

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การศึกษาระบบ OFDMA
STUDY ON ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION
MULTIPLE ACCESS SYSTEM**



**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION
MULTIPLE ACCESS SYSTEM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ Study On Orthogonal Frequency Division Multiple Access System (OFDMA)

ชื่อนักศึกษา นาย นรงค์ฤทธิ์ งามยิ่ง รหัสประจำตัว 49015455

นาย นฤพงษ์ อัมพรพงษ์ รหัสประจำตัว 49015456

นาย วันชัย ยุพดี รหัสประจำตัว 49015463

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. จักรี ทิมภาคย์วิศิษฏ์

ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ

ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ

ปีการศึกษา 2551

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

(ดร. จักรี ทิมภาคย์วิศิษฏ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาระบบ OFDMA		
ชื่อนักศึกษา	นายนรฤทธิ งามยิ่ง	รหัสนักศึกษา	49015455
	นายนฤพงศ์ อัมพรพงษ์	รหัสนักศึกษา	49015456
	นายวันชัย ยุพดี	รหัสนักศึกษา	49015463
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. จักรี ทิมภาคย์วิศิษฏ์		
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ		
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ		
ปีการศึกษา	2551		

บทคัดย่อ

ในอนาคตรับการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย จะต้องมีความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูงและรับรองการใช้งานของผู้ใช้ได้หลายคน

เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลดังกล่าว จึงได้นำระบบ OFDMA มาศึกษาทฤษฎีและหลักการ โดยพัฒนามาจากระบบ OFDM-MIMO โดยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลให้สามารถใช้งานได้หลายผู้ใช้ โดยการนำโปรแกรม MATLAB เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณ อัตราความผิดพลาด และ อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDM-MIMO และ OFDMA

Thesis Title STUDY ON ORTHOGONAL FREQUENCY
DIVISION MULTIPLEXING ACCESS SYSTEM

Student MR.Narongrid Ngamyng ID. 49015455
MR.Naruepong Ampornpong ID. 49015456
MR.Wanchai Yuppadee ID. 49015463

Advisor Dr. Chakree Teekapakvisit

Graduate Level Bachelor Degree of Information Engineering

Department Information Engineering

Academic Year 2008

ABSTRACT

Next generation wireless communication system requires a high data rate and supports a number of active users in the system

To archive such requirement Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA) based on Orthogonal Frequency Division Multiplexing System with a combination of Multiple Input Multiple Output (MIMO) is studied. MATLAB program is used to simulate the performance of the system are shown.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลงได้ โดยได้รับความกรุณาและความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก
หลายๆ ฝ่ายซึ่งคณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วม แนะนำและช่วยเหลือในการทำ
โครงการนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ดร.จักรี ทิมภาคย์วิศิษฏ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรที่ได้เสียสละเวลา
ให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ จึงทำให้การทำปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วง
ไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และอาจารย์ผู้มีพระคุณ รวมถึงเพื่อนๆทุกคน ที่ให้การ
สนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากโครงการนี้ ทาง
ผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่อค่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหาในการทำโครงการ	1
1.2 จุดประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความเป็นมาของ OFDM	3
2.1.1 ความหมายของ OFDM	4
2.1.2 การมัลติเพล็กซ์แบบ OFDM	7
2.1.3 Orthogonality	15
2.1.4 ช่วงเวลาป้องกัน	16
2.1.5 ช่วงเวลาคูมและส่วนหน้าแบบวน	17
2.1.6 การซิงโครไนซ์ (Synchronization)	20
2.1.7 ระบบ OFDM	22
2.1.7.1 ข้อดีของ OFDM	23
2.1.7.2 ข้อเสียของ OFDM	24
2.1.7.3 การประมาณค่าสัญญาณ	24
2.2 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)	25
2.2.1 MIMO Capacity	25
2.2.2 MIMO Encoding	25
2.2.3 ข้อดีของ MIMO	28
2.2.4 ข้อเสียของ MIMO	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.3	คุณลักษณะทางการแพร่ของช่องสัญญาณ	29
2.3.1	การลดทอน	29
2.3.2	การแผ่กว้างของการประวิง	35
2.3.3	การเคลื่อนไปของดอปเปลอร์ (Doppler Shift)	35
2.3.4	White Gaussian noise	36
2.3.5	AWGN Channel Block	37
2.4	Fast Fourier Transform (FFT)	37
2.4.1	Discrete Fourier Transform	38
2.4.2	ทฤษฎี Fast Fourier Transform	39
2.5	การแปลงผกผันฟูเรียร์แบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform)	40
2.6	เทคโนโลยี OFDMA	42
บทที่ 3	การออกแบบโครงงาน	44
3.1	หลักการออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDM	44
3.1.1	หน้าที่การทำงานในแต่ละส่วน	44
3.1.1.1	ภาคส่ง (Transmitter)	44
3.1.1.2	ภาครับ (Receiver)	45
3.2	ออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDM รวมเข้ากับระบบ MIMO	45
3.2.1	ออกแบบทางภาคส่ง	45
3.2.2	ออกแบบทางภาครับ	46

สารบัญ (ต่อ)

3.3	หลักการออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDMA	47
3.3.1	หน้าที่การทำงานในแต่ละส่วนของระบบ OFDMA	48
3.3.1.1	ภาคส่ง (Transmitter)	48
3.3.1.2	ภาครับ (Receiver)	48
3.4	ออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDMA	49
3.4.1	ออกแบบทางภาคส่ง	49
3.4.2	ออกแบบทางภาครับ	50
บทที่ 4	ผลการทดลอง	52
4.1	การทดลองที่ 1 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบ OFDM แบบ MIMO โดยมีจำนวนการวนซ้ำปรับค่าได้ที่เท่ากัน	52
4.1.1	จุดประสงค์การทดลองระบบ OFDM	52
4.1.2	ขั้นตอนการทดลองระบบ OFDM	53
4.2	การทดลองที่ 2 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 2 ยูเซอร์ โดยมีจำนวนการวนซ้ำปรับค่าได้ที่เท่ากัน	54
4.2.1	จุดประสงค์การทดลองระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 2 ยูเซอร์	54
4.2.2	ขั้นตอนการทดลองระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 2 ยูเซอร์	54
4.3	การทดลองที่ 3 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 4 ยูเซอร์ โดยมีจำนวนการวนซ้ำปรับค่าได้ที่เท่ากัน	55
4.3.1	จุดประสงค์การทดลองระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 4 ยูเซอร์	56
4.3.2	ขั้นตอนการทดลองระบบ OFDMA	56

สารบัญ (ต่อ)

4.4 การทดลองที่ 4 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบ OFDMA แบบการส่ง พร้อมกัน 8 ยูเซอร์ โดยมีจำนวนการวนซ้ำปรับค่าได้ที่เท่ากัน	57
4.4.1 จุดประสงค์การทดลองระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 8 ยูเซอร์	57
4.4.2 ขั้นตอนการทดลองระบบ OFDMA	57

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง	59
5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ	60
เอกสารอ้างอิง	61



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของ MCM	4
รูปที่ 2.2 ความแตกต่างระหว่างการสื่อสารแบบ Single Carrier Mode กับ OFDM	6
รูปที่ 2.3 OFDM เปรียบเทียบกับการสื่อสารแบบ Spread Spectrum ชนิด Single Carrier Mode	7
รูปที่ 2.4 การมัลติเพล็กซ์แบบ โอเอฟดีเอ็ม	8
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของ OFDM spectrum, (a) single subchannel, (b) 5 carriers	9
รูปที่ 2.6 FDM carrier	10
รูปที่ 2.7 Bit stream ซึ่งจะถูกรวมอดูเลต โดยใช้ OFDM ซึ่งมี 4 carriers	10
รูปที่ 2.8 Sub-carrier 1 และบิตที่มอดูเลต (คอลัมน์ที่ 1 จากตารางที่ 2.1)	11
รูปที่ 2.9 Sub-carrier 2 และบิตที่มอดูเลต (คอลัมน์ที่ 2 จากตารางที่ 2.1)	12
รูปที่ 2.10 Sub-carrier 3 และ 4 และบิตที่มอดูเลต (คอลัมน์ที่ 3 และ 4 จากตารางที่ 2.1)	12
รูปที่ 2.11 การมอดูเลตสัญญาณ OFDM	13
รูปที่ 2.12 ความถี่หลังมอดูเลต	13
รูปที่ 2.13 OFDM ใน time และ frequency domain	14
รูปที่ 2.14 Function diagram ของการสร้างสัญญาณ OFDM	15
รูปที่ 2.15 สัญญาณ OFDM ที่ถูกสร้างขึ้นมา	15
รูปที่ 2.16 การส่งส่วนขยายแบบย้อนกลับในช่วงเวลาป้องกัน	17
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างสัญญาณ OFDM ที่ได้รับจากช่องสัญญาณแบบหลายทิศทาง	17
รูปที่ 2.18 ผลกระทบที่เกิดจากการประวิงหลายวิธีที่ออกนอกเหนือเวลาคุม	19
รูปที่ 2.19 สัญลักษณ์ OFDM กับการขยายส่วนหน้าแบบวน	19
รูปที่ 2.20 กราฟแสดงผลของการแผ่กว้างของประวิงแบบหลายทิศทาง	20
รูปที่ 2.21 โครงสร้างชุดข้อมูล OFDM	22
รูปที่ 2.22 บล็อกไดอะแกรมของระบบ OFDM	23
รูปที่ 2.23 สถาปัตยกรรม MIMO	25
รูปที่ 2.24 MIMO system block diagram	26
รูปที่ 2.25 กราฟแสดงผลของการสูญเสียทิศทางที่มีต่อสัญญาณ	29
รูปที่ 2.26 กราฟแสดงผลของการสูญเสียทิศทางและการบดบังที่มีต่อสัญญาณ	30
รูปที่ 2.27 กราฟแสดงผลของการหายแบบเรย์ลีเมื่อ Mobile Unit มีการเคลื่อนที่	31

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 2.28 โครงสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิธีตามแบบของเจ็ค	32
รูปที่ 2.29 สเปกตรัมความถี่ของออสซิลเลเตอร์สำหรับกรณี $0=8$ และ $N=34$	33
รูปที่ 2.30 การเกิดคอปเปอเรอร์	35
รูปที่ 2.31 สัญญาณรบกวนแบบ white noise	36
รูปที่ 2.32 คุณสมบัติของสัญญาณรบกวนแบบขาววอก	37
รูปที่ 2.33 หลักการพื้นฐานในการนำ IFFT และ FFT มาใช้งานกับระบบ OFDM	38
รูปที่ 2.34 การเปลี่ยนรูปจากสัญญาณโดเมนเวลาเป็นสเปกตรัมความถี่โดยใช้ FFT	38
รูปที่ 2.35 Discrete Fourier Transform	39
รูปที่ 2.36 การหาค่า 8 จุดฟาสฟูเรียร์ทรานฟอร์ม	39
รูปที่ 2.37 การหาค่า 8 จุดฟาสฟูเรียร์ทรานฟอร์ม	40
รูปที่ 2.38 สัญญาณเชิงซ้อนโดเมนความถี่ จำนวน $2N$ สัญญาณ ถูกแปลงฟูเรียร์ผกผัน (IFFT) ขนาด $2N$ จุด ทำให้ได้เป็น สัญญาณจริงโดเมนเวลา $2N$ สัญญาณ	41
รูปที่ 2.39 การมอดูเลต แบบ มัลติแคเรียร์ โดยใช้ การแปลงผกผันฟูเรียร์	42
รูปที่ 3.1 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM MIMO ทางภาคส่ง	46
รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM MIMO ทางภาครับ	47
รูปที่ 3.3 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDMA ทางภาคส่ง	50
รูปที่ 3.4 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDMA ทางภาครับ	51
รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDM แบบ MIMO	53
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDMA แบบ 2 ยูเซอร์	55
รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDMA แบบ 4 ยูเซอร์	56
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDMA แบบ 8 ยูเซอร์	58

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของการทำโครงการ	2
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนจาก Serial เป็น parallel จากบิตข้อมูล	11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต่ออายุอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหาในการทำโครงการ

โลกของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายในปัจจุบันสามารถติดต่อสื่อสารได้ทั้งภาพและเสียง รวมไปถึงข้อความและตัวอักษรต่างๆ แต่เมื่อความต้องการของผู้ใช้งานเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากการสื่อสารที่เน้นเฉพาะเสียงพูด มาเป็นการสื่อสารที่เน้นข้อมูล ทั้งภาพและเสียงมากขึ้น จึงทำให้มีผู้ค้นคว้า วิจัย และพัฒนาเพื่อหาเทคโนโลยีที่ตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว ในด้านการสื่อสารได้ดีที่สุด

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) เป็นเทคนิคการมอดูเลตแบบหลายคลื่นพาห้ (Multiple Carrier Modulation) เป็นการนำเอาข้อมูลหลายชุดไปฝากไว้กับคลื่นพาห้ จะทำให้กระบวนการรับส่งข้อมูล สามารถส่งได้ครั้งละหลายๆชุดในเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบขนานนั่นเอง แต่มักจะใช้กับสัญญาณของยูสเซอร์เพียงยูสเซอร์เดียว

รวมถึงปัจจุบันเทคนิคของ MIMO (Multiple Input multiple Output) หรือ การสื่อสารแบบหลายอินพุทหลายเอาต์พุท ได้รับความสนใจในการสื่อสารสมัยใหม่ ซึ่งสามารถใช้จำนวนของเสาอากาศส่งและเสาอากาศรับมากกว่าหนึ่งเสา เป็นผลให้สามารถที่จะส่งข้อมูลได้รวดเร็วมากขึ้น เนื่องจากการใช้เสาอากาศส่งหลายเสา อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของภาครับ เนื่องจากการใช้เสาอากาศรับหลายเสา เพราะเหตุนี้จึงได้มีการนำระบบ MIMO มาประยุกต์ใช้กับระบบการสื่อสาร OFDM

แต่ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบ MIMO คือปัญหาการรบกวนของช่องสัญญาณรวม (Co-Channel Interference) ที่เกิดขึ้นจากการที่ผู้ใช้มีการใช้งานของเสาอากาศมากกว่าหนึ่งเสาต่อ 1 คน และอีกทั้งในสภาพการใช้งานจริงสัญญาณจะมีการสะท้อนกับสิ่งต่างๆ รอบข้างได้มากมาย หลายลักษณะไม่จำกัดอยู่เฉพาะในบางรูปแบบ ซึ่งการสะท้อนของคลื่นเหล่านี้ส่งผลให้สัญญาณที่ได้รับที่ภาครับประกอบด้วยสัญญาณที่แพร่มาจากมากกว่าหนึ่งทิศทาง และ โดยทั่วไปแล้วสัญญาณเหล่านี้มักจะเดินทางมาถึงภาครับด้วยเวลาที่แตกต่างกันและมีขนาดที่แตกต่างกันด้วย เมื่อสัญญาณเหล่านี้มารวมเข้าด้วยกัน จะได้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดเปลี่ยนแปลงได้อย่างมาก ปัญหานี้มีชื่อเรียกว่า มัลติพาทเฟดดิ้ง (Multipath Fading)

ดังนั้น จึงได้มีการแนวคิดและพัฒนาจากระบบ OFDM และระบบ MIMO มาเป็นระบบ OFDMA เพื่อรองรับจำนวนของผู้ใช้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 จุดประสงค์

- 1 เพื่อศึกษาระบบการทำงานของระบบ OFDM และ MIMO ให้สามารถใช้งานร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสาร
- 2 เพื่อศึกษาและออกแบบระบบ OFDMA
- 3 เพื่อพัฒนาวิเคราะห์แนวโน้มและความเป็นไปได้ในอนาคตของระบบ OFDMA และ Block Diagram ของ OFDMA

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1 ศึกษาการทำงานของระบบ OFDM และ MIMO
- 2 ศึกษาและออกแบบระบบ OFDMA
- 3 วิเคราะห์พิจารณาผ่านโปรแกรมการคำนวณ MATLAB เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในระบบ OFDMA

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการทำโครงการแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ การกำหนดปัญหาที่จะศึกษา การออกแบบการจำลองการวัด การทดลองผ่านโปรแกรม MATLAB การวิเคราะห์และสรุปข้อมูลที่ได้ และการทำปฏิญานพนธ์ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของการทำโครงการ

ขั้นตอนการทำโครงการ	2551							2552		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	
1. การกำหนดปัญหาที่จะศึกษา	←→									
2. การออกแบบการจำลองการวัด			←→							
3. การทดลองผ่านโปรแกรม MATLAB					←→					
4. การวิเคราะห์และสรุปข้อมูลที่ได้						←→				
5. การทำปฏิญานพนธ์		←→								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเป็นมาของ OFDM

OFDM แม้จะเป็นหนึ่งในมาตรฐานทางเทคนิคที่แตกแขนงออกมาจากเทคโนโลยี Spread Spectrum ก็ตาม แต่ก็ถือว่ามีารรับส่งข้อมูลแบบเป็นการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาห้หลายสัญญาณ (Multi-carrier modulation : MCM) เป็นเทคนิคที่ทำให้ช่องสื่อสารถูกแบ่งออกเป็นย่อยๆ โดยแต่ละส่วนจะเป็นช่องย่อยๆ ที่อิสระจากกันซึ่ง MCM ไม่ได้เป็นเทคโนโลยีที่ใหม่เพราะว่ามันเกิดขึ้นตั้งแต่ พ.ศ.2498 และถูกนำมาใช้โดยห้องปฏิบัติการโทรศัพท์เบลล์ (Bell Telephone Laboratories) ในปี พ.ศ. 2508 เทคนิค OFDM ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในกิจการสื่อสารทางทหาร ด้านระบบสื่อสารผ่านความถี่สูง (HF) เช่นระบบ KINEPLEX ของบริษัท วิทยุคอลลินส์ และระบบโทรพิมพ์ที่ใช้การเลื่อนความถี่ ย่านแคบของเวสเทริน อิเล็กทริก (Western Electric) เป็นต้น

ต้นแบบของการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาห้หลายสัญญาณมีการทดลองใช้ โดยการกำหนดจำนวนสัญญาณพาห้จากวงจรกำเนิดความถี่ ที่เป็นอิสระจากกัน ซึ่งเครื่องรับรองต้องการวงจรกรองแถบความถี่ผ่านย่านแคบ เพื่อใช้แยกแยะสัญญาณพาห้ออกจากกันก่อนที่จะทำการดีมอดูเลต ทั้งนี้การใช้งานสมัยนั้นระบบค่อนข้างจะใหญ่ เทอะทะ ราคาแพง และอาจจะไม่สามารถ นำมาใช้กับงานในปัจจุบันได้

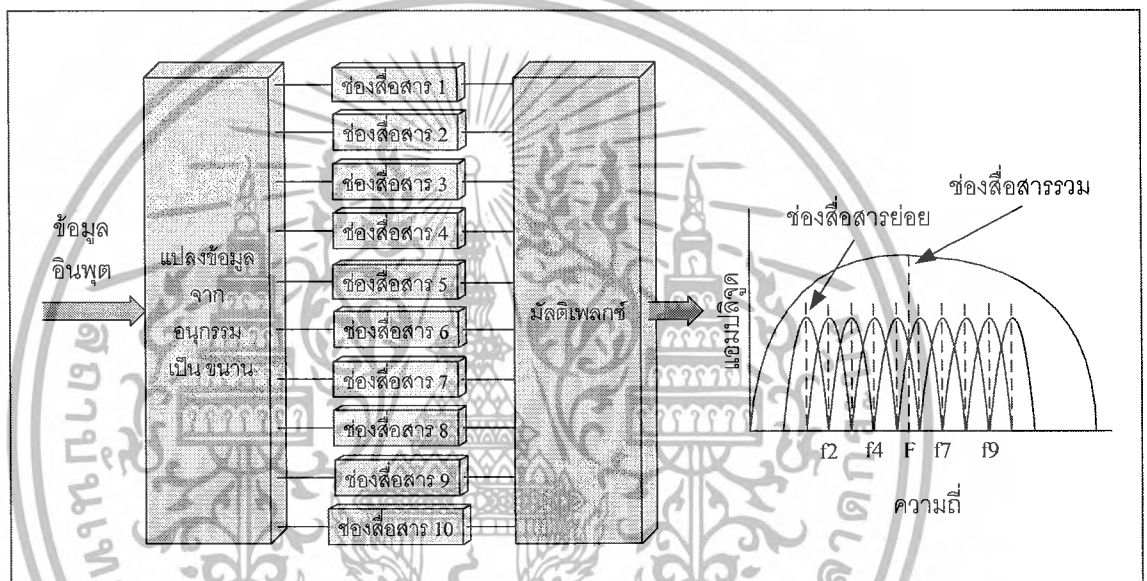
ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา DOCSIS ซึ่งมีการทำงานแบบ MCM ถูกพัฒนาขึ้นในอเมริกาเหนือ และถูกตรวจสอบโดยสหภาพโทรคมนาคมนานาชาติ (ITU) ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2541 โดย DOCSIS ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นมาตรฐานสำหรับการส่งข้อมูลดิจิทัลความเร็วสูง

การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของการติดต่อสื่อสารด้วยสัญญาณดิจิทัล บวกกับการที่มีการสร้างไอซีที่มีความเร็วสูง ดังที่เราเห็นการเพิ่มขึ้น ของความเร็วซีพียูที่มีขายในบ้านเรา รวมทั้งมีการนำเอาการแปลงฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fast Fourier Transform: FFT) มาประยุกต์ใช้ ทำให้ความเป็นไปได้ในการพัฒนา OFDM กลับมาใช้ในงานปัจจุบันสูง ซึ่งแท้จริงแล้ว OFDM กลายมาเป็นสิ่งที่น่าสนใจมากขึ้นเมื่อมีการนำเอา FFT มาใช้ในการกำเนิดสัญญาณพาห้ที่มีลักษณะตั้งฉากกัน (orthogonal carriers)

MCM เป็นหลักการของการส่งข้อมูลดิจิทัล โดยทำการแบ่งข้อมูลทั้งหมดเป็นจำนวนข้อมูลขนาดใหญ่ที่ขนานกัน (โดยทั่วไป กลุ่มของข้อมูลแต่ละชุดจะมากกว่า 500 บิต) ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีการส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็วต่ำๆ แต่เมื่อทำการส่งผ่านข้อมูลขนานกันไปโดยการนำแต่ละกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลย่อยมาออกคู่กับสัญญาณพาห่อย่อย แต่ละสัญญาณพาห่อย่อยจะจับจองแถบความถี่ในการส่งเพียงส่วนน้อยและจะมีการซ้อนทับกันเฉพาะสัญญาณพาห่อย่อยที่อยู่ติดกันเท่านั้น ยิ่งเพิ่มจำนวนของสัญญาณพาห่อย่อยมากขึ้นเท่าไรยิ่งส่งข้อมูลได้มากขึ้น และมีปัญหาเกี่ยวกับการลดทอนสัญญาณน้อยลง อย่างไรก็ตามจำนวนของสัญญาณพาห่อย่อยในทางปฏิบัติถูกจำกัดโดยข้อจำกัดของกระบวนการกรองความถี่ ช่วงเวลาในการคำนวณ แถบความถี่ที่มีอยู่ภายในช่องสื่อสารและความถี่คอปเปอร์ (Doppler) ในกรณีใช้การสื่อสารไร้สาย



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของ MCM

2.1.1 ความหมายของ OFDM

OFDM ย่อมาจาก Orthogonal Frequency Division Multiplex เป็นรูปแบบของ MCM สมัยใหม่ที่มีการเพิ่มความหนาแน่นของสัญญาณพาห่อย่อยและการซ้อนทับของสัญญาณพาห่อย่อยที่อยู่ติดกัน ซึ่งเป็นเทคนิคการมอดูเลชันแบบหลายคลื่นพาห่อย่อย (Multiple Carrier Modulation) และเป็นรูปแบบของการสื่อสารแบบขนาน แตกต่างจากมาตรฐาน Spread Spectrum ทั่วไปที่ใช้แถบความถี่เดียวสำหรับรับส่งข้อมูลช่องเดียว

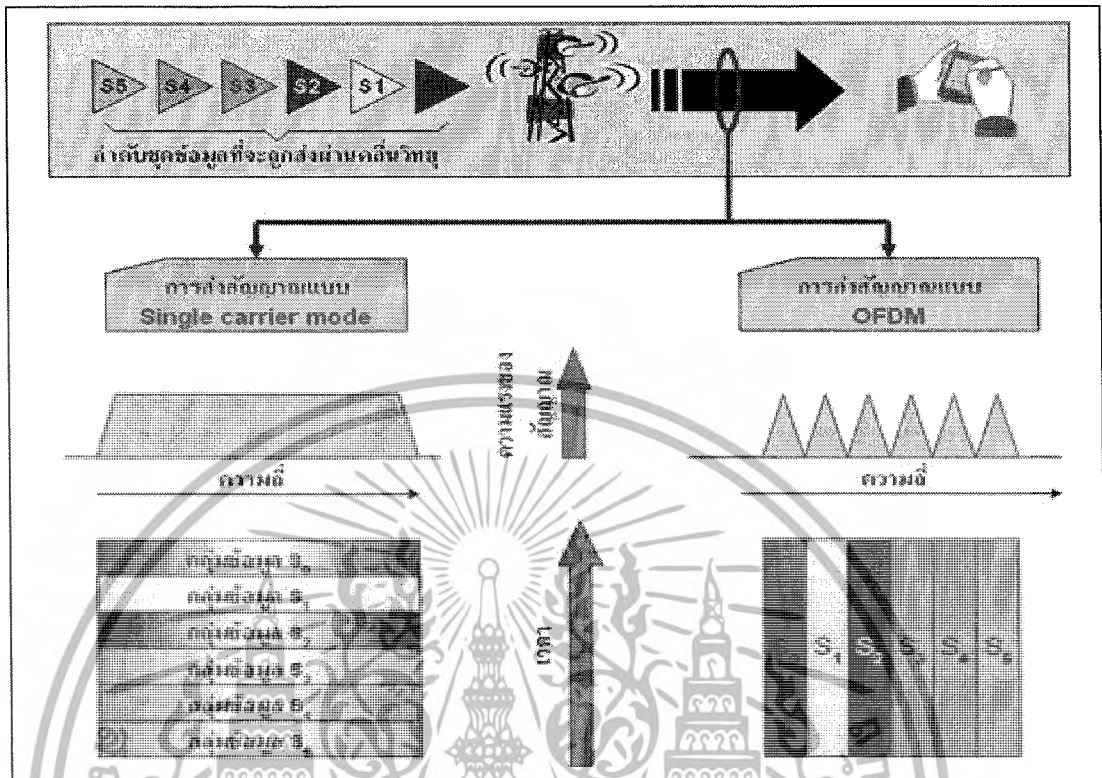
OFDM เป็นเทคโนโลยีการเข้ารหัสในชั้น Physical Layer สำหรับถ่ายทอด สัญญาณผ่านทางคลื่นวิทยุ ซึ่งกระบวนการนี้จะเป็นการแบ่งสัญญาณ ความถี่ออกเป็นหลาย ๆ เซ็กเมนต์ และในแต่ละเซ็กเมนต์จะมีความถี่เฉพาะตัวด้วยรหัสที่ต่างกัน ซึ่งจะทำให้สามารถรองรับความจุได้มากกว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นวิทยุในความถี่เดียวกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว OFDM ถูกใช้อยู่ในคลื่น ความถี่ 2.4 GHz ISM ซึ่งเป็นคลื่นความถี่มาตรฐานสำหรับมาตรฐาน เครือข่าย IEEE 802.11g ในขณะที่ IEEE 802.11a ถูกเลือกให้คลื่น ความถี่ที่ 5 GHz UNII (Unlicensed National Information Infrastructure)

OFDM สร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบเคลื่อนที่ที่แบนด์กว้าง (Broad band) มีอัตราการส่งข้อมูลสูงๆ เช่น ระบบ LAN แบบไร้สาย (Wireless LAN) ระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงแบบไร้สาย (Wireless high speed internet) ระบบกระจายเสียงแบบดิจิทัล (Digital Audio Broadcasting) หรือ DAB และระบบกระจายสัญญาณโทรทัศน์แบบดิจิทัล (Digital Television) หรือ DTV เป็นต้น

เทคโนโลยี OFDM แม้จะเป็นหนึ่งในมาตรฐานทางเทคนิคที่แตกแขนงออกมาจากเทคโนโลยี Spread Spectrum ก็ตาม แต่ก็ถือว่ามีารับส่งข้อมูลแบบ Multiple Carrier Mode ซึ่งหมายถึงการแบ่งย่อยแถบความถี่ออกเป็นแถบย่อยๆ สำหรับแยกส่งข้อมูลหลายๆช่อง แตกต่างจากมาตรฐาน Spread Spectrum ทั่วไปที่ใช้แถบความถี่เดียวสำหรับรับส่งข้อมูลช่องเดียว แนวคิดในการสื่อสารแบบ Spread Spectrum ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ว่าให้นำข้อมูลที่ต้องการส่งทั้งหมด ไม่ว่าจะมาจากที่แหล่งก็ตาม มาทำการมอดูเลตเข้ากับสัญญาณรบกวนเสมือน (Pseudo Noise) แล้วทำการส่งแบบให้กระจายไปทั่วในแถบความถี่สำหรับรับส่ง ตัวอย่างเช่น ในกรณีของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G มาตรฐาน W-CDMA ซึ่งมีการกำหนดแถบความถี่กว้าง 5 เมกะเฮิรตซ์สำหรับวงจรความถี่หนึ่งช่อง ข้อมูลของผู้ใช้งานทั้งหมดจะถูกนำมามอดูเลตกับสัญญาณรบกวนเสมือนแล้วกระจายส่งไปตลอดแถบความถี่ 5 เมกะเฮิรตซ์นั้น ๆ คล้ายกับการเป่าพวงเป่าลูกโป่งลมให้กระจายออกไปในวงกว้าง เครื่องรับปลายทางจะทราบเองว่าต้องแยกรับสัญญาณรบกวนเสมือนรหัส โดยจะพิจารณาจับข้อมูลที่ต้องการตลอดแถบความถี่ 5 เมกะเฮิรตซ์นั้น ดังแสดงในส่วนซ้ายมือของรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

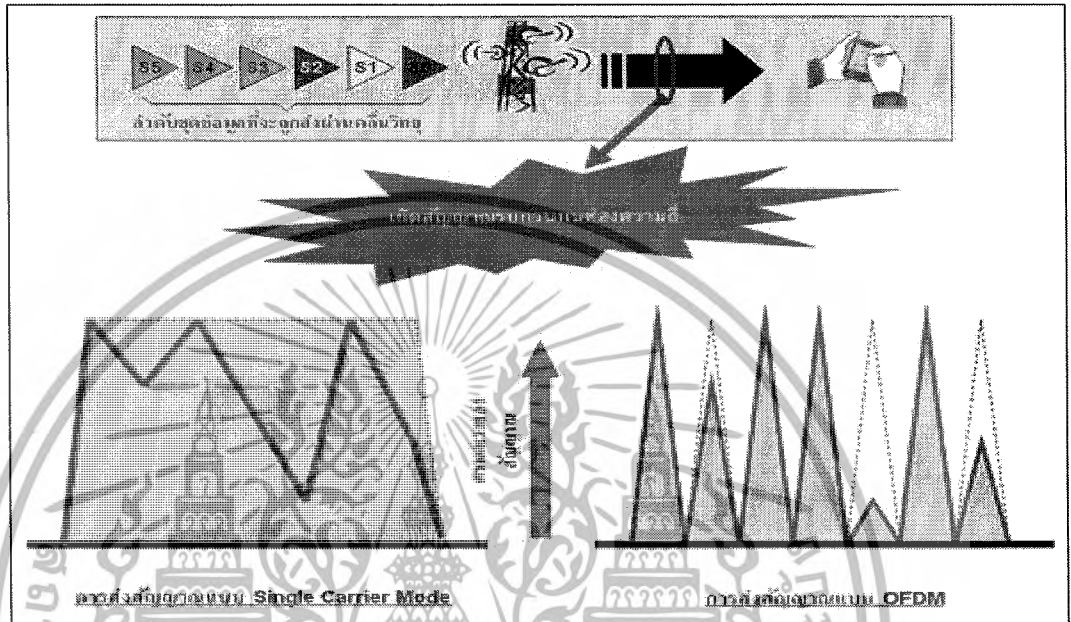


รูปที่ 2.2 ความแตกต่างระหว่างการสื่อสารแบบ Single Carrier Mode กับ OFDM

สำหรับการรับส่งข้อมูลด้วยเทคโนโลยี OFDM จะมีข้อแตกต่างออกไป โดยก่อนส่ง จะทำการแบ่งแยกแถบความถี่ออกเป็นแถบความถี่ย่อย ๆ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ต้องการจะส่งมาทำการเรียงลำดับเป็นกลุ่มรหัสข้อมูล (Symbol) โดยเนื้อหาข้อมูลที่อยู่ภายในแต่ละกลุ่มรหัสข้อมูลนั้นไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นข้อมูลของผู้ใช้บริการรายเดียวกัน เปรียบเสมือนการคักน้ำที่ปลายท่อ ซึ่งต้นทางอาจมีการเก็บสะสมน้ำที่ต่างกัน จากหลากหลายท่อย่อยที่เทรวมกันมา อธิบายให้ง่ายเข้าก็คือเป็นการเพิ่มเงื่อนไขในการทำงานขึ้นจากมาตรฐาน Spread Spectrum แทนที่จะส่งข้อมูลออกไปในแถบความถี่กว้าง ก็ให้นำข้อมูลมาจัดเป็นกลุ่มรหัสข้อมูลเสียก่อนนั่นเอง กลุ่มรหัสข้อมูลแต่ละกลุ่มจะถูกนำไปส่งออกอากาศโดยมีการกำหนดแบ่งแยกแถบความถี่ออกเป็นแถบย่อย ๆ มีจำนวนแถบเท่ากับกลุ่มรหัสข้อมูล ส่วนที่ว่าจะกำหนดให้มีกี่กลุ่มรหัสข้อมูลหรือแถบความถี่ย่อยนั้นก็แล้วแต่ข้อกำหนดของเทคโนโลยีนั้น ๆ จึงคล้ายกับว่ามีการตัดตอนข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ แล้วให้แต่ละกลุ่มส่งขนานกันไปในเวลาเดียวกัน เพียงแต่อยู่ในแถบความถี่ย่อย ๆ ผิดกับมาตรฐาน Spread Spectrum ที่หากคิดแบบเดียวกับ OFDM ว่ามีการจัดกลุ่มรหัสข้อมูลขึ้นเหมือนกัน ก็จะเห็นราวกับว่ามีการส่งกลุ่มรหัสข้อมูลเรียงต่อกันไปตามเวลา มาตรฐาน OFDM จึงคล้ายกับเป็นการคิดนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรอบออกจากมาตรฐาน Spread Spectrum โดยมีการส่งข้อมูลในแนวนานแทนที่จะเป็นการส่งต่อเป็นทอด ๆ หรือที่เรียกกันว่าเป็นอนุกรม

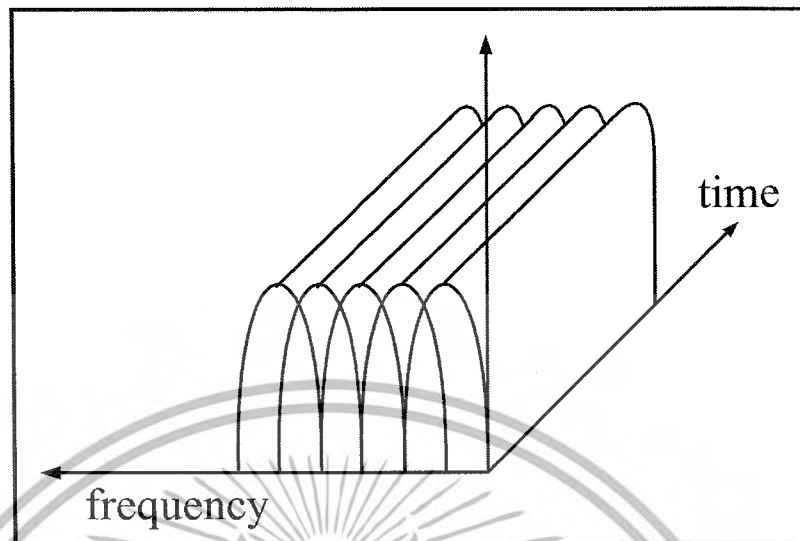


รูปที่ 2.3 OFDM เปรียบเทียบกับการสื่อสารแบบ Spread Spectrum ชนิด Single Carrier Mode

2.1.2 การมัลติเพล็กซ์แบบ OFDM

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม เป็นเทคนิคที่ทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็วสูง โดยอาศัยหลักการส่งผ่านแบบหลายคลื่นพาห์ (Multi-carrier) อีกทั้งยังใช้ย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะแต่ละคลื่นพาห์ย่อยที่ใช้ในการส่งสัญญาณจะมีสเปกตรัมเหลื่อมกัน โดยช่องสัญญาณความถี่จะถูกแบ่งออกเป็นความถี่คลื่นพาห์ย่อย (sub-carrier) หลายๆความถี่ โดยแต่ละความถี่คลื่นพาห์ย่อยจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทำให้เป็นอิสระต่อกัน ความถี่ที่คลื่นพาห์ตั้งฉากกันนั้นทำให้ไม่มีปัญหาการซ้อนทับกันของสัญญาณที่อยู่ติดกัน โดยมีคุณสมบัติของการตั้งฉาก (Orthogonal properties) ซึ่งกันและกันระหว่างคลื่นพาห์ย่อยดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การมัลติเพล็กซ์แบบ โอเอฟดีเอ็ม

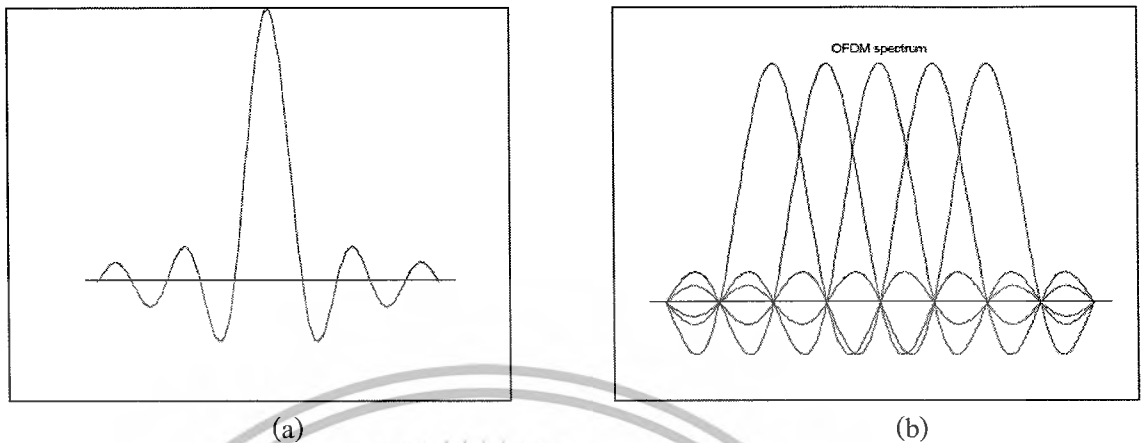
OFDM เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งความถี่ เมื่อช่วงความถี่ถูกแบ่งออกเป็น ขนานเล็กๆ N ช่อง แต่ละช่องมีขนาดเท่ากับขนาดของสัญลักษณ์ (bit rate) ดิจิตอล ทางด้านส่งจะมี สัญลักษณ์ดิจิทัลความเร็วสูงที่ถูกแบ่งเป็นกลุ่มข้อมูลย่อย ที่มีความถี่ต่ำกว่า จะถูกมอดูเลตกับ สัญญาณคลื่นพาห่อย่อย 1 สัญญาณ และนำสัญญาณทั้งหมดส่งขนานกันออกไป รูปแบบในการมอดูเลตสัญญาณคลื่นพาห่อย่อยที่นิยมทั่วไปได้แก่ QAM, 16 QAM หรือ 64 QAM เป็นต้น ใน OFDM กลุ่มของข้อมูลจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบขนานกัน โดยการมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นพาห่อย่อย ดังนั้น จะกลายมาเป็นสัญญาณบนแกนความถี่ ซึ่งการแปลงสัญญาณกลับให้อยู่บนแกนเวลาอีกครั้งโดยการแปลงกลับฟูรีเยร์ทรานสฟอร์ม (IFFT) จากนั้นสัญลักษณ์บนแกนเวลาจะถูกมัลติเพล็กซ์เข้าด้วยกันให้เป็นอนุกรมของสัญญาณแล้วจึงส่งสัญญาณออกไปทางเสาอากาศ

หลังจากการมอดูเลตแบบ OFDM จะมีการสอดแทรกช่วงแถบป้องกันแคบๆ เพื่อลดสัญญาณรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ (Inter symbol Interference: ISI) ที่เกิดจากสัญลักษณ์หลายเส้นทาง (multi-path) เรียกแถบป้องกันแคบๆนี้ว่า การเสริม ไชคลิก (cyclic prefix) ส่วนในเครื่องรับ จะดำเนินการระบวงตรงข้ามกับเครื่องส่ง ในเครื่องรับจะใช้การแปลงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มแปลงสัญญาณที่อยู่บนแกนเวลาไปเป็นแถบความถี่สมบูรณ์

ข้อดีของ OFDM คือสามารถใช้งานแถบความถี่ในระบบที่ใช้สัญญาณคลื่นพาห่เดี่ยวได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ (spectral efficiency) สามารถป้องกันผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของสัญญาณหลายเส้นทาง (immunity to multi-path) และมีความไวต่ำต่อการเลือนหายไปของความถี่ที่

เล็กน้อย (less sensitivity to frequency selective fading)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



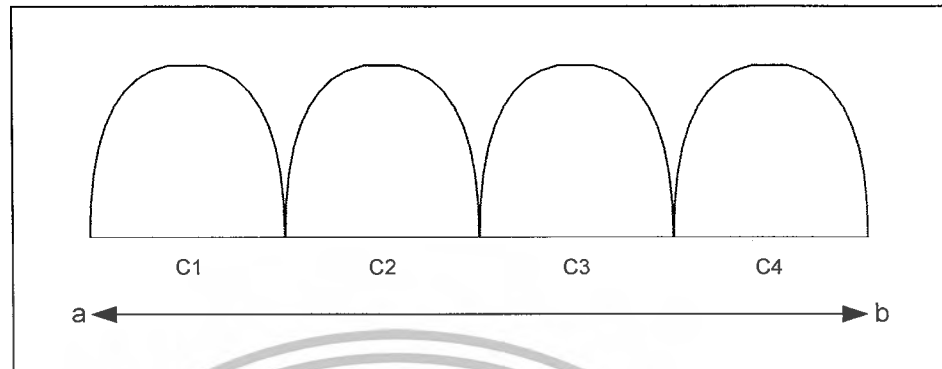
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของ OFDM spectrum, (a) single sub channel, (b) 5 carriers

ในระบบทั่วไปของการส่งข้อมูลแบบขนานโดยวิธี Frequency Division Multiplexing (FDM) แแถบความถี่ของสัญญาณทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็นช่องสัญญาณย่อยตามความถี่ซึ่งไม่มีการเหลื่อมล้ำกัน โดยแต่ละช่องสัญญาณย่อยจะถูกมอดูเลตด้วยคุณลักษณะและสัญลักษณ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งเหมือนเป็นวิธีที่ดีในการหลีกเลี่ยงการเหลื่อมล้ำกันของสัญญาณความถี่ใกล้เคียงเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนที่จะเกิดระหว่างช่องสัญญาณที่จะเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้นำไปสู่วิธีการใช้งานแถบความถี่ที่ไม่มีประสิทธิภาพซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการใช้งานแถบความถี่ที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการของการตั้งฉากซึ่งกันและกัน (orthogonal) ซึ่งทำให้สัญญาณความถี่ใกล้เคียงสามารถที่จะเหลื่อมล้ำกันและไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกันระหว่างช่องสัญญาณที่อยู่ติดกันได้ แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างในการใช้งานแบนด์วิดธ์ระหว่างกานส่งผ่านแบบหลายคลื่นพาห้แบบเดิมที่ไม่มีการเหลื่อมล้ำกันและแบบที่มีการเหลื่อมล้ำกันได้จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าสามารถแบนด์วิดธ์ได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถใช้งานแถบสเปกตรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดได้

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ ที่คล้ายกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่องความถี่ (Frequency Division Multiplexing) โดยที่ระบบโอเอฟดีเอ็มนั้นจะใช้พื้นฐานของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ที่ทำให้สามารถส่งข่าวสารได้หลายข่าวสารไปในช่องสัญญาณช่องเดียวกันซึ่งเป็นการใช้ย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

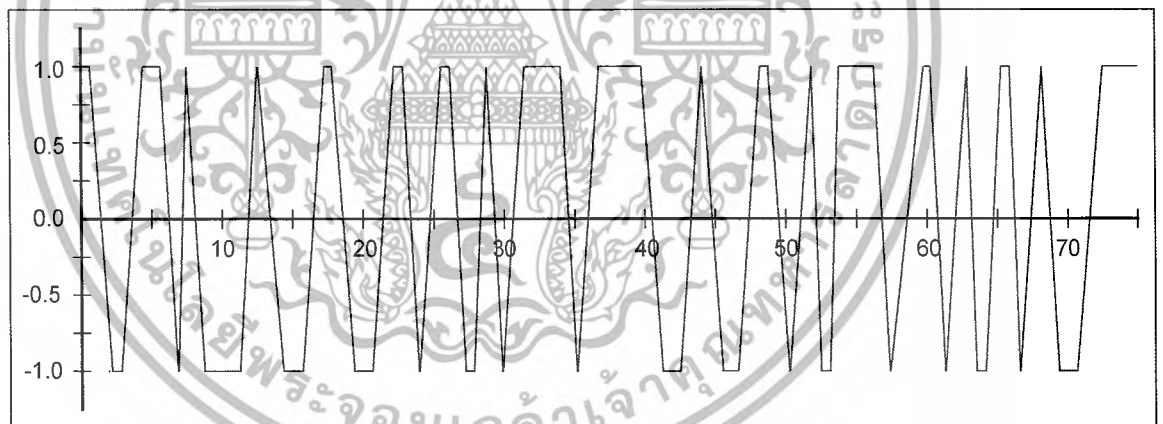
การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ (FDM) นั้นจะใช้ช่องทางการสื่อสารร่วมกัน ด้วยการแบ่งความกว้างของช่องสัญญาณเป็นหลายช่องทางขนานกัน กำหนดและแยกด้วย guard band ของความถี่ที่แตกต่างกัน สัญญาณทั้งหมดจะถูกส่งไปพร้อมๆกัน เช่นสมมุติว่ามีแบนด์วิดธ์ความถี่ตั้งแต่ a ถึง b สามารถแบ่งความถี่นี้ ออกเป็นความถี่สี่ช่องเท่าๆกันดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 FDM carrier

ใน OFDM สามารถใช้คลื่นพาห้ได้ N ตัวซึ่ง N เป็นได้ตั้งแต่ 16 ถึง 1024 ตามตัวอย่างข้างล่างจะใช้คลื่นพาห้ 4 ตัวโดยที่สัญญาณมีอัตราเท่ากับ 1 และความถี่ sampling เท่ากับ 1 sample/symbol



รูปที่ 2.7 รูปแบบสัญญาณ OFDM ที่ได้จากการมอดูเลต ซึ่งมี 4 carriers

มีบิตตั้งต้นดังต่อไปนี้ 1,1,-1,-1, 1, 1, 1,-1,-1,-1,-1,-1, 1,-1,-1,-1,1,... ทำการเปลี่ยนจาก serial เป็น parallel ได้โดยการเขียนบิตข้างต้นได้เป็น 4 คอลัมน์

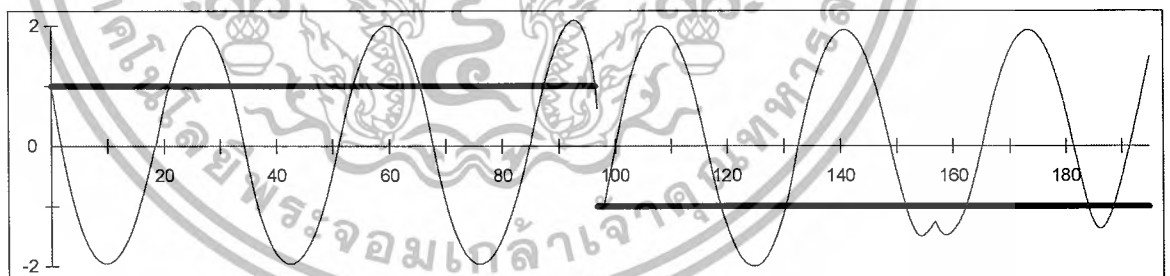
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนจาก Serial เป็น parallel จากบิตข้อมูล

C1	C2	C3	C4
1	1	-1	-1
1	1	1	-1
1	-1	-1	-1
-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1
-1	-1	1	-1

แต่ละคอลัมน์แสดงบิตที่ถูกส่งไปในหนึ่งคลื่นพาห่อย่อย จากทฤษฎีของ Nyquist ทำให้ทราบว่าความถี่ต่ำสุดที่สามารถส่งข้อมูลได้จะต้องเป็นสองเท่าของอัตราข้อมูล ในกรณีนี้อัตราข้อมูลต่อหนึ่งคลื่นพาห่อย่อยเท่ากับ 1/4 หรือ 1 symbol ต่อวินาที สำหรับคลื่นพาห่อย่อยทั้งสี่ ดังนั้นความถี่ต่ำสุดที่สามารถใช้ได้คือ 1/2 Hz แต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะใช้ 1 Hz ดังนั้น harmonics จะเท่ากับ 1, 3/2 และ 2 Hz

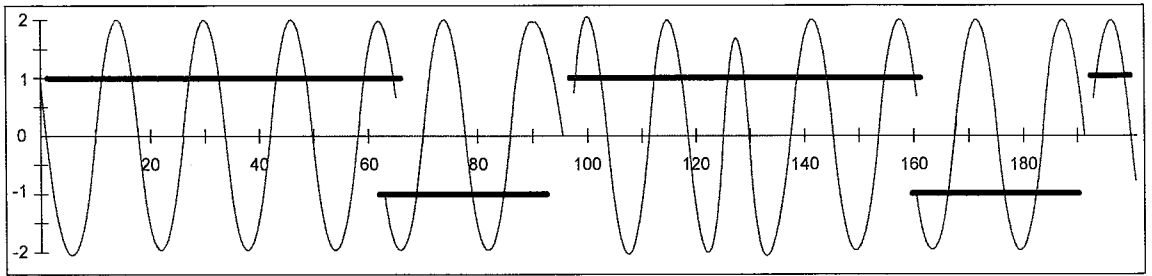
ในคลื่นพาห่แรก (C1) ส่ง 1, 1, 1, -1, -1, -1 เมื่อผ่านการมอดูเลชันแบบ BPSK จะเป็นดังนี้



รูปที่ 2.8 Sub-carrier 1 และบิตที่มอดูเลต (คอลัมน์ที่ 1 จากตารางที่ 2.1)

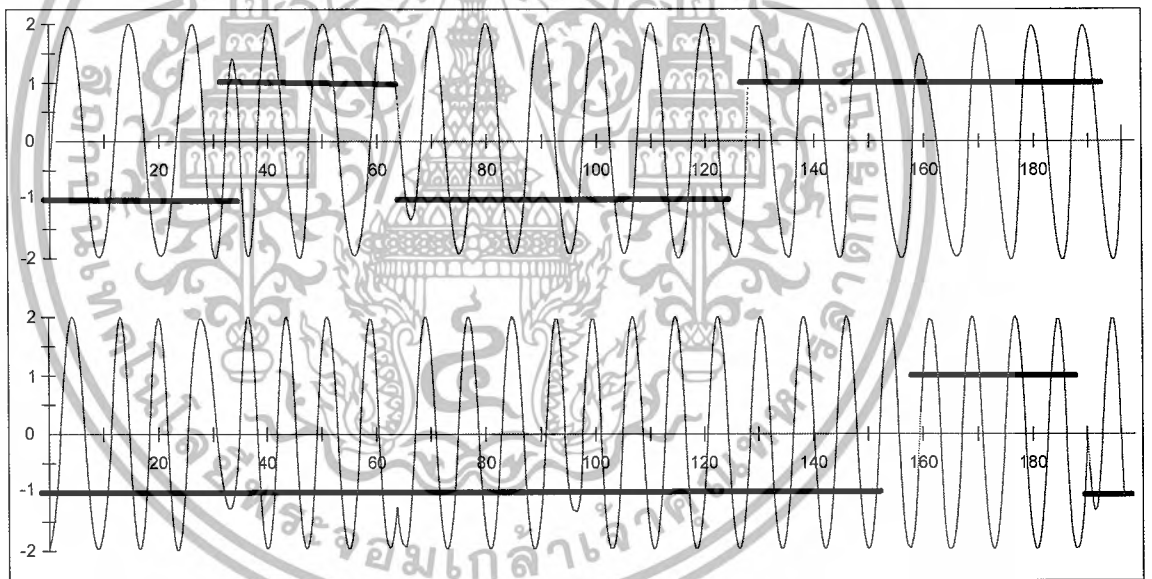
คลื่นพาห่ที่ 2 (C2) จะมีความถี่เท่ากับ 2 Hz ซึ่งจะเป็นฮาร์โมนิกและตั้งฉากกับความถี่ของคลื่นพาห่แรกซึ่งเท่ากับ 1 Hz นำบิตในคอลัมน์ที่สอง (C2) คือ 1, 1, -1, 1, -1 นำมามอดูเลตจะได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



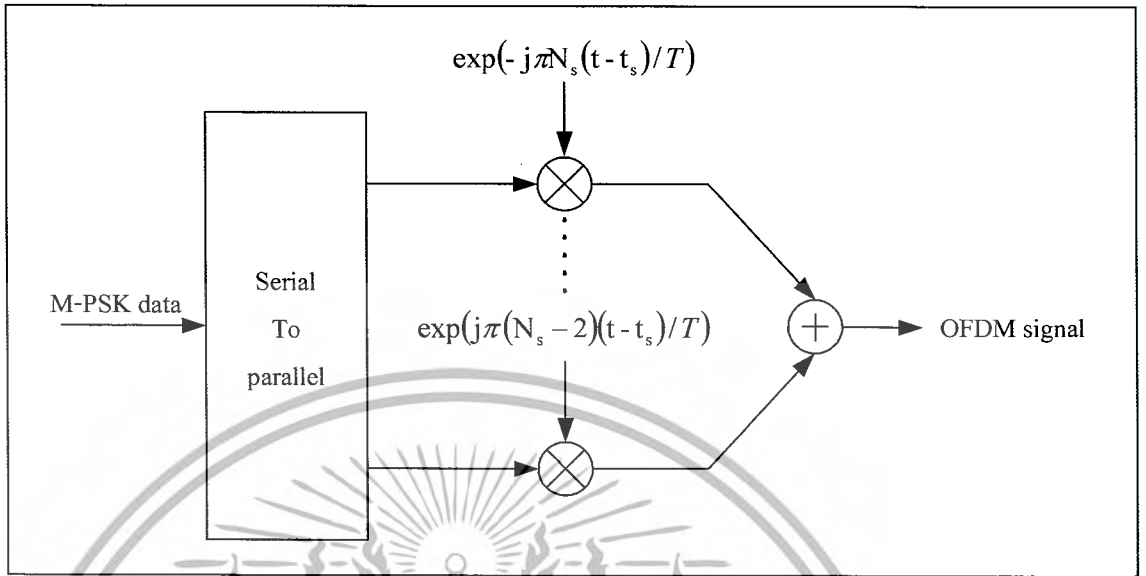
รูปที่ 2.9 Sub-carrier 2 และบิตที่มอดูเลต (คอลัมน์ที่ 2 จากตารางที่ 2.1)

คลื่นพาห์ที่ 3 (C3) ความถี่จะเท่ากับ 3 Hz และคลื่นพาห์ที่ 4 (C4) ความถี่จะเท่ากับ 4 Hz
คลื่นพาห์ C3 จะมอดูเลตกับ -1, 1, 1, -1, -1, 1 และคลื่นพาห์ C4 กับ -1, -1, -1, -1, -1, 1 จากตาราง
ที่ 2.1



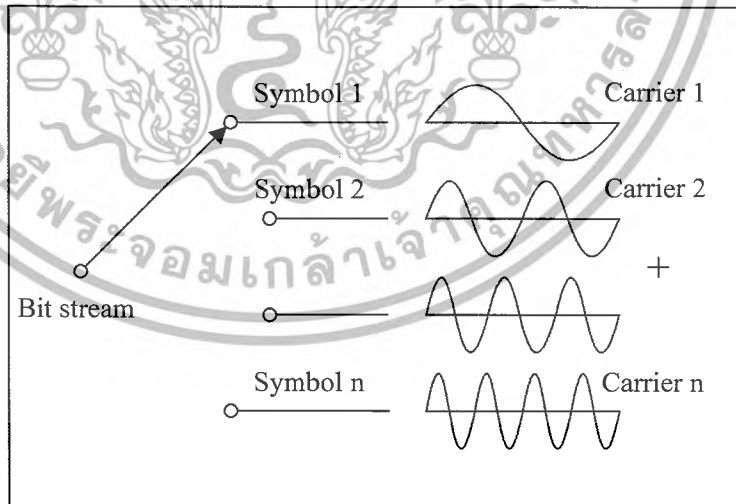
รูปที่ 2.10 Sub-carrier 3 และ 4 และบิตที่มอดูเลต (คอลัมน์ที่ 3 และ 4 จากตารางที่ 2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



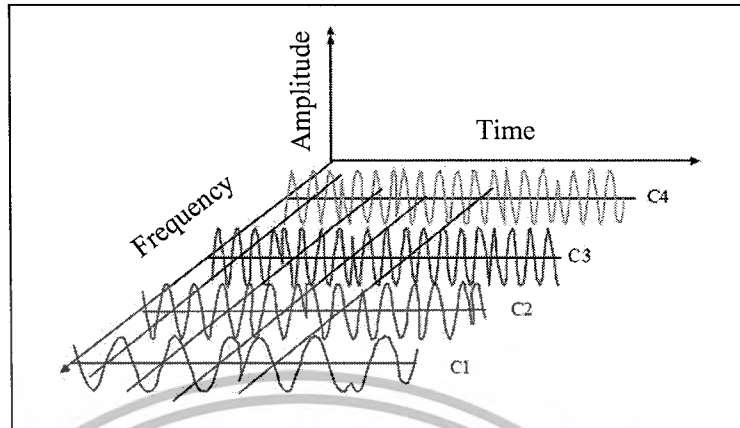
รูปที่ 2.11 การมอดูเลตสัญญาณ OFDM

นำบิตสตรีมมากระจายทีละบิตไปยังความถี่คลื่นพาห่อย่อยทั้งสี่โดยใช้ความถี่คลื่นพาห่อย่อยที่เป็นอิสระต่อกัน (C1-C4) ซึ่งตั้งฉากกันตั้งแต่ความถี่ที่ 1-4 Hz มามอดูเลตได้รูปตามข้างล่าง



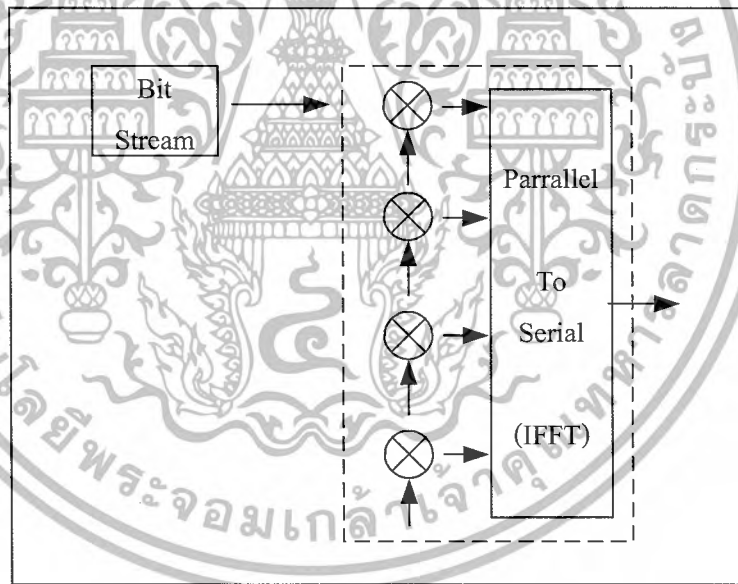
รูปที่ 2.12 ความถี่หลังมอดูเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



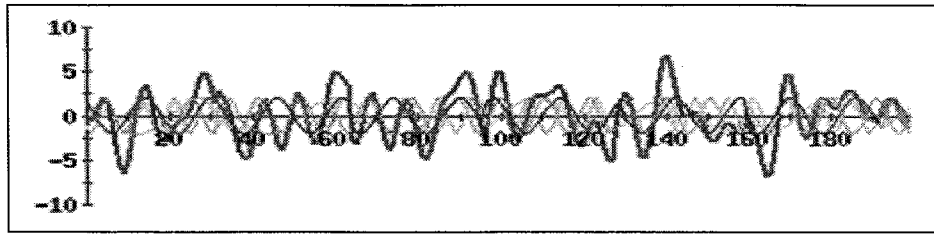
รูปที่ 2.13 OFDM ใน time และ frequency domain

รวมความถี่คลื่นพาห่อย่อยที่มอดูเลตแล้วทั้งสิ้นเพื่อสร้างสัญญาณ OFDM (ส่วนใหญ่สร้างโดย IFFT)



รูปที่ 2.14 Function diagram ของการสร้างสัญญาณ OFDM ในเส้นประเรียกว่า IFFT block

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 สัญญาณ OFDM ที่ถูกสร้างขึ้นมา

สามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$C(t) = \sum_{n=1}^N m_n(t) \sin(2\pi n t) \quad (2.1)$$

ซึ่งก็คือสมการของ Inverse FFT นั่นเอง

2.1.3 Orthogonal

สัญญาณจะ Orthogonal กันถ้ามีความเป็นอิสระร่วมกัน (mutually independent) ของแต่ละสัญญาณ คุณสมบัติของการ Orthogonal จะทำให้สามารถส่งสัญญาณหลายๆสัญญาณรวมกันไปในช่องสัญญาณการสื่อสารเดียวกันและสามารถที่จะกู้สัญญาณกลับมาได้โดยไม่มีการแทรกสอดซึ่งกันและกัน ปกติแล้วส่วนมากการมัลติเพล็กซ์รูปแบบต่างๆ จะมีคุณสมบัติของการ Orthogonal โดยธรรมชาติ ตัวอย่างเช่นการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา (TDM : Time Division Multiplexing) ซึ่งสามารถที่จะส่งสัญญาณข่าวสารหลายๆสัญญาณไปในช่องการสื่อสารเดียวกัน โดยอาศัยการส่งคนละช่วงเวลา (time slot) คือในระหว่างที่ส่งสัญญาณข่าวสารสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งนั้น จะไม่มีการส่งสัญญาณข่าวสารอื่น ส่วนสัญญาณข่าวสารอื่นๆนั้นจะส่งที่ช่วงเวลาถัดไป ดังนั้นทำให้ไม่เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญญาณข่าวสารที่ส่ง เพราะระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลานั้น มีลักษณะของการ Orthogonal ในส่วนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ (FDM : Frequency Division Multiplexing) นั้นสัญญาณข่าวสารแต่ละสัญญาณจะ Orthogonal กันโดยไม่เกิดการแทรกสอดซึ่งกันและกัน โดยการส่งที่คลื่นพาห้คนละความถี่ และแถบความถี่ที่ห่างกันเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันระหว่างสัญญาณที่ใช้คลื่นพาห้ที่มีความถี่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าวิธีการเหล่านี้จะมีความ Orthogonal ในส่วนของระบบ OFDM จะเป็นรูปการแบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ โดยที่คลื่นพาห้ย่อยๆของสัญญาณ OFDM จะมี สเตปครัมที่ซ้อนทับกันซึ่งมีความเป็นไปได้ในทางทฤษฎี ถ้าสามารถที่จะรักษาคุณสมบัติของการ Orthogonal ระหว่างคลื่นพาห้ย่อยเหล่านั้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมัลติเพล็กซ์แบบ OFDM นั้น จะมีคุณสมบัติของการ Orthogonal ในแกนความถี่ที่สามารถที่จะส่งสัญญาณข่าวสารไปในคลื่นพาห่อย่อยที่ต่างกัน โดยไม่เกิดการรบกวนกันของสัญญาณ OFDM สามารถสร้างจากผลรวมของสัญญาณไซน์ซออยด์ (Sinusoid signal) หลายๆ สัญญาณ แต่ละสัญญาณก็คือ คลื่นพาห่อย่อยแต่ละตัวนั่นเอง ความถี่เบสแบนด์ของแต่ละคลื่นพาห่อย่อย จะกำหนดให้เป็นจำนวนเต็มของส่วนกลับของช่วงเวลาของสัญญาณหนึ่งสัญลักษณ์ (symbol time) โดยผลที่ได้จะทำให้แต่ละคลื่นพาห่อย่อยนั้นมีจำนวนของไซเคิลเป็นจำนวนเต็มในหนึ่งสัญลักษณ์ และผลที่ตามมาจะทำให้แต่ละคลื่นพาห่อย่อยๆ นั้น Orthogonal กัน

ใน OFDM นั้นจะเลือกความถี่คลื่นพาห่กับข้อมูลซึ่งมอดูเลตแล้วตั้งฉากต่อกัน ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ guard band อีกต่อไป ด้วยลักษณะแบบนี้จึงทำให้ออกแบบภาครับและภาคส่งของ OFDM นั้นง่ายขึ้น และไม่จำเป็นต้องใช้ filter แยกสำหรับแต่ละช่องสัญญาณย่อย เหมือนกับ FDM การตั้งฉากกันของคลื่นพาห่ ยังทำให้สามารถใช้ความจุได้ใกล้เคียงกับ Nyquist rate โดยที่สามารถใช้ความจุได้เกือบทั้งหมดของย่านความถี่นั้น

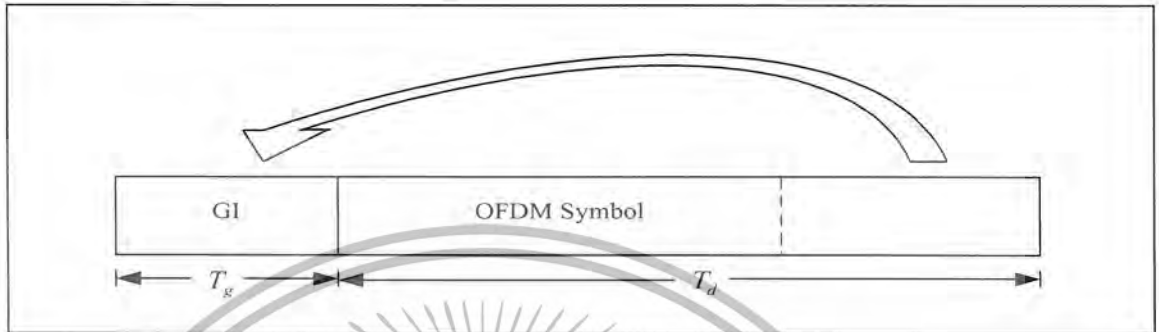
ประสิทธิภาพของ OFDM อาจถูกลดทอนเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเนื่องจาก Doppler Shift ของความถี่คลื่นพาห่ อาจทำให้สูญเสียความ orthogonal ไป และทำให้เกิด Inter-carrier-interference (ICI) เช่นการ cross-talk ระหว่างช่องสัญญาณย่อย

OFDM จำเป็นต้องใช้ synchronize ความถี่ ซึ่งมีความแม่นยำสูงในเครื่องรับ ถ้าเกิดความผิดพลาดขึ้น อาจทำให้คลื่นพาห่อย่อยนั้น ไม่ตั้งฉากกันอีกต่อไป ซึ่งเป็นการลดประสิทธิภาพของ OFDM

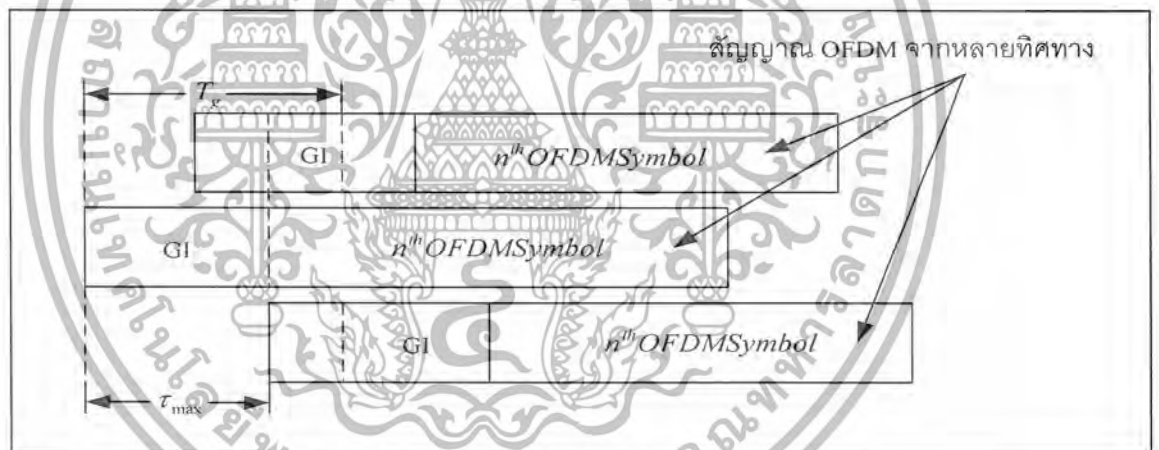
2.1.4 ช่วงเวลาป้องกัน

หนึ่งในเหตุผลที่สำคัญของการนำ OFDM มาใช้ในงาน ก็คือ มีความทนทานต่อการแผ่กว้างของการประวิงแบบหลายทิศทาง โดยการแบ่งชุดข้อมูล ตามจำนวนของคลื่นพาห่อย่อย N ซึ่งช่วงเวลาสัญลักษณ์จะเพิ่มขึ้น N เท่า ในการกำจัดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ได้อย่างสมบูรณ์นั้น จะมีการเพิ่มช่วงเวลาป้องกัน (Guard Time) เข้าไปในช่วงสัญลักษณ์ OFDM แต่ละช่วง โดยช่วงเวลาป้องกัน จะถูกกำหนดให้มีขนาดใหญ่กว่า การแผ่กว้างของการประวิง กล่าวคือองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายทิศทาง จากสัญลักษณ์หนึ่งไม่สามารถแทรกสอดกับสัญลักษณ์ถัดไปได้ การกำจัดการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห่นั้น ทำได้โดยการใส่ส่วนขยายแบบย้อนกลับ (Cyclic Prefix) ของช่วงสัญลักษณ์ OFDM ในช่วงเวลาป้องกัน โดยคัดลอกข้อมูลที่อยู่ส่วนท้ายของช่วงสัญลักษณ์ OFDM แล้วนำมาวางไว้หน้าช่วงสัญลักษณ์ OFDM เดิม ทำให้แน่ใจว่าสัญลักษณ์ OFDM ซึ่งถูก

ประวิงมาจะมีจำนวนรอบคลื่นเป็นจำนวนเต็ม ในคาบเวลาของ FFT เสมอ จึงไม่สามารถก่อให้เกิดการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห้ได้



รูปที่ 2.16 การส่งส่วนขยายแบบย้อนกลับในช่วงเวลาป้องกัน



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างสัญญาณ OFDM ที่ได้รับจากช่องสัญญาณแบบหลายทิศทาง

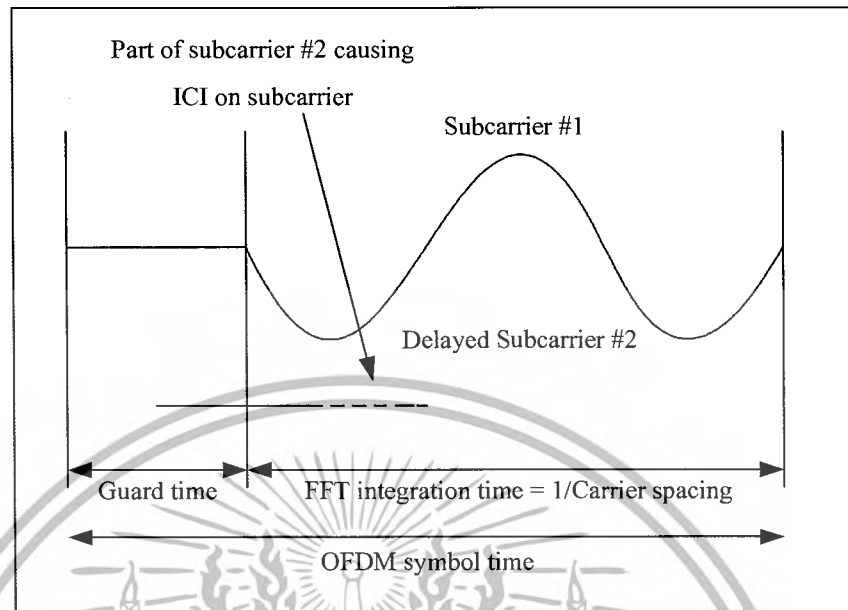
2.1.5 ช่วงเวลาควมและส่วนหน้าแบบวน

หนึ่งในเหตุผลที่สำคัญของการนำ OFDM มาใช้ในงานคือ มีความทนทานต่อการแผ่กว้างของการประวิงแบบหลายวิถี (multipath delay spread) ด้วยวิธีแบ่งชุดข้อมูลอินพุตออกตามจำนวนของ คลื่นพาห้ย่อย N_s เท่ากับว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์ จะถูกแบ่งออกเป็นช่วงแคบๆตาม N_s เช่นกัน ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วย ลดการเกิดการประวิงแบบหลายวิถี สำหรับการกำจัดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ที่สมบูรณ์แบบนั้น ได้มีการนำช่วงเวลาควมมาใช้ในแต่ละสัญลักษณ์ OFDM โดยที่เวลาควมจะถูกกำหนดให้มีค่ามากกว่า การแผ่กว้างของการประวิงตามเวลาที่คาดหมายไว้ (ปกติจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและตั้งวงอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

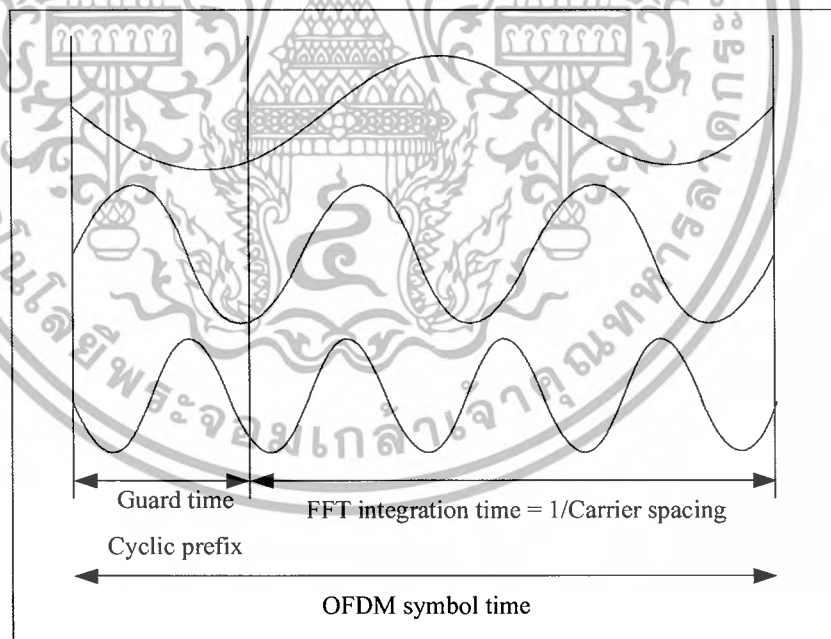
กำหนดให้มีค่ามากกว่า 4 เท่า ของค่าประวิงเวลาการแผ่กว้างโดยเฉลี่ย) จนกระทั่งส่วนประกอบในหลายวิธี จากสัญลักษณ์หนึ่งสามารถไปรบกวนสัญลักษณ์ต่อไปได้ อย่างไรก็ตามอาจจะไม่มีสัญญาณอยู่ในช่วงเวลาทั้งหมด ในกรณีเช่นนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห้ได้ ซึ่ง หมายถึง คลื่นพาห้ย่อยได้เสียคุณลักษณะการตั้งฉากไปนั่นเอง โดยผลกระทบนี้ จะเห็นได้ว่าคลื่นพาห้ย่อยที่ 2 เกิดการประวิงเวลาออกไปนอกส่วนของช่วงเวลาคุม ดังนั้นเมื่อเครื่องรับต้องการคีมอดูเลตคลื่นพาห้ย่อยที่ 1 จะพบว่าเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นจากคลื่นพาห้ย่อยที่ 2 ได้ เพราะภายในคาบเวลาของ FFT นั้น ได้เกิดจำนวนรอบที่ไม่เป็นจำนวนเต็มส่งผลทำให้เกิดผลต่างขึ้น และในเวลาเดียวกันนั่นเองคลื่นพาห้ย่อยที่ 1 จะไปรบกวนคลื่นพาห้ย่อยที่ 2 ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกัน

เทคนิคในการต่อสู้กับความเสียหายที่เกิดจาก ICI นั้นคือการใช้เทคนิคการเพิ่มเติมส่วนหน้าแบบวน ซึ่งเป็นการลอกแบบส่วนท้ายสุดของสัญลักษณ์ OFDM ก่อนหน้านี้มาต่อไว้ที่ส่วนหน้าของสัญลักษณ์ OFDM ถัดไป ซึ่งถูกนำไปใช้ในช่องของเวลาคุมโดยกำหนดความยาวให้มีค่าเท่ากันหรือ มากกว่าค่าสูงสุดของการประวิงเวลา (delay) ที่แผ่กว้างออกดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งวิธีนี้ทำให้แน่ใจได้ว่าสัญลักษณ์ OFDM จะมีค่าเป็นจำนวนเต็มของรอบคลื่นภายในคาบเวลาของ FFT อย่างแน่นอน

ในส่วนทางด้านเครื่องรับจะทำการถอดช่วงเวลาคุมและส่วนหน้าแบบวนออก ซึ่งมีความยาวของช่วงเวลา ตามที่กำหนดไว้ในการป้องกันการเกิด ISI และ ICI ยิ่งถ้ากำหนดความยาวไว้มาก จะสามารถป้องกันปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อเสีย นั่นคือ ทำให้ช่วงเวลาในการส่งข้อมูลมีค่าลดลง เนื่องจากต้องสิ้นเปลืองไปกับการใช้ช่วงเวลาคุมที่เพิ่มขึ้นทำให้สูญเสียกำลังในการส่งผ่านข้อมูล และแถบความถี่ใช้งานไปโดยเปล่าประโยชน์ ฉะนั้นจึงต้องมีการกำหนดช่วงเวลาคุมให้เหมาะสม กับสถานะแวดล้อมที่ใช้ในการส่งสัญญาณด้วยเช่นกัน เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.18 ผลกระทบที่เกิดจากการประวิงหลายวิธีที่ออกนอกเหนือเวลาคุม

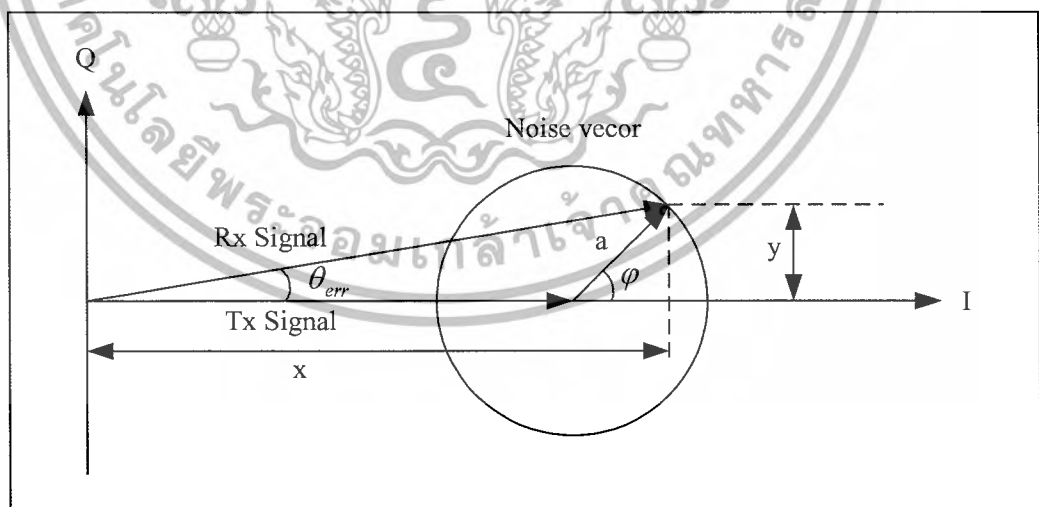


รูปที่ 2.19 สัญลักษณ์ OFDM กับการขยายส่วนหน้าแบบวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 การซิงโครไนซ์ (Synchronization)

ก่อนที่เครื่องรับ OFDM จะสามารถตีความคุณลักษณะคลื่นพาห่อย่อยออกมาได้ จะต้องมีการซิงโครไนซ์อย่างน้อยสองครั้ง โดยครั้งแรกใช้เพื่อหาของเขตของสัญลักษณ์และเวลา (timing) ที่เหมาะสมเพื่อให้ผลกระทบที่เกิดจาก ISI และ ICI มีค่าน้อยที่สุดในขณะนั้น ส่วนครั้งที่สองใช้เพื่อการประมาณค่า และการตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดของสัญญาณที่ได้รับได้ ซึ่งเกิดมาจากความเบี่ยงเบนทางความถี่ของคลื่นพาห่เพื่อใช้ในการหลีกเลี่ยงการเกิด ICI สำหรับเครื่องรับร่วมนัย (coherent receivers) เฟสของคลื่นพาห่ ต้องมีการซิงโครไนซ์ เพื่อใช้ในการตรวจวัดขนาด และเฟสของคลื่นพาห่อย่อยทั้งหมด จนถึงใช้ในการกำหนดขอบเขตสำหรับแผนผัง QAM ของแต่ละคลื่นพาห่อย่อย โดยปกติสัญญาณ OFDM ที่รับได้จะมีความเบี่ยงเบนทางความถี่ซึ่งมีผลลัพธ์ทันที ในรูปของการเกิด ICI ทำให้คลื่นพาห่อย่อยสูญเสียคุณลักษณะของการตั้งฉากซึ่งกันและกัน ซึ่งนำไปสู่การเกิดสัญญาณรบกวนทางเฟส ส่งผลทำอัตราส่วนสัญญาณรบกวนบนกวนทางเฟสและทางความถี่เมื่อเทียบกับ ระบบที่ส่งแบบคลื่นพาห่เดี่ยว สำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าว ได้มีการนำเทคนิคการเพิ่มเติมส่วนหน้าแบบวน หรือชุดสัญลักษณ์ (training symbols) แบบพิเศษ มาใช้ ในการซิงโครไนซ์ ทั้งแบบความถี่และแบบเวลา เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากสัญญาณรบกวนทางเฟส และทางความถี่ให้มีค่าน้อยที่สุด



รูปที่ 2.20 ผลกระทบของสัญญาณรบกวนบนค่ามุมเฟสที่ได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.20 แสดงผลกระทบของสัญญาณรบกวนบนค่ามุมเฟสที่ได้รับ ถ้ากำหนดให้สัญญาณทางค้ำส่งมีค่าเป็น 1 และความยาวของเวกเตอร์สัญญาณรบกวนมีค่าเป็น a กับมุม ϕ ฉะนั้นค่าผิดพลาดของเฟสที่รับได้คือ θ_{err}

จากตรีโกณมิติ

$$x = 1 + a \cos \phi \quad (2.7)$$

$$y = a \sin \phi \quad (2.8)$$

เมื่อ $\theta_{err} = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (2.9)$

เพราะฉะนั้น $\theta_{err} = \tan^{-1} \frac{a \sin \phi}{1 + a \cos \phi} \quad (2.10)$

อัตราส่วนสัญญาณกำหนดตามขนาดของสัญญาณที่ได้รับ และระดับของสัญญาณรบกวน เมื่อสัญญาณถูกสเกลให้มีขนาดเท่ากับ 1 ดังนั้น ขนาดของสัญญาณรบกวนคือ

$$a = \frac{1}{SNR} \quad (2.11)$$

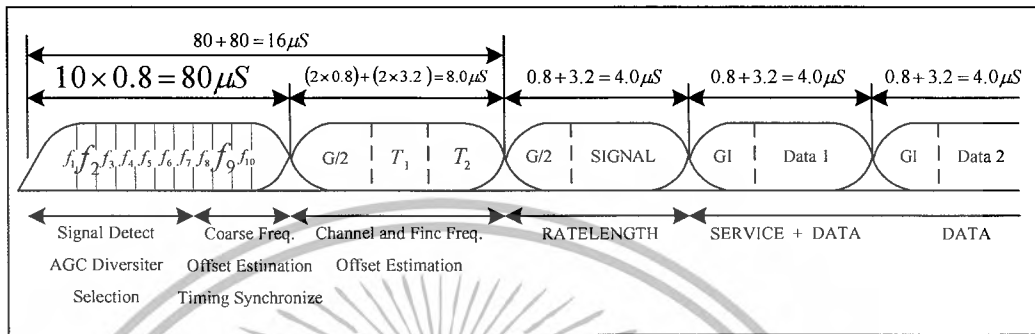
SNR อยู่บนพื้นฐานขนาดของสัญญาณ ดังนั้นสเกลที่ถูกต้องจึงจัดให้อยู่ในรูปของ dB แทนค่าใน

$$\theta_{err} = \tan^{-1} \left(\frac{1}{SNR} \frac{\sin \phi}{\left(\frac{1}{SNR} \right) \cos} \right) \quad (2.12)$$

เทคนิคการชิงโครโมโซมบนพื้นฐานของการเพิ่มส่วนขยายแบบวน เป็นวิธีที่เหมาะสมเป็นพิเศษกับการชิงโครโมโซมที่ไม่ชัดเจนในการติดต่อ ซึ่งไม่มีการใช้งานสัญญาณชุดแบบพิเศษ แต่สำหรับระบบการส่งผ่านแบบแฟ็กเกจนั้น จำเป็นต้องมีการชิงโครโมโซมที่แน่นอน โดยเฉลี่ยจะใช้สัญลักษณ์ OFDM จำนวนมากกว่า 10 สัญลักษณ์ในการชิงโครโมโซม เพื่อให้ได้ค่า SNR ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการส่งผ่านแฟ็กเกจความเร็วสูง เวลาการชิงโครโมโซม จำเป็นต้องเป็นช่วงสั้นซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้สัญลักษณ์ OFDM จำนวนเล็กน้อยภายในบรรจุด้วยข้อมูลซึ่งเครื่องรับสามารถรับรู้ข้อมูลเหล่านี้ได้ โดยสัญญาณชุดที่ได้รับทั้งหมดจะถูกนำมาใช้ในการชิงโครโมโซม ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการเพิ่มส่วนหน้าแบบวน จะใช้เฉพาะบางส่วนของแต่ละสัญลักษณ์เท่านั้น รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างการใช้สัญลักษณ์แบบสั้นและแบบยาวในการชิงโครโนซ์



รูปที่ 2.21 โครงสร้างชุดข้อมูล OFDM

ชิงโครโนซ์จะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ

1. การตรวจจับเฟรม (frame detection)
2. การประมาณค่าความถี่ออฟเซตของคลื่นพาห์และการแก้ไขถูกต้อง (carrier frequency offset and correction)
3. การแก้ไขข้อผิดพลาดของการสุ่ม (sampling error correction)

การตรวจจับเฟรม (Frame detection) ใช้สำหรับการหาจุดเชื่อมต่อของสัญลักษณ์แต่ละสัญลักษณ์ เพื่อให้สามารถที่จะทำการสุ่มค่าของแต่ละสัญลักษณ์ได้อย่างถูกต้อง

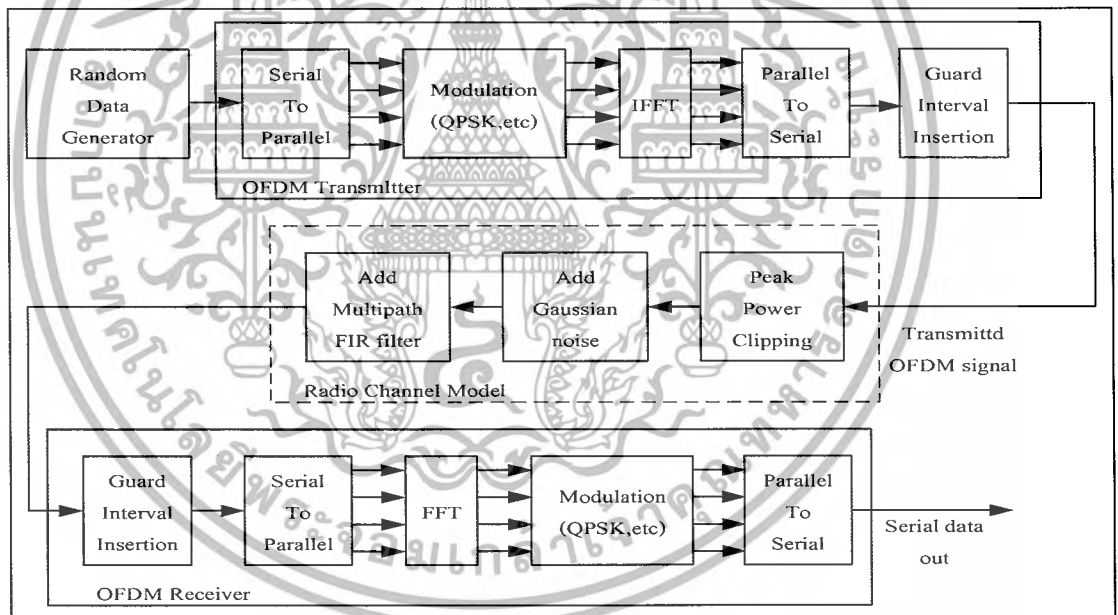
เนื่องจากความแตกต่างของความถี่คลื่นพาห์ของเครื่องส่ง และเครื่องรับทำให้การสุ่มสัญลักษณ์แต่ละครั้งที่เวลา t จะประกอบด้วยค่าเฟคเตอร์ของเฟส (phase factor) ที่ไม่รู้ค่าๆหนึ่ง โดยสามารถเขียนได้โดยที่ค่าความถี่ออฟเซตของคลื่นพาห์ (carrier frequency offset) ที่ไม่รู้ค่าจะนั้นค่าของเฟคเตอร์ที่รู้ค่านี้ จะต้องทำการประมาณค่า และชดเชยสำหรับการสุ่มแต่ละครั้ง ก่อนที่จะนำสัญลักษณ์ที่ได้รับจากการสุ่มไปผ่านกระบวนการ FFT ไม่อย่างนั้นจะทำให้สูญเสียคุณสมบัติของการ Orthogonality ระหว่างช่องสัญญาณย่อยๆ

2.1.7 ระบบ OFDM

รูปที่ 2.22 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับ – ส่งสัญญาณ OFDM โดยที่ส่วนด้านบนเป็นชุดเครื่องส่งและส่วนด้านล่างเป็นชุดเครื่องรับ และเมื่อสังเกตจะพบว่า IFFT ทำหน้าที่คล้ายกับการมอดูเลตสัญญาณอินพุตตามจำนวนของคลื่นพาห์ย่อย และ FFT ทำหน้าที่เหมือนการดีมอดูเลต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณซึ่งตรงกันข้ามกับ IFFT โดยไม่จำเป็นต้องนำ Equalizer มาใช้งาน ทำให้สามารถลดความยุ่งยากซับซ้อนรวมถึงลดต้นทุนทางด้านอุปกรณ์เครื่องรับได้

ในส่วนทางด้านเครื่องส่ง สัญญาณอินพุตที่มีความเร็วสูง และมีแบนด์วิดท์กว้าง จะถูกแบ่งออกตามจำนวนของชุดข้อมูล (data streams) ที่มีความเร็วต่ำ และมีแบนด์วิดท์ค่อนข้างแคบ โดยนำไปเข้ารหัส (coding) และทำการวางสลับ (interleaving) รวมถึงการจัดวางรูปแบบการมอดูเลต (mapping) และมีการเพิ่มเติมในส่วนของสัญญาณ ซึ่งถูกใช้ในการซิงโครไนซ์ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ ในส่วนของ IFFT จะทำหน้าที่แปลงสเปกตรัมความถี่ให้อยู่ในรูปโดเมนเวลาพร้อมกับทำการเพิ่มเติมช่วงเวลาคูมและส่วนหน้าแบบวนเพื่อป้องกันการเกิด ISI และ ICI แล้วจึงนำไปเข้ากับตัวแปลงสัญญาณจาก Digital เป็น Analog พร้อมกับทำการกรองความถี่เพื่อเลือกเฉพาะความถี่ที่ต้องการส่งออกไปเท่านั้น ในส่วนของเครื่องรับก็จะทำงานตรงกันข้ามกับทางด้านส่ง จะแตกต่างกันตรงที่ต้องเพิ่มเติมส่วนของการตรวจสอบการซิงโครไนซ์เท่านั้น



รูปที่ 2.22 บล็อกไดอะแกรมของระบบ OFDM

2.1.7.1 ข้อดีของ OFDM

1. OFDM ทนทานต่อการจางหาย การแทรกสอดระหว่างสัญญาณ การแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห์ และไม่ไวต่อการจางหายเฉพาะความถี่
2. การใช้งานแถบความถี่ที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากยอมให้การเหลื่อมล้ำกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แบนด์วิดท์ที่แคบ (ประมาณ 1 KHz) ทำให้ช่องสัญญาณเกิดการจางหายแบบเรียบ (flat fading) และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า
4. รองรับผู้ใช้บริการได้เป็นจำนวนมากและสนับสนุนอัตราการส่งผ่านข้อมูลความเร็วสูงได้ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้จำนวนคลื่นพาห่อย่อย

2.1.7.2 ข้อเสียของ OFDM

ข้อเสียของ OFDM เมื่อเทียบกับการมอดูเลตแบบคลื่นพาห่เดียว

1. OFDM มีความไวเป็นอย่างมากต่อความเบี่ยงเบนทางความถี่และสัญญาณรบกวนทางเฟส
2. OFDM เกี่ยวข้องกับอัตราการส่งค่าเฉลี่ยสูงสุดของกำลัง ซึ่งนำไปสู่ปัญหาในการทำงานของตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) ของระบบความถี่วิทยุ RF

2.1.7.3 การประมาณค่าสัญญาณ

การประมาณค่าสัญญาณที่ส่งตามหลักการของความน่าจะเป็นสูงสุด พิจารณาสัญญาณที่ได้รับ ในช่วงสัญลักษณ์ OFDM ที่ i ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$x(t) = \sum_{m=0}^{M-1} h_{i,m} s(t - mt_s) + n(t) \quad (2.13)$$

เมื่อ M คือ จำนวนเส้นทางของสัญญาณที่ได้รับ ณ เครื่องรับ, $S(t)$ คือ สัญญาณที่ส่งบน N คลื่นพาห่อย่อย ณ เวลา, t คือ สัญญาณรบกวนอื่นๆ ณ เวลา t , h_i และ m คือ ค่า Scaling Factor หรือ พารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ Path ที่ m ในช่วงสัญลักษณ์ OFDM ที่ i , T_s คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการสุ่มสัญญาณ 1 Sample

ถ้ามีการสุ่มสัญญาณที่ได้รับ $x(t)$ จำนวน L Sample โดยมีช่วงเวลาที่ใช้ในการสุ่มสัญญาณแต่ละ Sample เป็น T_s จะได้เวกเตอร์ของสัญญาณที่ได้รับดังสมการต่อไปนี้

$$x_i = [x(iL)x(iL+1)\cdots x((i+1)L-1)]^T \quad (2.14)$$

$$x_i = A_c B_i A_d h_i + n_i \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

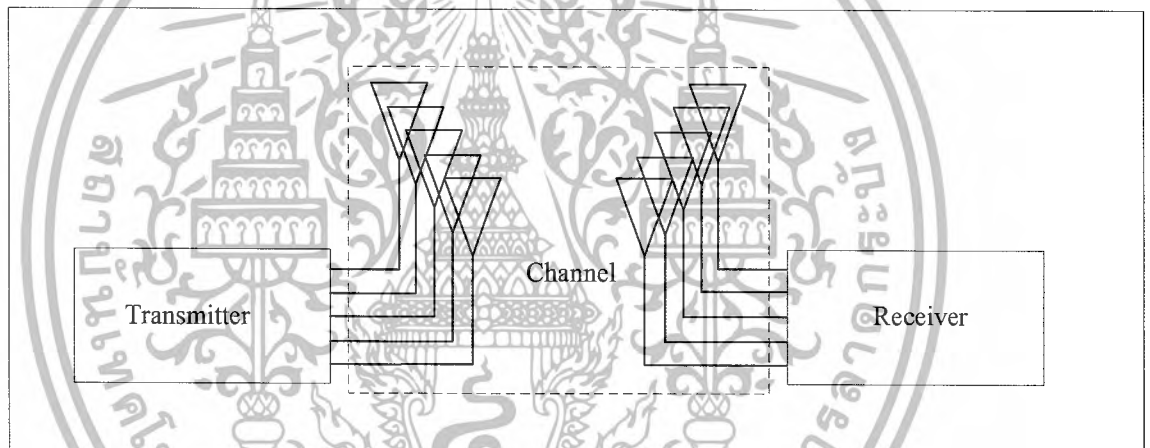
2.2 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

Multiple-input multiple-output (MIMO) เป็นเทคโนโลยีการส่งข้อมูลที่สามารถเพิ่มช่องส่งสัญญาณและพื้นที่ได้โดยใช้เสาอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับ

2.2.1 MIMO Capacity

ความจุช่องสัญญาณของระบบ MIMO จะแปรผันตามจำนวนของสายอากาศ ซึ่งก็คือเมื่อมีสายอากาศมากขึ้น ความจุก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

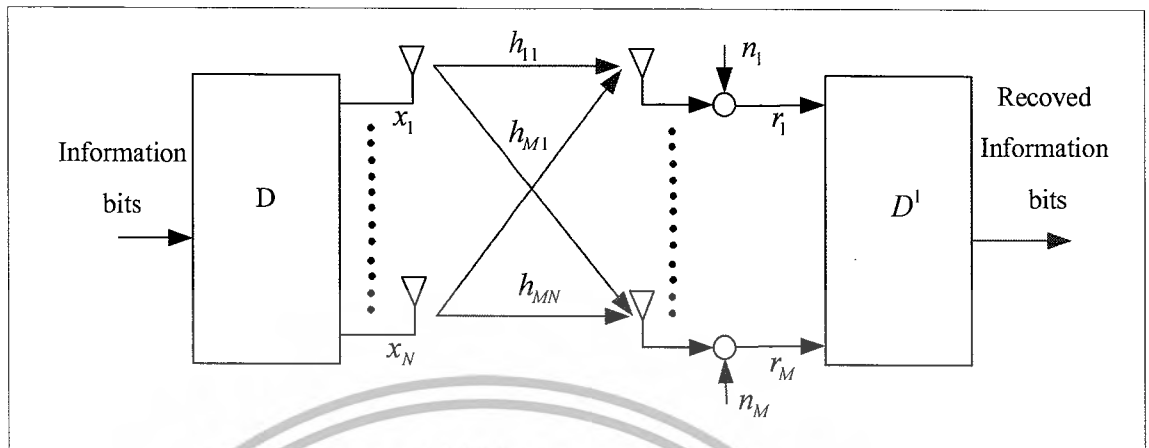
2.2.2 MIMO Encoding



รูปที่ 2.23 สถาปัตยกรรม MIMO

สมมติว่ามีเสาอากาศ N เสาที่ภาคส่ง และ M ตัวที่ภาครับ M Block Diagram ของ MIMO จะเป็นดังรูปที่ 2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 MIMO system block diagram

ในตอนแรกข่าวสารจะถูก Process ใน Block Diagram D เพื่อสร้างสัญญาณสำหรับส่ง โดยสามารถเขียนได้เป็น $N \times 1$ column vector $x = [x_1, \dots, x_N]^T$ กำลังงานที่ถูกส่งไปทั้งหมดขึ้นอยู่กับ P และ x จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ค่ากำลังงานเฉลี่ยจะเท่ากับ $P_x = P/N$

สัญญาณ x_i ถูกส่งจากเสาอากาศ i ($i=1,2,3,\dots,N$) ซึ่งจะผ่านช่องสัญญาณไร้สายและเข้าสู่เสาอากาศตัวรับ j ($j=1,2,3,\dots,M$) สัญญาณที่ได้รับทั้งหมดที่เสาอากาศตัวรับเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$r_j = \sum_{i=1}^N h_{ji} x_i + n_j \quad (2.16)$$

H_{ji} คือ sample ของค่าเชิงซ้อนที่บ่งบอกถึงช่องสัญญาณระหว่างเสาอากาศตัวส่ง i และเสาอากาศตัวรับ j และ n_j มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ สัญญาณเวกเตอร์ที่ได้รับทั้งหมดแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$r = H_x + n \quad (2.17)$$

โดยที่ $r = [r_1, \dots, r_M]^T$ คือ $M \times 1$ column vector ของสัญญาณที่ได้รับผ่านเสาอากาศตัวรับ M , H คือ $M \times N$ complex channel matrix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1} & \dots & h_{M,N} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

X คือ $N \times 1$ vector ของสัญลักษณ์ที่ถูกส่งผ่านเสาอากาศ N และ n คือ $M \times 1$ vector ของสัญญาณรบกวน AWGN ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และค่าความแปรผันเท่ากับ σ_n^2 ที่ภาครับ ให้กำลังงานเฉลี่ยที่เอาท์พุทของเสาอากาศภาครับแต่ละตัวเท่ากับ P_r , SNR ที่ภาครับแต่ละตัวเท่ากับ

$$\gamma = \frac{P_r}{\sigma_n^2} = \frac{P_t \sum_{j=1}^N E[|h_{ji}|^2]}{\sigma_n^2} \quad (2.19)$$

อย่างไรก็ตามสำหรับการ normalization สมมติว่ากำลังงานที่ได้รับที่เสาอากาศตัวรับ M เท่ากับกำลังงานที่ถูกส่งมาทั้งหมด เช่น $P_r = P_t$ ดังนั้นค่า normalization ของ H คือ

$$\sum E[|h_{ji}|^2] = N, j = 1, \dots, M \quad (2.20)$$

ในที่สุดสัญลักษณ์ที่ถูกส่งโดยเสาอากาศคนละตัวจะได้รับพร้อมกันที่ด้านรับ ดังนั้นสัญญาณที่ถูกส่งจากเสาอากาศ i ($i=1, \dots, N$) จะถูกรบกวนโดยสัญญาณจากเสาอากาศที่เหลือในช่องสัญญาณเดียวกัน

MIMO ภาครับแบบง่ายที่สุดคือ filter ที่ match กับ multi-channel impulse response (การ fading ใน flat fading channel)

$$y = H^h r = H^H Hx + n \quad (2.21)$$

Correlation matrix คือ

$$H = H^H H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1} & \dots & h_{N,N} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$G_{j,i}$ ($j, i = 1, \dots, N$) คือ correlation ระหว่าง j -th และ i -th เสาอากาศภาคส่ง, interference ที่เกิดจาก correlation ถูกเรียกว่า co-channel interference (CCI)

2.2.3 ข้อดีของ MIMO

การเพิ่มความเร็วจะไม่ต้องถูกจำกัดด้วยย่านความถี่คลื่นวิทยุที่รัฐบาลเป็นผู้จัดสรรให้อีกต่อไปซึ่งเป็นการก้าวข้ามทฤษฎีเก่าๆ โดยสิ้นเชิงเพราะแต่ก่อนนี้คนเคยเชื่อกันว่า เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วในการรับ-ส่ง ข้อมูลก็ต้องเพิ่มความกว้างของช่วงความถี่ในการสื่อสาร (Bandwidth) เท่านั้น แต่เนื่องจากการใช้งานคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ต่าง ๆ นั้น รัฐบาลของแต่ละประเทศมีการควบคุมอย่างเข้มงวดโอกาสที่จะเพิ่มความเร็วจึงแทบเป็นไปได้เลย

2.2.4 ข้อเสียของ MIMO

คือความยุ่งยากในการออกแบบและผลิตเสาอากาศที่ต้องมีความเที่ยงตรงเป็นอย่างยิ่ง และเนื่องจากการจัดวางขนาดและระยะตำแหน่งของเสาอากาศในระบบ MIMO ต้องเหมือนกันจึงจะสามารถสื่อสารกันได้

2.3 คุณลักษณะทางการแพร่ของช่องสัญญาณ

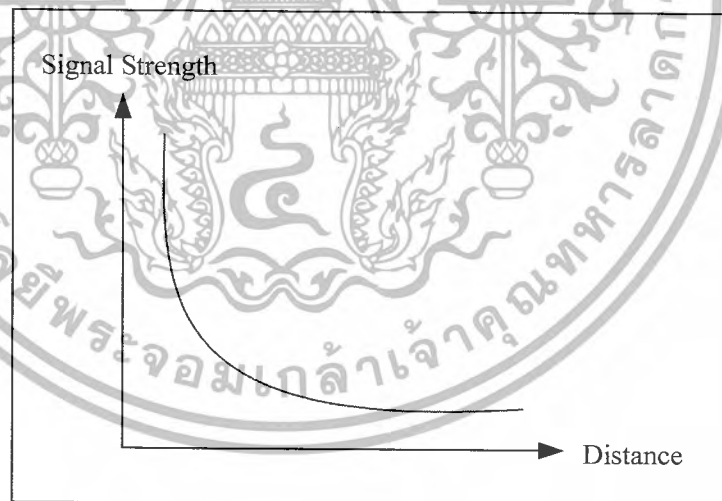
บนช่องสัญญาณวิทยุ สัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงไประหว่างการส่งผ่านไปบนช่องสัญญาณ โดยสัญญาณที่ได้รับจะประกอบด้วย

1. การรวมตัวกันของสัญญาณซึ่งเกิดจากการลดทอน การสะท้อน การหักเห และการแตกตัวของ สัญญาณที่ส่ง
2. สัญญาณรบกวน ซึ่งเกิดจากการส่งผ่านช่องสัญญาณ
3. การเลื่อนความถี่ของคลื่นพาห้ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของเครื่องส่งหรือเครื่องรับ

2.3.1 การลดทอน

การลดทอนของสัญญาณแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

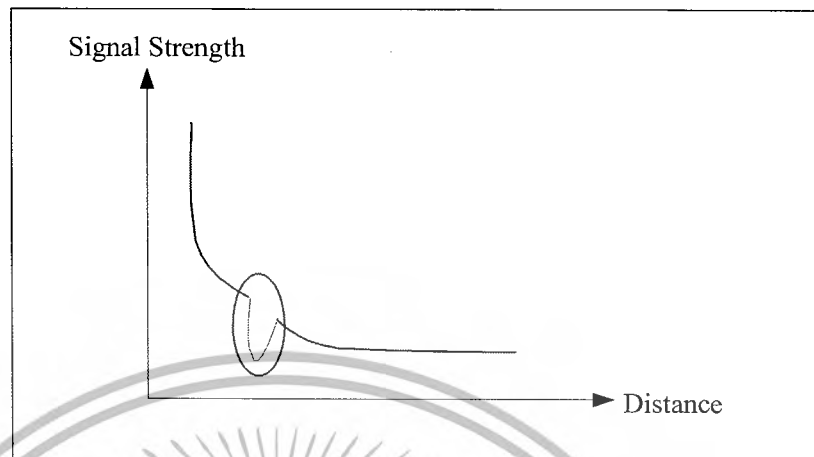
1. การสูญเสียทิศทาง (Path loss) เป็นกานลดทอนของสัญญาณที่กำลังส่งของสัญญาณจะลดลงอย่างคงที่ตามระยะทางในการส่งสัญญาณ



รูปที่ 2.25 กราฟแสดงผลของการสูญเสียทิศทางที่มีต่อสัญญาณ

2. การบดบัง (Shadowing) เป็นการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากมีสิ่งกีดขวางระหว่างเส้นทางในการส่งสัญญาณ เช่น ต้นไม้ อาคาร ภูเขา ฯลฯ

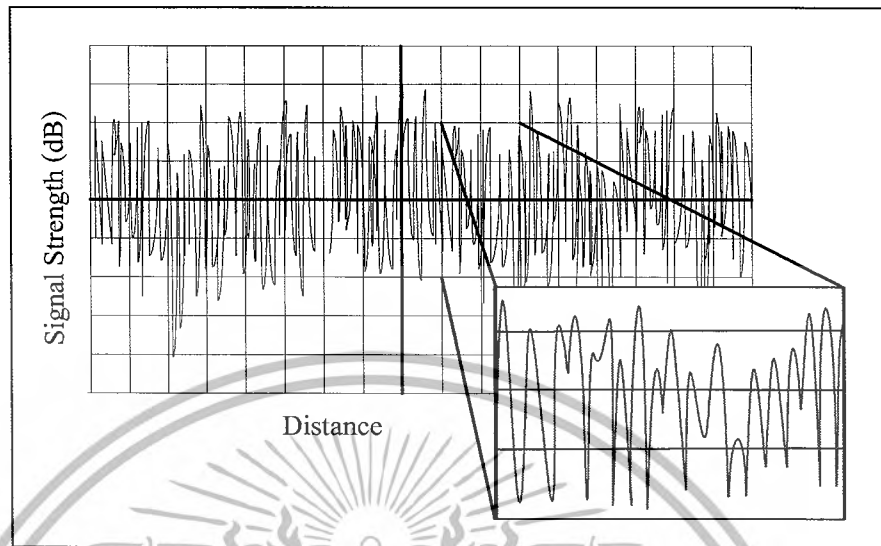
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 กราฟแสดงผลของการสูญเสียทิศทางและการบดบังที่มีต่อสัญญาณ

3. ผลกระทบของสัญญาณจากหลายทิศทาง (Multipath Effect) เกิดจากการสะท้อนของสัญญาณ (ชนกับวัตถุหรือสิ่งกีดขวาง) ทำให้สัญญาณที่ได้รับเกิดจากการรวมตัวกันของสัญญาณจากหลายทิศทาง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การจางหายแบบเร็วและการจางหายแบบเฉพาะความถี่

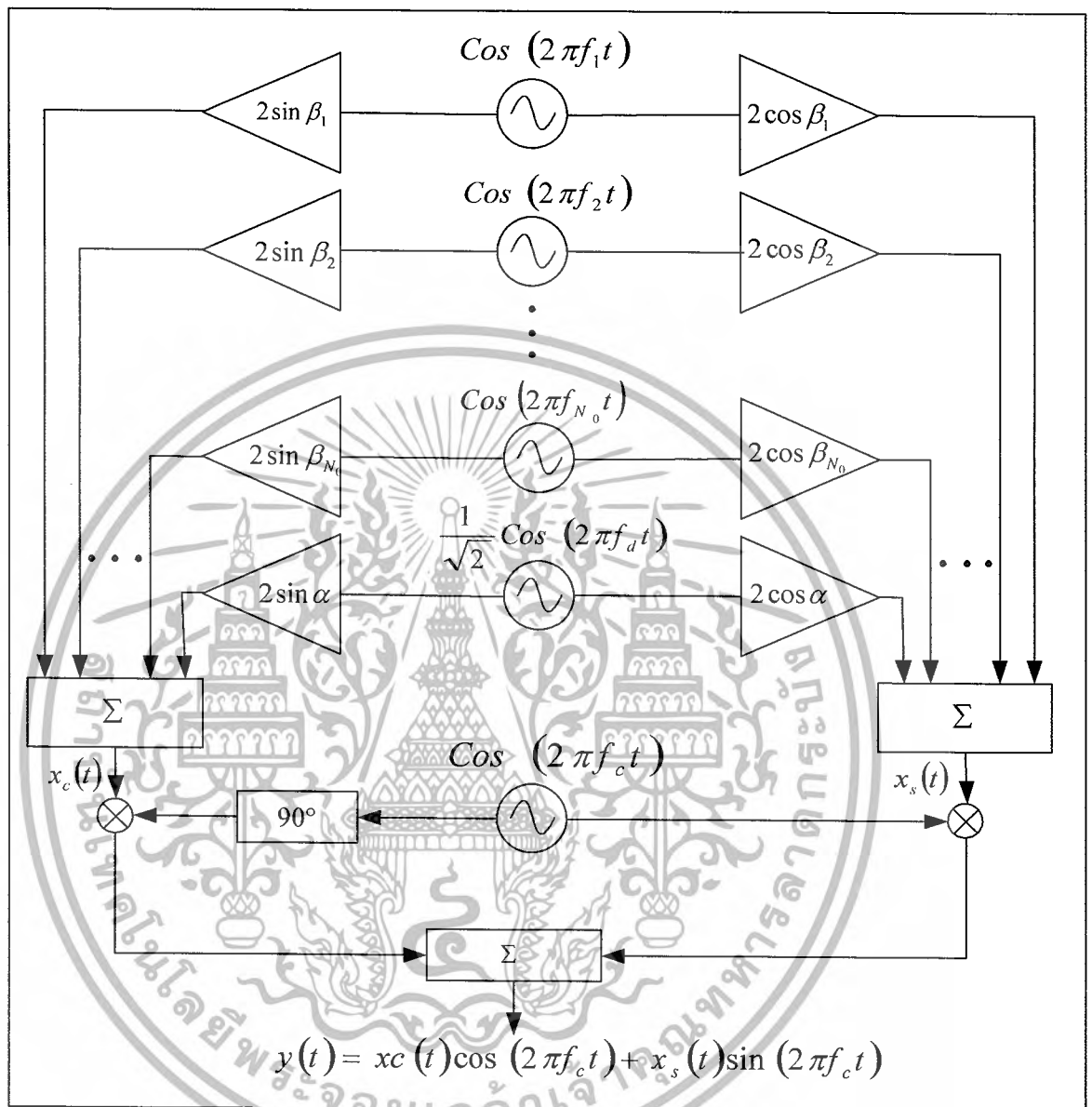
การจางหายแบบเร็ว (Fast Fading) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การจางหายแบบเรย์ลี (Rayleigh Fading) เป็นการลดลง หรือเพิ่มขึ้นของระดับสัญญาณอย่างทันทีทันใด เนื่องมาจากการแทรกสอดแบบเสริม (Constructive Interference) หรือการแทรกสอดแบบหักล้าง (Destructive Interference) ระหว่างสัญญาณตรงและสัญญาณสะท้อนที่มาถึงเครื่องรับ



รูปที่ 2.27 กราฟแสดงผลของการจางหายแบบเรย์ลีเมื่อ Mobile Unit มีการเคลื่อนที่

การจางหายแบบเฉพาะความถี่ การสะท้อนของสัญญาณจากวัตถุที่อยู่ใกล้เคียง เช่น พื้นดิน อาคาร ต้นไม้ ฯลฯ ทำให้สัญญาณจากหลายทิศทางมีกำลังของสัญญาณเท่ากับสัญญาณตรง (สัญญาณซึ่งเดินทางจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับโดยตรง) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการจางหายเฉพาะความถี่ (Frequency Selective Fading) กล่าวคือ กำลังของสัญญาณรอบกวนที่ได้รับเป็นจุดต่ำของระดับสัญญาณ เนื่องจากการแทรกสอดแบบหักล้าง สำหรับการส่งสัญญาณที่มีช่วงกว้างของแถบสัญญาณแคบนั้น ถ้าจุดต่ำของระดับสัญญาณเกิดขึ้นที่ความถี่ที่ส่งแล้ว ข้อมูลที่ส่งไปทั้งหมดจะสูญเสียไป ดังนั้นจึงสามารถแก้ไขได้ คือ ใช้แบบจำลองของเจ็ค (Jake's Model)

ปกติการสร้างแบบจำลองของช่องสัญญาณ Fading แบบหลายวิธีโดยใช้วิธีการการสร้างฮาร์ดแวร์ (Hardware) หรือ ซอฟต์แวร์ (Software) นั้นจะมีประโยชน์อย่างมาก วิธีการสร้างแบบจำลองของสัญญาณโดยส่วนใหญ่จะใช้หลักการมอดูเลตแบบอินเฟสและควอดเรเจอร์ ลักษณะสัญญาณที่ได้จากการวัด



รูปที่ 2.28 โครงสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิธีตามแบบของเจ็ค

สำหรับวิธีการของเจ็คนั้น จะอาศัยโครงสร้างของแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิธีตามรูปที่ 2.28 เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วย วงจรออสซิลเลเตอร์ความถี่ต่ำจำนวน N_0 ชุด ที่มีค่าความถี่เท่ากับ คอเพลอร์ชีพต์ต่างๆกัน และวงจรออสซิลเลเตอร์อีกหนึ่งตัวที่ความถี่คอเพลอร์ชีพต์สูงสุดที่มีค่าเท่ากับ f_d องค์ประกอบทางความถี่ทั้งหมดนี้มีหน้าที่จำลองสัญญาณความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห์ f_{N_0}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเกตว่าองค์ประกอบทางความถี่ของออสซิลเลเตอร์ N_0 ชุด จะกำหนดให้มีแอมพลิจูดเป็น 1 ทั้งหมด ส่วนองค์ประกอบ ทางความถี่ตัวสุดท้ายจะมีแอมพลิจูดเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ สำหรับค่าความถี่ของออสซิลเลเตอร์แต่ละตัวกำหนดให้มีค่าเท่ากับ [6,9]

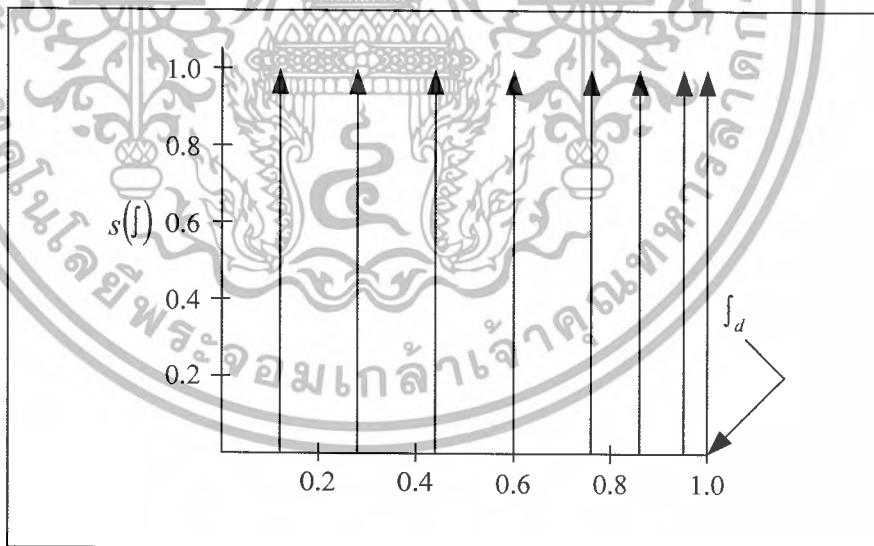
$$f_n = f_d \cos(2\pi n / N) \tag{2.19}$$

โดย $f_d = \frac{v}{d}$ เป็นค่าคอปเปลอร์ชิฟต์สูงสุดและ N มีความสัมพันธ์กับ N_0

$$N_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \tag{2.20}$$

โดยมีข้อกำหนดอีกด้วยว่า $N/2$ ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มคือ

เมื่อนำองค์ประกอบความถี่ทั้งหมดที่ได้มาว่าเป็นตัวอย่างรูปสเปกตรัมความถี่จะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.49 ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นลักษณะที่กำหนดให้ $N_0=8$ และ $N=34$



รูปที่ 2.29 สเปกตรัมความถี่ของออสซิลเลเตอร์สำหรับกรณี $N_0=8$ และ $N=34$

สำหรับค่าของเฟส β_n จะได้รับการกำหนดให้มีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับสภาพที่ต้องการคือ กำหนดให้แต่ละเฟสมีการกระจายแบบยูนิฟอร์มระหว่าง $0 - 2\pi$ คือมีความน่าจะเป็นในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดของเฟสแต่ละค่าเท่า ๆ กันซึ่งเท่ากับ $\frac{1}{2\pi}$ ดังนั้น β_n จึงกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\frac{\pi n}{N_0}$ สำหรับ $n=1, 2, 3, \dots, N_0$

จากรูปที่ 2.29 แสดงให้เห็นว่า $x_c(t)$ และ $x_s(t)$ มีค่าเท่ากับ [6,19]

$$X_c(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \cos \beta_n + \cos(2\pi f_n t) + \sqrt{2} \cos \alpha \cos(2\pi f_d t) \quad (2.21)$$

$$X_s(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \sin \beta_n + \cos(2\pi f_n t) + \sqrt{2} \sin \alpha \cos(2\pi f_d t) \quad (2.22)$$

ในการสร้างสัญญาณ $y(t)$ ให้มีเฟสเป็นแบบ Random และมีการกระจายแบบยูนิฟอร์มระหว่าง $0-2\pi$ จะต้องทำให้เงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริง นั่นคือ $\langle x_s x_c \rangle = \langle x_c^2 \rangle \approx \langle x_s^2 \rangle$ และ ≈ 0 จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ของค่า $\langle x_c^2 \rangle = \langle x_s^2 \rangle$ และ $\langle x_s x_c \rangle$ ได้

ดังนี้

$$\langle x_c^2 \rangle = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \cos^2 \beta_n + \cos^2 \alpha = N_0 + \cos^2 \alpha + 2 \sum_{n=1}^{N_0} \cos^2 \beta_n \quad (2.23)$$

$$\langle x_s^2 \rangle = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \sin^2 \beta_n + \sin^2 \alpha = N_0 + \sin^2 \alpha + \sum_{n=1}^{N_0} \cos^2 \beta_n \quad (2.24)$$

$$\langle x_s x_c \rangle = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \sin \beta_n + \cos \beta_n + \sin \alpha \cos \alpha \quad (2.25)$$

จากความสัมพันธ์ที่ได้นี้สามารถกำหนดค่า β_n และ α ที่เหมาะสมเพื่อให้เงื่อนไขทั้งสองข้อข้างต้นเป็นจริงได้

1. ส่งสัญญาณที่มีช่วงกว้างของแถบสัญญาณกว้าง หรือมีการแผ่กว้างของแถบความถี่ (Spread Spectrum) การลดลงของแถบความถี่ส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังของสัญญาณเพียงบางส่วนเท่านั้น ไม่ได้สูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมด
2. แบ่งช่องสัญญาณไปเป็นช่องสัญญาณย่อยๆ ที่มีช่วงกว้างของแถบสัญญาณเล็กลง การเกิดจุดต่ำของระดับสัญญาณที่แถบความถี่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้กับทุกๆ ความถี่คลื่นพาห้ ทำให้มีเพียงบางคลื่นพาห้ที่สูญเสียข้อมูลไป ซึ่งข้อมูลของคลื่นพาห้ที่เสียไปสามารถกู้คืนได้โดยใช้การเข้ารหัสสำหรับแก้ไขข้อผิดพลาด (Error Correction Coding: ECC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

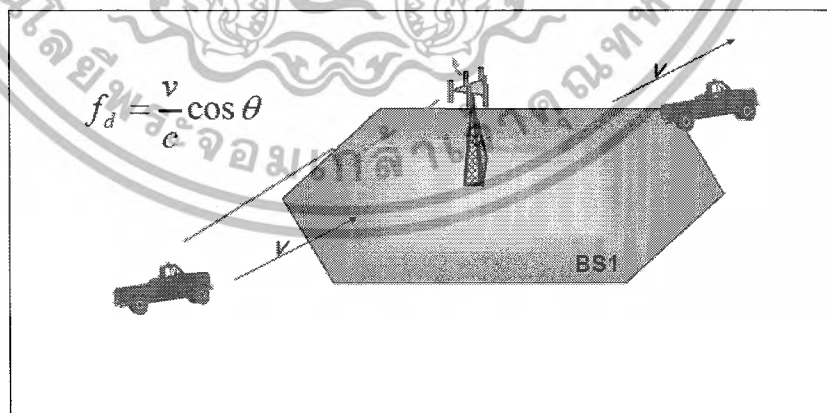
2.3.2 การแผ่กว้างของการประวิง

สัญญาณวิทยุที่ได้รับจากเครื่องส่งประกอบด้วยสัญญาณตรง และสัญญาณสะท้อนที่สะท้อนจากวัตถุทิศทางการต่างๆ เช่น อาคาร ภูเขา และวัตถุอื่นๆ สัญญาณสะท้อนจะมาถึงเครื่องรับช้ากว่าสัญญาณตรง ซึ่งการแผ่กว้างของการประวิง (Delay Spread) ก็คือการแผ่กว้างของเวลาระหว่างสัญญาณจากหลายทิศทางที่มาถึงเครื่องรับเป็นสัญญาณแรกและสัญญาณสุดท้าย

ในระบบดิจิทัลการแผ่กว้างของการประวิงสามารถก่อให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการซ้อนทับกันของสัญญาณจากหลายทิศทางที่ประวิงมากับสัญญาณของช่วงสัญลักษณ์ใหม่ที่ส่งมา การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์นี้จะมึบทบาทมากในระบบที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา (TDM) นอกจากนี้ยังเครื่องส่งมีอัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้นก็ยิ่งทำให้มีการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์เพิ่มมากขึ้น

การลดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์สามารถทำได้โดยการลดอัตราการส่งสัญลักษณ์ โดยการลดอัตราการส่งข้อมูลของแต่ละช่องสัญญาณ หรืออาจจะใช้รูปแบบของการเข้ารหัสเพื่อให้นานขึ้นต่อการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ดังในกรณีของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงรหัสก็ได้

2.3.3 การเคลื่อนไปของ Doppler Shift



รูปที่ 2.30 การเกิด Doppler Shift

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ Doppler Shift คือปรากฏการณ์ที่เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันระหว่างจุดส่งคลื่นและจุดรับคลื่น ซึ่งจะทำให้ความถี่ที่จุดรับได้แตกต่างไปจากความถี่จริงที่ส่งคลื่นออกมา ผลกระทบจาก Doppler Shift ความเร็วของการแพร่ของคลื่นการเคลื่อนไปของ Doppler ของความถี่สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$f_D = (2 \times V)(f/c) \quad (2.26)$$

เมื่อ f_D คือ ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของสัญญาณจากเครื่องส่งกับสัญญาณที่เครื่องรับได้รับ

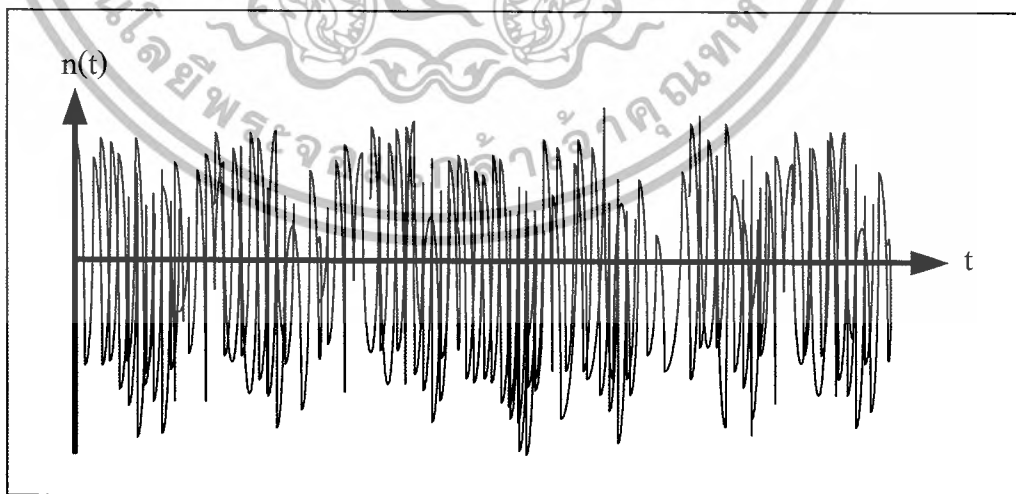
f คือ ความถี่ของสัญญาณจากเครื่องส่ง

v คือ ความเร็วที่แตกต่างกันระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่มีการเคลื่อนที่

c คือ ความเร็วแสง

2.3.4 White Gaussian noise

White Gaussian noise เป็นสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นมาเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบสุ่มตามอุณหภูมิของอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านตัวนำ ที่มีความต้านทานภายในวงจร โดยสเปกตรัมกำลัง (Power Spectrum) ของสัญญาณรบกวนนี้จะมีลักษณะที่เรียบ หรือกล่าวได้ว่าทุกๆ Harmonic ของสัญญาณรบกวนจะมีค่าพลังงาน เท่ากันอย่างต่อเนื่องตลอดย่านสเปกตรัม White Noise จะมีลักษณะการกระจายแบบเกาส์เซียน ดังนั้นจึงเรียกชื่อกันว่า White Gaussian Noise



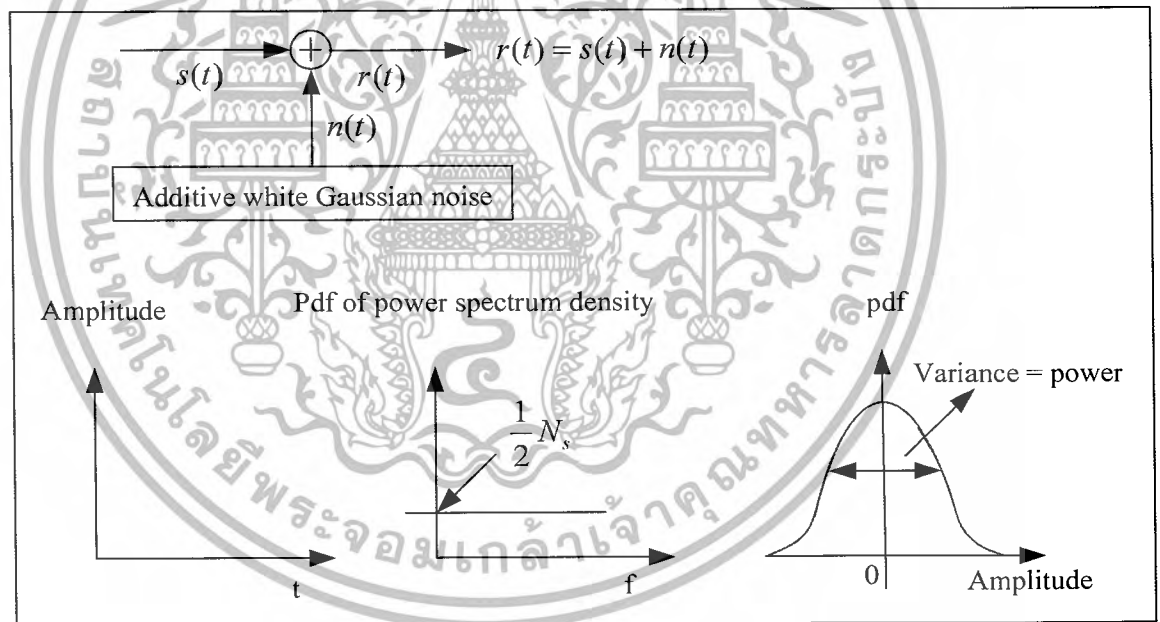
รูปที่ 2.31 สัญญาณรบกวนแบบ white noise

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 AWGN Channel Block

สัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารนั้นส่วนมากจะจำลองให้เป็นสัญญาณรบกวนแบบขาวบวก (AWGN: Additive White Gaussian Noise) ซึ่งจะมีความหนาแน่นของสเปกตรัมเป็นแบบยูนิฟอร์ม (uniform spectrum density) แอมพลิจูดมีการแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian distribution) โดยปกติแล้วสัญญาณรบกวนทางอุณหภูมิ (thermal noise) และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (electrical noise) ที่เกิดจากการขยายสัญญาณนั้นจะมีคุณสมบัติของ White Gaussian Noise ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวสามารถจำลองให้เป็นสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ได้ ซึ่งฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function) ของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN แสดงได้ดังนี้

$$\phi_{nn}(f) = \frac{1}{2} N_s \quad (2.27)$$

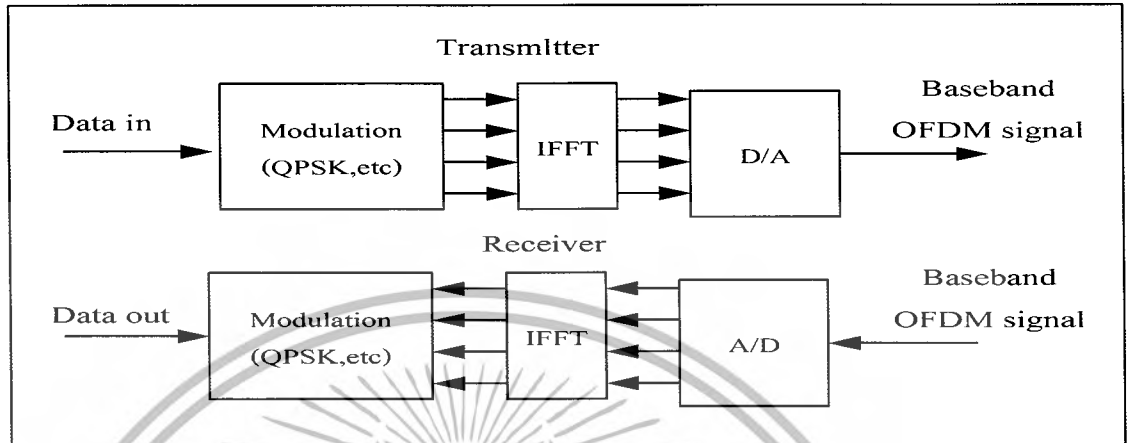


รูปที่ 2.32 คุณสมบัติของสัญญาณรบกวนแบบขาวบวก

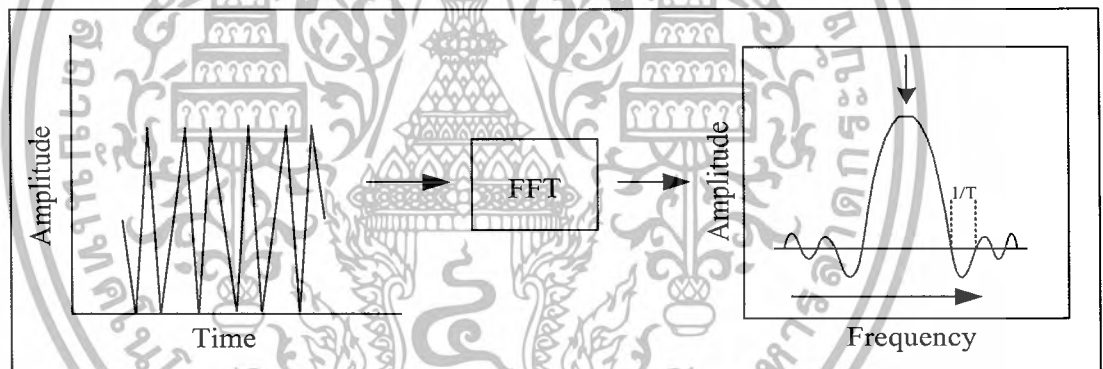
2.4 Fast Fourier Transform (FFT)

FFT ก็คือ DFT แต่เป็นการสลับตำแหน่งข้อมูลและเทคนิคการรวมสัญญาณ เพื่อย่อยให้จำนวนการแปลงลดรูปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 หลักการพื้นฐานในการนำ IFFT และ FFT มาใช้งานกับระบบ OFDM

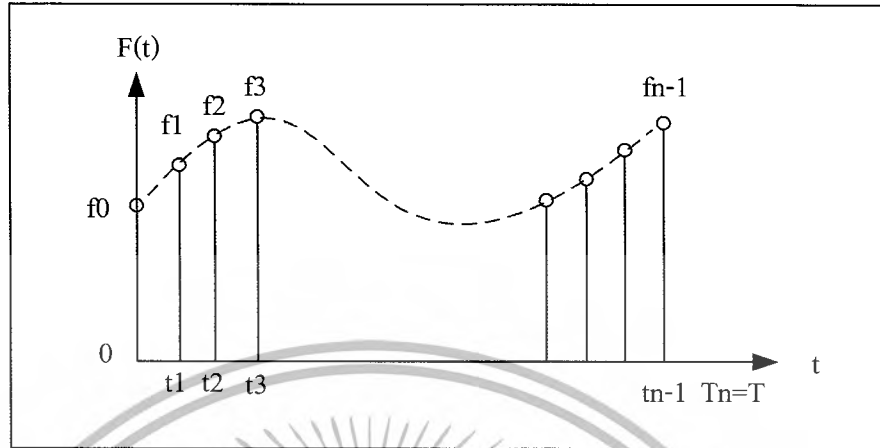


รูปที่ 2.34 การเปลี่ยนรูปจากสัญญาณ โดเมนเวลาเป็นสเปกตรัมความถี่โดยใช้ FFT

2.4.1 Discrete Fourier Transform

Discrete Fourier Transform เป็นการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่องโดยข้อมูลที่สุ่มเข้ามาจะต้องเริ่มจากค่า “0” ถึง “1” ดังรูป โดยให้ค่า N เป็นจำนวนการสุ่มข้อมูลทั้งหมด โดยมีค่า t_n เป็นเวลาในการส่งข้อมูล และค่า f_n เป็นค่าของฟังก์ชันต่อเนื่องตามการสุ่มของ t_n ใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



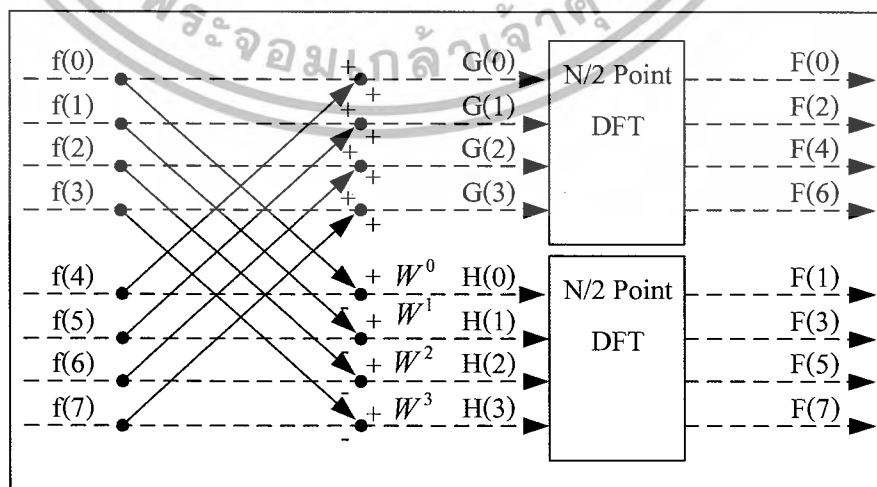
รูปที่ 2.35 Discrete Fourier Transform

2.4.2 ทฤษฎี Fast Fourier Transform

FFT เป็นการพัฒนามาจาก DFT เพื่อให้มีการคำนวณเร็วขึ้น ซึ่ง DFT ต้องการข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณเป็นจำนวน N^2 แต่ FFT ใช้ข้อมูลในการคำนวณประมาณ $N \log_2 N$

FFT จะคำนวณเร็วกว่า DFT ประมาณ 10 เท่า โดยจะใช้วิธีการแบบบิตเรโวลูชันหรือวิธีการของคูเลย์-ตุคีย์

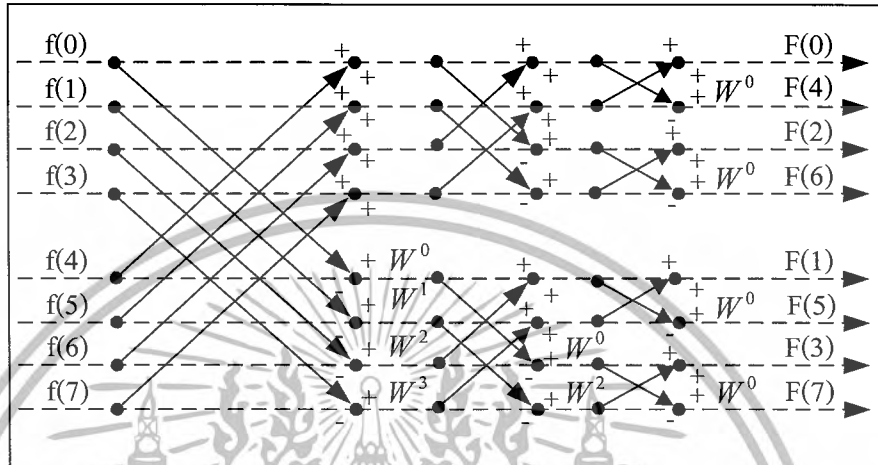
สำหรับการหาค่าฟาสต์ฟูเรียร์ทรานฟอร์มจะใช้แค่ 2 จุดในการคำนวณหาค่าของฟาสต์ฟูเรียร์ทรานฟอร์มที่สมบูรณ์จะต้องมีการคูณด้วยแฟกเตอร์ที่เหมาะสม ค่า “W” โดยค่า W จะต้องเริ่มจาก W^0 to $W^{N/2-1}$



รูปที่ 2.36 การหาค่า 8 จุดฟาสต์ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการคำนวณต้องทราบค่าของ N ที่จะใช้ในการคำนวณ จากรูปจะใช้ค่า $N=8$ และจะใช้ค่า g_n และ h_n ที่คำนวณได้เป็นจำนวน $N/2$ จุด โดยมีค่า W^0 มาคูณกับค่า h_n และคำนวณต่อไปดังนี้



รูปที่ 2.37 การหาค่า 8 จุดฟาสฟูเรียร์ทรานฟอร์ม

จากรูปข้างบนเมื่อคำนวณช่วงแรกเสร็จจะคำนวณช่วงที่ 2 ต่อ โดยมีวิธีการคำนวณดังรูปและจะใช้ข้อมูลในการคำนวณทั้งสิ้นประมาณ $N \log_2 N$ สามารถหาจำนวนบิตเตอร์ฟลายได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนบิตเตอร์ฟลาย} &= (N/2) \times \log_2 N \times 2 \\ &= N \log_2 N \end{aligned} \tag{2.28}$$

โดย $N/2$ = จำนวนแถวของบิตเตอร์ฟลาย (มี 2 ชุด)

$\log_2 N$ = จำนวนหลักของบิตเตอร์ฟลาย

แต่ละบิตเตอร์ฟลายต้องมี 2 ชุดเท่านั้น

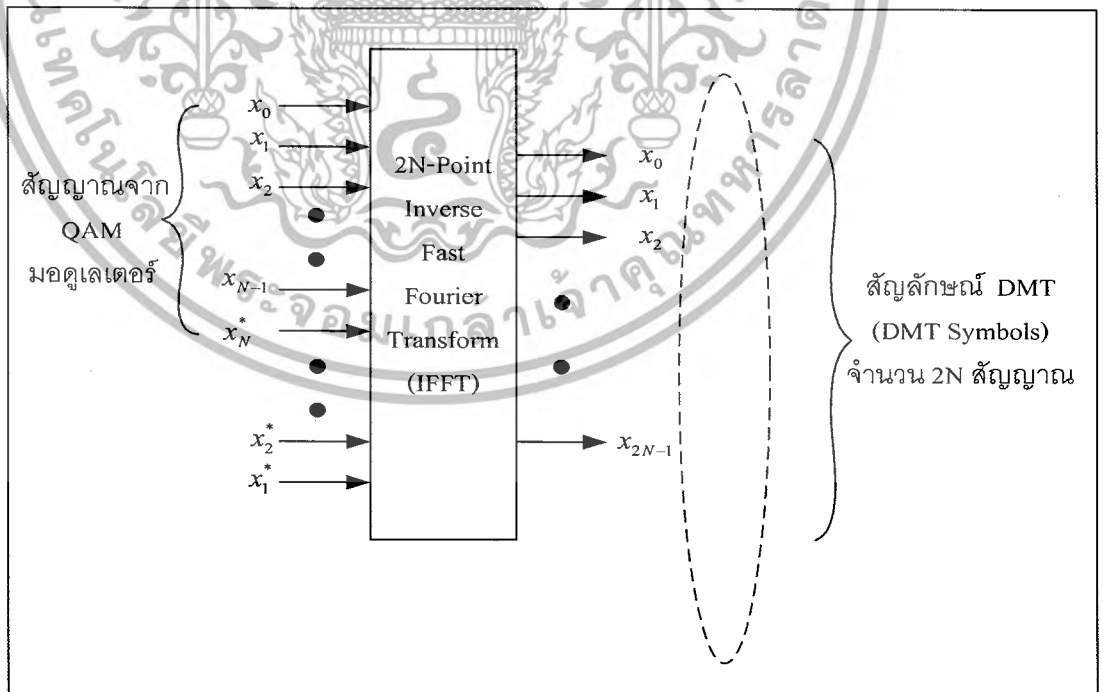
2.5 การแปลงผกผันฟูเรียร์แบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform)

ต้องการทำการแยกแยะแบนด์ย่อย DMT นี้เองที่จะใช้ประโยชน์จากกรรมวิธีที่สำคัญอันหนึ่งของทฤษฎีการประมวลผลดิจิทัล นั่นก็คือใช้ การแปลงผกผันฟูเรียร์แบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform : IFFT) กับสัญญาณเชิงซ้อนจาก QAM modulator การแปลงผกผันฟูเรียร์จะหมายถึงการหาค่าองค์ประกอบของสัญญาณในโดเมนเวลา (time domain) ซึ่งก็คือ สัญญาณที่จะส่งผ่านช่องการสื่อสาร จากสัญญาณในโดเมนความถี่ (frequency domain) ซึ่งได้ เป็นเอาต์พุตของ QAM โมดูเลเตอร์ เหตุที่สัญญาณนี้ถือว่าเป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ นั้นหมายถึงว่า ในแต่ละสัญญาณสุ่ม (Sample) ของสัญญาณ จะถือว่าเป็นองค์ประกอบทางความถี่หนึ่งค่า ที่ภาครับก็จะใช้การแปลงฟูเออร์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกรวดเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ซึ่งเป็นการแปลงกลับของ IFFT เพื่อแปลงสัญญาณในโดเมนเวลานั้นกลับไปเป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ เพื่อเป็นสัญญาณอินพุต ให้กับ QAM demodulator

เมื่อลำดับสัญญาณจาก QAM modulator ถูกนำเข้าสู่ตัวแปลงอนุกรม/ขนาน (S/P) สัญญาณก็จะเรียงลำดับออกเป็น N สัญญาณคือ X_1 ถึง X_N ซึ่งจะถูกลบเป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน (complex coefficients) ของการแปลง IFFT เพื่อการมอดูเลตกับคลื่นพาห่อย่อยจำนวน N คลื่นพาห้ ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตของการแปลง IFFT ก็คือ สัญญาณในเชิงโดเมนเวลา (ซึ่งจะถูกส่งไปยังเครื่องรับผ่านช่องการสื่อสาร ซึ่งก็คือคู่สายโทรศัพท์)

ใช้สัญญาณ $2N$ สัญญาณ X_1 ถึง X_{2N} เป็นสัญญาณสมมาตร โดยใช้สัญญาณเชิงซ้อนจำนวน N สัญญาณคือ X_0 ถึง X_{N-1} รวมกับ สัญญาณ N ที่ได้จากการทำคอนจูเกตเชิงซ้อน (complex conjugate) กับ X_0 ถึง X_{N-1} ซึ่งได้เป็น X_1^* ถึง X_N^* สัญญาณทางโดเมนเวลา ที่เป็นเอาต์พุตของ IFFT นี้ เรียกว่าเป็น สัญญาณ DMT (DMT symbol) ซึ่งมีจำนวน $2N$ สัญลักษณ์ การเลือกให้สัญญาณเชิงซ้อนมีลักษณะเป็นสมมาตรเช่นนี้จะทำให้ได้สัญญาณ x_0 ถึง x_{2N-1} ที่เป็นสัญญาณจริง (real signal) ในโดเมนเวลา



รูปที่ 2.38 สัญญาณเชิงซ้อนโดเมนความถี่ จำนวน $2N$ สัญญาณ ถูกแปลงฟูเรียร์ผกผัน (IFFT)

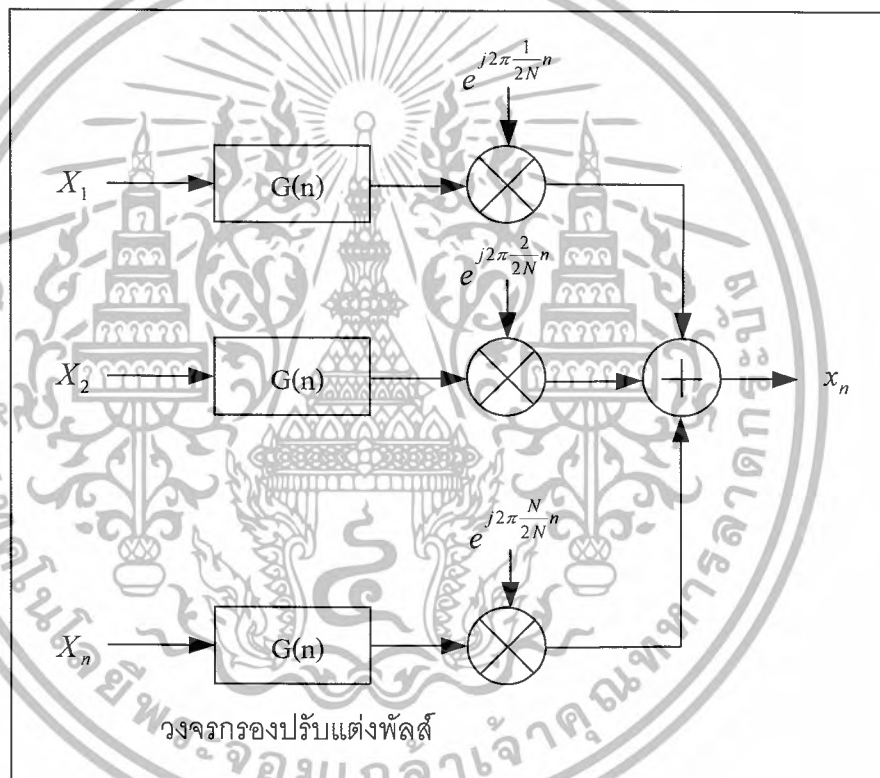
ขนาด $2N$ จุด ทำให้ได้เป็น สัญญาณจริงโดเมนเวลา $2N$ สัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณียกเว้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงผกผันฟูเรียร์ IFFT จะแสดงสมการข้างล่าง

$$x_n = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{2N-1} X_k e^{j\frac{2\pi k}{2N}n}, n = 0, 1, \dots, 2N-1 \quad (2.29)$$

โดยที่ X_0 ถึง X_{N-1} ทำหน้าที่เป็น ค่าถ่วงน้ำหนัก หรือ สัมประสิทธิ์ของการแปลง IFFT ค่า k ที่แสดงนั้น คือ ค่าความละเอียดทางความถี่ หรือ เป็นความถี่ของคลื่นพาห่อย่อยดิจิทัล



รูปที่ 2.39 การมอดูเลต แบบ มัลติแคเรียร์ โดยใช้ การแปลงผกผันฟูเรียร์

2.6 เทคโนโลยี OFDMA

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) เป็นเทคโนโลยีการขนส่งข้อมูลโดยใส่ไว้บนคลื่นความถี่(ที่เรียกว่าCarrierหรือคลื่นพาหะ)ที่ทำให้ผู้ใช้หลายๆคนสามารถใช้ความถี่(Frequency)ในการใช้รับส่งข้อมูลให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น หลักการง่ายๆก็คือแทนที่เราจะนำคลื่นพาหะทั้งย่านที่จะใช้มาส่งข้อมูล ในOFDMAนั้นขั้นแรกเราจะแบ่งย่านความถี่คลื่นพาหะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เป็นช่องย่อยๆหลายช่องที่เรียกว่าคลื่นพาหะย่อย(Sub Carrier) ซึ่งแต่ละคลื่นพาหะย่อยก็เปรียบเสมือนหนึ่งช่องในการขนส่งข้อมูล ผลที่ได้ก็คือเราสามารถที่จะส่งข้อมูลหลายๆชุดไปพร้อมกันได้ ในคลื่นพาหะเดียวกันนั่นเอง ในการส่งนั้นฝั่งส่งจะแยกข้อมูลที่จะส่งเป็นหลายส่วนย่อยซึ่งแต่ละส่วนจะถูกส่งไปบนคลื่นพาหะย่อยแต่ละตัว หลังจากนั้นจะมีการรวมคลื่นพาหะย่อยนี้เข้าด้วยกันแล้วทำการส่งออกไป ในทางกลับกันเมื่อมาถึงฝั่งรับคลื่นที่ถูกรวมไว้จะถูกแยกเป็นแต่ละคลื่นพาหะย่อยเพื่อดึงเอาข้อมูลในแต่ละส่วนย่อยออกมาและนำมารวมเป็นข้อมูลที่ถูส่งมาทั้งหมด ในท้ายที่สุด จุดสำคัญที่สุดของเทคโนโลยีนี้คือการเลือกความถี่ของคลื่นพาหะย่อยจะต้องทำให้แต่ละคลื่นพาหะย่อยไม่เกิดการรบกวน(Interference)ซึ่งกันและกันหรือเรียกว่าคลื่นพาหะย่อยเหล่านี้มีคุณสมบัติ”Orthogonal”ต่อกันนั่นเอง โดยมีลักษณะที่ว่าในแต่ละคลื่นพาหะย่อยนั้น ณ จุดศูนย์กลางของความถี่ช่วงที่สัญญาณมีระดับความแรงสูงสุดนั้น จะซ้อนทับกับจุดที่ระดับความแรงสัญญาณของคลื่นพาหะย่อยที่ความถี่อยู่ติดกันเป็นศูนย์พอดีผลก็คือถ้าเราเลือกชุดของคลื่นพาหะย่อยที่ Orthogonalกันอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว จะสามารถสร้างคลื่นพาหะย่อยที่อยู่ติดกันจำนวนมากขึ้นได้ ทำให้สามารถใช้งานความถี่ของคลื่นพาหะเดียวสร้างช่องทางย่อยเพื่อส่งข้อมูลจำนวนมากๆได้อย่างคุ้มค่านั่นเอง ในขั้นที่สองนั้น นอกจากสร้างคลื่นพาหะย่อยมาเป็นช่องทางย่อยในการรับส่งข้อมูลขึ้นมาแล้ว ยังสามารถแบ่งซอยคลื่นพาหะเป็นช่องย่อยตามเวลาที่ผ่านไปในการส่งข้อมูลโดยจะแบ่งช่วงเวลาเป็นคาบเท่าๆกันที่เรียกว่าSlot เมื่อรวมการแบ่งซอยคลื่นพาหะทั้งสองแกนขึ้นดังกล่าวเข้าด้วยกัน จะเห็นได้ว่า OFDMA สามารถแบ่งความถี่ของคลื่นพาหะออกเป็นกลุ่มๆตามแต่ละคลื่นพาหะย่อย (หรือกลุ่มของคลื่นพาหะย่อยที่เรียกว่าSub channel) และตามแต่ละช่วงเวลา (Slot)ในการส่งข้อมูล

บทที่ 3

การออกแบบโครงงาน

การออกแบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) เนื่องจากบทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) จากทฤษฎีที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าทฤษฎีของ ทั้ง 2 ระบบเป็นนวัตกรรมระดับสูง โดย OFDM นั้น มีความจุของสเปกตรัมที่เกินขีดจำกัดทางด้านทรัพยากรความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด ส่วนทางด้านระบบ MIMO ก็เป็นนวัตกรรมที่ช่วยในการส่งสัญญาณได้หลายเสามากขึ้น

3.1 หลักการออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDM

ลักษณะเด่นของระบบ OFDM มีการแยกเป็น sub carrier โดยแต่ละ carrier ตั้งฉากซึ่งกันและกัน (orthogonal) ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของความจุสเปกตรัมหรือ Bandwidth มีค่าสูงขึ้น อีกทั้งยังทนทานต่อการจางหายแบบหลายวิถีได้ดี

ลักษณะเด่นของระบบ MIMO คือมีการแยกส่งข้อมูลหลายเสาอากาศ โดยแต่ละเสามีข้อมูลการส่งที่แตกต่างกัน ส่งไปยังภาครับที่มีจำนวนเสาอากาศรับเท่ากัน ทำให้ส่งข้อมูลได้รวดเร็วขึ้นในแต่ละเฟรม

3.1.1 หน้าที่การทำงานในแต่ละส่วนของระบบ OFDM

3.1.1.1 ภาควิทยุ (Transmitter) จะต้องทำหน้าที่ตามลำดับดังนี้

1. ส่งข้อมูลในรูปแบบของ bit stream เป็นรูปแบบของสัญญาณ Digital
2. แปลงสัญญาณในรูปแบบของ bit stream ด้วย S/P หรือ Serial to Parallel ที่มี bite rate สูง ให้แยกออกจากกันเป็น sub stream ที่มี bite rate ต่ำ โดยแยกตามจำนวนคลื่นพาห์ที่ต้องการส่ง
3. ทำการ Modulation ข้อมูลรวมเข้ากับคลื่นพาห์ ซึ่งในที่นี้ใช้หลักการ Bi Phase Shift Keying ในการ Modulation สัญญาณ Digital ให้อยู่ในรูปแบบของ Analog
4. ส่งเข้า Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) แปลง Frequency Domain ให้อยู่ในรูปแบบของ Time Domain และ ทำการเพิ่ม Cyclic Prefix (CP) แทรกแถบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันแคบๆ เพื่อลด Inter-Block Interference (IBI) แล้วทำการ Parallel to Serial ก็จะได้สัญญาณ OFDM ออกมา

- รวมสัญญาณ OFDM เข้ากับ MIMO ด้วย Transmitter Combiner ส่ง Sub carrier ออกไป

3.1.1.2 ภาครับ (Receiver) จะต้องทำหน้าที่ตามลำดับดังนี้

- รับสัญญาณจากภาครับ โดยระบบ MIMO ฝั่งรับมีสายอากาศรับหลายสาย ถอดสัญญาณ OFDM
- ทำการ Detect สัญญาณเพื่อหาสัญญาณที่ต้องการหรือการทำ Equalization ปรับ Amplitude และ Phase ของสัญญาณ
- สัญญาณ OFDM ทำการถอด Cyclic Prefix ออกแล้วเข้า Fast Fourier Transform (FFT) แปลงสัญญาณจาก Time Domain เป็น Frequency Domain
- ทำการ Demodulation ข้อมูลรวมออกจากรับสัญญาณ ซึ่งในที่นี้ใช้หลักการ Bi Phase Shift Keying ในการ Demodulation สัญญาณ Analog ให้อยู่ในรูปของ Digital ดั้งเดิม
- แล้วทำการแปลงสัญญาณ Sub Channel โดย P/S หรือ Parallel to Serial ให้อยู่ในรูปของ bit stream ข้อมูลเดิมอีกครั้ง

3.2 ออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDM รวมเข้ากับระบบ MIMO

หลังจากทราบคุณสมบัติของระบบ MIMO แล้วและได้ออกแบบระบบ OFDM SISO เพื่อปรับใช้กับระบบ MIMO สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นเรื่องต่อไปคือการ Detect สัญญาณ ซึ่งได้นำรูปแบบการ Detect สัญญาณดังนี้

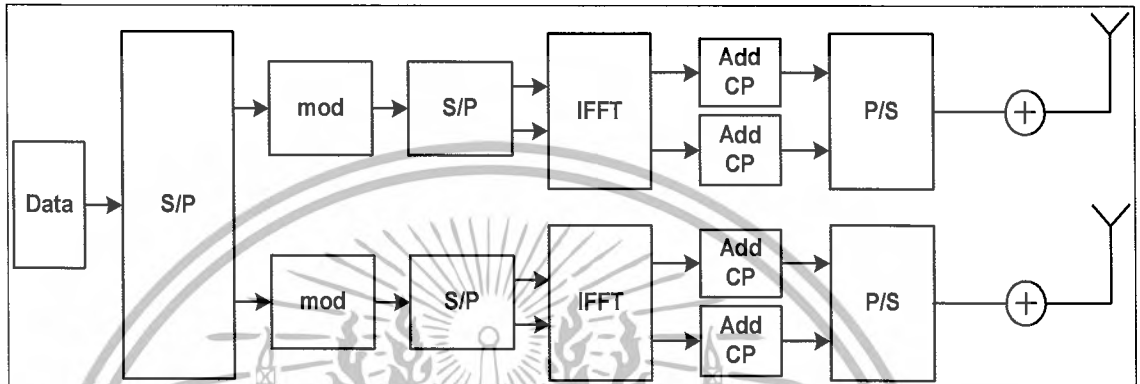
3.2.1 ออกแบบทางภาคส่ง

- ทำการส่ง Data Stream ผ่านเข้า Serial to Parallel แยกเป็น 2 สาย เพื่อแยกแต่ละสายในการส่งในแต่ละเสา
- ทำการ Modulation จากสัญญาณ Digital เป็น Analog ในแต่ละสาย แต่ละสายทำ Serial to Parallel แยกออกเป็น 2 สายอีกต่างหาก
- ในแต่ละทำการเข้า IFFT แบบ 2 จุด
- ทำการ Add Cyclic Prefix ลงไป ในแต่ละสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สุดท้ายทำการ Parallel to Serial ให้เหลือ 2 สายส่งเป็น High Data Rate ออกไปทั้งหมด 2 เสา

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาคส่ง ได้ดังนี้



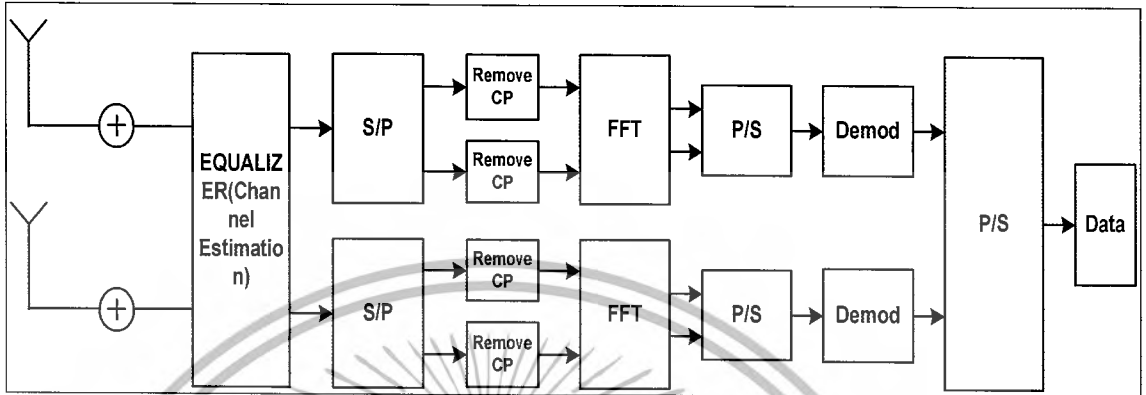
รูปที่ 3.1 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM MIMO ทางภาคส่ง

3.2.2 ออกแบบทางภาครับ

1. ทำการรับสัญญาณจากภาครับมา ผ่านเข้าตัวจับสัญญาณ Detector โดยใช้หลักการของ Channel Estimate
2. เข้าสู่วงจร Serial to Parallel ในแต่ละเสาออกเป็น 2 สาย
3. ทำการถอด Cyclic Prefix ออก
4. ทำการเข้า FFT 2 จุด แล้วเข้าสู่วงจร Parallel to Serial ในแต่ละเสา
5. ทำการ Demodulation สัญญาณ Analog ให้กลับมาเป็น Digital เหมือนดั้งเดิม
6. ส่งเข้า Parallel to Serial ออกมาเป็น Data Stream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาครับ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM MIMO ทางภาครับ

3.3 หลักการออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDMA

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) เป็นเทคโนโลยีการขนส่งข้อมูลโดยใช้ไบนารีคลื่นความถี่ (ที่เรียกว่า Carrier หรือคลื่นพาหะ) ที่ทำให้ผู้ใช้หลายๆคนสามารถใช้ความถี่ (Frequency) ในการใช้รับส่งข้อมูลให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้น

หลักการก็คือ จะแบ่งย่านความถี่คลื่นพาหะให้เป็นช่องสัญญาณย่อยๆหลายช่อง ที่เรียกว่าคลื่นพาหะย่อย (Sub Carrier) ซึ่งแต่ละคลื่นพาหะย่อยก็เปรียบเสมือนหนึ่งช่องในการขนส่งข้อมูล ผลที่ได้ก็คือสามารถที่จะส่งข้อมูลหลายๆชุด ไปพร้อมกันได้ ในคลื่นพาหะเดียวกันนั่นเอง ในทางกลับกันเมื่อมาถึงฝั่งรับคลื่นสัญญาณที่ถูกรวมไว้ จะถูกแยกเป็นแต่ละคลื่นพาหะย่อยเพื่อดึงเอาข้อมูลในแต่ละส่วนย่อยออกมา และนำมารวมเป็นข้อมูลที่ถูกส่งมาทั้งหมดในท้ายที่สุด จุดสำคัญที่สุดของเทคโนโลยีนี้คือการเลือกความถี่ของคลื่นพาหะย่อย จะต้องทำให้แต่ละคลื่นพาหะย่อย ไม่เกิดการรบกวน (Interference) ซึ่งกันและกัน

นอกจากสร้างคลื่นพาหะย่อยมาเป็นช่องทางย่อยในการรับส่งข้อมูลขึ้นมาแล้ว ยังสามารถแบ่งซอยคลื่นพาหะเป็นช่องย่อยตามเวลาที่ผ่านไป ในการส่งข้อมูลโดยจะแบ่งช่วงเวลาคาบเท่าๆกันที่เรียกว่า Slot เมื่อรวมการแบ่งซอยคลื่นพาหะทั้งสองแกนขึ้นดังกล่าวเข้าด้วยกัน จะเห็นได้ว่า OFDMA สามารถแบ่งความถี่ของคลื่นพาหะออกเป็นกลุ่มๆตามแต่ละคลื่นพาหะย่อย (หรือกลุ่มของคลื่นพาหะย่อยที่เรียกว่า Sub channel) และตามแต่ละช่วงเวลา (Slot) ในการส่งข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 หน้าที่การทำงานในแต่ละส่วนของระบบ OFDMA

3.3.1.1 ภาคส่ง (Transmitter) จะต้องทำหน้าที่ตามลำดับดังนี้

1. ส่งข้อมูลในรูปแบบของ bit stream เป็นรูปแบบของสัญญาณ Digital
2. แปลงสัญญาณในรูปแบบของ bit stream ด้วย S/P หรือ Serial to Parallel ที่มี bite rate สูง ให้แยกออกจากกันเป็น sub stream ที่มี bite rate ต่ำ โดยแยกตามจำนวนคลื่นพาห์ที่ต้องการส่ง
3. ข้อมูลจะถูกเข้ารหัส (Encode) แบบคอนโวลูชัน (Convolution) เพื่อความปลอดภัยและเพิ่มบิตในการตรวจสอบข้อผิดพลาด
4. ทำการ Modulation ข้อมูลรวมเข้ากับคลื่นพาห์ ซึ่งในที่นี้ใช้หลักการ Bi Phase Shift Keying ในการ Modulation สัญญาณ Digital ให้อยู่ในรูปของ Analog
5. ทำสเปซเชียลอินเตอร์ลีฟ (Spatial Interleave) หรือการวางสลับข้อมูลเพื่อป้องกันข้อผิดพลาดที่ต่อเนื่องเป็นแถบ ฟังก์ชันจะสามารถตรวจสอบข้อผิดพลาดได้ง่ายขึ้น
6. ทำการเข้ารหัสอินเตอร์ลีฟตามช่วงเวลา (Time Interleave) หรือการสลับบิตที่ติดกันให้กระจายออกไป
7. ส่งเข้า Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) แปลง Frequency Domain ให้อยู่ในรูปของ Time Domain และทำการเพิ่ม Cyclic Prefix (CP) แทรกแถบป้องกันแแถบๆ เพื่อลด Inter-Block Interference (IBI) แล้วทำการ Parallel to Serial ก็จะได้สัญญาณที่พร้อมส่งออกมา

3.3.1.2 ภาครับ (Receiver) จะต้องทำหน้าที่ตามลำดับดังนี้

1. ภาครับจะมีสายอากาศสองสายเพื่อรับสัญญาณจากภาคส่ง ผ่านเข้าตัวจับสัญญาณ Detector เพื่อหาสัญญาณที่ต้องการหรือการทำ Equalization ปรับ Amplitude และ Phase ของสัญญาณ โดยใช้หลักการของ Channel Estimation
2. แปลงสัญญาณในรูปแบบของ bit stream ด้วย S/P หรือ Serial to Parallel
3. ทำการถอด Cyclic Prefix ออกแล้วเข้า Fast Fourier Transform (FFT) แปลงสัญญาณจาก Time Domain เป็น Frequency Domain
4. นำสัญญาณนั้นมาทำการถอดรหัสการอินเตอร์ลีฟตามช่วงเวลา (DeTime Interleave) ของแต่ละเสาอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แล้วยนำสัญญาณที่ได้มาทำการถอดรหัสสเปเชียลอินเตอร์ลีฟ (Despatial Interleave)
6. ทำการ Demodulation ข้อมูลรวมออกจากคลื่นพาห์ ซึ่งในที่นี้ใช้หลักการ Bi Phase Shift Keying ในการ Demodulation สัญญาณ Analog ให้อยู่ในรูปของ Digital ดังเดิม
7. ทำการถอดรหัส (Decode) แบบคอนโวลูชัน (Convolution) เพื่อทำการตรวจสอบบิตที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นและทำการแก้ไขสัญญาณ
8. แล้วทำการแปลงสัญญาณ Sub Channel โดย P/S หรือ Parallel to Serial ให้อยู่ในรูปของ bit stream ข้อมูลเดิมอีกครั้ง

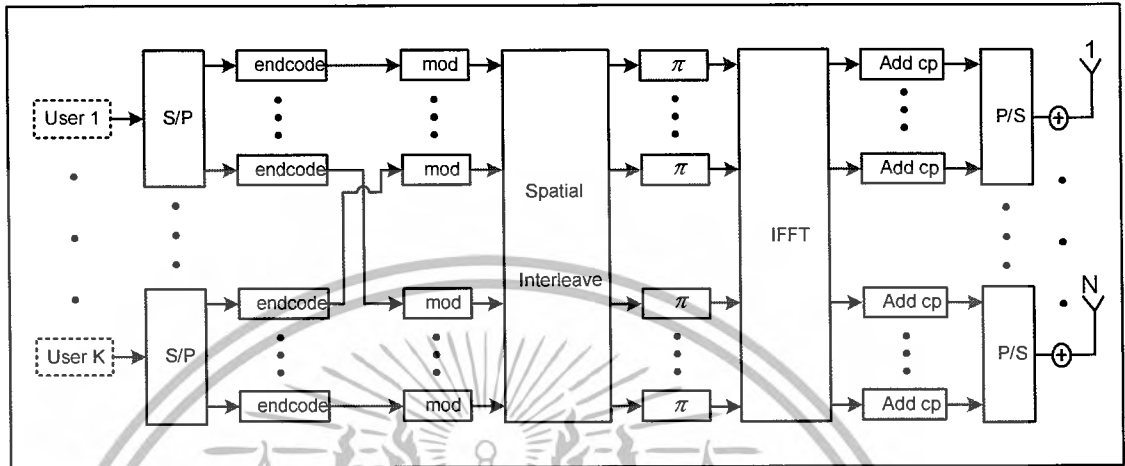
3.4 ออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDMA

3.4.1 ออกแบบทางภาคส่ง

1. ทำการส่ง Data Stream ของแต่ละ User ผ่านเข้า Serial to Parallel แยกเป็น K สาย เพื่อแยกแต่ละสายในการส่งในแต่ละเสา
2. เข้ารหัส (Encode) แบบคอนโวลูชัน (Convolution)
3. ทำการ Modulation จากสัญญาณ Digital เป็น Analog
4. ทำสเปเชียลอินเตอร์ลีฟ (Spatial Interleave)
5. เข้ารหัสอินเตอร์ลีฟตามช่วงเวลา (Time Interleave)
6. ทำการเข้า IFFT
7. ทำการ Add Cyclic Prefix ลงไป ในแต่ละสาย
8. สุดท้ายทำการ Parallel to Serial ให้เหลือ K สายส่งเป็น High Data Rate ออกไปทั้งหมด N เสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาคส่ง ได้ดังนี้



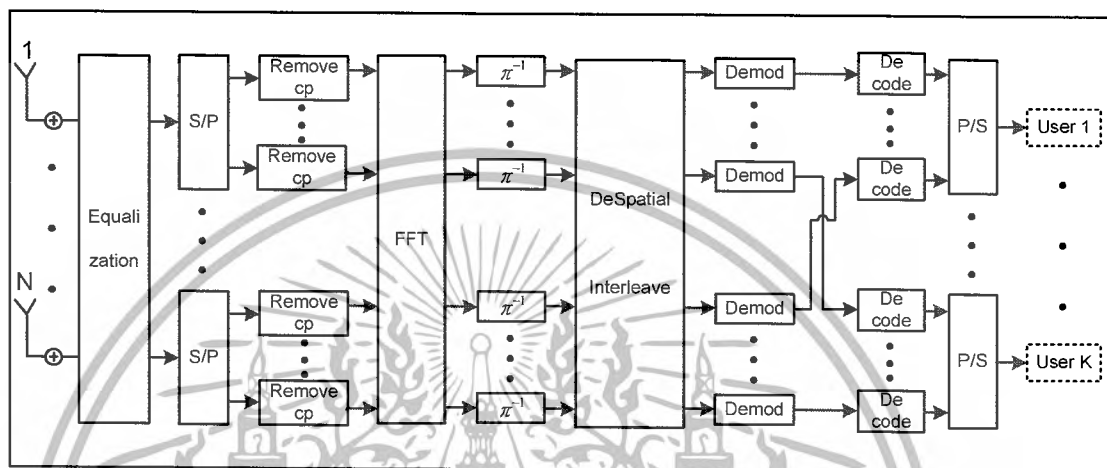
รูปที่ 3.3 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDMA ทางภาคส่ง

3.4.2 ออกแบบทางภาครับ

1. ทำการรับสัญญาณจากภาคส่งมาทำ Equalization ปรับ Amplitude และ Phase
2. แปลงสัญญาณด้วย S/P หรือ Serial to Parallel
3. Remove Cyclic Prefix ออกแล้วเข้า Fast Fourier Transform (FFT)
4. ทำการถอดรหัสการอินเตอร์ลีฟตามช่วงเวลา (Detime Interleave)
5. ทำการถอดรหัสการสเปเชียลอินเตอร์ลีฟ (Despatial Interleave)
6. ทำการ Demodulation ข้อมูลรวมออกจากคลื่นพาห้
7. ทำการถอดรหัส (Decode) แบบคอนโวลูชัน (Convolution)
8. ทำการแปลงสัญญาณ Sub Channel โดย P/S หรือ Parallel to Serial ให้อยู่ในรูปของ bit stream

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาครับ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDMA ทางภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการทดลองโดยการจำลองระบบในโปรแกรม MATLAB เพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDM แบบ MIMO และระบบ OFDMA โดยเปรียบเทียบ ค่าเฉลี่ยอัตราการผิดพลาดของข้อมูล (BER) กับ อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Eb/No) โดยเราทำการป้อนข้อมูลวนซ้ำรับค่า 10 รอบ การป้อนข้อมูลแบบวนซ้ำรับค่า ทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลมีค่าลดลง โดยแยกการทดลองเป็นดังนี้

4.1 การทดลองที่ 1 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบ OFDM แบบ MIMO โดยมีจำนวนการวนซ้ำรับค่าได้เท่ากัน

จำลองการทำงานของตัวรับสัญญาณแบบวนซ้ำรับค่า โดยกำหนดจำนวนเสาอากาศในการรับสัญญาณ จำนวนผู้ส่งและจำนวนเสาอากาศในการส่ง ให้เท่ากันในแต่ละรูปแบบการสื่อสาร มีจำนวนรอบที่มีการป้อนกลับของข้อมูลเท่ากัน

กำหนดค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

1. จำนวนผู้ส่ง 1 ราย
2. ทำการทดลองในช่วงของค่า SNR ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เดซิเบล
3. ความยาวข้อมูล 480 บิต
4. จำนวนรอบของการวนซ้ำ 10 รอบ

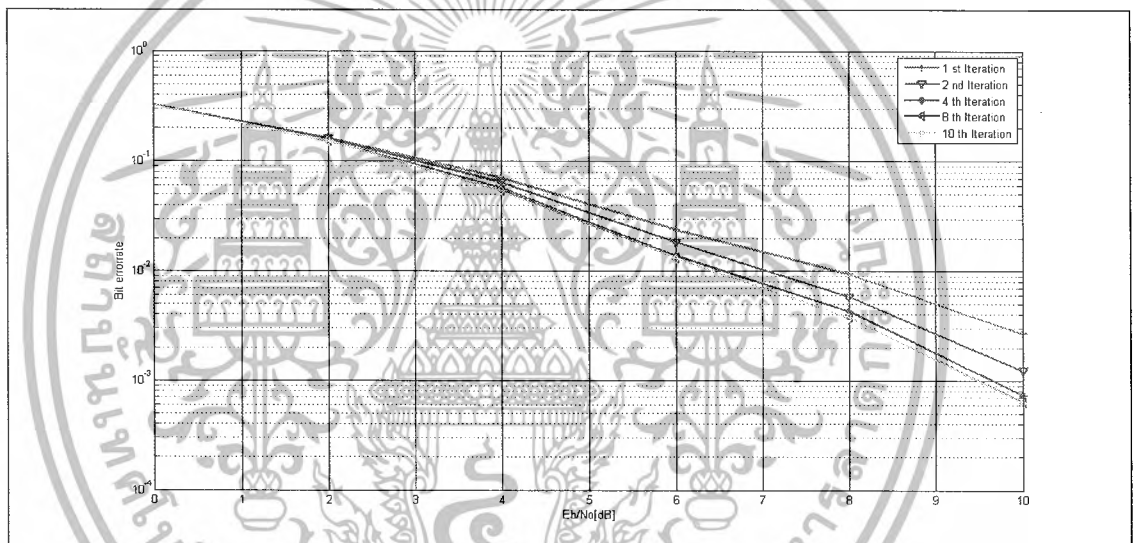
4.1.1 จุดประสงค์การทดลองระบบ OFDM

เพื่อทดลองระบบ OFDM แบบ MIMO สามารถใช้จำนวนของเสาอากาศส่งและเสาอากาศรับมากกว่าหนึ่งเส้าว่าจะสามารถส่งข้อมูลได้รวดเร็วมากขึ้นเนื่องจากการใช้เสาอากาศส่งหลายเส้า ได้ตามทฤษฎีหรือไม่ หลังจากได้ค่าการทดลองของระบบ OFDM แบบ MIMO ตามทฤษฎีแล้ว จึงจะนำไปเพื่อใช้อ้างอิงในการเปรียบเทียบค่า Error กับระบบ OFDMA

4.1.2 ขั้นตอนการทดลองระบบ OFDM

เนื่องจากการส่งแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นทั้งจากช่องสัญญาณร่วม (CCI) ดังนั้นเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเราจึงจำเป็นต้องทำการลดสัญญาณรบกวนเหล่านี้ออกไปโดยการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) โดยให้เครื่องรับสัญญาณปรับค่าสัญญาณไปเรื่อยๆ

จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบของกราฟ โดยแกนตั้งของกราฟจะแสดงค่าของอัตราความผิดพลาด (Bit Error Rate) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของข้อมูล (BER) กับ อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) ในแกนนอน



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDM แบบ MIMO

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าของอัตราความผิดพลาด (Bit Error Rate) ที่อยู่ในแกนตั้งมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) ในแกนนอนมีค่าลดลง และในทางกลับกันค่าของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราความผิดพลาดลดลง และในการการป้อนข้อมูลแบบวนซ้ำปรับค่าได้จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มการวนซ้ำมากขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ

4.2 การทดลองที่ 2 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 2 ยูเซอร์ โดยมีจำนวนการวนซ้ำปรับค่าได้ที่เท่ากัน

จำลองการทำงานของตัวรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่า โดยกำหนดจำนวนเสาอากาศในการรับสัญญาณสองเสา จำนวนผู้ใช้สองยูเซอร์ และจำนวนเสาอากาศในการส่งให้เท่ากันในแต่ละรูปแบบการสื่อสาร มีจำนวนรอบที่มีการป้อนกลับของข้อมูลที่เท่ากัน

กำหนดค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

1. จำนวนผู้ใช้ 2 ราย
2. ทำการทดลองในช่วงของค่า SNR ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เดซิเบล
3. ความยาวข้อมูล 480 บิต
4. จำนวนรอบของการวนซ้ำ 10 รอบ

4.2.1 จุดประสงค์การทดลองระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 2 ยูเซอร์

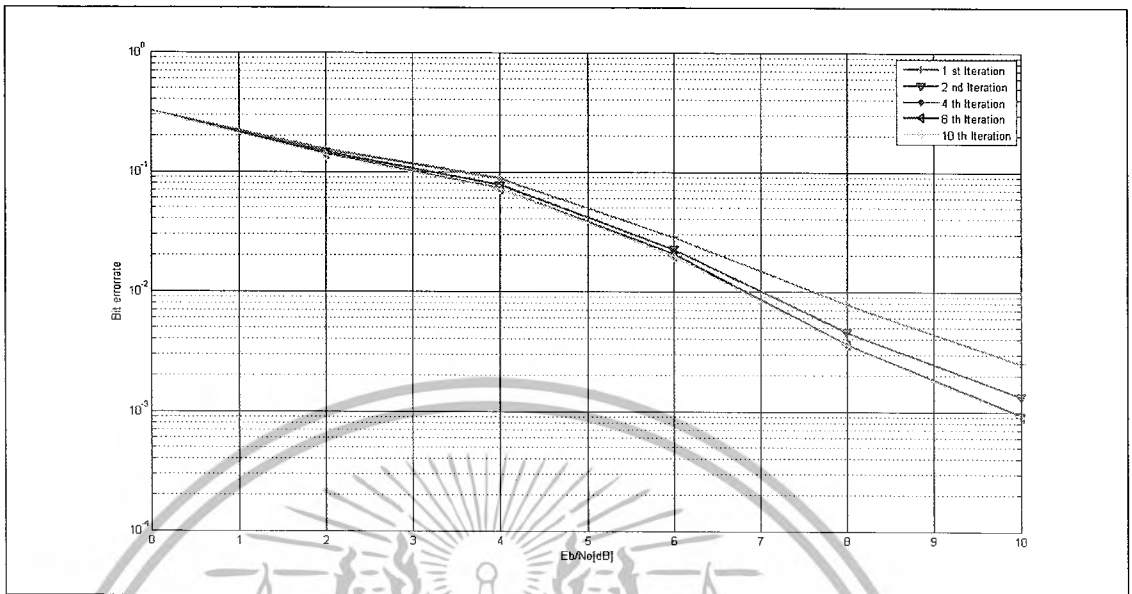
ระบบ OFDM แบบ MIMO จะมีข้อจำกัดในการส่ง กล่าวคือ สามารถใช้งานได้เพียงหนึ่งยูเซอร์เท่านั้น และในการทดลองนี้ จะทำการเพิ่มจำนวนผู้ใช้เป็นจำนวนสองยูเซอร์ เพื่อทำการทดลอง เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้จากหนึ่งรายเป็นสองราย จะมีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนจากเสาของผู้ใช้หรือไม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลและการพัฒนาระบบต่อไป

4.2.2 ขั้นตอนการทดลองระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 2 ยูเซอร์

เนื่องจากการส่งแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นทั้งจากช่องสัญญาณร่วม (CCI) ดังนั้นเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเราจึงจำเป็นต้องทำการลดสัญญาณรบกวนเหล่านี้ออกไปโดยการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) โดยให้เครื่องรับสัญญาณปรับค่าสัญญาณไปเรื่อยๆ และเพิ่มจำนวนของผู้ใช้ ระบบ OFDMA จะทำการเพิ่มจำนวนผู้ใช้ เป็นจำนวนสองยูเซอร์

จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบของกราฟ โดยแกนตั้งของกราฟจะแสดงค่าของอัตราความผิดพลาด (Bit Error Rate) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยอัตราการผิดพลาดของข้อมูล (BER) กับ อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) ในแกนนอน และนำกราฟที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ 1 ที่มีจำนวนผู้ใช้รายเดียว เพื่อเปรียบเทียบค่าเมื่อเพิ่มจำนวนของผู้ใช้เป็นสองราย จะมีค่าเฉลี่ยอัตราการผิดพลาดของข้อมูล (BER) กับ อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากผู้ใ้รายเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDMA แบบ 2 ยูเซอร์

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าของอัตราความผิดพลาด (Bit Error Rate) ที่อยู่ในแกนตั้งมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) ในแกนนอนมีค่าลดลง และในทางกลับกันค่าของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราความผิดพลาดลดลง และในการการป้อนข้อมูลแบบวนซ้ำรับค่าได้จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มการวนซ้ำมากขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ

4.3 การทดลองที่ 3 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 4 ยูเซอร์ โดยมีจำนวนการวนซ้ำรับค่าได้ที่เท่ากัน

จำลองการทำงานของตัวรับสัญญาณแบบวนซ้ำรับค่า โดยกำหนดจำนวนเสาอากาศในการรับสัญญาณสี่เสา จำนวนผู้ใช้สี่ยูเซอร์ และจำนวนเสาอากาศในการส่งให้เท่ากันในแต่ละรูปแบบการสื่อสาร มีจำนวนรอบที่มีการป้อนกลับของข้อมูลที่เท่ากัน

กำหนดค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

1. จำนวนผู้ใช้ 4 ราย
2. ทำการทดลองในช่วงของค่า SNR ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เดซิเบล
3. ความยาวข้อมูล 480 บิต
4. จำนวนรอบของการวนซ้ำ 10 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

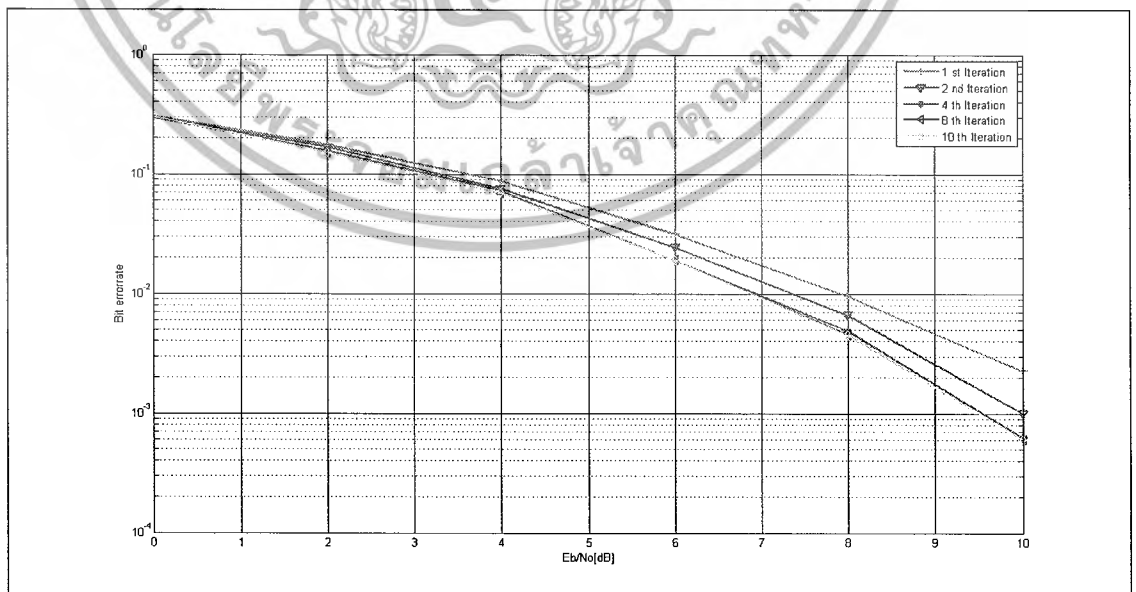
4.3.1 จุดประสงค์การทดลองระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 4 ยูเซอร์

ระบบ OFDM แบบ MIMO จะมีข้อจำกัดในการส่ง กล่าวคือ สามารถใช้งานได้เพียงหนึ่งยูเซอร์เท่านั้น และในการทดลองนี้ จะทำการเพิ่มจำนวนผู้ใช้เป็นจำนวนสี่ยูเซอร์ เพื่อทำการทดลอง เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้จากหนึ่งรายเป็นสี่ราย จะมีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนจากเสาของผู้ใช้หรือไม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลและการพัฒนาระบบต่อไป

4.3.2 ขั้นตอนการทดลองระบบ OFDMA

เนื่องจากการส่งแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นทั้งจากช่องสัญญาณร่วม (CCI) ดังนั้นเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เราจึงจำเป็นต้องทำการลดสัญญาณรบกวนเหล่านี้ออกไปโดยการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) โดยให้เครื่องรับสัญญาณปรับค่าสัญญาณ ไปเรื่อยๆ และเพิ่มจำนวนของผู้ใช้และในการทดลองนี้ ระบบ OFDMA จะทำการเพิ่มจำนวนผู้ใช้ เป็นจำนวนสี่ยูเซอร์

จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบของกราฟ โดยแกนตั้งของกราฟจะแสดงค่าของอัตราความผิดพลาด (Bit Error Rate) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของข้อมูล (BER) กับ อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) ในแกนนอน และนำกราฟที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับกราฟการทดลองที่ 1 ที่มีจำนวนผู้ใช้รายเดียว เพื่อเปรียบเทียบค่าเมื่อเพิ่มจำนวนของผู้ใช้สี่ราย จะมีค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดของข้อมูล (BER) กับ อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากผู้ใช้รายเดียว



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDMA แบบ 4 ยูเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าของอัตราความผิดพลาด (Bit Error Rate) ที่อยู่ในเกณฑ์มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) ในเกณฑ์มีค่าลดลง และในทางกลับกันค่าของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราความผิดพลาดลดลง และในการการป้อนข้อมูลแบบวนซ้ำปรับค่าได้จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มการวนซ้ำมากขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ

4.4 การทดลองที่ 4 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 8 ยูเซอร์ โดยมีจำนวนการวนซ้ำปรับค่าได้ที่เท่ากัน

จำลองการทำงานของตัวรับสัญญาณแบบวนซ้ำปรับค่า โดยกำหนดจำนวนเสาอากาศในการรับสัญญาณสี่เสา จำนวนผู้ใช้สี่ยูเซอร์ และจำนวนเสาอากาศในการส่งให้เท่ากันในแต่ละรูปแบบการสื่อสาร มีจำนวนรอบที่มีการป้อนกลับของข้อมูลเท่ากัน

กำหนดค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

1. จำนวนผู้ใช้ 8 ราย
2. ทำการทดลองในช่วงของค่า SNR ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เดซิเบล
3. ความยาวข้อมูล 480 บิต
4. จำนวนรอบของการวนซ้ำ 10 รอบ

4.4.1 จุดประสงค์การทดลองระบบ OFDMA แบบการส่งพร้อมกัน 8 ยูเซอร์

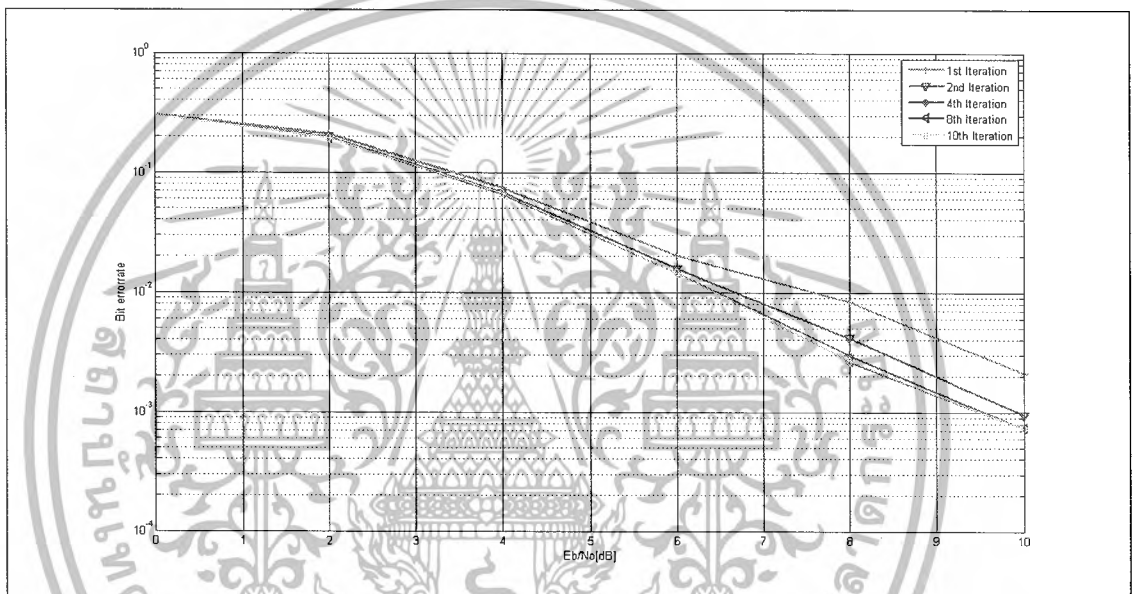
ระบบ OFDM แบบ MIMO จะมีข้อจำกัดในการส่ง กล่าวคือ สามารถใช้งานได้เพียงหนึ่งยูเซอร์เท่านั้น และในการทดลองนี้ จะทำการเพิ่มจำนวนผู้ใช้เป็นจำนวนแปดยูเซอร์ เพื่อทำการทดลองเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้จากหนึ่งรายเป็นแปดราย จะมีผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนจากเสาของผู้ใช้หรือไม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลและการพัฒนาระบบต่อไป

4.4.2 ขั้นตอนการทดลองระบบ OFDMA

เนื่องจากการส่งแบบระบบหลายสัญญาณเข้าหลายสัญญาณออก (MIMO) ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นทั้งจากช่องสัญญาณร่วม (CCI) ดังนั้นเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเราจึงจำเป็นต้องทำการลดสัญญาณรบกวนเหล่านี้ออกไปโดยการป้อนข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) โดยให้เครื่องรับสัญญาณปรับค่าสัญญาณไปเรื่อยๆ และเพิ่มจำนวนของผู้ใช้ และในการทดลองนี้ระบบ OFDMA จะทำการเพิ่มจำนวนผู้ใช้ เป็นจำนวนแปดยูเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบของกราฟ โดยแกนตั้งของกราฟจะแสดงค่าของอัตราความผิดพลาด (Bit Error Rate) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตของข้อมูล (BER) กับ อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) ในแกนนอน และนำกราฟที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ 1 ที่มีจำนวนผู้ใช้รายเดียว เพื่อเปรียบเทียบค่าเมื่อเพิ่มจำนวนของผู้ใช้เป็นแปดราย จะมีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตของข้อมูล (BER) กับ อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากผู้ใช้รายเดียว



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDMA แบบ 8 ยูเซอร์

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าของอัตราความผิดพลาด (Bit Error Rate) ที่อยู่ในแกนตั้งมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) ในแกนนอนมีค่าลดลง และในทางกลับกันค่าของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราความผิดพลาดลดลง และในการการบื่อนข้อมูลแบบวนซ้ำรับค่าได้จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มการวนซ้ำมากขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตข้อมูลมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาระบบ OFDM มีส่วนช่วยเพิ่มสมรรถภาพของแบนด์วิดท์เป็นอย่างมาก ยังสามารถส่ง sub carrier ได้มากเท่าไรสัญญาณก็จะยิ่ง orthogonal ซึ่งกันและกันมาก

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าของอัตราความผิดพลาด (Bit Error Rate) ที่อยู่ในเกณฑ์มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) ในเกณฑ์มีค่าลดลง และในทางกลับกันค่าของอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของอัตราความผิดพลาดลดลง และในการการป้อนข้อมูลแบบวนซ้ำปรับค่าได้จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มการวนซ้ำมากขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยอัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ

จากรูปที่ 4.2, รูปที่ 4.3, และรูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบระบบ OFDMA แบบ 2, 4 และ 8 ยูเซอร์ตามลำดับ นำมาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องรับในระบบ OFDM แบบ MIMO จะเห็นได้ว่าเมื่อนำกราฟมาเปรียบเทียบกันกราฟมีค่าใกล้เคียงกับผู้ใช้รายเดียว จะทำให้ระบบ OFDMA มีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าถ้าช่องสัญญาณมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อย จะมีผลทำให้ Bit Error Rate มีค่าน้อย ถ้าช่องสัญญาณมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมาก จะมีผลทำให้ Bit Error Rate มีค่ามากตามไปด้วย การรบกวนกันของสัญญาณเสาข้างเคียง และการเกิดปรากฏการณ์ Doppler Shift จะมีผลทำให้ Bit Error Rate มีค่ามาก มีผลทำให้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการ Fading ของสัญญาณมากขึ้น ซึ่งจะแปรผันตามความเร็วของเสาอากาศ

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง

1. การจำลองการทำงานในการใช้โปรแกรม MATLAB ใช้เวลาในการรันโปรแกรมนาน
2. ต้องใช้เวลาในการศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับระบบ MIMO และระบบ OFDM
3. การออกแบบโปรแกรม MATLAB ของระบบ OFDMA ค่อนข้างมีความซับซ้อนในการสร้างระบบ เนื่องจากปัญหาทางด้านตัวเลข ซึ่งเก็บในรูปแบบของ short c ทำให้การหารหรือคูณตัวเลขในบางครั้ง อาจมีการคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แนวทางการพัฒนาต่อ

นำข้อดีของระบบ OFDM แบบ MIMO เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบ OFDMA ทำให้ OFDM ส่งได้แบบหลายยูสเซอร์ หรือที่เรียกว่า OFDMA นั้นเอง และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลระบบ OFDMA จึงจำเป็นต้องทำการลดสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้หลายคน (MAI) เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มช่องทางการสื่อสารต่างๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบอื่นๆได้และเพื่อการพัฒนาต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

Bahai, A. R. S., Saltzberg, B. R. and Ergen, M. (2004). **Multi Carrier Digital Communications, Theory and Applications of OFDM**. Springer, 2004.

Biran A. and Breiner M. Addison – Wesley, 1995 ‘MATLAB for Engineers’.

Brad Morris 1993. **Optimization of a Broadband Modulation Scheme for the Indoor Radio Channel**. M.Sc. Thesis, University of Calgary.

Chang, R. W. 1966. **Synthesis of band-limited orthogonal signals for multi-channel data transmission**. Bell System Technical Journal 46, 1775-1796.

Jonathan Stott 1998. **The how and why of COFDM**. EBU: EBU Technical Review 278 (winter 1998).

Kamil Sh.Ziganairov.2004.**Theory of code division multiple access communication**. Piscataway,NJ.IEEE Press

Mohinder Lankiraman.2004.**Space-time and MIMO systems**.Boston.Artech House

Saadat, H. McGra-Hall 1993 ‘MATLAB user ‘s Guide’. The Math Work,Inc

Savo Glisic.2004.**Advanced wireless communication :4G Technologies**.Chichester.John Wiley

Shinsuke Hara and Ramjee Prasad.2003.**Multicarrier techniques for 4G mobile communication**.Boston.Artech House

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้