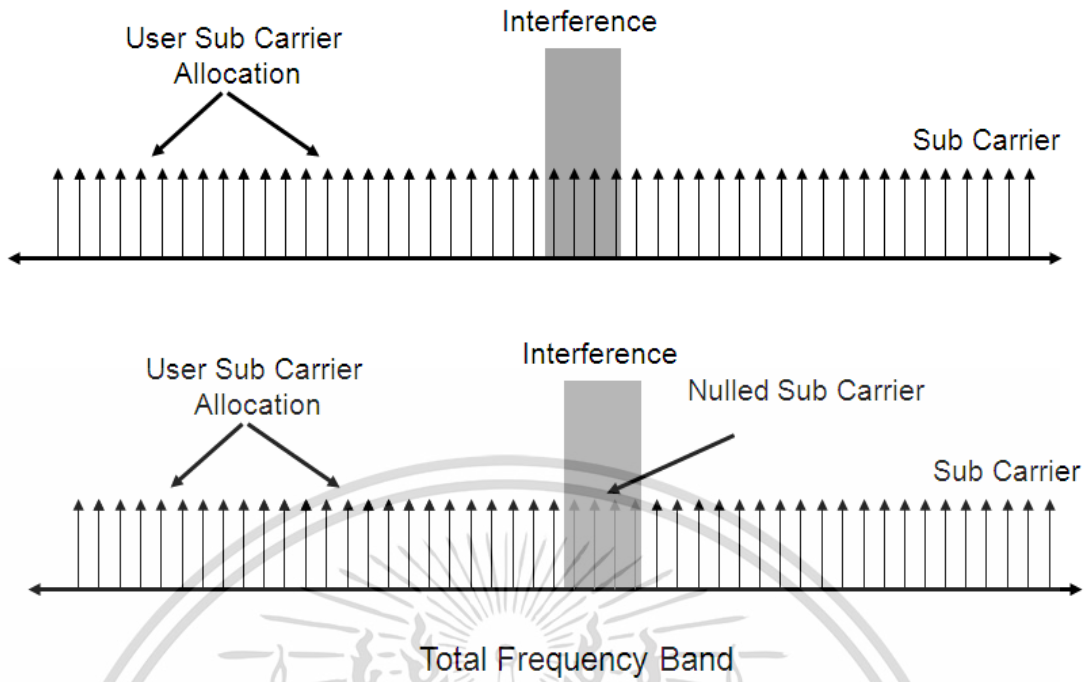


รูปที่ 2.12 การแบ่งช่องสัญญาณของโอเอฟดีเอ็มเอ

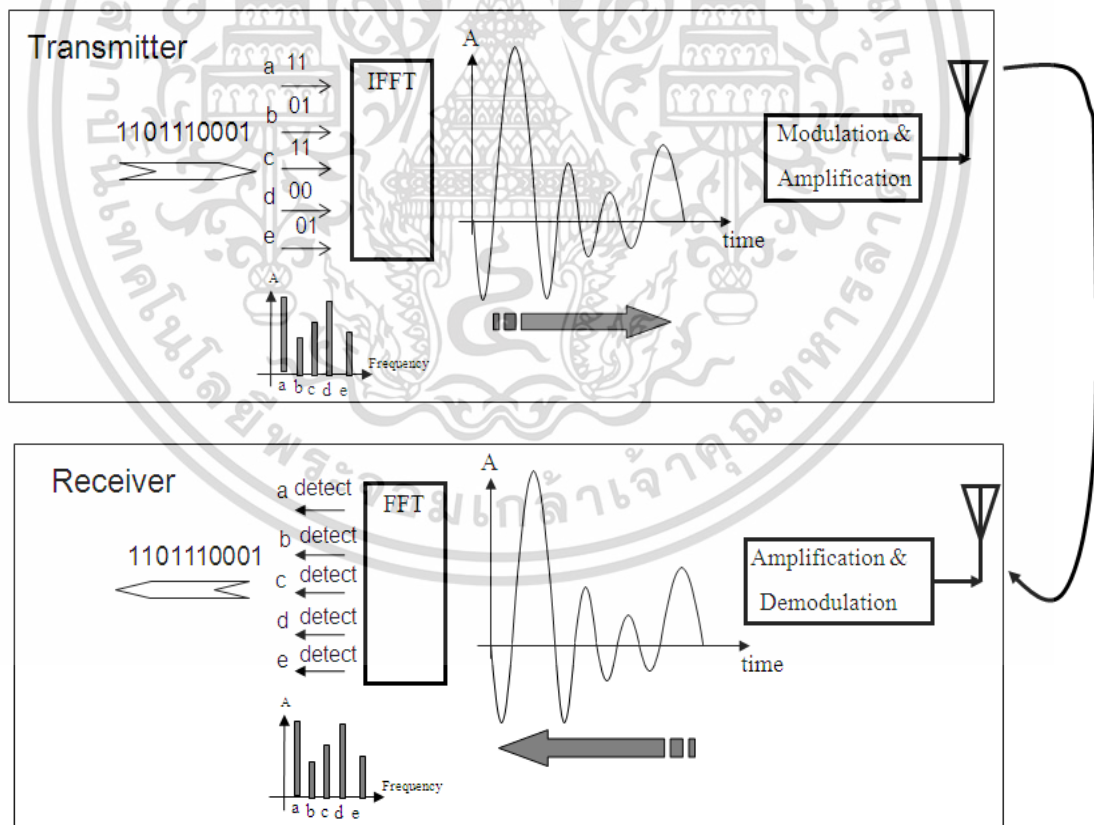
ข้อดีของการทำเช่นนี้คือ ช่วยกระจายความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน โดยเฉพาะสัญญาณรบกวนแบบแคบๆ (Narrow Band Interference) ได้ดี หากเกิดการรบกวนขึ้นสัญญาณที่หายไปจะเป็นเพียงแค่น้อยส่วนและชั่วคราวเท่านั้น สามารถที่จะแก้ไขได้ด้วยวิธีการอื่น เช่น การใช้ Error Coding เป็นต้น ทำให้คุณภาพสัญญาณที่มันดีขึ้น อีกทั้งยังสามารถที่จะใช้ทรัพยากรความถี่ร่วมกันหลายๆ ผู้ใช้งานได้

ดังรูปที่ 2.13 แสดงการถูกรบกวนของช่องสัญญาณย่อยของระบบ โอเอฟดีเอ็มเอ ด้วยสัญญาณรบกวนแบบแคบๆ ซึ่งเห็นได้ว่ามีเพียง 3 ช่องสัญญาณย่อยเท่านั้นที่สูญเสียไปจากการที่ถูกสัญญาณรบกวนแบบแคบๆ รบกวน จึงเป็นข้อดีของระบบ โอเอฟดีเอ็มเอ ที่ช่องสัญญาณจะไม่สูญเสียไปทั้งหมดเมื่อสัญญาณเกิดการรบกวนจากสัญญาณที่เป็นแบบแคบๆ

ดังนั้น เทคโนโลยี โอเอฟดีเอ็มเอ คือ เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพที่ดีทั้งเรื่องการใช้ความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การแก้ไขปัญหาสัญญาณรบกวนได้ดี อีกทั้งยังสามารถที่จะเลือกใช้ความถี่ต่างๆ ได้อย่างยืดหยุ่นมากกว่า แต่ก็จะมีข้อเสียก็คือค่า PAPR (Peak to Average Power Ratio) ที่สูง ซึ่งส่งผลต่อการกินไฟที่มากกว่าปกติ มีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่ลดลง



รูปที่ 2.13 ผลกระทบที่เกิดจาก Narrow Band Interference [6]



รูปที่ 2.14 หลักการโอเอฟดีเอ็มเอ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.14 แสดงหลักการของโอเอฟดีเอ็มเอ โดยจะแยกบิตสตรีมออกเป็นส่วนๆ เพื่อป้อนเข้าไปยัง กระบวนการแปลงผกผันฟูริเยร์แบบเร็ว (IFFT) เพื่อที่จะกระจายบิตเหล่านี้ไปยังความถี่ต่างๆ ที่จะจัดให้ตั้งฉากกันด้วย IFFT นั้นตามหลักการที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งเมื่อส่งมาถึงด้านรับก็จะเข้ากระบวนการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (FFT) และนำเอาบิตสตรีมเหล่านั้นมาใช้งานอีก และเมื่อจำเป็นต้องลดข้อเสียเรื่อง PAPR จึงได้มีการปรับวิธีโดยเพิ่มเติมกระบวนการ FFT ขึ้นมาก่อนที่จะส่งบิตสตรีมเหล่านั้นเข้าไปยัง IFFT นั่นคือ แทนที่จะกระจายข้อมูลเหล่านี้เป็นบิตๆ ไปยังแต่ละความถี่หรือ Sub carrier ตรงๆ ก็มาใช้วิธีการกระจายข้อมูลเข้าไปยังแต่ละ Sub carrier ด้วย FFT ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะส่งเข้าไปยัง IFFT และไม่จำเป็นต้องที่จะต้องใช้งานทุก Sub carrier ตามแต่ผลลัพธ์ที่ได้จาก FFT จากนั้นก็เข้ากระบวนการเช่นเดียวกับ โอเอฟดีเอ็มเอ ที่ผ่าน IFFT ออกไป สำหรับด้านรับนั้นก็จะส่ง เข้าไปยัง FFT เช่นเดียวกับ โอเอฟดีเอ็มเอ จนกระทั่งก่อนที่จะแยกบิตสตรีมเช่นเดิมก็มาผ่านเข้าไปยัง IFFT เพื่อดึงข้อมูลกลับมาโดยที่ไม่ต้องทำการแยกข้อมูลออกจากกันและใช้อุปกรณ์ด้านรับที่น้อยกว่าอีกด้วย

2.7.2 การเสริมสร้างไซคลิก (Add cyclic prefix: Add CP)

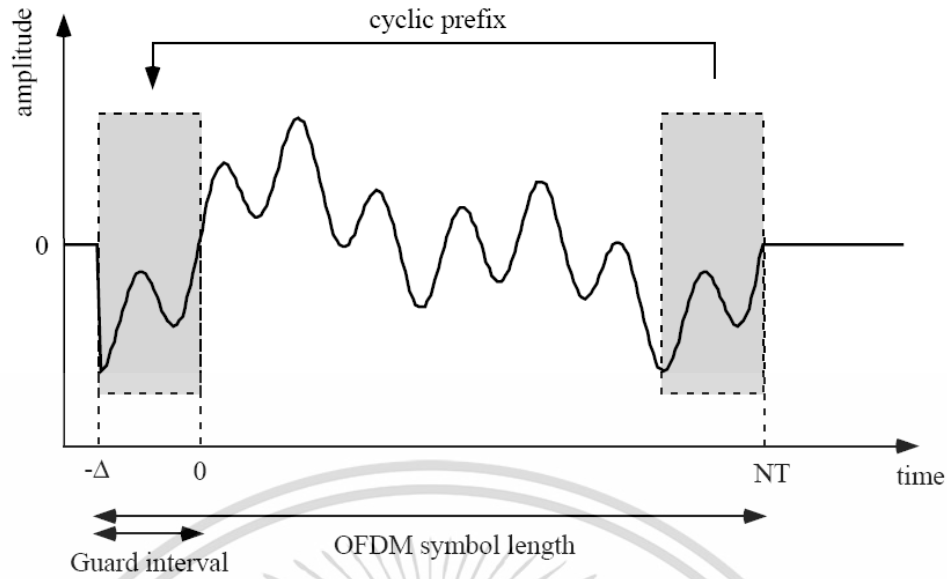
ความยาก 2 ประการของการส่งข้อมูลเมื่อสัญญาณ OFDM ที่ถูกมอดูเลตด้วย N คลื่นพาห่อย่อยขนาด ดังสมการที่ (2.11)

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \phi_k(t), \quad 0 < t < NT \quad (2.11)$$

ไปบนช่องสัญญาณที่มีการกระจาย (Dispersive) ออกของพัลส์บิตข้อมูล ที่ประกอบไปด้วยประการแรก คือ การกระจายออกของช่องสัญญาณ (Channel dispersion) ทำให้ความถี่ตั้งฉากของสัญญาณลดน้อยลงระหว่างคลื่นพาห่อย่อย จึงทำให้เกิดการแทรกสอดคลื่นพาห่ซึ่งกันและกัน (Inter-carrier interference: ICI) และอีกประการหนึ่งเกิดจากเหตุการณ์ การส่งสัญลักษณ์ โอเอฟดีเอ็ม พร้อมๆ กันหลายสัญลักษณ์ทำให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ขึ้น (Intersymbol interference: ISI) ระหว่างสัญลักษณ์ โอเอฟดีเอ็ม ด้วยกันเอง การแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการเพิ่มช่วงเวลาป้องกัน (Guard period) ระหว่าง โอเอฟดีเอ็ม สัญญาณลักษณะนี้อาจแก้ปัญหาด้านของ ISI ได้แต่ยังไม่สามารถแก้ปัญหาของ ICI ได้ 100% ดังนั้นการรักษาการตั้งฉากซึ่งกันและกันของสัญญาณข้อมูลแทรกสอดซึ่งกันและกันเอง สามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่ม cyclic prefix ซึ่งถูกคิดค้นโดย Peled และ Ruiz [8]

จากรูปที่ 2.15 ความยาวทั้งหมดของสัญลักษณ์ โอเอฟดีเอ็ม (OFDM symbol) จะถูกเพิ่มด้วย Cyclic prefix เข้าไปทางหัวและท้ายของสัญลักษณ์ โอเอฟดีเอ็ม ดังนั้นจากสมการที่ (2.11) จะได้สัญญาณใหม่บนช่วงเวลา Δ ดังนี้

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j2\pi f_k t}, \quad -\Delta < t < NT \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.15 รูปแบบการเพิ่ม cyclic prefix เข้าไปในสัญลักษณ์โอเอฟดีเอ็ม [8]

จากนั้นสัญญาณจากสมการที่ (2.12) จะถูกส่งผ่านเข้าไปในช่องสัญญาณ ซึ่งช่องสัญญาณนี้มีผลตอบสนองพัลส์จำกัด (Finite-length impulse response) อยู่ในช่วงของ $[0, \Delta_h]$ และถ้าคาบเวลาของ cyclic prefix ที่ $\Delta > \Delta_h$ ที่เครื่องรับสามารถหาค่าในช่วง $[0, NT]$ เมื่อไม่คำนึงถึงสัญญาณรบกวนได้ดังนี้

$$r(t) = s(t) * h(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} H_k x_k e^{j2\pi f_k t}, \quad 0 < t < NT \tag{2.13}$$

$$H_k = \int_0^{\Delta_h} h(\tau) e^{j2\pi f_k \tau} d\tau \tag{2.14}$$

สมการที่ (2.14) คือการแปลงฟูรีเยร์ ของ $h(\tau)$ ที่ความถี่ f_k ซึ่งภายในช่วงเวลานี้สัญญาณที่รับเข้ามาจะเหมือนกับสัญญาณที่ส่งมายกเว้นเมื่อ $H_k x_k$ ที่ถูกมอดูเลตที่ k^{th} คลื่นพาห่อย่อยแทนด้วยแค่ x_k และจากสมการที่ (2.12)-(2.15) นี้ทำให้ cyclic prefix สามารถป้องกันการไม่ตั้งฉากของคลื่นพาห่อย่อยได้นั่นเอง

$$y_k = H_k x_k, \quad k = 0, \dots, N - 1 \tag{2.15}$$

จากสมการที่ (2.13) การตีมอดูเลตสามารถทำได้โดยการใช้การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (FFT) บนช่วง $[0, NT]$ และไม่สนใจสัญญาณที่รับได้ในช่วงเวลา $0 < t < NT$ และสามารถแทนค่าใหม่ได้ดังสมการที่ (2.15) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการนำ cyclic prefix มาใช้ทำให้ต้องใช้กำลังงานในการส่งข้อมูลมากขึ้น จึงสามารถหาค่ากำลังงานสูญเสียได้ดังสมการที่ (2.16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{loss} = \frac{NT}{NT + \Delta} \quad (2.16)$$

สมการที่ (2.16) ยังหาค่าของอัตราการลดบิตข้อมูล นั่นคือเมื่อแต่ละคลื่นพาทีย่อยสามารถส่ง b บิต จะได้อัตราบิตข้อมูลทั้งหมดของระบบ โอเอฟดีเอ็ม เมื่อนำ cyclic prefix มาใช้งานได้ดังนี้

$$BitRate_{OFDM} = \frac{Nb}{NT + \Delta}, \quad bps \quad (2.17)$$

และเมื่อไม่นำเอา cyclic prefix มาใช้งาน จะได้อัตราบิตข้อมูลทั้งหมดของระบบ โอเอฟดีเอ็ม เป็น

$$BitRate_{OFDM_no} = \frac{b}{T}, \quad bps \quad (2.18)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

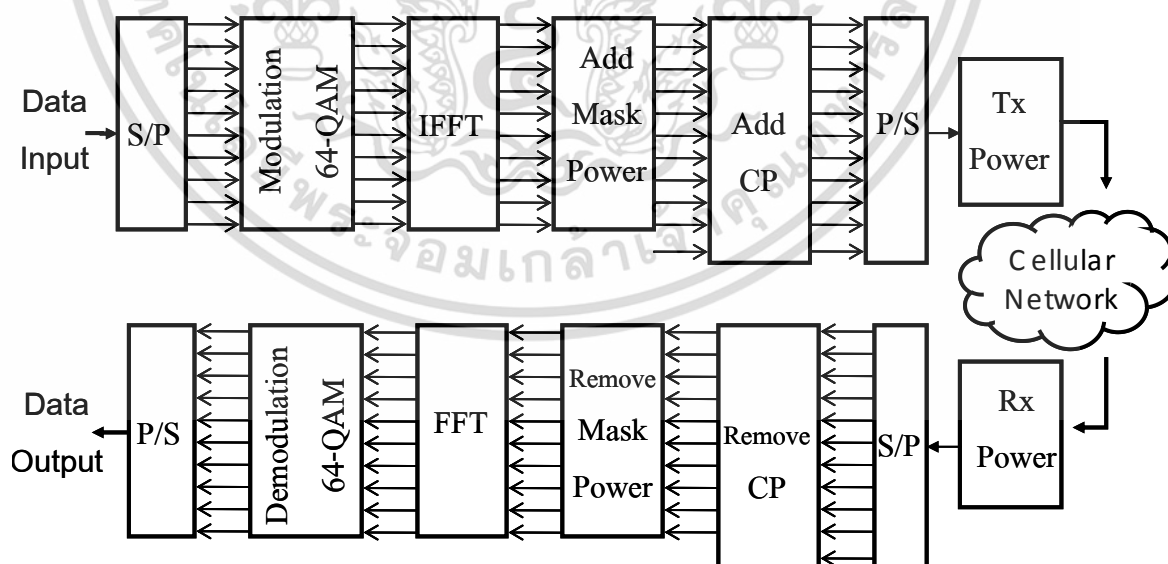
แบบจำลองระบบและวิธีการจำลอง

3.1 บทนำ

การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ โดย การพิจารณาค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่มีการจัดความถี่ใช้ งานแบบแข็ง การจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูป และการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน ด้วยการ เปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล 2 ระดับที่แตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงระดับ พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลเป็น 6 ระดับร่วมกับการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน เพื่อคำนวณหา ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูล เปรียบเทียบรูปแบบการจัดความถี่ใช้ งานและระดับกำลังส่งข้อมูลที่เหมาะสมที่ประสิทธิภาพของระบบดีที่สุด นำมาสร้างแบบจำลองระบบ การสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอขึ้นมาและจำลองระบบด้วยค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ซึ่ง จะกล่าวถึงการออกแบบแบบจำลองและวิธีการจำลองระบบในหัวข้อถัดไป

3.2 แบบจำลองระบบ

การออกแบบแบบจำลองระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ ประกอบด้วย แบบจำลองย่อย ดังนี้ แบบจำลองการนำเข้าข้อมูลเพื่อสร้างข้อมูล ส่งเข้าระบบการสื่อสารแบบ เซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ



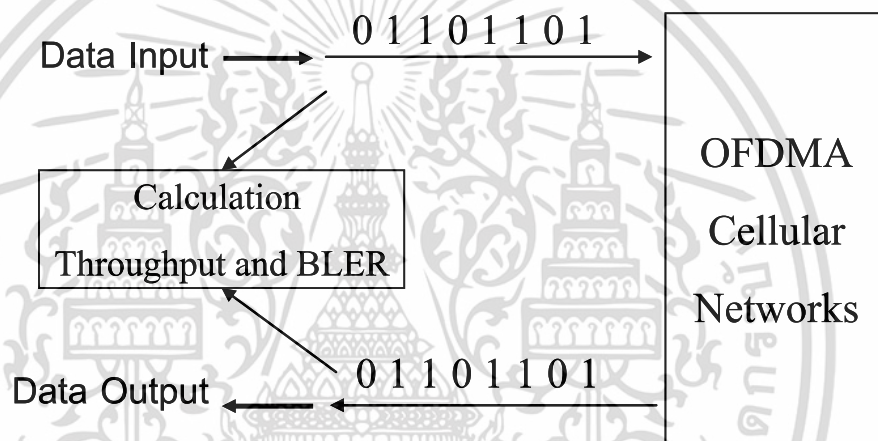
รูปที่ 3.1 แบบจำลองระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองช่องสัญญาณแบบเซลล์ลูลาร์ โดยแต่ละแบบจำลองของระบบจะถูกสร้างแยกกัน และสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบของการสื่อสารแบบเซลล์ลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอที่ ถูกกำหนดได้ ซึ่งแบบจำลองระบบการสื่อสารแบบเซลล์ลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ แสดงด้วยรูปที่ 3.1 และ รายละเอียดการทำงานของระบบ รวมถึงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการจำลองระบบ อธิบายไว้ในหัวข้อ ถัดไป

3.2.1 แบบจำลองการนำเข้าข้อมูลและแบบจำลองการนำออกข้อมูล (Data Input and Data Out)

จากรูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองการนำเข้าข้อมูลสำหรับสร้างข้อมูล และส่งข้อมูลไปให้กับ ชุดจำลองการสื่อสารแบบเซลล์ลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ บล็อกอื่นต่อไป



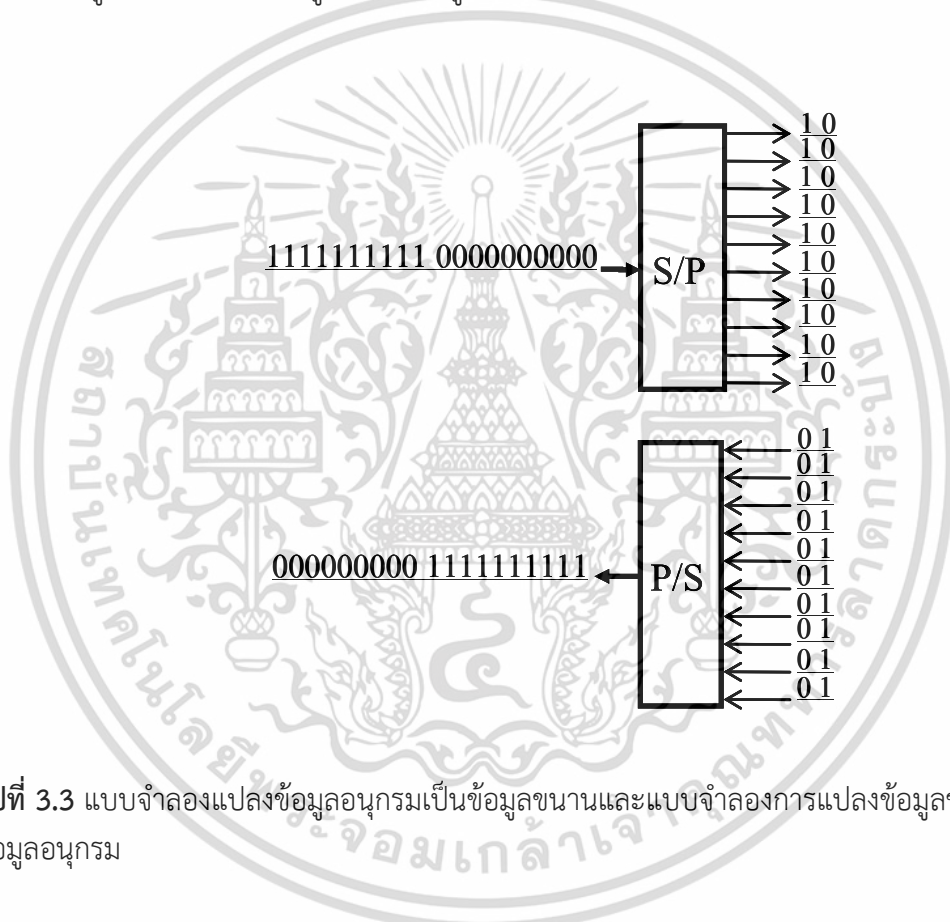
รูปที่ 3.2 แบบจำลองการนำเข้าข้อมูลและแบบจำลองการนำออกข้อมูล

ถ้าเปรียบเทียบกับระบบที่มีการใช้งานจริง แบบจำลองนี้หมายถึง ข้อมูลที่ต้องการส่งในระบบ ยกตัวอย่างข้อมูลเช่น เสียง ภาพ วิดีโอ หรือข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการสื่อสาร แต่การกำเนิดข้อมูลในวิทยานิพนธ์นี้ ข้อมูลที่ก่อนส่งเข้าแบบจำลองของระบบ จะต้องทำการแปลงข้อมูลเป็นข้อมูลที่สามารถใช้แทนข้อมูลต่างๆ ที่มีอยู่หลายรูปแบบได้ ดังนั้น วิธีการกำเนิดข้อมูลที่ส่งเข้าแบบจำลองระบบจะเป็นแบบดิจิทัลเพียงอย่างเดียว คือ ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบ 1, 0 เท่านั้น

ข้อมูลแบบดิจิทัลที่กำเนิดขึ้น จะทำการส่งเข้าแบบจำลองระบบการสื่อสารแบบเซลล์ลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ โดยข้อมูลที่ส่งผ่านแบบจำลองระบบแล้วจะกลับมาเก็บไว้ในแบบจำลองการนำออกข้อมูลและที่แบบจำลองการนำออกข้อมูลนี้จะทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่รับจากภาครับของแบบจำลองระบบการสื่อสารแบบเซลล์ลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างข้อมูลที่ออกจากแบบจำลองการนำเข้าข้อมูลกับข้อมูลที่ผ่านแบบจำลองระบบแล้ว ด้วยวิธีการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ส่งผ่านแบบจำลองระบบการสื่อสารแบบเซลล์ลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ

3.2.2 แบบจำลองการแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนานและแบบจำลองการแปลงข้อมูลขนานเป็นข้อมูลอนุกรม (S/P and P/S)

รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองการแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนาน โดยทำการเปลี่ยนการส่งข้อมูลแบบอนุกรมมาเป็นการส่งข้อมูลแบบขนาน ซึ่งหลักการทำงาน คือ นำข้อมูลที่เข้ามาและรอจนกระทั่งรับข้อมูลครบจำนวนข้อมูล เพื่อทำการส่งข้อมูลออกพร้อมๆ กันเป็นแบบขนานกันครั้งเดียว ทำนองเดียวกันแบบจำลองการแปลงข้อมูลขนานกลับมาเป็นข้อมูลอนุกรม เป็นการเปลี่ยนข้อมูลที่ส่งเข้ามาเป็นแบบขนานออกมาเป็นข้อมูลที่เป็นแบบอนุกรม โดยการที่ข้อมูลเข้ามาเป็นแบบขนานและทยอยส่งข้อมูลออกเป็นแบบอนุกรม ซึ่งเวลาที่ใช้สำหรับรับข้อมูลเข้ามาและเวลาที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลออกไปจะต้องใช้เวลาเท่ากันจึงจะทำให้ความถี่ของการส่งข้อมูลแบบอนุกรมเป็นข้อมูลที่มีความเร็วที่เร็วกว่าข้อมูลของแต่ละช่องข้อมูลของส่งข้อมูลแบบขนาน



รูปที่ 3.3 แบบจำลองแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนานและแบบจำลองการแปลงข้อมูลขนานเป็นข้อมูลอนุกรม

3.2.3 แบบจำลองการมอดูเลชั่น และ แบบจำลองการดีมอดูเลชั่น (Modulation and Demodulation)

การมอดูเลชั่น คือ การเปลี่ยนข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบดิจิทัลเป็นข้อมูลแบบสัญญาณ ซึ่งปัจจุบันการมอดูเลชั่นที่ใช้ในระบบการสื่อสารไร้สารนั้นมีหลายรูปแบบ ดังนี้

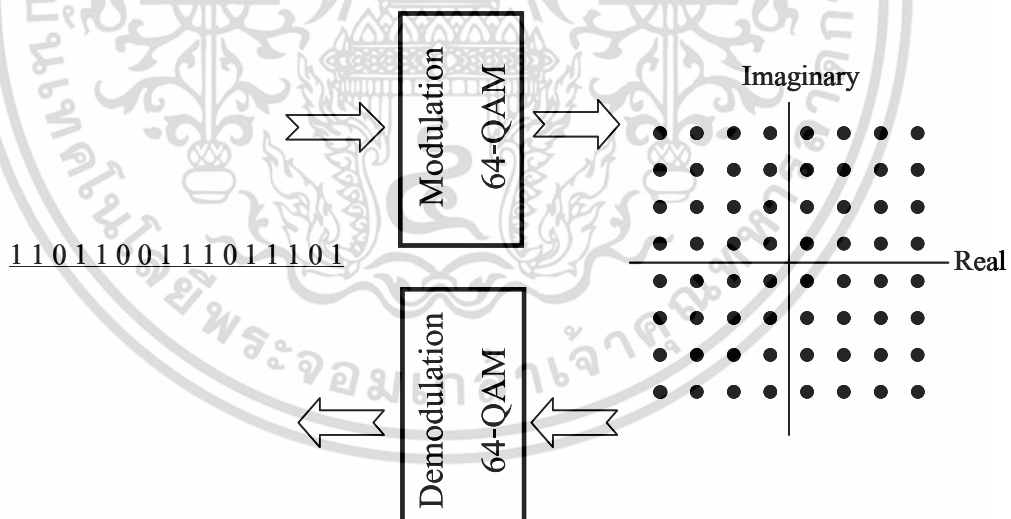
- การมอดูเลชั่นแบบ BPSK เป็นการแปลงข้อมูลแบบดิจิทัล 1 บิต ให้แทนด้วย 1 สัญญาณ

- การมอดูเลชันแบบ QPSK เป็นการแปลงข้อมูลแบบดิจิทัล 2 บิต ให้แทนด้วย 1 สัญลักษณ์ จะทำให้สามารถส่งข้อมูล 2 บิตด้วยการส่งข้อมูลเพียง 1 สัญลักษณ์ ทำให้ความเร็วในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเมื่อเทียบกับการมอดูเลชันแบบ BPSK

- การมอดูเลชันแบบ 16QAM เป็นการแปลงข้อมูลแบบดิจิทัล 3 บิต ให้แทนด้วย 1 สัญลักษณ์ จะทำให้สามารถส่งข้อมูล 4 บิตด้วยการส่งข้อมูลเพียง 1 สัญลักษณ์ ทำให้ความเร็วในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าเมื่อเทียบกับการมอดูเลชันแบบ BPSK หรือเพิ่มขึ้น 2 เท่าเมื่อเทียบกับการมอดูเลชันแบบ QPSK

- การมอดูเลชันแบบ 64QAM เป็นการแปลงข้อมูลแบบดิจิทัล 6 บิต ให้แทนด้วย 1 สัญลักษณ์ จะทำให้สามารถส่งข้อมูล 6 บิตด้วยการส่งข้อมูลเพียง 1 สัญลักษณ์ ทำให้ความเร็วในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่าเมื่อเทียบกับการมอดูเลชันแบบ BPSK หรือเพิ่มขึ้น 3 เท่าเมื่อเทียบกับการมอดูเลชันแบบ QPSK หรือเพิ่มขึ้น 3/2 เท่าเมื่อเทียบกับการมอดูเลชันแบบ 16QAM ซึ่งยิ่งจำนวนบิตที่ใช้แทน 1 สัญลักษณ์มากเท่าใดความเร็วในการส่งข้อมูลก็จะเร็วขึ้นตามไปด้วย

ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวยังมีข้อเสียเช่นกัน คือ ยิ่งจำนวนบิตข้อมูลที่ใช้แทน 1 สัญลักษณ์มาก ความน่าจะเป็นของการเกิดสัญลักษณ์จะมีมากขึ้นไปด้วยตาม ดังสมการ $จำนวนสัญลักษณ์ = 2^n$, n คือจำนวนบิตที่ใช้แทน 1 สัญลักษณ์ ซึ่งยิ่งจำนวนสัญลักษณ์มากความแตกต่างของแต่ละสัญลักษณ์จะมีน้อยลงไปด้วย ถ้าความแตกต่างของแต่ละสัญลักษณ์น้อยโอกาสที่จะถูกรบกวนแล้วทำให้เกิดความผิดพลาดก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.4 แบบจำลองมอดูเลชัน และ แบบจำลองดีมอดูเลชัน

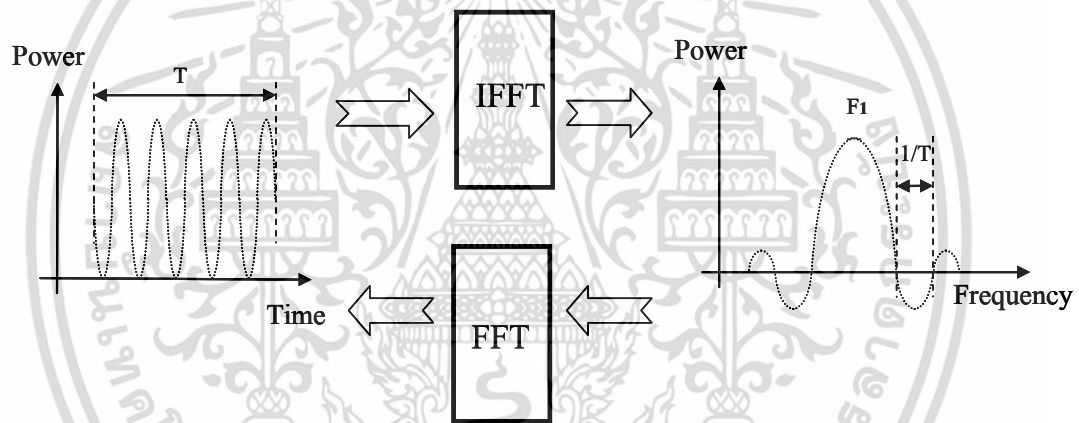
รูปที่ 3.4 แสดงแบบจำลองการมอดูเลชันและแบบจำลองการดีมอดูเลชัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์เลือกใช้การมอดูเลชันแบบ 64QAM สำหรับแบบจำลองการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้ 6 บิต แทนด้วย 1 สัญลักษณ์ โดยที่ความเป็นไปได้ของสัญลักษณ์มีทั้งหมด $2^6 = 64$ สัญลักษณ์ แบบจำลองมอดูเลชันทำหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลแบบดิจิทัลให้เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ และแบบจำลองการตีมอดูเลชัน เป็นแบบจำลองที่ทำการเปลี่ยนข้อมูลที่เป็นสัญลักษณ์ให้เป็นข้อมูลแบบดิจิทัล

3.2.4 แบบจำลองการแปลงกลับเร็วแบบฟูรีเยร์

และแบบจำลองการแปลงเร็วแบบฟูรีเยร์ (IFFT and FFT)

รูปที่ 3.5 แสดงแบบจำลองการแปลงกลับเร็วแบบฟูรีเยร์ และแบบจำลองการแปลงเร็วแบบฟูรีเยร์ โดยกระบวนการภายในของแบบจำลองแต่ละแบบแตกต่างกันดังนี้ แบบจำลองการแปลงผกผันฟูรีเยร์แบบเร็ว (IFFT) จะทำหน้าที่จะกระจายบิตข้อมูลที่ผ่านการมอดูเลชันแล้ว ไปยังตำแหน่งความถี่ต่างๆ ที่จะจัดให้ตั้งฉากกัน และเมื่อข้อมูลที่ส่งออกมาถึงทางด้านรับ ทางด้านรับจำเป็นต้องมีแบบจำลองที่ทำหน้าที่แปลงข้อมูลกลับมาด้วยแบบจำลองการแปลงเร็วแบบฟูรีเยร์ กระบวนการของแบบจำลองนี้จะนำเอาข้อมูลที่ตำแหน่งความถี่ต่างๆที่ตั้งฉากกลับมา และเมื่อข้อมูลถูกส่งมาถึงเครื่องรับเครื่องรับจะสามารถแปลงข้อมูลที่อยู่ในความถี่ที่ตั้งฉากกันกลับมาใช้งานได้ดังเดิม



รูปที่ 3.5 แบบจำลองการแปลงกลับเร็วแบบฟูรีเยร์ และแบบจำลองการแปลงเร็วแบบฟูรีเยร์

แบบจำลองทั้งสองที่กล่าวมานั้นสามารถอธิบายด้วยคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2)

สมการที่ 1 เป็นการแปลงเร็วแบบฟูรีเยร์แบบมิติเดียว

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{nK} \quad , \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (3.1)$$

และการแปลงกลับเร็วแบบฟูรีเยร์ แสดงด้วยสมการที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] W_N^{-nk} \quad , \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (3.2)$$

ที่ $W_N = e^{-j2\pi/N}$ คือ แฟกเตอร์ตัวบิด (Twiddle Factor)

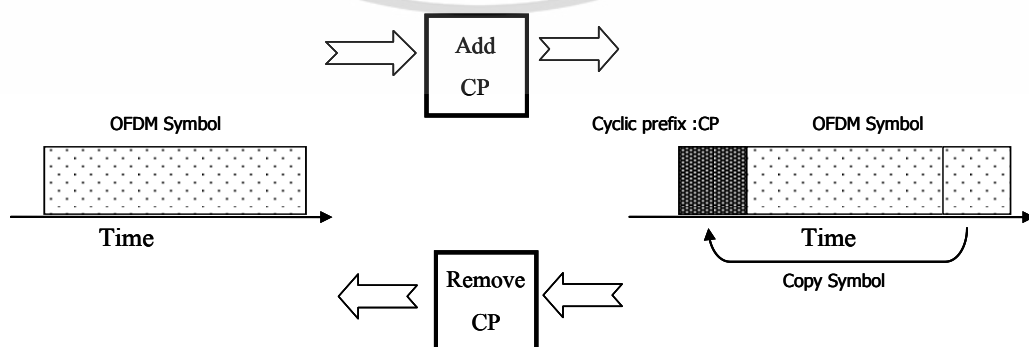
โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในแบบจำลองของระบบโอเอฟดีเอ็ม แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองระบบโอเอฟดีเอ็ม

Parameter	Value
Frequency	2.1GHz
Bandwidth	15MHz
Number of Sub Channel	768
Sub Channel space	15KHz
Number of Transmitter (BTS)	7
Distance between transceiver	1500m
Number of Transmitter Direction (ELL)	3

3.2.5 แบบจำลองนำเข้าสัญญาณป้องกันและแบบจำลองลบออกสัญญาณป้องกัน (Add CP and Remove CP)

รูปที่ 3.6 แบบจำลองนำเข้าสัญญาณป้องกันเป็นแบบจำลองที่นำค่าสัญญาณป้องกัน ซึ่งค่าสัญญาณป้องกันนี้จะเข้าไปรวมกับสัญญาณที่จะทำการส่งออก และสัญญาณป้องกันนี้สร้างโดยการตัดข้อมูลส่วนท้ายของข้อมูลที่จะส่ง นำมาต่อด้านหน้าของชุดข้อมูลเพื่อทำหน้าที่เป็นการป้องกันสัญญาณรบกวน [9]



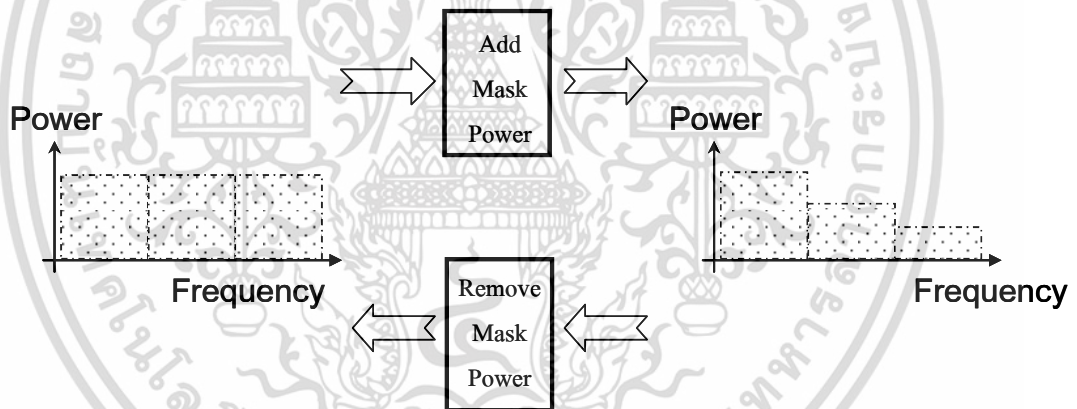
รูปที่ 3.6 แบบจำลองนำเข้าสัญญาณป้องกันและแบบจำลองลบออกสัญญาณป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองลอกออกสัญญาณป้องกันเป็นการลบข้อมูลที่ถูกลำเลียงเข้าไปเป็นสัญญาณป้องกันออกก่อนที่จะนำข้อมูลไปใช้งานต่อไป

3.2.6 แบบจำลองการจำกัดพลังงานที่ใช้สำหรับส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย และแบบจำลองการชดเชยพลังงานที่ใช้ในการส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย (Add Mask Power Control and Remove Mask Power Control)

รูปที่ 3.7 แสดงแบบจำลองการจำกัดพลังงานที่ใช้ในการส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย [10] โดยแบบจำลองจะทำหน้าที่กำหนดรูปแบบการใช้งานความถี่ให้เป็นตามการจัดความถี่ใช้งานตามรูปแบบที่ต้องการ เพื่อให้รูปแบบของช่องสัญญาณแต่ละช่องมีรูปแบบตามการจัดความถี่ใช้งาน โดยที่แบบจำลองการจำกัดพลังงานที่ใช้ในการส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย ให้พลังงานที่ใช้ในการส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อยมีพลังงานที่ใช้ในการส่งเป็นไปตามรูปแบบการจัดความถี่ใช้งาน ตามรูปที่ 3.11, 3.12, 3.13 โดยรูปที่ 3.11, 3.12, 3.13 แสดงพลังงานที่ใช้ในการส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อยมีพลังงานที่ใช้ในการส่งไม่เท่ากันซึ่งเป็นตามรูปแบบของการจัดความถี่ใช้งาน และแบบจำลองการชดเชยพลังงานที่ใช้ในการส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย ทำหน้าที่คอยปรับพลังงานที่ใช้ในการส่งจะสูญหายไปจากการจำกัดพลังงานที่ใช้ในการส่งให้มีค่ากลับมาเท่าเดิมเพื่อนำไปใช้งานในบล็อกถัดไป



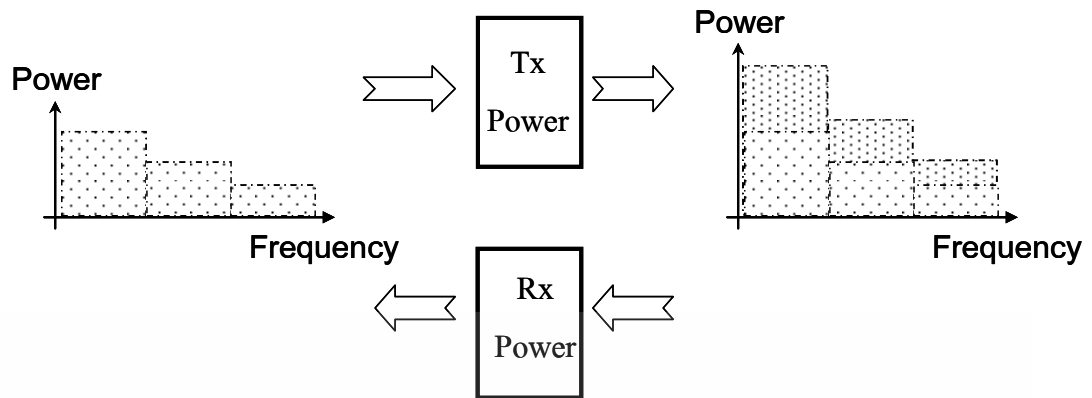
รูปที่ 3.7 แบบจำลองการจำกัดพลังงานที่ใช้ในการส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อยและแบบจำลองการชดเชยพลังงานที่ใช้ในการส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย

3.2.7 แบบจำลองการควบคุมระดับพลังงานภาคส่ง-ภาครับ (Tx Power and Rx Power Control)

รูปที่ 3.8 แสดงแบบจำลองส่งสัญญาณทำหน้าที่นำสัญญาณข้อมูลที่จะทำการส่งมาทำการเพิ่มพลังงานที่ใช้ในการส่งให้มีค่าเพียงพอต่อการส่งออก ตามรูปแบบของการจัดความถี่ใช้งานแบบต่างๆ ที่กำหนดไว้ตามค่าในตารางที่ 3.2

แบบจำลองรับสัญญาณทำหน้าที่นำสัญญาณที่เกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากสัญญาณถูกส่งผ่านช่องสัญญาณแบบเซลลูลาร์ แล้วมาทำการชดเชยค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งให้มีค่าเป็นปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

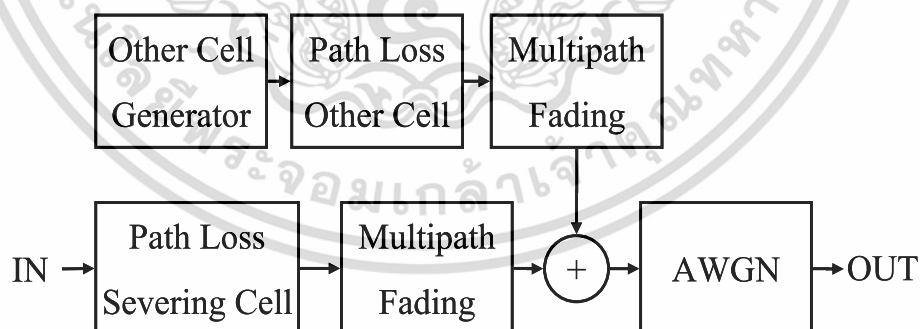


รูปที่ 3.8 แบบจำลองการควบคุมระดับพลังงานภาคส่ง-ภาครับ

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองการควบคุมระดับพลังงานภาคส่ง-ภาครับและรูปแบบการส่งข้อมูล มีค่าดังตารางที่ 3.2

3.2.8 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบเซลลูลาร์

แบบจำลองช่องสัญญาณแบบเซลลูลาร์ เป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญมากกับการจำลองระบบสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเออย่างยิ่ง เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าว ทำหน้าที่สร้างสัญญาณรบกวนจากหลายทิศทาง (Multipath Fading) สัญญาณรบกวนแบบ AWGN และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์ [11], [12], [13] ซึ่งส่งผลให้สัญญาณข้อมูลเกิดการสูญหาย การลดทอน



รูปที่ 3.9 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบเซลลูลาร์

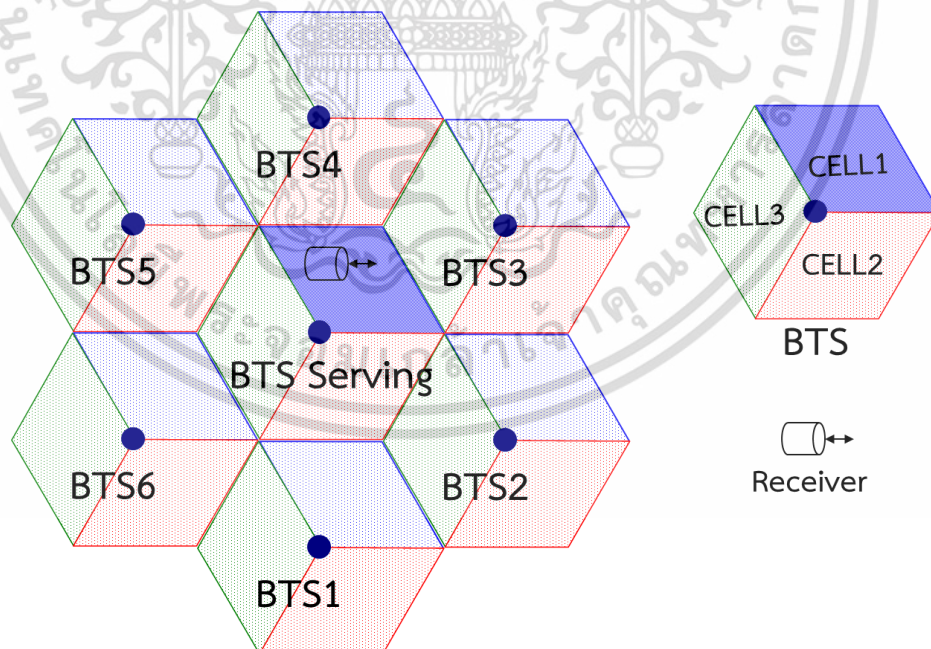
จากแบบจำลองการสร้างช่องสัญญาณแบบเซลลูลาร์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ตามรูปที่ 3.10 ดังนี้

ส่วนที่ 1 : ทำหน้าที่สร้างตัวส่งสัญญาณย่อยที่ 1 (CELL1) ของตัวส่งสัญญาณหลัก (BTS Serving) โดยที่สัญญาณหลัก (Serving Signal) จะมาจากตัวส่งสัญญาณย่อยที่ 1 (CELL1) ของตัวส่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณหลัก (BTS Serving) ส่วนตัวส่งสัญญาณย่อยที่ 2 และ 3 (CELL2, CELL3) ของตัวส่งสัญญาณหลักจะยังไม่ถูกสร้างในแบบจำลองนี้ และในส่วนนี้จะทำการจำลองการสูญหายของสัญญาณหลัก การเกิดสัญญาณรบกวนหลายทิศทาง (Multipath Fading) และการลดทอนของสัญญาณ (Path Loss) หลัก ก่อเพื่อนำไปรวมกับสัญญาณที่ส่งออกมาจากตัวส่งสัญญาณอื่นๆ

ส่วนที่ 2 : ทำหน้าที่สร้างตัวส่งสัญญาณต่างๆ (BTS) จำนวน 6 ตัว โดยแต่ละตัวส่งสัญญาณประกอบด้วยตัวส่งสัญญาณย่อย 3 ตัวส่งย่อย (3CELL) และตัวส่งสัญญาณย่อยของแต่ละตัวส่งสัญญาณจะมีทิศทางของการส่งสัญญาณที่ไม่เหมือนกัน เมื่อรวมกันทั้งหมดจะมี 20 ตัวส่งย่อย และทั้ง 20 ตัวส่งย่อยจะทำการสร้างสัญญาณที่มีลักษณะเดียวกันกับสัญญาณหลักแต่จะมีข้อมูลที่ใช้ในการส่งคนละชุดกัน รวมถึงการสูญหายของสัญญาณ การเกิดสัญญาณรบกวนจากหลายทิศทาง และการลดทอนของสัญญาณของแต่ละตัวส่งสัญญาณย่อยทั้ง 20 ตัว ด้วยเช่นกัน จากนั้นจะนำไปรวมกับสัญญาณที่ส่งมาจากตัวส่งสัญญาณย่อยที่ 1 ของตัวส่งสัญญาณหลักต่อไป

ส่วนที่ 3 : ทำหน้าที่รวมสัญญาณหลักและสัญญาณที่ส่งออกมาจากตัวส่งย่อยทั้งหมด 20 ตัวที่มาจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน การสูญหายของสัญญาณ การเกิดสัญญาณรบกวนจากหลายทิศทาง และการลดทอนของสัญญาณไม่เท่ากัน เมื่อนำสัญญาณมารวมกันจะเกิดการสูญหายของบางสัญญาณโดยที่บางสัญญาณจะมีระดับพลังงานสูงขึ้น บางสัญญาณจะมีระดับพลังงานที่ต่ำลง การรวมกันของสัญญาณทั้งหมด 21 สัญญาณจะทำให้สัญญาณหลักซึ่งเป็นสัญญาณที่สนใจถูกรบกวนจากช่องสัญญาณอื่นๆ ซึ่งการรบกวนที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามการจัดความถี่ใช้งานแต่ละรูปแบบและระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณหลักกับตัวรับสัญญาณ



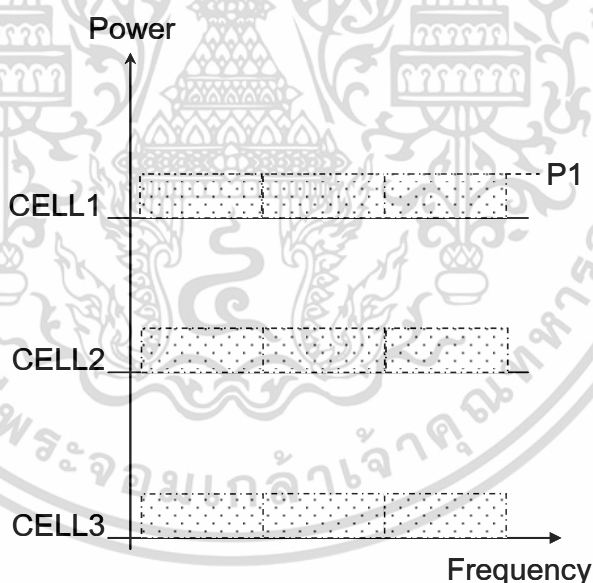
รูปที่ 3.10 รูปแบบระบบสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างสัญญาณของแต่ละตัวส่งสัญญาณหลักและตัวส่งสัญญาณย่อย ขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดความถี่ใช้งาน โดยรูปแบบการจัดความถี่ใช้งาน [10],[14] แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้ การจัดความถี่แบบเอกรูป (Uniform Frequency Reuse) การจัดความถี่แบบแข็ง (Hard Frequency Reuse: HFR) และการจัดความถี่แบบอ่อน (Soft Frequency Reuse: SFR) แต่ละรูปแบบการจัดความถี่ใช้งานจะกำหนดให้ตัวส่งสัญญาณย่อยแตกต่างกัน คือ ตัวส่งสัญญาณย่อยที่ 1 (CELL1) ใช้การจัดรูปแบบความถี่ ของ CELL1 ตัวส่งสัญญาณย่อยที่ 2 (CELL2) ใช้การจัดรูปแบบความถี่ ของ CELL2 และตัวส่งสัญญาณย่อยที่ 3 (CELL3) ใช้การจัดรูปแบบความถี่ ของ CELL3 โดยเปลี่ยนแปลงตามการจัดความถี่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.11, 3.12, 3.13

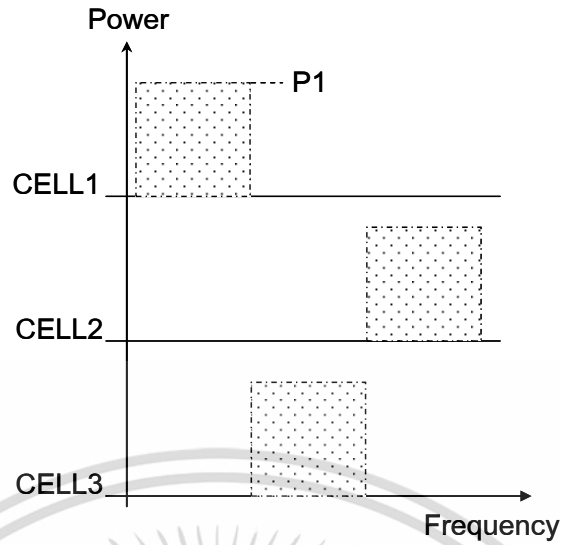
การจัดความถี่ใช้งานจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นมี 3 รูปแบบนั้น มีลักษณะการทำงานดังนี้

1. **การจัดความถี่แบบเอกรูป (Uniform Frequency Reuse)** คือ การจัดความถี่แบบไม่มีการแบ่งความถี่ ดังนั้น ตัวส่งสัญญาณ (Base Transceiver Station: BTS) มีเพียงความถี่เดียว และส่งออกทุกทิศทางของตัวส่งสัญญาณย่อย จึงทำให้แต่ทิศทางของตัวส่งสัญญาณ (CELL) ตามรูปที่ 3.10 เนื่องจากการจัดความถี่แบบนี้ใช้ความถี่เดียวกันทั้งหมด ซึ่งส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกันสูง ณ ตำแหน่งที่เป็นตำแหน่งเชื่อมต่อระหว่างทิศทางตัวส่งสัญญาณ 2 ตัว (Edge CELL) ดูตามรูปที่ 3.11



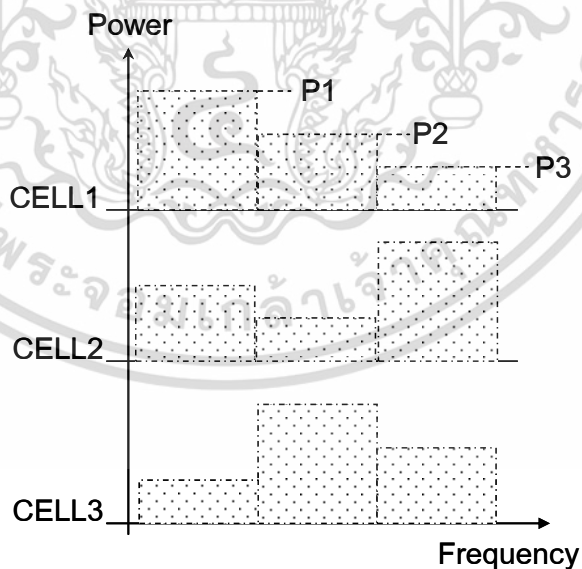
รูปที่ 3.11 การจัดความถี่แบบเอกรูป

2. **การจัดความถี่แบบแข็ง (Hard Frequency Reuse: HFR)** คือ การจัดความถี่ที่มีการแบ่งความถี่ต่างกัน โดยตัวส่งสัญญาณแต่ละตำแหน่ง (1 BTS) จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ทิศทาง (3 CELL) และแต่ทิศทางจะกำหนดความถี่ใช้งานที่ต่างกัน ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การจัดความถี่แบบแข็ง

3. การจัดความถี่แบบอ่อน (Soft Frequency Reuse: SFR) คือ การจัดความถี่ที่มีการแบ่งความถี่ใช้งาน และแบ่งตัวส่งสัญญาณแต่ละตำแหน่ง ร่วมกับการจำกัดกำลังส่งความถี่ โดยให้แต่ละทิศทางของตัวส่งสัญญาณสามารถใช้งานความถี่ได้เท่ากัน แต่ใช้วิธีการจำกัดกำลังส่งของแต่ละความถี่ให้ไม่เท่ากันเพื่อจะลดสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การจัดความถี่แบบอ่อน

จากรูปที่ 3.11, 3.12, 3.12 ระดับของพลังงานที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลของจุด P1, P2, P3 ของการจัดความถี่ใช้งานแต่ละแบบ กำหนดค่าที่ศึกษาแบบจำลองตามตารางที่ 3.2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแต่ละรูปแบบ

Frequency Reuse	P1	P2	P3
FR1	43dBm.	-	-
FR2	40dBm.	-	-
HFR1	43dBm.	0	0
HFR2	40dBm.	0	0
SFR1	37dBm.	34dBm.	31dBm.
SFR2	40dBm.	37dBm.	34dBm.
SFR3	43dBm.	40dBm.	37dBm.
SFR4	46dBm.	43dBm.	40dBm.
SFR5	49dBm.	46dBm.	43dBm.
SFR6	52dBm.	49dBm.	46dBm.

สำหรับการจำลองแบบแต่ละรูปแบบการจัดความถี่ใช้งานและแต่ละระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล ตัวรับจะมีการเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณหลักและตัวรับสัญญาณหลักที่แตกต่างกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลจะส่งผลให้สัญญาณรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตามด้วย เช่น การสูญหายของสัญญาณ การเกิดสัญญาณรบกวนจากหลายทิศทาง และการลดทอนสัญญาณของแต่ละตัวส่งสัญญาณย่อยจะแตกต่างกันที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะทางต่างกัน โดยการเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลหลักและตัวรับข้อมูลจะมีทิศทาง ไปทางตัวส่งข้อมูลที่หลักที่ 4 (BTS4) ดังแสดงตามรูปที่ 3.10

จากที่กล่าวมานั้น การทำงานโดยรวมของแบบจำลองช่องสัญญาณแบบเซลลูลาร์ คือ การสร้างช่องสัญญาณหลักขึ้นมา 1 สัญญาณเพื่อส่งข้อมูลไปยังตัวรับข้อมูลที่อยู่ห่างออกไป และสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการใช้งานความถี่เดียวกันที่มาจากตัวส่งสัญญาณย่อยอีก 20 ตัวส่งสัญญาณ ซึ่งตั้งอยู่ในรูปแบบของการสื่อสารแบบเซลลูลาร์ เมื่อสัญญาณหลักถูกรบกวนจากสัญญาณที่มาจากสัญญาณย่อย 20 สัญญาณ ผลที่เกิดขึ้นจะทำให้สัญญาณมีความผิดพลาด โดยที่ความผิดพลาดของสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับ รูปแบบการจัดความถี่ใช้งาน ระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลของตัวสัญญาณย่อย ระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณนั่นเอง

3.3 วิธีการจำลอง

การจำลองแบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ เป็นการจำลองเพื่อหาประสิทธิภาพของการจัดความถี่ใช้งานแบบต่างๆ ที่มีระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ต่างกัน โดยที่ขั้นตอนของการทำการจำลองแบ่งออกเป็นทั้งหมด 9 ขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สร้างแบบจำลองแบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ โดยใช้แบบจำลองจากหัวข้อที่ 3.2 และรูปที่ 3.1 จากหัวข้อที่ 3.2 สามารถที่จะสร้างแบบจำลองของการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอขึ้นมา และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำการจำลองแบบแสดงในตารางที่ 3.1

2. คำนวณหาค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูล ในการทำการศึกษาเพื่อที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอในแต่ละการจัดความถี่ใช้งาน เราจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบด้วยค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลในแต่ละระยะห่างระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลที่แตกต่างกันไปของแต่ละรูปแบบการจัดความถี่ใช้

เริ่มทำการจำลองโดย ทำการหาค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานในแบบต่างๆโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของการจัดรูปแบบการจัดความถี่ใช้งานตามตารางที่ 3.2 โดยที่ขั้นตอนแรกเราจะทำการจำลองใช้การใช้การจัดความถี่ใช้งานแบบแข่งที่รูปแบบ HFR1 และ HFR2 ก่อน หลังจากที่ได้ทำการจำลองจะได้ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูล ที่ระยะห่างในระยะต่างๆ ของตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบแข่งที่รูปแบบ HFR1 และ HFR2

3. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 2 แต่ทำการเปลี่ยนการจัดความถี่ใช้งานจากการจัดความถี่ใช้งานแบบแข่งมาเป็นแบบเอกรูปที่รูปแบบ SF1 และ SF2 หลังจากที่ได้ทำการจำลองจะได้ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูล ที่ระยะห่างในระยะต่างๆ ของตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูปที่รูปแบบ SF1 และ SF2

4. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 2 แต่เปลี่ยนการจัดความถี่ใช้งานเป็นแบบอ่อนที่รูปแบบ SFR2 และ SFR3 หลังจากที่ได้ทำการจำลองจะได้ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูล ที่ระยะห่างในระยะต่างๆ ของตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานเป็นแบบอ่อนที่รูปแบบ SFR2 และ SFR3

5. ทำการสร้างกราฟค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไป ทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลระหว่างการจัดความถี่ใช้งานแบบแข่งที่ใช้รูปแบบ HFR1 และ HFR2 เปรียบเทียบกับการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูปแบบ SF1 และ SF2 และเปรียบเทียบกับการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนในรูปแบบ SFR2 และ SFR3 ทำการสรุปผลเพื่อหาแบบการจัดความถี่ใช้งานที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำไปทดลองต่อในขั้นตอนต่อไป

6. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 2 แต่ใช้การจัดความถี่ใช้งานเป็นแบบอ่อนในรูปแบบ SFR1 , SFR2 , SFR3 , SFR4 , SFR5 และ SFR6 หลังจากที่ได้ทำการจำลองจะได้ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูล ที่ระยะห่างในระยะต่างๆ ของตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานเป็นแบบอ่อนที่รูปแบบ SFR1 , SFR2 , SFR3 , SFR4 , SFR5 และ SFR6

7. ทำการสร้างกราฟค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเทียบกับระยะห่างระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไป ทำการเปรียบเทียบกับการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนในรูปแบบ SFR1 , SFR2 , SFR3 , SFR4 , SFR5 และ SFR6

8. ทำการสร้างกราฟการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนในรูปแบบ SFR1 , SFR2 , SFR3 , SFR4 , SFR5 และ SFR6

9. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเทียบกับระยะทางระตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไปของแต่ละการจัดความถี่ใช้งานในแต่ละรูปแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนในรูปแบบ SFR1 , SFR2 , SFR3 , SFR4 , SFR5 และ SFR6 และทำการสรุปผลของการจำลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการจำลองแบบ

4.1 บทนำ

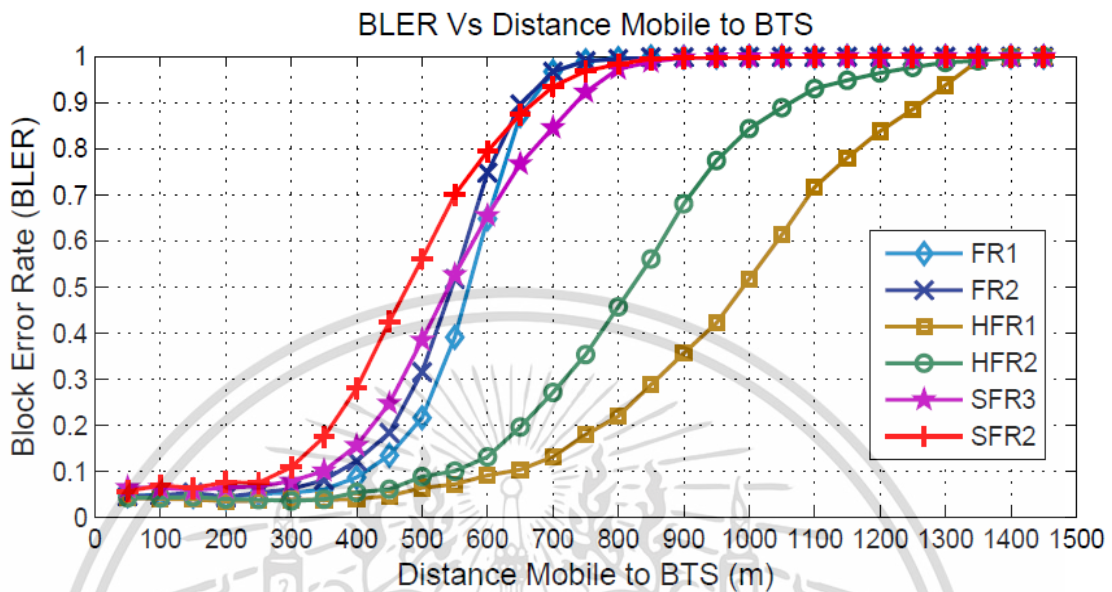
จากการที่ได้ทำการจำลองแบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ สามารถนำผลของการจำลองที่ได้มาทำการสร้างกราฟของความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูล และค่าความเร็วในการส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูล และทำการสร้างกราฟของความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูล และค่าความเร็วในการส่งข้อมูล เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล การเปลี่ยนรูปแบบของการจัดความถี่ใช้งานในรูปแบบที่แตกต่างกันไป หรือระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูล หรือระดับพลังงานที่ใช้ในส่งข้อมูล การเปลี่ยนแปลงของค่าเหล่านี้ล้วนมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ ทั้งนี้ จากการจำลองจึงสามารถนำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุดได้ โดยสามารถสร้างการเปรียบเทียบได้ 5 หัวข้อดังต่อไปนี้

4.2 ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานในรูปแบบต่างๆ

จากผลของการทำการจำลองแบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ โดยใช้การจัดความถี่แบบเอกรูป, การจัดความถี่แบบแข็งและการจัดความถี่แบบอ่อน ที่มีการกำหนดพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล 2 ระดับ ตามตารางที่ 3.2 โดยการใช้รูปแบบของการจัดความถี่แบบเอกรูปที่รูปแบบ FR1 และ FR2 , ใช้รูปแบบการจัดความถี่แบบแข็งที่รูปแบบ HFR1 และ HFR2 และใช้รูปแบบการจัดความถี่แบบอ่อนที่รูปแบบ SFR3 และ SFR2 และนำผลของการจำลองมาทำการสร้างกราฟแสดงค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.1 และกราฟค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของแต่ละการจัดความถี่ใช้งานเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจากกราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูล จากผลการจำลองดังกล่าวพบว่า เมื่อระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลมีระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลจะมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย ในทุกๆรูปแบบของการจัดความถี่ใช้งาน แต่ก็ยังพบข้อแตกต่างของการจัดความถี่ใช้งานของแต่ละรูปแบบคือ การจัดความถี่แบบแข็งได้ผลการจำลองค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดความถี่ใช้งานแบบอื่นๆ

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนกับค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูปแล้ว พบว่าที่ระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลมีระยะทางน้อยกว่า 300 เมตรนั้นได้ผลการจำลองของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ถ้าหากระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลมี

ระยะทางมากกว่า 600 เมตรแล้วจะพบว่าค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนในรูแบบ SFR3 มีค่าที่ดีกว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูปในรูแบบ FR1 และ FR2



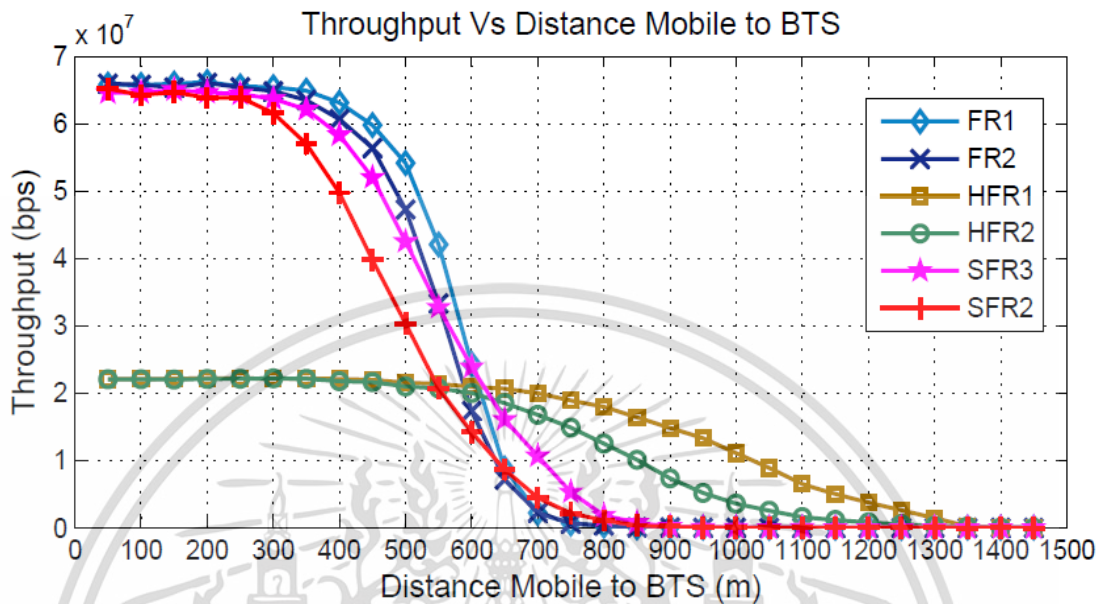
รูปที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่แบบเอกรูป, การจัดความถี่แบบแข็งและการจัดความถี่แบบอ่อน

เมื่อนำค่าความเร็วในการส่งข้อมูลจากผลการจำลองของแบบจำลองการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเพนดีเอ็มเอ สามารถนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.2 และจากผลการจำลองกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลดังกล่าวพบว่าเมื่อระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลมีระยะทางเพิ่มขึ้นผลที่ได้การจำลองแบบจำลองคือ ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลมีค่าที่ต่ำลงในทุกๆรูปแบบของการจัดความถี่ใช้งาน แต่เมื่อพิจารณาที่ระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลมีค่าน้อยกว่า 600 เมตรแล้ว การจัดความถี่ใช้งานแบบแข็ง ได้ผลการจำลองของค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่ดีที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการจัดความถี่ใช้งานแบบอื่นๆ แต่เมื่อระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลมีระยะทางมากกว่า 600 เมตรแล้ว ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบแข็งมีค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูปและการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน

แต่ถ้าพิจารณาที่ระยะทางน้อยกว่า 300 เมตรค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนเปรียบเทียบกับการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูปแล้วค่าความเร็วในการส่งข้อมูลมีใกล้เคียงกัน แต่ถ้าหากทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนเปรียบเทียบกับการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูปแล้วที่ระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลมีระยะทางมากกว่า 600 เมตรจะพบว่าค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบอ่อนที่ใช้รูปแบบ SFR3 มีค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่ต่ำกว่าค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบแข็งด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.2 ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่แบบเอกรูป, การจัดความถี่แบบแข็งและการจัดความถี่แบบอ่อน

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจัดความถี่ใช้งานในรูปแบบต่างๆ

จากผลของการทำการจำลองแบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเพนดีเอ็มเอ ในแต่ละรูปแบบของการจัดความถี่ใช้งาน เมื่อนำค่าความเร็วในการส่งข้อมูลมาพิจารณาพบว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน (SFR3, SFR2) และการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูป (FR1, FR2) ที่ระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลมีระยะทางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 600 เมตรลงมา พบว่าค่าความเร็วในการส่งข้อมูลมีค่าที่มากกว่าค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่แบบแข็ง (HFR1, HFR2) มากกว่าถึง 2 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่ระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูล ตั้งแต่ 0 ถึง 600 เมตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 80 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ใช้งานทั้งหมดแล้วจึงสรุปได้ว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน (SFR3, SFR2) และการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูป (FR1, FR2) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบแข็ง (HFR1, HFR2)

ตารางที่ 4.1 ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของแต่ละรูปแบบการจัดความถี่ใช้งาน

Frequency Reuse	Throughput (bps)		
	X <= 300 m	300 < X <= 600 m	600 < X <= 800 m
FR1	65.76×10^6	51.38×10^6	03.00×10^6
FR2	65.54×10^6	46.41×10^6	02.61×10^6
HFR1	22.14×10^6	21.68×10^6	19.38×10^6
HFR2	22.09×10^6	21.20×10^6	15.67×10^6
SFR3	64.48×10^6	45.24×10^6	08.47×10^6
SFR2	63.89×10^6	35.28×10^6	04.11×10^6

X = ระยะทาง

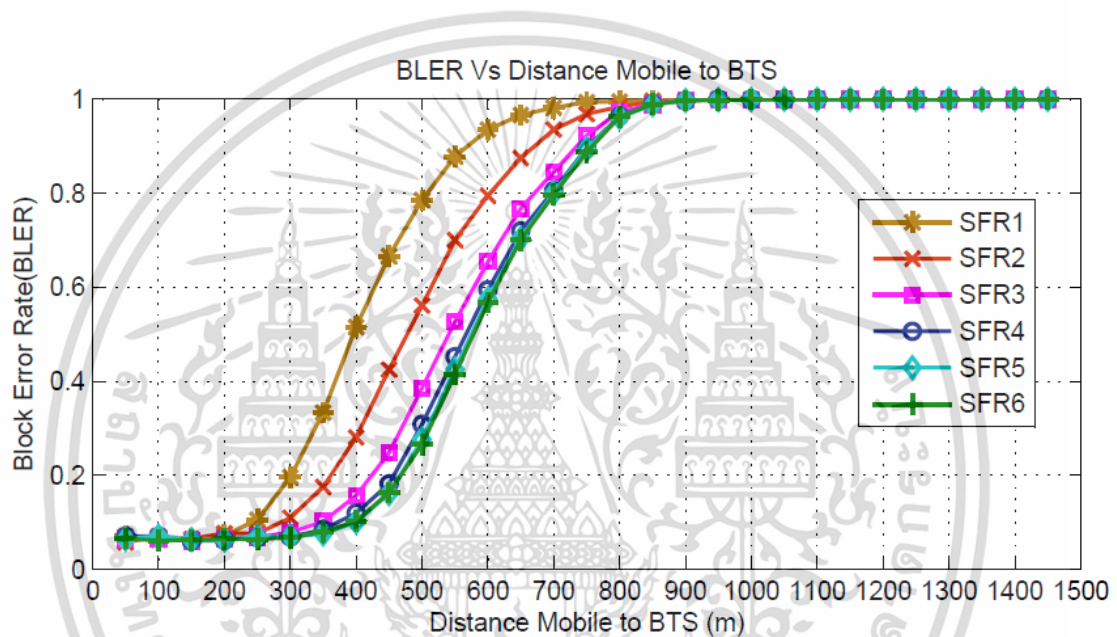
เมื่อพิจารณาค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน (SFR3) และการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูป (FR1) ที่ระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 600 เมตรแล้ว จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูป (FR1) มีค่าที่มากกว่าค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน (SFR3) อยู่เพียงประมาณ 1.1 เท่า เท่านั้นจึงยังไม่สามารถสรุปได้ว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน (SFR3) หรือ การจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูป (FR1) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่ากัน ดังนั้นจึงต้องนำค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่ระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลที่มีระยะทางมากกว่า 600 เมตร ไปจนถึง 800 เมตรมาพิจารณาเพิ่มเติม

เมื่อพิจารณาค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน (SFR3) และการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูป (FR1) ที่ระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลที่มีระยะทางมากกว่า 600 เมตร จนถึง 800 เมตร จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน (SFR3) มีค่าที่มากกว่าค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูป (FR1) อยู่ที่ 2.8 เท่า จึงสรุปได้ว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน (SFR3) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูป (FR1)

จากเหตุผลดังกล่าว ผลของการจำลองแบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอพีดีเอ็มเอ พบว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูปและการจัดความถี่ใช้งานแบบแข็ง แต่ก็ยังพบว่าการปรับเปลี่ยนระดับพลังในการส่งข้อมูลยังมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบเช่นกันกับรูปแบบของการจัดความถี่ใช้งาน เช่น มีความแตกต่างของค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนในรูปแบบ SFR3 และ SFR2 ซึ่งระดับของกำลังที่ใช้งานของทั้ง 2 รูปแบบมีระดับที่ไม่เท่ากัน จึงเลือกที่จะนำเอาการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนมาทำการศึกษาต่อเพื่อหาจุดของระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ดีที่สุดของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน

4.4 ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนในแต่ละระดับของพลังในการส่งข้อมูล

จากผลของการทำการจำลองแบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ โดยใช้การจัดความถี่แบบอ่อน ที่มีการกำหนดพลังงานที่ใช้ในการส่ง 6 ระดับ ตามตารางที่ 3.2 คือ การจัดความถี่แบบอ่อนที่รูปแบบ SFR1, SFR2, SFR3, SFR4, SFR5 และ SFR6 จากผลที่ได้ทำการจำลองสามารถที่จะสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และกราฟค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลในแต่ละระดับค่ากำลังสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.3

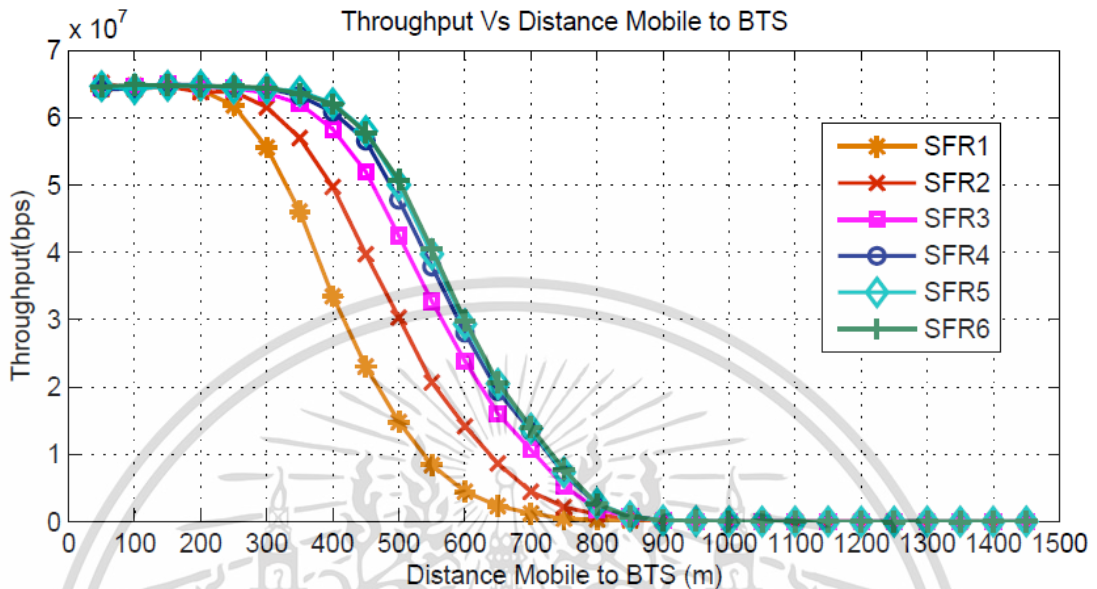


รูปที่ 4.3 ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน

จากผลการจำลองแบบในรูปที่ 4.3 แสดงค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนที่รูปแบบ SFR1, SFR2, SFR3, SFR4, SFR5 และ SFR6 เมื่อระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลมีระยะทางที่เพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลจะมีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย ในทุกรูปแบบ แต่ก็พบข้อแตกต่างของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลที่ไม่เท่ากันของในแต่ละรูปแบบซึ่งจะสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอได้ต่อไป

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนที่รูปแบบ SFR1, SFR2, SFR3, SFR4, SFR5 และ SFR6 พบว่าการเมื่อระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณหลักกับตัวรับสัญญาณยิ่งเพิ่มมากขึ้นค่าความเร็วในการส่งข้อมูลก็ลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นไปด้วย แต่ก็พบข้อแตกต่างของค่าความเร็วใน

การส่งข้อมูลที่ไม่เท่ากันของในแต่ละรูปแบบ ซึ่งที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเพนทีเอ็มเอได้เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน

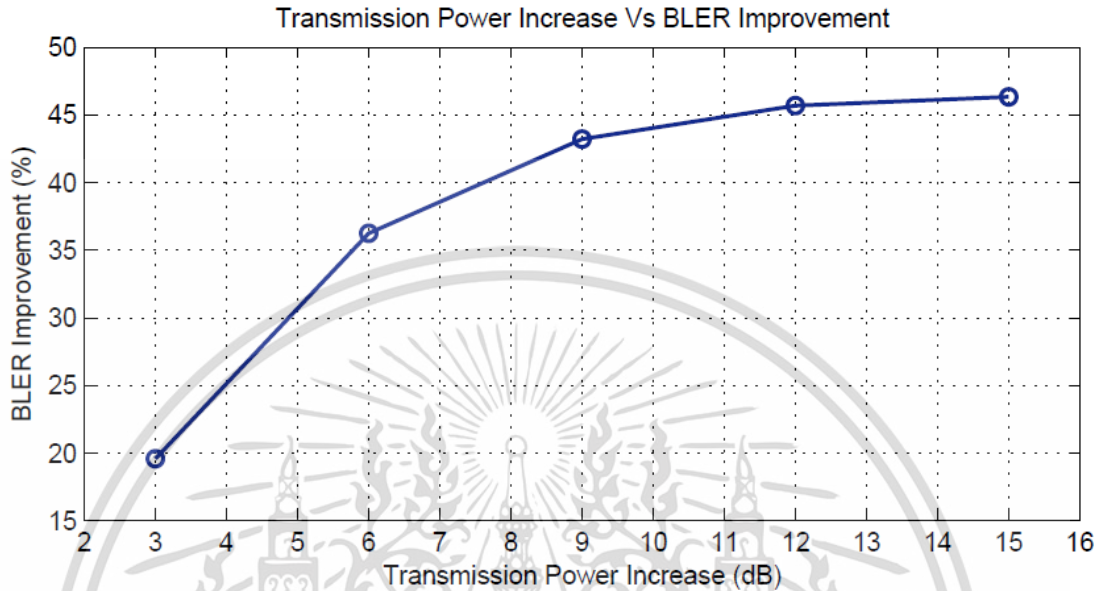
4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนในแต่ละระดับของพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 สามารถนำข้อมูลมาทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลที่ลดลงแสดงในรูปที่ 4.5 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่ 4.6

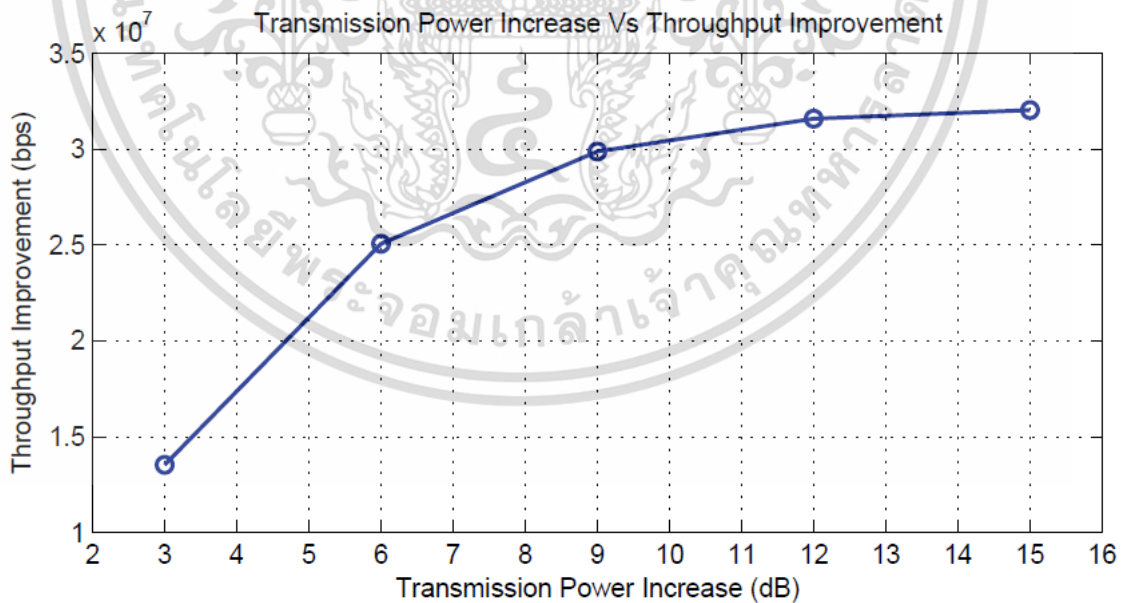
รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงการเพิ่มของระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลลดลงและการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นโดยค่าที่นำมาใช้ในการสร้างกราฟนำมาจากค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่ระยะทางระหว่างตัวส่งข้อมูลกับตัวรับข้อมูลอยู่ระหว่าง 450 เมตร ถึง 600 เมตร มาทำการเฉลี่ยกันเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นภาพรวมของระบบ ส่วนการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลนั้นหามาจากตารางที่ 3.2 ของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนที่รูปแบบ SFR1, SFR2, SFR3, SFR4, SFR5 และ SFR6 โดยการนำมาหาค่าที่เพิ่มขึ้นของระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลของแต่ละแบบโดยนับจากค่าที่น้อยที่สุดเป็นตัวตั้งคือรูปแบบ SFR1

เมื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างระดับกำลังสัญญาณในระดับที่แตกต่างกันไป พบว่าเมื่อเพิ่มระดับกำลังสัญญาณให้แรงขึ้นดูเหมือนว่าค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลดูเหมือนจะดีขึ้นแต่เมื่อเพิ่มระดับค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลมากขึ้นจนถึงระดับๆหนึ่งแล้วพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลกลับไม่ดีขึ้นตามการเพิ่มของระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลอีกแล้ว ดังแสดงตามรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลที่ลดลงของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการส่งข้อมูลข้อมูลที่เพิ่มขึ้นของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 และ 4.4 ร่วมกันแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูล และค่าความเร็วในการส่งข้อมูลของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนที่ระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบ SFR4 ได้ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกันกับระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบ SFR5 และ ระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบ SFR6 ถึงแม้ว่าระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบ SFR5 และระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบ SFR6 จะมีระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งที่มากกว่าระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบ SFR4 แต่ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลไม่ลดลงและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลกลับไม่เพิ่มตามระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแต่อย่างใด ดังแสดงตามรูปที่ 4.5 และ 4.6 จึงทำให้เห็นได้ว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนที่ระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแบบ SFR4 มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

ปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระบบการสื่อสารไร้สายสามารถที่จะอำนวยความสะดวกต่อการเข้าใช้งาน โดยผู้ใช้งานสามารถที่จะเข้าใช้งานได้ทุกพื้นที่ และแนวโน้มของความต้อการที่จะใช้งานระบบการสื่อสารไร้สายในยุคปัจจุบันและอนาคต เพื่อใช้ทำการรับ-ส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงเพิ่มมากขึ้น ภายใต้ทรัพยากรด้านความกว้างของคลื่นที่ยังใช้งานยังคงมีเท่าเดิม การสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอสามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงได้เป็นอย่างดีแต่ก็มีปัญหาที่เกี่ยวข้องสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่เดียวกันซึ่งจำเป็นจะต้องมีการจัดความถี่ที่ใช้งานและกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลของแต่ละตัวส่งสัญญาณที่เป็นแบบเซลลูลาร์ เพื่อลดการเกิดสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ แบบจำลองระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจัดความถี่ใช้งานในรูปแบบต่างๆและผลกระทบของการกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล ว่ามีผลกระทบกับประสิทธิภาพของระบบอย่างไร

5.2 สรุปผลการวิจัย

จากผลของการจำลองระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ พบว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนสามารถที่จะใช้ทรัพยากรด้านความกว้างของคลื่นได้เต็มที่มากกว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบแข็งและยังสามารถให้ประสิทธิภาพในช่วงรอยต่อระหว่างตัวส่งสัญญาณของแต่ละตัวได้ดีกว่าการจัดความถี่ใช้งานแบบเอกรูปอีกด้วย และเมื่อพิจารณาเฉพาะการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อน การกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลมีผลกระทบกับประสิทธิภาพของระบบด้วย เห็นได้จากผลการจำลอง พบว่าการเพิ่มระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลทำให้ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลมีแนวโน้มที่ดีขึ้นแต่ถ้าเพิ่มมากเกินไปจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกันมากขึ้น สัญญาณรบกวนดังกล่าวมาจากเหตุการณ์ที่ตัวส่งสัญญาณส่งสัญญาณข้ามตัวส่งสัญญาณอื่นๆ ทำให้เป็นการเพิ่มระดับกำลังสัญญาณที่มากเกินไปจนความจำเป็น ไม่ได้ทำให้ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและความเร็วในการส่งข้อมูลมีค่าที่ดีขึ้นตามการเพิ่มของระดับกำลังส่งสัญญาณเลย

ดังนั้นการเลือกใช้การจัดความถี่ใช้งานและการกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลมีผลกับประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอ ดังนั้นการเลือกการจัดความถี่ใช้งานและระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลควรเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งานของแต่ละพื้นที่ ไม่ควรเลือกใช้ระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลมากเกินไปหรือน้อยเกินไปเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุด

5.1 ข้อเสนอแนะ

ประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอไม่ได้ขึ้นอยู่กับการจัดความถี่ใช้และการกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแต่ยังคงมีปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อระบบ เช่นเดียวกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการทำมอดูเลชันแต่อย่างใด ในแบบจำลองที่ใช้ในการทำการจำลองได้ใช้การมอดูเลชันแบบ 64QAM เพียงอย่างเดียว และเนื่องจากประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบนี้ไม่ได้มีเพียงการจัดความถี่ใช้งานและการกำหนดระดับพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบเท่านั้นแต่ยังมีการทำแอดฟทีฟมอดูเลชัน (Adaptive modulation) การทำแอดฟทีฟมอดูเลชันคือการเปลี่ยนการทำมอดูเลชันตามค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเพื่อที่จะทำให้ลดค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลลงได้และทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นด้วย ซึ่งถ้านำแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ไปใช้ร่วมกับการทำแอดฟทีฟมอดูเลชันเข้ามาช่วย คาดว่าจะส่งผลทำให้ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่ระยะห่างระหว่างตัวส่งข้อมูลและตัวรับข้อมูลที่มีค่าดีขึ้น ในทุกรูปแบบของการจัดความถี่ใช้งาน ดังนั้นในการทำการศึกษาคู่เกี่ยวกับประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารแบบเซลลูลาร์โอเอฟดีเอ็มเอควรมีการนำการทำแอดฟทีฟมอดูเลชันเข้ามามีส่วนในการศึกษาต่อไปด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กุมภาพันธ์ 2544. เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในอนาคต. [online] Available: http://www.ku.ac.th/magazine_online/wirless.html
- [2] ไฟโรจน์ ไววานิชกิจ. เทคโนโลยีโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G กับการสื่อสารอัตราเร็วสูง. [online] Available: http://3g.siamphone.com/articles/2006/3g_wimax/002.htm
- [3] วีชี วีรคเชนทร์. การสื่อสารไร้สาย, กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2554.
- [4] Shankar, P.Mohana. **Introduction to Wireless Systems**. s.l. : John Wiley & Sons, 2002.
- [5] ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ. **หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่**, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [6] บุญชัย ศรีพลแผ้ว. “เทคโนโลยีหลักของ LTE”, MICRO COMPUTER, Vol.28, No.296, March 2010 [online] Available: <http://www.mvt.co.th/viewnews.php?cid=3&nid=383&page=3>
- [7] LTE and SAE. 2007. **An Introduction To SC-FDMA Used By LTE In Uplink Direction**. [online] Available: http://mobilesociety.typepad.com/mobile_life/2007/05/an_introduction.html
- [8] A. Peled. and A. Ruiz 1980. “Frequency Domain Data Transmission Using Reduced Computational Complexity Algorithms” **Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'80)**, Pp. 964-967
- [9] Bakker, J.D. “Eliminating the OFDM cyclic prefix” in **Proc. 13th IEEE International Symposium**, on Volume 2, 2002, Pp.834 – 837
- [10] Mathias Bohge James Grossy, Adam Wolisz. “Optimal Power Masking in Soft Frequency Reuse based OFDMA Networks” in **Proc. European Wireless Conference 2009 (EW '09)**, ISBN: 978-3-8007-3167-1, Aalborg, Denmark, May 2009, Pp.162-166
- [11] Y. Xiang and J. Luo. “Inter-cell interference mitigation through flexible resource reuse in OFDMA based communication networks” in **Proc. European Wireless 2007**, Apr. 2007, Pp.1-7
- [12] M. C. Necker. “Local interference coordination in cellular OFDMA networks” in **Proceedings of the 66th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '07)**, Baltimore, Md, USA, September-October 2007, Pp.1741-1746
- [13] S. Sezginer, H. Sari. “Full Frequency-Reuse in OFDMA-Based Wireless Networks with Sectorized cells” **WCNC 2009**, Budapest, Hungary, April 2009
- [14] A. Stolyar and H. Viswanathan. “Self-organizing dynamic fractional frequency reuse in OFDMA systems” in **Proc. IEEE INFOCOM**, Apr. 2008, Pp.691–699

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บรรจง โยสภา , สุวิพล ลิทธิชีวะภาค “การเปรียบเทียบสมรรถนะระดับกำลังส่งสัญญาณหลายวิธีของการใช้ความถี่ซ้ำแบบอ่อนในโครงข่ายการสื่อสารแบบเซลล่าที่ใช้ระบบ โอเอฟดีเอ็มเอ”, ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9 , ภูเก็ต , พฤษภาคม 2554



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9
2-3 พฤษภาคม 2554

การเปรียบเทียบสมรรถนะระดับกำลังส่งสัญญาณหลายวิธีของการใช้ ความถี่ซ้ำแบบอ่อนในโครงข่ายการสื่อสารแบบเซลล์ที่ใช้ระบบ โอเอฟดีเอ็มเอ

A Comparison of Different Transmission Power Performance in Soft Frequency Reuse based OFDMA Cellular Communication Networks

บรรจง โยสภา^{1*} สุวิพล สิทธีชีวะภาค²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

E-mail: j_yosapa@hotmail.com*

Bunjong Yosapa^{1*} Suvepon Sittichivapak²

^{1,2} Department of Telecommunications, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

E-mail: j_yosapa@hotmail.com*

บทคัดย่อ

สัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกันเป็นปัญหาหลักของการสื่อสารแบบเซลล์ที่ใช้ระบบโอเอฟดีเอ็มเอ ในบทความนี้ได้ศึกษาถึงวิธีการใช้งานทรัพยากรคลื่นความถี่ซ้ำด้านขาลงที่จะแก้ไขปัญหาสัญญาณรบกวนนี้ โดยการใช้อัตราสัญญาณวิทยุทางด้านขาลงที่มีการยืดหยุ่นได้และเปลี่ยนระดับกำลังสัญญาณให้มีความเหมาะสม เนื่องด้วยสมรรถนะของโครงข่ายระบบสื่อสารดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับการจัดความถี่ใช้งานและระดับกำลังส่งสัญญาณที่เหมาะสม ในบทความนี้จึงศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมรรถนะในแต่ละรูปแบบของระดับกำลังส่งสัญญาณของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนที่เหมาะสมในมุมมองของการกระจายกำลังส่งและการจำกัดของทรัพยากรคลื่นความถี่จากการใช้งานของผู้ใช้งานในระบบ ด้วยเหตุนี้การจัดการดังกล่าวเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดของระบบสื่อสารสามารถแสดงถึงความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่แตกต่างกันเป็นอย่างดีเห็นได้ชัด

คำหลัก ระบบโอเอฟดีเอ็มเอ, สัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกัน, ระดับกำลังส่งสัญญาณ

Abstract

Co-channel interference problem is a key issue in OFDMA-based cellular communication networks. In order to deal with this problem, several flexible radio resource reuse schemes for the downlink are examined in this paper. The performance of such networks significantly depends on the configuration of the transmission power formats of the soft frequency reuse pattern. In this paper, we investigate the performance of

different transmission power format of the soft frequency reuse pattern of configurations against the optimal case, in which a central entity optimally distributes power and resource blocks among the users of the network. It is shown that large differences exist between the block error rates and throughput of different transmission power formats.

Keywords: OFDMA, Co-channel interference, transmission power

1. บทนำ

ปัจจุบันการสื่อสารไร้สายได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการสื่อสารแบบไร้สายให้ความสะดวกสบายในการใช้งานในสถานที่ต่างๆ สำหรับแนวโน้มความต้องการใช้งานการสื่อสารแบบไร้สายในปัจจุบัน และอนาคตมีความต้องการการรับส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูงเพิ่มมากขึ้น โดยระบบการสื่อสารแบบไร้สายในยุคต่อไปที่สามารถรองรับการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูงได้อย่างเหมาะสมนั้นมีอยู่หลายระบบด้วยกัน เช่น ระบบ CDMA, ระบบ OFDMA และ อื่นๆ

ในการสื่อสารแบบไร้สายที่เป็นแบบเซลล์ที่ใช้ระบบ OFDMA นั้น จำเป็นจะต้องมีการจัดแบ่งช่องความถี่ที่ใช้งานในแต่ละตัวรับส่งสัญญาณที่เป็นแบบเซลล์ การจัดแบ่งช่องความถี่ที่ใช้งานมีความสำคัญมากกับการสื่อสารแบบเซลล์ที่ใช้ระบบ OFDMA เนื่องมาจากจะเกิดสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกัน (Co-Channel Interference: CCI) ถ้าการจัดช่องความถี่ที่ใช้งานไม่ดีพอจะทำให้บางพื้นที่ไม่สามารถใช้งานได้และบางพื้นที่คุณภาพของการใช้งานจะไม่ดีเท่าที่ควรจะเป็น จึงมีหลายวิธีการที่ลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกันนี้

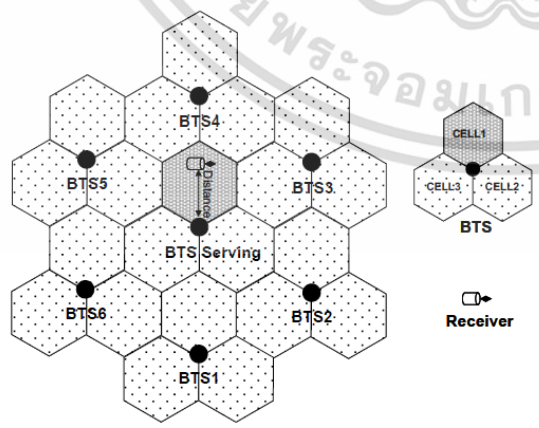
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกตัวอย่างเช่นวิธีการใช้ Frequency Hopping ,แบ่งความถี่ใช้งานออกเป็นหลายช่วงเพื่อให้ตัวส่งสัญญาณที่อยู่ใกล้เคียงกันใช้งานคนละความถี่กัน (Frequency Reuse) ตามอ้างอิงที่ [2],[5] และใช้การกำหนดให้แต่ละช่วงความถี่ที่ใช้งานสามารถที่จะส่งสัญญาณด้วยกำลังที่ต่างกันไป (Mask Power control) ตามอ้างอิงที่ [6] เพื่อเป็นการลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกัน แต่ก็ยังมีอีกสิ่งหนึ่งที่จะมีผลต่อการใช้งานว่าจะสามารถใช้งานได้ครอบคลุมพื้นที่ได้ดีเพียงก็คือกำลังส่งที่ใช้ส่งของแต่ละตัวส่ง (Transmission Power of CELL) การเพิ่มหรือลดกำลังส่งจะมีผลต่อคุณภาพและระยะทางที่สามารถใช้งานได้แต่การที่จะเพิ่มกำลังส่งให้มากขึ้นอาจจะผลเสียมากกว่าผลดีก็เป็นไปได้

ในบทความนี้ได้ให้ความสนใจกับการเปรียบเทียบคุณสมบัติของการจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนในการสื่อสารแบบไร้สายที่เป็นแบบเซลล์ลู่ล่าที่ใช้ระบบ OFDMA ในมุมมองที่กำลังส่งของตัวส่งเปลี่ยนแปลงไป การเพิ่มหรือลดกำลังส่งของตัวส่ง ส่งผลอย่างไรกับระบบโดยรวม มีความคุ้มค่ากับการเพิ่มกำลังหรือไม่

2. การสื่อสารแบบไร้สายที่เป็นแบบเซลล์ลู่ล่าที่ใช้ระบบ OFDMA

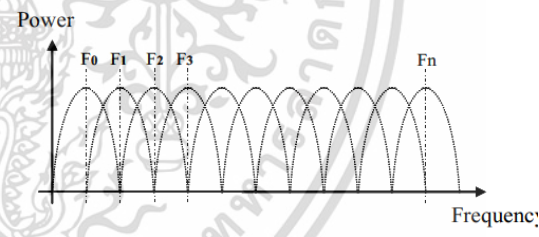
การสื่อสารแบบไร้สายที่เป็นแบบเซลล์ลู่ล่าที่ใช้ระบบ OFDMA ที่ใช้ในการพิจารณานั้นแสดงดังรูปที่ 1 จะเห็นว่ามีการรับส่งข้อมูลทั้งหมด 7 ชุด (7 BTS) แต่ละชุดของตัวรับส่งมีตัวรับส่งย่อยอีก 3 ตัว (3 CELL) ตัวรับย่อยแต่ละจะส่งข้อมูลไปใน 3 ทิศทางดังแสดงในรูปที่ 1 แต่เราให้ความสนใจคือตัวรับส่งย่อยที่ 1(CELL1) ของตัวรับส่งหลัก (BTS Serving) ที่อยู่ตรงกลางของตัวรับส่งทั้งหมดว่าถ้าเราใช้งานตัวส่งข้อมูลย่อยตัวนี้รับส่งข้อมูลกับตัวรับและทำการเพิ่มหรือลดระดับกำลังส่งสัญญาณของตัวส่งข้อมูลให้เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลอย่างไรกับคุณภาพของการรับส่งข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างตัวรับและตัวส่งข้อมูลเปลี่ยนแปลงไปด้วย



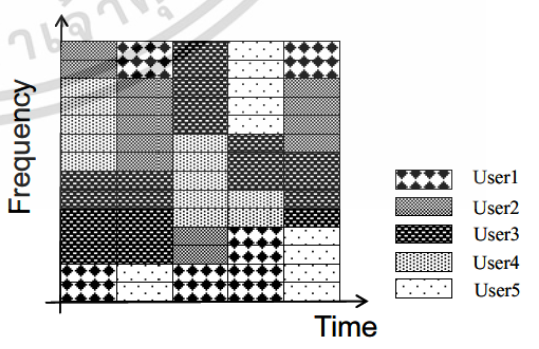
รูปที่ 1 รูปแบบระบบสื่อสารไร้สายแบบเซลล์ลู่ล่าที่ใช้ในการจำลอง

การสื่อสารแบบไร้สายที่เป็นแบบเซลล์ลู่ล่าที่ใช้ระบบ OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) ซึ่งระบบ OFDMA เป็นการส่งข้อมูลที่ใช้เทคนิคของระบบ OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiple) ซึ่งเป็นเทคนิคการส่งข้อมูลแบบขนานโดยข้อมูลจะถูกส่งออกแบบขนานไปพร้อมกันในหลายความถี่ โดยที่ความถี่แต่ละความถี่ต้องมีคุณสมบัติตั้งฉากซึ่งกันและกัน สำหรับเทคนิคของระบบ OFDM แสดงดังในรูปที่ 2 จะเห็นว่าความถี่ F0 ตั้งฉากกับ F1 จนถึง Fn และความถี่อื่นๆ ตั้งฉากซึ่งกันและกันทุกความถี่ ซึ่งดูได้จากจุดที่พลังงานของความถี่ F0 มีค่าสูงที่สุดจะตรงกับจุดที่พลังงานของความถี่อื่นเป็นศูนย์เสมอ

ระบบ OFDM เป็นระบบที่สามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนแบบสัญญาณรบกวนที่มาจากสัญญาณเดียวกัน (Inter-Symbol Interference :ISI) และสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่ข้างเคียง (Inter-Carrier Interference :ICI) โดยการใช้วิธีการเพิ่มช่องสัญญาณป้องกัน (Cyclic Prefix : CP) ตามอ้างอิงที่ [1] เข้าไปทำให้สามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนลงไปได้ ส่วนระบบ OFDMA ที่นำระบบ OFDM มาใช้งานเพื่อให้สามารถที่จะส่งข้อมูลไปยังผู้รับหลายคนในเวลาเดียวกันโดยการแบ่งช่องความถี่ออกเป็นหลายกลุ่มย่อยเพื่อให้แต่ละคนแบ่งกันใช้งาน ดังแสดงตามรูปที่ 3 แสดงการแบ่งช่องความถี่ใช้งานของระบบ OFDMA เมื่อมีจำนวนข้อมูลของผู้รับหลายชุดข้อมูลที่จะส่งออกไประบบสามารถที่จะแบ่งช่องความถี่ที่ส่งออกเป็นช่องสัญญาณย่อยๆ เพื่อให้ข้อมูลของผู้รับแต่ละคนสามารถที่จะส่งออกไปได้ในเวลาเดียวกันได้



รูปที่ 2 ช่องความถี่ของระบบ โอเอฟดีเอ็ม

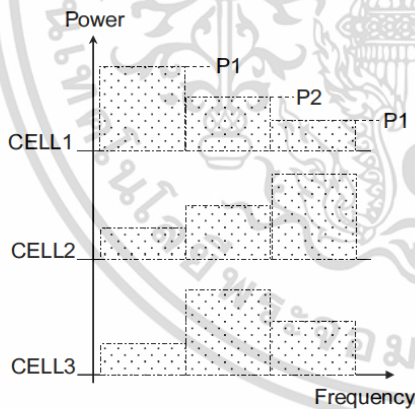


รูปที่ 3 ตัวอย่างการแบ่งช่องความถี่ออกเป็นหลายกลุ่มย่อยเพื่อให้แต่ละคนแบ่งกันใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นกับการสื่อสารแบบไร้สายที่เป็นแบบเซลลูลาร์ที่ใช้ระบบ OFDMA ก็คือสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกัน (Co-Channel Interference: CCI) ซึ่งระบบ OFDMA ไม่สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนแบบนี้ได้ การแก้ปัญหาที่สัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกันจะต้องใช้วิธีการจัดการความถี่ใช้งานให้แต่ละตัวรับส่งข้อมูลย่อยของแต่ละชุดรับส่งข้อมูลที่อยู่ข้างเคียงที่มีพื้นที่การใช้งานที่เป็นพื้นที่เดียวกันให้ใช้งานคนละความถี่จะสามารถทำให้ลดปัญหาสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกันให้ลดลงไปได้แต่ช่วงกำลังส่งสัญญาณของตัวส่งข้อมูลก็มีผลกับการแก้ปัญหาการนี้เช่นกันเนื่องจากถ้าเราส่งข้อมูลด้วยกำลังส่งที่ต่ำเกินไปอาจจะทำให้คุณภาพของการรับส่งข้อมูลไม่ดีเท่าที่ควร แต่ถ้าเพิ่มกำลังมากเกินไปอาจจะเกิดสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเหตุการณ์ การส่งสัญญาณข้ามตัวส่งสัญญาณ (CELL Overshoot) หมายถึงว่าตัวส่งได้ส่งสัญญาณข้อมูล ส่งข้อมูลด้วยกำลังส่งที่มากเกินไปทำให้สัญญาณส่งออกไปข้ามไปรบกวนตัวส่งสัญญาณที่อยู่ถัดไปนั่นเอง

การจัดการความถี่ใช้งานแต่ละแบบก็มีความแตกต่างกันไป โดยวิธีการจัดการความถี่แบ่งออกได้เป็นหลายแบบ เช่น การจัดการความถี่แบบใช้ความถี่เดียว (Uniform Frequency Reuse) การจัดการความถี่แบบแข็ง (Hard Frequency Reuse: HFR) การจัดการความถี่แบบแบ่งสัดส่วน (Fractional Frequency Reuse: FFR) และการจัดการความถี่แบบอ่อน (Soft Frequency Reuse: SFR) การจัดการความถี่ใช้งานที่น่าสนใจและสามารถให้ประสิทธิภาพที่ดีก็คือการจัดการความถี่ใช้งานแบบอ่อนและการจัดการความถี่ใช้งานแบบอ่อนแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การจัดการความถี่แบบอ่อน

การจัดการความถี่แบบอ่อน (Soft Frequency Reuse: SFR) คือการจัดการความถี่ใช้งานโดยให้แต่ละทิศทางของตัวส่งสัญญาณสามารถใช้งานความถี่ได้เท่ากันได้แต่ใช้วิธีการจำกัดกำลังส่งของแต่ละความถี่ให้ไม่เท่ากันเพื่อจะลดสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้นได้ดูตามรูปที่ 4

เมื่อให้ความสนใจที่ตัวรับส่งย่อยที่ 1 ของตัวรับส่งข้อมูลหลักและใช้การจัดการความถี่แบบอ่อน จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าในแต่ละช่วง

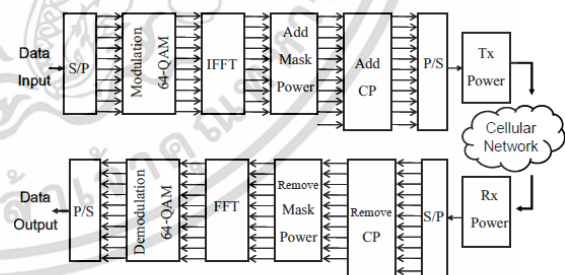
ความถี่ของตัวรับส่งย่อยที่ 1 มีระดับความแรงไม่เท่ากันโดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ P1, P2, P3 (สูง, กลาง, ต่ำ) ซึ่งแสดงได้ว่าช่วงความถี่ของตัวรับส่งย่อยที่ 1 จะมีสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกันที่มาจาก ตัวรับส่งย่อยที่ 1, 2 และ 3 ของตัวรับส่งข้อมูลหลักอื่นๆ (BTS1, 2, 3, 4, 5, 6) ที่มีความแรงไม่เท่ากัน เมื่อตัวรับข้อมูล (Receiver) อยู่ตรงกลางระหว่างตัวรับส่งข้อมูลหรือเรียกอีกอย่างคือขอบตัวรับส่งย่อย (CELL edge) ตัวรับข้อมูลจะยังสามารถรับข้อมูลมาจากตัวรับส่งย่อยที่ 1 ของตัวรับส่งข้อมูลหลักได้เนื่องจากช่องความถี่แรกๆของตัวรับส่งย่อยที่ 1 มีกำลังส่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับช่องความถี่แรกๆของตัวรับส่งย่อยที่ 2 และ 3 ดังนั้นจากที่กล่าวมาจึงทำให้เห็นว่าการจัดการความถี่ใช้งานแบบอ่อนสามารถที่จะลดการเกิดปัญหาสัญญาณรบกวนที่มาจากความถี่เดียวกันได้และเมื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวนได้จึงทำให้ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูล (BLER) มีความค่าที่ดีขึ้นตามไปด้วย

ในบทความได้ทำการจำลองการจัดการความถี่ในแบบอ่อนขึ้นโดยมีกระบวนการตามบล็อกไดอะแกรมตามหัวข้อต่อไปและได้ทำการเพิ่มระดับกำลังส่งสัญญาณของตัวส่งข้อมูลให้มีค่ามากขึ้นไปเรื่อยๆ เพื่อที่จะดูผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบโดยรวมว่าจะมีแนวโน้มเป็นอย่างไรและทำการเปรียบเทียบข้อมูลข้อดีข้อเสียว่าถ้าทำการเพิ่มกำลังส่งมากขึ้นเพียงใดจึงจะเพียงพอกับการใช้งานที่เหมาะสมและไม่ได้เพิ่มกำลังส่งของตัวส่งข้อมูลให้มากเกินไปจน

3. แบบจำลองระบบ

3.1 การออกแบบการจำลองการสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์ที่ใช้ระบบ OFDMA

การออกแบบการจำลองการสื่อสารไร้สายแบบเซลลูลาร์ที่ใช้ระบบ OFDMA แสดงในรูปที่ 3 ตามบล็อกไดอะแกรม



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้ OFDMA

3.2 บล็อกกำเนิดข้อมูลและบล็อกการเก็บข้อมูล (Data Input and Data Out)

บล็อกกำเนิดข้อมูลเป็นตัวสร้างข้อมูลเพื่อที่จะส่งข้อมูลให้กับชุดอื่นถ้าจะเปรียบเทียบกับระบบจริงข้อมูลก็เช่น เสียง ภาพ ข้อมูลต่างๆ การกำเนิดข้อมูลในการจำลองระบบจะกำเนิดเป็นข้อมูลที่มี

สามารถใช้แทนข้อมูลต่างๆได้หลายแบบจึงเลือกกำเนิดแบบดิจิตอล อย่างเดียว คือ 1, 0 เท่านั้น เนื่องจากข้อมูลทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นเสียงหรือข้อมูลต่างๆต้องแปลงให้อยู่ในรูปแบบดิจิตอลก่อนที่ส่งข้อมูลอยู่แล้ว

บล็อกเก็บข้อมูลเป็นการเก็บข้อมูลที่ได้รับจากภาครับเพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ออกจากชุดกำเนิดข้อมูลเพื่อที่จะหาค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ผ่านเข้าไปในระบบการจำลอง

3.3 บล็อกแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนานและบล็อกแปลงข้อมูลขนานเป็นข้อมูลอนุกรม (S/P and P/S)

บล็อกแปลงข้อมูลอนุกรมเป็นข้อมูลขนาน เป็นการเปลี่ยนข้อมูลแบบอนุกรมให้เป็นข้อมูลแบบขนานโดยหลักการคือนำข้อมูลที่เข้ามาจนครบจำนวนข้อมูลแล้วค่อยปล่อยข้อมูลออกไปพร้อมๆกันเป็นขนานกันในครั้งเดียว

บล็อกข้อมูลขนานเป็นข้อมูลอนุกรม เป็นการเปลี่ยนข้อมูลที่เข้ามาแบบขนานให้ออกไปเป็นข้อมูลแบบอนุกรม โดยการที่เข้าที่เข้ามาแบบขนานกลับข้อมูลแบบจะต้องใช้เวลาในการส่งเท่ากันจึงทำให้ความถี่ของข้อมูลแบบอนุกรมจึงเป็นข้อมูลที่มีความเร็วของข้อมูลที่เร็วกว่าข้อมูลของแต่ละช่องข้อมูลของข้อมูลแบบขนาน

3.4 บล็อกมอดูเลชัน และ บล็อกดีมอดูเลชัน (Modulation and Demodulation)

บล็อกมอดูเลชัน เป็นบล็อกที่เปลี่ยนข้อมูลแบบดิจิตอลให้เป็นรูปแบบข้อมูลแบบสัญญาณ การ Modulation มีอยู่หลายชนิด เช่น BPSK 8-PSK QPSK 16QAM 64QAM อื่นๆ ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้งาน

บล็อกดีมอดูเลชัน เป็นบล็อกที่ทำการเปลี่ยนข้อมูลที่รับสัญญาณให้เป็นข้อมูลแบบดิจิตอล

3.5 บล็อกการแปลงกลับเร็วแบบฟูริเยร์ และบล็อกการแปลงเร็วแบบฟูริเยร์ (IFFT and FFT)

การอธิบายทางคณิตศาสตร์ของการแปลงเร็วแบบฟูริเยร์ (FFT) [6], [7] แสดงได้โดย สมการที่ (1) ถึง สมการที่ (2)

การแปลงเร็วแบบฟูริเยร์แบบมิติเดียว อธิบายด้วยสมการ

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{nk}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

และการแปลงกลับเร็วแบบฟูริเยร์ อธิบายด้วยสมการ

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k]W_N^{-nk}, \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

ที่ $W_N = e^{-j2\pi/N}$ นี้คือตัวประกอบขยเล็กการบิด

3.6 บล็อกจำกัดกำลังส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย และบล็อกการชดเชยกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย (Add Mask Power Control and Remove Mask Power Control)

บล็อกจำกัดกำลังส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย คือบล็อกที่เป็นตัวจำกัดกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยให้กำลังแต่ละช่องสัญญาณย่อยมีกำลังส่งที่เหมาะสมกับการใช้งานตามรูปที่ 1. ได้แสดงถึงกำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อยมีกำลังส่งไม่เท่ากัน

บล็อกการชดเชยกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย คือบล็อกที่ทำหน้าที่คอยปรับกำลังส่งจะหายไปจากการจำกัดให้มีค่ากลับมาเท่าเดิมเพื่อนำไปใช้งาน

3.7 บล็อกนำเข้าสู่สัญญาณป้องกันและบล็อกลบออกสัญญาณป้องกัน (Add CP and Remove CP)

บล็อกนำเข้าสู่สัญญาณป้องกันเป็นบล็อกนำค่าสัญญาณป้องกันเข้าไปรวมกับสัญญาณที่จะส่งออกไปโดยการตัดข้อมูลด้านท้ายของข้อมูลที่ส่งนำมาต่อต้านหน้าของชุดข้อมูลเพื่อเป็นการป้องกันสัญญาณรบกวน

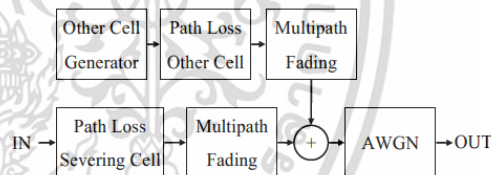
บล็อกลบออกสัญญาณป้องกันเป็นการลบข้อมูลที่ถูกนำเข้าไปเป็นสัญญาณป้องกันออกก่อนที่จะนำข้อมูลไปใช้งาน

3.8 บล็อกส่งสัญญาณและบล็อกรับสัญญาณ (Tx Power and Rx Power)

บล็อกส่งสัญญาณเป็นบล็อกที่นำสัญญาณมาทำการเพิ่มกำลังส่งให้ได้ค่าตามที่เรากำลังจะส่ง

บล็อกรับสัญญาณเป็นบล็อกที่นำสัญญาณที่ผ่านช่องสัญญาณแบบเซลล์แล้วมาทำการชดเชยค่ากำลังส่งให้มีค่าเป็นปกติ

3.9 ช่องสัญญาณแบบแบบเซลล์คู่



รูปที่ 6 บล็อกไออะแกรมแบบจำลองช่องสัญญาณแบบแบบเซลล์คู่

ช่องสัญญาณแบบแบบเซลล์คู่ เป็นการสร้างการสูญเสียของสัญญาณที่เกิดขึ้นในระบบ สัญญาณรบกวนต่างๆจะถูกรวมเข้ามาในส่วนนี้ สัญญาณที่มาจากตัวส่งอื่นก็ถือว่าเป็นสัญญาณรบกวนอีกชนิดหนึ่ง ในส่วนนี้จะเป็นการสร้างสัญญาณที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับตัวส่งข้อมูลหลักแต่จะต่างกันที่ข้อมูลที่เข้า จะเป็นข้อมูลที่ไม่เหมือนกันและนำสัญญาณที่มาจากจุดส่งข้อมูลต่างๆมารวมกัน

4. วิธีการจำลองแบบและค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองแบบ

วิธีการจำลองแบบ ทำการสร้างสัญญาณตามรูปที่ 3 และค่าพารามิเตอร์ของการจำลองจากตารางที่ 1 ใช้การจัดความถี่ใช้งานแบบอ่อนตามรูปที่ 4 ทำการกำหนดค่าระดับกำลังส่งสัญญาณโดยการเปลี่ยนค่า P1,P2,P3 ตามตารางที่ 2 และทำการเพิ่มระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณหลัก (BTS Serving) กับตัวรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ (Receiver) ให้ออกห่างกันในทิศทางของตัวส่งที่ 1 (CELL1) ไปยังตัวส่งสัญญาณที่ 4 (BTS4) ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อเพิ่มระยะทางทำให้สัญญาณที่มาจากตัวส่งสัญญาณหลังจกานลดทอน (Path Loss) ลงไปและทำให้ระดับสัญญาณของตัวส่งอื่นมีระดับสัญญาณที่แรงขึ้นมาทำให้สัญญาณที่รับได้จากตัวส่งหลักมีการรบกวนเกิดขึ้นและผ่านช่องสัญญาณแบบเฟสคั้งหลายทั้งทาง (Multipath Fading) จึงสามารถที่จะหาค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูล (BLER) และความเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) เปรียบเทียบกับระยะทางได้

ทำการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังส่งของตัวส่งสัญญาณหลายๆตามตารางที่ 2 คำนามาสรางกราฟเปรียบเทียบกันระหว่าง ความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางและเปรียบเทียบแต่ละระดับกำลังส่งสัญญาณว่าเป็นอย่างไร

ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองแบบ จากวิธีการจำลองดังกล่าวจึงได้มีการกำหนดจุดรับส่งสัญญาณให้มี 7 จุดส่ง (7 BTS) แต่ละจุดส่งมี 3 ทิศทาง (3 CELL) ทั้ง 7 จุดส่งอยู่ห่างกัน 1500 เมตรเป็นแบบเซลล์ลู่

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองระบบโอเอพีดีเอ็ม

Parameter	Value
Frequency	2.1 GHz
Bandwidth	15 MHz
Number of Sub Channel	768
Sub Channel space	15 KHz
Number of Transmitter (BTS)	7
Distance between transceiver	1500 m
Number of Transmitter Direction (ELL)	3

ตารางที่ 2 ระดับกำลังสัญญาณในแต่ละแบบ

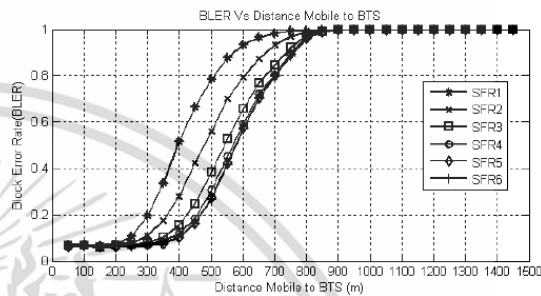
Frequency Reuse	P1	P2	P3
SFR1	37dBm.	34dBm.	31dBm.
SFR2	40dBm.	37dBm.	34dBm.
SFR3	43dBm.	40dBm.	37dBm.
SFR4	46dBm.	43dBm.	40dBm.
SFR5	49dBm.	46dBm.	43dBm.
SFR6	52dBm.	49dBm.	46dBm.

5. ผลการจำลองแบบ

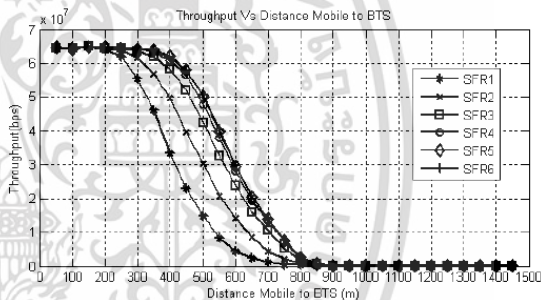
จากผลการจำลองสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทาง และกราฟค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทางในแต่ละระดับกำลังสัญญาณ จากกราฟทั้ง 2 กราฟ สามารถที่จะนำค่ามาทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างการเปลี่ยนของกำลังส่งสัญญาณที่

เพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับความเร็วในการส่งข้อมูลและค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไปอีกด้วย

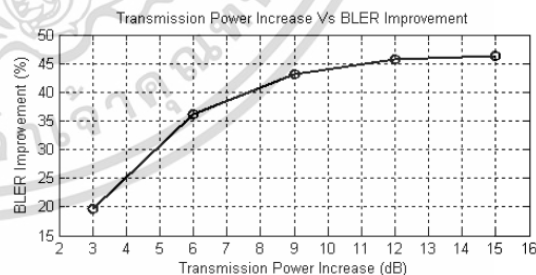
จากรูปที่ 7 และ 8 พบว่าการเมื่อระยะทางระหว่างตัวส่งสัญญาณหลักกับตัวรับสัญญาณยิ่งเพิ่มมากขึ้นค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลก็เพิ่มมากขึ้นตามระยะทางไปด้วยและในทางเดียวกันเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้นค่าความเร็วของการส่งข้อมูลก็ลดลงตามการเพิ่มของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูล



รูปที่ 7 ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทาง



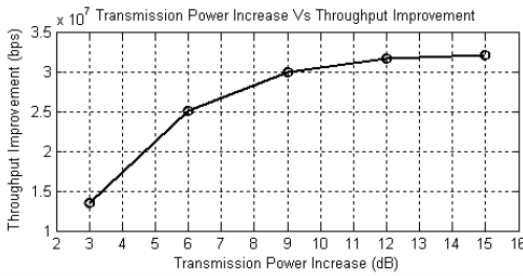
รูปที่ 8 ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลเปรียบเทียบกับระยะทาง



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของระดับกำลังส่งสัญญาณเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูล

รูปที่ 9 และ 10 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบการเพิ่มของระดับกำลังส่งสัญญาณกับการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการส่งข้อมูลโดยที่ค่าที่ใช้ในการสร้างกราฟสร้างมาจากกรณำค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลที่ระยะทางระหว่าง 450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของระดับกำลังสัญญาณเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในการส่งข้อมูลข้อมูล

เมตร ถึง 600 เมตร มาทำการเฉลี่ยกันเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นภาพรวมของระบบส่วนการเปลี่ยนแปลงของระดับกำลังสัญญาณนั้นหา มาจากตารางที่ 2 มาหาค่าที่เพิ่มขึ้นของระดับกำลังสัญญาณแต่ละแบบโดยนับจากค่าที่น้อยที่สุดเป็นตัวตั้ง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าระดับกำลังสัญญาณในระดับต่างกันไปพบวาเมื่อเพิ่มระดับกำลังสัญญาณให้แรงขึ้นดูเหมือนว่าค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลดูเหมือนจะดีขึ้นแต่เมื่อเพิ่มระดับกำลังสัญญาณมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งแล้วพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลกลับไม่ดีขึ้นตามการเพิ่มของระดับกำลังสัญญาณอีกแล้ว ดังแสดงตามรูปที่ 9 และ 10 จากรูปที่ 7 และ 8 แสดงให้เห็นว่าระดับกำลังสัญญาณแบบ SFR4 มีค่าที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ SFR5 และ SFR6 ถึงแม้ว่า SFR5 และ SFR6 จะมีระดับกำลังที่มากกว่า SFR4 แต่ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลกลับไม่เพิ่มตามระดับกำลังสัญญาณแต่อย่างใด ดังแสดงตามรูปที่ 9 และ 10 จึงทำให้เห็นได้ว่าระดับกำลังสัญญาณแบบ SFR4 มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

6. สรุป

จากผลการจำลองระบบพบว่าการเพิ่มระดับกำลังสัญญาณทำให้ค่าความผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลมีแนวโน้มที่ดีขึ้นแต่ถ้าเพิ่มมากเกินไปจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนมาจากเหตุการณ์การส่งสัญญาณข้ามตัวส่งสัญญาณทำให้การเพิ่มระดับกำลังสัญญาณที่มากเกินไปจนความจำเป็น

ไม่ได้ทำให้ค่าผิดพลาดของบล็อกข้อมูลและค่าความเร็วในการส่งข้อมูลมีค่าที่ดีขึ้นตามการเพิ่มของระดับกำลังสัญญาณเลย

ดังนั้นการเลือกใช้ระดับกำลังสัญญาณจึงควรเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งานไม่ควรเลือกใช้ระดับกำลังสัญญาณที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ก็เกิดพ่อแม่เพื่อนร่วมงานที่คอยให้กำลังใจและอาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้คำแนะนำสำหรับการทำ งานวิจัยนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bakker, J.D., "Eliminating the OFDM cyclic prefix," in Proc. 13th IEEE International Symposium on Volume 2 2002: 834 – 837.
- [2] Y. Xiang and J. Luo, "Inter-cell interference mitigation through flexible resource reuse in OFDMA based communication networks," in Proc. European Wireless 2007, Apr. 2007:1-7.
- [3] M. C. Necker, "Local interference coordination in cellular OFDMA networks," in Proceedings of the 66th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '07), Baltimore, Md, USA, September-October 2007: 1741-1746.
- [4] A. Stolyar and H. Viswanathan, "Self-organizing dynamic fractional frequency reuse in OFDMA systems," in Proc. IEEE INFOCOM, Apr. 2008: 691-699.
- [5] S. Sezginer, H. Sari, "Full Frequency-Reuse in OFDMA-Based Wireless Networks with Sectored cells", WCNC 2009, Budapest, Hungary .April 2009.
- [6] Mathias Bohge James Grossy, Adam Wolisz , "Optimal Power Masking in Soft Frequency Reuse based OFDMA Networks" in Proc. European Wireless Conference 2009 (EW '09), ISBN: 978-3-8007-3167-1, Aalborg, Denmark, May 2009:162-166.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายบรรจง โยสภา
วัน เดือน ปีเกิด 23 กันยายน 2524 ที่จังหวัดร้อยเอ็ด
ที่อยู่ 226 หมู่ที่ 11 หมู่บ้านหนองตอ ตำบลหัวช้าง
อำเภอจตุรพักตรพิมาน จังหวัดร้อยเอ็ด 45180 โทร. 081-839-2226
ประวัติการศึกษา 2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
(เกียรตินิยมอันดับ1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณบุรี
ความชำนาญเฉพาะด้าน

1. ระบบโทรคมนาคม
2. ระบบโทรศัพท์มือถือ GSM/WCDMA

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2554

นำเสนอผลงาน “การเปรียบเทียบสมรรถนะระดับกำลังส่งสัญญาณหลายวิธี
ของการใช้ความถี่ซ้ำแบบอ่อนในโครงข่ายการสื่อสารแบบเซลล่าที่ใช้ระบบ โอ
เอฟดีเอ็มเอ” ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้