

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**OFDM สำหรับการสื่อสารยุคที่ 4
OFDM FOR 4G COMMUNICATIONS**



โดย
นางสาวรตยา ทัศนเกษม
นายสิทธิชัย วรจันทร์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**72297**.....
วัน,เดือน,ปี.....**1.3.ค.ย. 2550**

b..... 417 b6e2x
i.....

**ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OFDM FOR 4G COMMUNICATIONS

BY

MISS RATAYA MASKASEM

MR. SITTICHAI VORACHANTRA



**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**

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ OFDM สำหรับการสื่อสาร ยุคที่ 4
นักศึกษา นางสาวรตยา มาศเกษม รหัสประจำตัว 46010626
นายสิทธิชัย วรจันทร์ รหัสประจำตัว 46010830
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. จักรี ที่มภาคยวิศิษฎ์
ระดับการศึกษา ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ
ภาควิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา 2549

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว



(ดร. จักรี ที่มภาคยวิศิษฎ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	OFDM สำหรับการสื่อสาร ยุคที่ 4	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรศยา มาศเกษม	รหัสประจำตัว 46010626
	นายสิทธิชัย วรจันทรา	รหัสประจำตัว 46010830
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. จักรี ทิมภักขวิศิษฏ์	
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
	สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ	
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ	
ปีการศึกษา	2549	

บทคัดย่อ

ในอนาคตรบบการติดต่อสื่อสารในยุคที่ 4 จะต้องประกอบด้วยปริมาณของข้อมูลและความเร็วของข้อมูลทางการส่ง packet มัลติมีเดียที่สูงเหนือกว่าระบบเหมาะสำหรับการสื่อสารด้วยเสียง การที่จะทำได้นั้นจำเป็นที่การสื่อสารจะต้องมีความถูกต้อง ประสิทธิภาพความจุของสเปคตรัมที่มีปริมาณความถี่ที่จำกัดและกำลังงานของสายส่งที่เพียงพอ ระบบ MIMO นั้นมีความท้าทายที่จะสามารถตอบปัญหาความต้องการทางเทคนิคของการติดต่อสื่อสารยุคที่ 4 ได้

ที่มากกว่านั้นคือการเพิ่มประสิทธิภาพของสเปคตรัมและผลกระทบที่มาจากกาเกิด ISI ระบบ MIMO นั้นสามารถรวมเป็นอันหนึ่งกับระบบ OFDM สามารถนำไปใช้ได้ OFDM เป็นเทคนิคการส่งแบบ multicarrier เป็นวิธีที่ยอมรับว่าดีเยี่ยมสำหรับการสื่อสาร 2 ทางด้วยความเร็วสูงแบบไร้สาย

ในโปรเจกต์นี้ระบบ MIMO และ OFDM ถูกพิจารณาภายใต้การรวมกันของ Iterative detection และ decoding algorithm เพื่อกำจัด ISI และ co-channel interference

Thesis Title	OFDM FOR 4G COMMUNICATIONS	
Student	Miss Rataya Maskasem	ID. 46010626
	Mr. Sittichai Vorachantra	ID. 46010830
Advisor	Dr. Chakree Teekapakvisit	
Graduate Level	Bachelor Degree of Information Engineering	
Department	Information Engineering	
Academic Year	2006	

ABSTRACT

The future 4th generation mobile communication systems are expected to provide high quality and high data rate multimedia packet transmission rather than voice-oriented legacy wireless systems. To achieve the innovative feature into reality, capability of high spectral efficiency over limited frequency resource with limited transmission power is required. The MIMO systems are a challenging technique to provide such a requirement.

Moreover, to increase spectral efficiency and effectively overcome effects of ISI (Inter-Symbol Interference), MIMO with the combination with OFDM system can be utilized. OFDM is a multicarrier transmission technique that has been recognized as an excellent method for high speed bi-directional wireless data communication.

In this project, the MIMO-OFDM system is investigated based on the combination of an iterative detection and decoding algorithm to suppress and cancel both the ISI and co-channel interference.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาและความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ดร. จักรี ทิมภาคย์วิศิษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้คำแนะนำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำโครงการนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และอาจารย์ ผู้มีพระคุณ รวมถึงเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา



นางสาวรตยา มาศเกษม

นายสิทธิชัย วรจันทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ สรุปที่มาของปัญหาหรือแนวคิดเริ่มต้นในการทำโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 สถาปัตยกรรม องค์ประกอบหลักๆ โดยรวมของโครงการ หรือรูปแสดงระบบการทำงาน	2
1.4.1 สถาปัตยกรรมระบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	2
1.4.2 สถาปัตยกรรมระบบ Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)	3
1.5 ขั้นตอนของการทำโครงการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	5
2.1.1 บทนำ	5
2.1.2 ความแตกต่างระหว่าง OFDM และ FDM	9
2.1.3 การใช้ Inverse FFT สร้างสัญญาณ OFDM	16
2.1.4 Orthogonality	16
2.1.5 การมอดูเลตสัญญาณอาร์เอฟ	17
2.1.6 ช่วงเวลาป้องกัน	19
2.1.7 ช่วงเวลาคูมและส่วนหน้าแบบวน	20
2.1.8 การซิงโครไนซ์ (Synchronization)	22
2.1.9 ระบบ OFDM	26
2.1.10 ประโยชน์ของระบบการส่งสัญญาณแบบ OFDM	27
2.1.11 ข้อเสียของ OFDM เมื่อเทียบกับการมอดูเลตแบบคลื่นพาห์เดียว	28
2.1.12 การประมาณค่าสัญญาณที่ส่งตามหลักการของความน่าจะเป็นสูงสุด	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)	28
2.2.1 MIMO Capacity	28
2.2.2 MIMO Encoding	29
2.2.3 ข้อดีของ MIMO	31
2.2.4 ข้อเสียของ MIMO	31
2.3 คุณลักษณะทางการแพร่ของช่องสัญญาณวิทยุ	32
2.3.1 การลดทอน	32
2.3.2 การแผ่กว้างของการประวิง	37
2.3.3 การเคลื่อนไปของดอปเปลอร์ (Doppler Shift)	38
2.3.4 White Gaussian noise	39
2.3.5 AWGN Channel Block	39
2.4 Fast Fourier Transform (FFT)	40
2.4.1 Discrete Fourier Transform	41
2.4.2 ทฤษฎี Fast Fourier Transform	42
2.5 การแปลงผกผันฟูเรียร์แบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform)	45
บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน	48
3.1 หลักการออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDM System	48
3.1.1 การออกแบบระบบ OFDM System จะต้องคำนึงถึงอะไรบ้าง	49
3.1.2 ปัญหาที่พบในการรวมระบบ OFDM เข้ากับระบบ MIMO	49
3.1.3 แก้ไขด้วยวิธีอะไร	49
3.1.4 หน้าที่การทำงานในแต่ละส่วน	49
3.2 ออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDM ที่มีการส่งเสาอากาศแบบ SISO	50
3.2.1 ออกแบบ Block diagram ทดสอบระบบที่ 1	50
3.2.2 ออกแบบ Block diagram ทดสอบระบบที่ 2	52
3.2.3 ออกแบบ Block diagram ทดสอบระบบที่ 3	53
3.3 ออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDM รวมเข้ากับระบบ MIMO	54
3.3.1 ออกแบบทางภาคส่ง	54
3.3.2 ออกแบบทางภาครับ	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4	หลักการทำให้ Iterative	56
บทที่ 4	ผลการทดลอง	57
4.1	การทดลองเปรียบเทียบการออกแบบวงจร OFDM SISO	57
4.1.1	ทำการทดลอง Block diagram ทดสอบระบบที่ 1	57
4.1.2	ทำการทดลอง Block diagram ทดสอบระบบที่ 2	58
4.1.3	ทำการทดลอง Block diagram ทดสอบระบบที่ 3	59
4.2	การทดลองวงจร OFDM SISO ผ่านช่องสัญญาณในลักษณะต่างๆ	60
4.2.1	Quasi Static Fading Channel	61
4.2.2	Slow Fading Channel	62
4.2.3	Fast Fading Channel	63
4.3	การทดลองรวมระบบ OFDM เข้ากับระบบ MIMO	63
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	66
5.1	สรุป	66
5.1.1	สรุปผลการทดลองที่ 4.1	66
5.1.2	สรุปผลการทดลองที่ 4.2	66
5.1.3	สรุปผลการทดลองที่ 4.3	67
5.2	สรุปการพัฒนาโครงการ	67
5.3	ปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านเทคนิค	68
บรรณานุกรม		69

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	แสดงโครงสร้างของระบบ OFDM	3
รูปที่ 1.2	แสดงลักษณะการส่งและรับของระบบ MIMO	3
รูปที่ 2.1	ความแตกต่างระหว่างการสื่อสารแบบ Spread Spectrum กับ OFDM	6
รูปที่ 2.2	OFDM เปรียบเทียบกับการสื่อสารแบบ Spread Spectrum ชนิด Single Carrier Mode	7
รูปที่ 2.3	การมัลติเพล็กซ์แบบ โอเอฟดีเอ็ม	8
รูปที่ 2.4	ตัวอย่างของ OFDM spectrum (a) single subchannel (b) 5 carriers	9
รูปที่ 2.5	การเปรียบเทียบระหว่าง FDM และ OFDM	9
รูปที่ 2.6	FDM carrier	10
รูปที่ 2.7	Bit stream ซึ่งจะถูกมอดูเลต โดยใช้ OFDM ซึ่งมี 4 carriers	11
รูปที่ 2.8	Sub-carrier 1 และบิตที่มอดูเลต	12
รูปที่ 2.9	Sub-carrier 2 และบิตที่มอดูเลต	12
รูปที่ 2.10	Sub-carrier 3 และ 4 และบิตที่มอดูเลต	13
รูปที่ 2.11	การมอดูเลตสัญญาณ OFDM	13
รูปที่ 2.12	ความถี่หลังมอดูเลต	14
รูปที่ 2.13	OFDM ใน time และ frequency domain	14
รูปที่ 2.14	Function diagram ของการสร้างสัญญาณ OFDM ในเส้นประจะเรียกว่า IFFT block	15
รูปที่ 2.15	สัญญาณ OFDM ที่ถูกสร้างขึ้นมา	15
รูปที่ 2.16	Block diagram ของระบบ OFDM ซึ่งใช้ FFT, pilot PN sequence และใส่ guard bit	16
รูปที่ 2.17	การมอดูเลตสัญญาณอาร์เอฟโดยเทคนิคแบบอนาล็อก	18
รูปที่ 2.18	การมอดูเลตสัญญาณอาร์เอฟโดยเทคนิคแบบดิจิตอล (DDS: Direct Digital Synthesis)	18
รูปที่ 2.19	การส่งส่วนขยายแบบย้อนกลับในช่วงเวลาป้องกัน	19
รูปที่ 2.20	ตัวอย่างสัญญาณ OFDM ที่ได้รับจากช่องสัญญาณแบบหลายทิศทาง	19
รูปที่ 2.21	ผลกระทบที่เกิดจากการประวิงหลายวิธีที่ออกนอกเหนือเวลาคูม	21
รูปที่ 2.22	สัญลักษณ์ OFDM กับการขยายส่วนหน้าแบบวน	21
รูปที่ 2.23	กราฟแสดงผลของการแผ่กว้างของการประวิงแบบหลายทิศทาง	22

รูปที่ 2.24	การซิงโครไนซ์ด้วยการใช้การเพิ่มเติมส่วนหน้าแบบวน	23
รูปที่ 2.25	ผลกระทบของสัญญาณรบกวนบนค่านุมเฟสที่รับได้	24
รูปที่ 2.26	โครงสร้างชุดข้อมูล OFDM	26
รูปที่ 2.27	บล็อกไดอะแกรมของระบบ OFDM	27
รูปที่ 2.28	สถาปัตยกรรม MIMO	29
รูปที่ 2.29	MIMO system block diagram	29
รูปที่ 2.30	กราฟแสดงผลของการสูญเสียทิศทางที่มีต่อสัญญาณ	32
รูปที่ 2.31	กราฟแสดงผลของการสูญเสียทิศทางและการบดบังที่มีต่อสัญญาณ	33
รูปที่ 2.32	กราฟแสดงผลของการจางหายแบบเรย์ลีเมื่อ Mobile Unit มีการเคลื่อนที่	33
รูปที่ 2.33	โครงสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีตามแบบของเจ็ค	35
รูปที่ 2.34	สเปกตรัมความถี่ของออสซิลเลเตอร์สำหรับกรณี $0 \leq n \leq 8$ และ $N=34$	36
รูปที่ 2.35	การเกิดคอปเปิลอร์	38
รูปที่ 2.36	สัญญาณรบกวนแบบ white noise	39
รูปที่ 2.37	คุณสมบัติของสัญญาณรบกวนแบบขาววอก	40
รูปที่ 2.38	หลักการพื้นฐานในการนำ IFFT และ FFT มาใช้งานกับระบบ OFDM	41
รูปที่ 2.39	การเปลี่ยนรูปจากสัญญาณ โดเมนเวลาเป็นสเปกตรัมความถี่โดยใช้ FFT	42
รูปที่ 2.40	Discrete Fourier Transform	42
รูปที่ 2.41	การหาค่า 8 จุดฟาสต์ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม	44
รูปที่ 2.42	การหาค่า 8 จุดฟาสต์ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม	45
รูปที่ 2.43	สัญญาณเชิงซ้อน โดเมนความถี่ จำนวน $2N$ สัญญาณ ถูกแปลงฟูเรียร์ผกผัน (IFFT) ขนาด $2N$ จุด ทำให้ได้เป็น สัญญาณจริง โดเมนเวลา $2N$ สัญญาณ	46
รูปที่ 2.44	การมอดูเลต แบบ มัลติแคเรียร์ โดยใช้ การแปลงผกผันฟูเรียร์	47
รูปที่ 3.1	แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาคส่งระบบที่ 1	51
รูปที่ 3.2	แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาครับระบบที่ 1	51
รูปที่ 3.3	แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาคส่งระบบที่ 2	52
รูปที่ 3.4	แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาครับระบบที่ 2	53
รูปที่ 3.5	แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาคส่งระบบที่ 3	53
รูปที่ 3.6	แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาครับระบบที่ 3	54
รูปที่ 3.7	แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM MIMO ทางภาคส่ง	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM MIMO ทางภาครับ	55
รูปที่ 4.1 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ AWGN และช่องสัญญาณ Fading Channel	58
รูปที่ 4.2 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ AWGN และช่องสัญญาณ Fading Channel	59
รูปที่ 4.3 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ AWGN และช่องสัญญาณ Fading Channel	60
รูปที่ 4.4 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ สัญญาณ Quasi Fading Channel ที่ความเร็วต่างๆ	61
รูปที่ 4.5 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ สัญญาณ Slow Fading Channel	62
รูปที่ 4.6 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ สัญญาณ Fast Fading Channel	63
รูปที่ 4.7 แสดงอัตราการเกิดความผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณแบบ Fading โดยใช้การทำ Equalization	64
รูปที่ 4.8 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้หลักการของ Iterative	65

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของการทำโครงการ

4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ สรุปที่มาของปัญหาหรือแนวคิดเริ่มต้นในการทำโครงการ

ระบบเครือข่ายการสื่อสารในปัจจุบัน เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระบบ 2.5-3G ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยให้ผู้ใช้สามารถติดต่อสื่อสารได้ทั้งภาพและเสียง ตลอดจนถึงข้อความต่างๆที่ข้อความภาพและตัวอักษรได้ในเวลาอันรวดเร็ว ฉะนั้นประโยชน์จากการติดต่อสื่อสารไร้สายระบบ 2.5-3G นั้นก็คือ ผู้ใช้นอกจากจะติดต่อสื่อสารกันด้วยเสียงหรือการสนทนาแล้ว ยังสามารถที่จะติดต่อสื่อสารกันด้วยภาพหรือข้อความต่างๆได้อีกด้วย จนกระทั่งได้มีผู้คิดค้นระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สายยุคที่ 4 ขึ้นมา เพื่อรองรับการสื่อสารไร้สายในอนาคต ระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สายแห่งอนาคตดังกล่าว ก็มีคุณสมบัติต่างๆคล้ายคลึงกับระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สาย 2.5-3G ในยุคปัจจุบัน แต่ก็มีคุณสมบัติพิเศษซึ่งแตกต่างกันนั้นก็คือ ระบบการสร้างภาพ 3 มิติ แต่ระบบการสร้างภาพ 3 มิตินั้นไม่ใช่ระบบ 3 มิติที่ใช้กันในปัจจุบัน เพราะเทคโนโลยีดังกล่าวเป็นการจำลองภาพคนหรือวัตถุที่สมจริงราวกับเป็นคนหรือวัตถุนั้นจริงๆเพียงแต่จับต้องไม่ได้เท่านั้น

อย่างไรก็ดี ประโยชน์ที่จะได้รับจากการนำระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 มาใช้นอกจากระบบการสื่อสารดังกล่าวจะรองรับการสื่อสารในรูปแบบต่างๆแล้ว ผู้ใช้ยังสามารถที่จะนำโปรแกรมสื่อมัลติมีเดียมาปรับใช้กับเครือข่ายในยุคที่ 4 ได้ เนื่องจากระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 นั้น มีความเร็วในการถ่ายโอนข้อมูลได้ถึง 100 เมกะบิตต่อวินาที โดยการนำโปรแกรมสื่อมัลติมีเดียดังกล่าวมาใช้ อาทิเช่น การฟังเพลง MP3 ผ่านระบบเครือข่ายการสื่อสาร เป็นต้น นอกจากนั้นผู้เชี่ยวชาญต่างเห็นด้วยว่า มีหลายสิ่งๆที่อาจเป็นไปได้ในระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 โดยสิ่งใหม่ๆที่ เกิดขึ้นอาจรวมถึงการช่วยเสริมประสิทธิภาพของระบบ GPS (Global Positioning System) ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าในปัจจุบันและหากมีการผสมผสานเทคโนโลยีดังกล่าวเข้ากับระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4 ก็จะสามารถค้นหาตำแหน่งที่ตั้งต่างๆได้ทั่วโลกราวกับว่าบุคคลนั้นได้ไปอยู่ในสถานที่เหล่านั้นจริงๆ

ระบบการติดต่อสื่อสารในยุคที่ 4 จึงต้องประกอบด้วยปริมาณและความเร็วของข้อมูลทางด้านการส่ง packet มัลติมีเดียที่สูงเหนือกว่า สำหรับระบบที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสาร ซึ่งยุคที่ 4 จะต้องมีคุณสมบัติ ประสิทธิภาพความจุของสเปกตรัมที่มีปริมาณความถี่ที่จำกัดและกำลังงานของสายส่งที่เพียงพอ ระบบ MIMO นั้นสามารถรวมเป็นอันหนึ่งกับระบบ OFDM สามารถนำไปใช้ได้ โดย OFDM เป็นเทคนิคการส่งแบบ multicarrier เป็นวิธีที่ยอมรับว่าดีเยี่ยมสำหรับการสื่อสารสองทางด้วยความเร็วสูงแบบไร้สาย

ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับสัญญาณ โดยทำการจำลองสัญญาณด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าที่ดีที่สุด วิธีการที่เหมาะสมทางภาครับว่าควรจะใช้อุปกรณ์ชนิดไหนอย่างไรบ้าง เพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุด คือมีค่า Bit Error Rate (BER) น้อย มีความจุสเปคตรัมที่สูง และยังสามารถรับข้อมูลที่เร็วที่เป็นที่ยอมรับได้เพื่อเป็นการรองรับการทำงานทางด้านมัลติมีเดียซึ่งมีการรับส่งข้อมูลภาพและเสียงที่มีจำนวนมากและต้องมีความเร็วสูงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาระบบ MIMO และ OFDM ให้สามารถใช้งานร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสาร
2. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ข้อมูลที่วัดได้โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์สัญญาณ โปรแกรม MATLAB และออกแบบ Block Diagram
3. เพื่อศึกษาการสื่อสารในยุคที่ 4 วิเคราะห์แนวโน้มและความเป็นไปในอนาคต

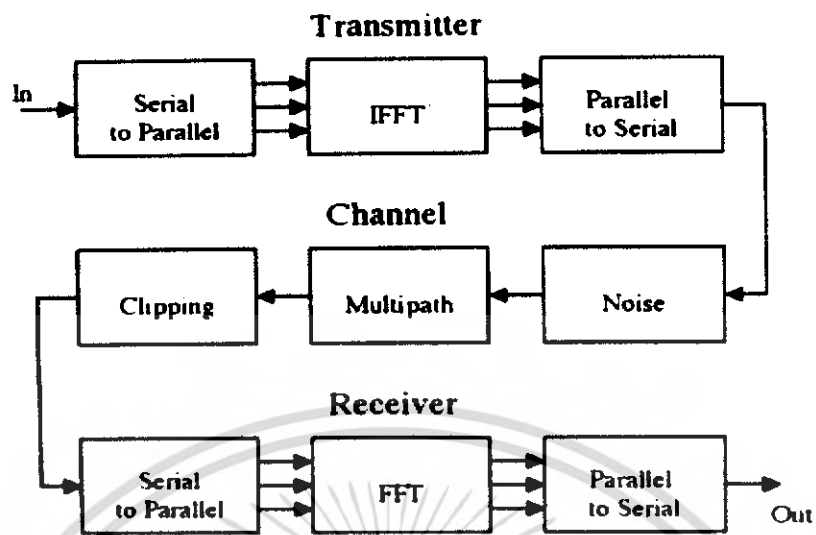
1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาเกี่ยวกับการสื่อสารในยุคที่ 4 ว่ามีลักษณะ แนวโน้มและทิศทางเป็นไปในรูปแบบใด
2. ศึกษา ระบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) และ Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) เพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการ ข้อดีข้อเสียของระบบ ของระบบดังกล่าว
3. ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นของ 2 ระบบนี้ และสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้
4. นำระบบ MIMO มาร่วมใช้กับ OFDM และทำการส่งในลักษณะ Multicarrier เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่ได้ออกมาว่ามีลักษณะอย่างไร
5. เมื่อได้ระบบ MIMO-OFDM System แล้วเมื่อดูในภาครับโดยใช้ Equalizer และ Iterative algorithm ตำแหน่งต่างๆ นำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ พิจารณาผ่าน โปรแกรมการคำนวณ MATLAB เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

1.4 สถาปัตยกรรม องค์ประกอบหลักๆ โดยรวมของโครงการ หรือรูปแสดงระบบการทำงาน

1.4.1 สถาปัตยกรรมระบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

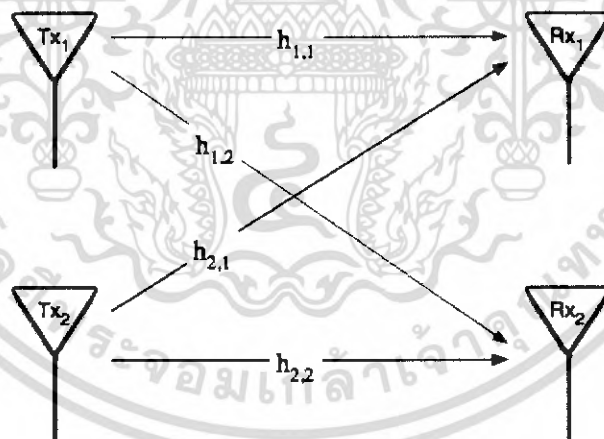
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของระบบ OFDM

ประกอบด้วยภาคส่ง (Transmitter) ช่องสัญญาณ (Channel) และภาครับ (Receiver)

1.4.2 สถาปัตยกรรมระบบ Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)



รูปที่ 1.2 แสดงลักษณะการส่งและรับของระบบ MIMO

ประกอบด้วยเสาอากาศภาคส่ง (Transmitter; Tx) ช่องสัญญาณ (Channel; h) และภาครับ (Receiver; Rx)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนของการทำโครงการ

ขั้นตอนการทำโครงการแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ การกำหนดปัญหาที่จะทำการศึกษา การออกแบบจำลองการวัด การวัดช่องสัญญาณ การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัด และการทำปริญญานิพนธ์ โดยช่วงเวลาในการทำขั้นตอนต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของการทำโครงการ

ขั้นตอนการทำโครงการ	ช่วงระยะเวลา							
	2549						2550	
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.
1. การกำหนดปัญหาที่จะศึกษา	←→							
2. การออกแบบจำลองการวัด			←→					
3. การทดลองผ่าน MATLAB					←→			
4. การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้และสรุป						←→		
5. การทำปริญญานิพนธ์							←→	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

2.1.1 บทนำ

OFDM ย่อมาจาก Orthogonal Frequency Division Multiplex เป็นเทคนิคการมอดูเลชันแบบหลายคลื่นพาห์ (Multiple Carrier Modulation) ซึ่งเป็นรูปแบบของการสื่อสารแบบขนานนั่นเอง (ในอดีตส่วนใหญ่การสื่อสารเป็นแบบอนุกรม) OFDM ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบเคลื่อนที่แบนด์กว้าง (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

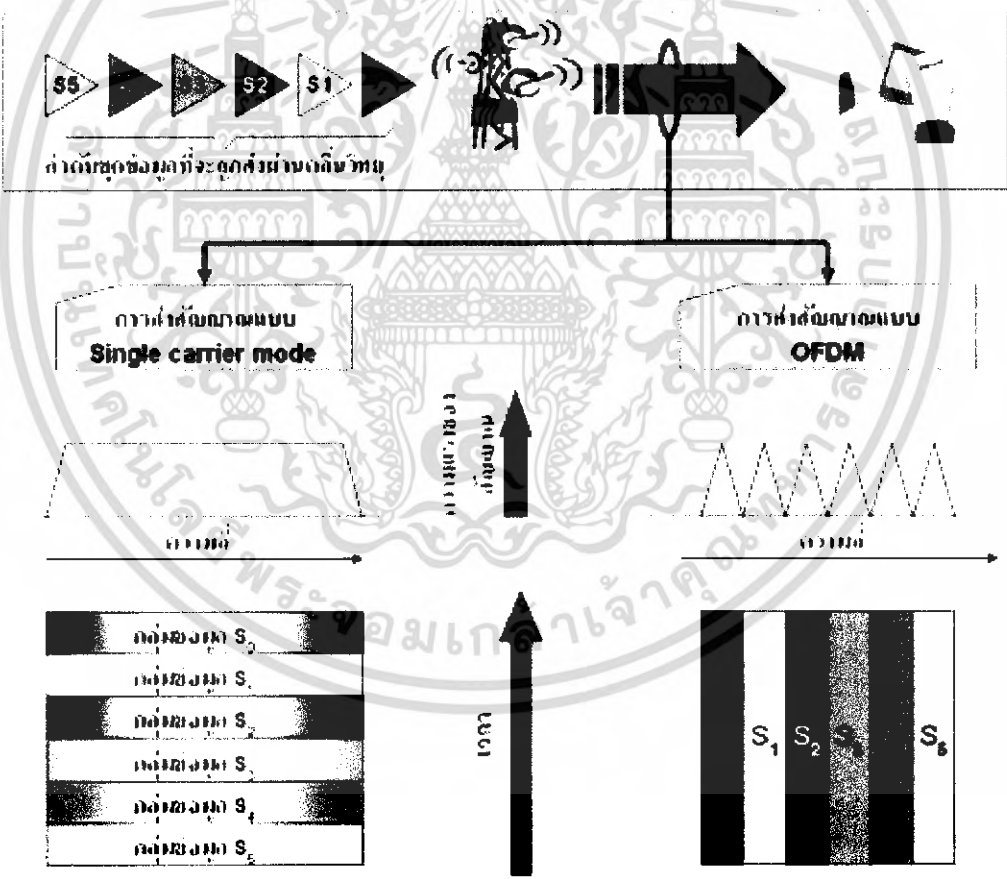
เนื่องจากการสื่อสารแบบไร้สายมักจะประสบกับปัญหาการจางหายของสัญญาณ (Fading) อันมีสาเหตุมาจากการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณเป็นหลายวิถี (Multipath propagation) นอกจากนั้นคลื่นหลายวิถียังทำให้เกิดการรบกวนแบบแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter Symbol Interference) หรือ ISI ของสัญญาณข้อมูลขึ้นที่เครื่องรับอีกด้วย ซึ่งถ้าเป็นระบบการมอดูเลตและส่งสัญญาณแบบเก่า (การส่งข้อมูลแบบอนุกรม) จะแก้ไขปัญหาลำนี้ได้ค่อนข้างยาก โดยเฉพาะเมื่อเป็นการสื่อสารที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง แต่สำหรับ OFDM แล้วปัญหาลำนี้สามารถแก้ไขได้ง่ายกว่าและยังสามารถส่งข้อมูลที่มีอัตราสูง ได้อย่างสบาย เนื่องจากในระบบ OFDM ข้อมูลที่เป็นอนุกรมความเร็วสูงจะถูกแปลงให้เป็นข้อมูลแบบขนานความเร็วต่ำเสียก่อน แล้วจึงส่งออกไปยังเครื่องรับพร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถลดปัญหาลำนี้ลงได้

จริงๆ แล้ว OFDM ไม่ใช่สิ่งใหม่อะไรเลยแต่เป็นเทคนิคที่มีการคิดค้น วิจัยและพัฒนามากกว่าห้าสิบปีมาแล้ว คือราวๆ ค.ศ. 1950 เริ่มต้น เทคนิค OFDM ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานกิจการสื่อสารทางทหาร ต่อมาได้ถูกพัฒนามาเป็นระบบสื่อสารดิจิทัลความเร็วสูงแบบ ไร้สายเพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์ เช่น ระบบ HDSL (High bit rate Digital Subscriber Lines) ระบบ ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Lines) ระบบ VHDSL (Very High Speed Digital Subscriber Lines) ระบบ DAB (Digital Audio Broadcasting) และระบบ DTV (Digital Television Broadcasting) เป็นต้น

เทคโนโลยี OFDM แม้จะเป็นหนึ่งในมาตรฐานทางเทคนิคที่แตกแขนงออกมาจากเทคโนโลยี Spread Spectrum ก็ตาม แต่ก็ถือว่ามีารรับส่งข้อมูลแบบ Multiple Carrier Mode ซึ่งหมายถึงการแบ่งย่อยแถบความถี่ออกเป็นแถบย่อยๆ สำหรับแยกส่งข้อมูลหลายๆ ช่อง แตกต่างจากมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

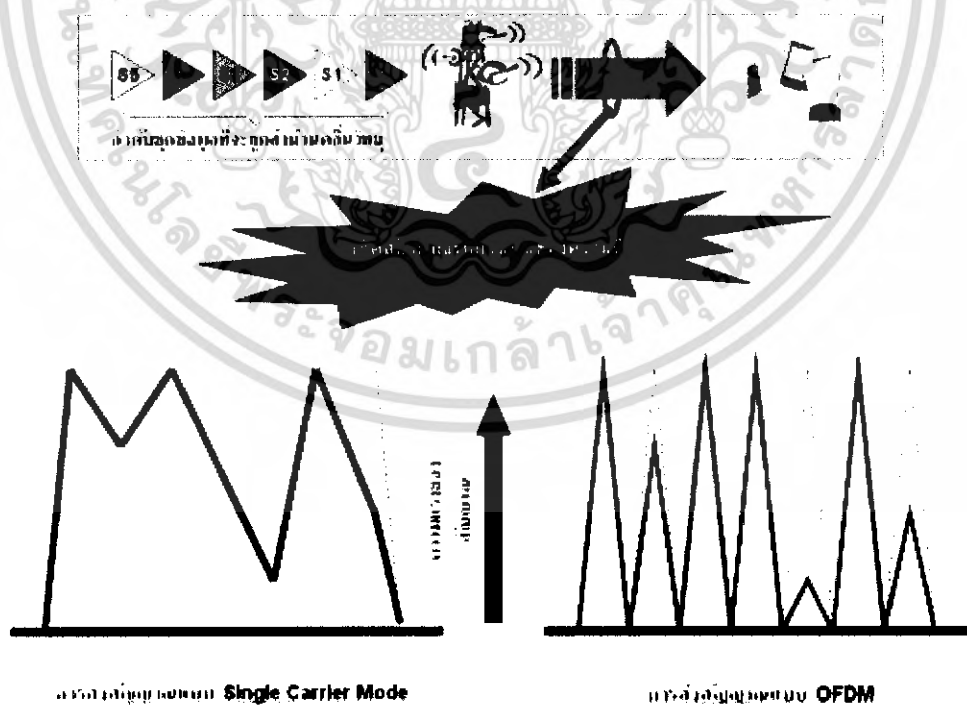
Spread Spectrum ทั่วไปที่ใช้แถบความถี่เดียวสำหรับรับส่งข้อมูลช่องเดียว ความแตกต่างและข้อเด่นของเทคโนโลยี OFDM แสดงในรูปที่ 2.1 แนวคิดในการสื่อสารแบบ Spread Spectrum ตั้งอยู่บนพื้นฐานที่ให้นำข้อมูลที่ต้องการส่งทั้งหมด ไม่ว่าจะมาจากที่ไหนก็ตาม มาทำการมอดูเลตเข้ากับสัญญาณรบกวนเสมือน (Pseudo Noise) แล้วทำการส่งแบบให้กระจายไปทั่วในแถบความถี่สำหรับรับส่ง ตัวอย่างเช่น ในกรณีของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G มาตรฐาน W-CDMA ซึ่งมีการกำหนดแถบความถี่กว้าง 5 เมกะเฮิรตซ์สำหรับวงจรความถี่หนึ่งช่อง ข้อมูลของผู้ใช้งานทั้งหมดจะถูกนำมามอดูเลตกับสัญญาณรบกวนเสมือนแล้วกระจายส่งไปตลอดแถบความถี่ 5 เมกะเฮิรตซ์นั้น ๆ คล้ายกับการเป่าผงแป้งหลากสีบนฝ่ามือให้กระจายออกไปในวงกว้าง เครื่องรับปลายทางจะทราบเองว่าต้องแยกรับสัญญาณรบกวนเสมือนรหัสใด โดยจะพิจารณาจับข้อมูลที่ต้องการตลอดแถบความถี่ 5 เมกะเฮิรตซ์นั้น ดังแสดงในส่วนซ้ายมือของรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างการสื่อสารแบบ Spread Spectrum กับ OFDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการรับส่งข้อมูลด้วยเทคโนโลยี OFDM จะมีข้อแตกต่างออกไป โดยก่อนส่ง จะทำการแบ่งแยกแถบความถี่ออกเป็นแถบความถี่ย่อยๆ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ต้องการจะส่งมาทำการเรียงลำดับเป็นกลุ่มรหัสข้อมูล (Symbol) โดยเนื้อหาข้อมูลที่อยู่ภายในแต่ละกลุ่มรหัสข้อมูลนั้นไม่จำเป็นว่าจะต้องเป็นข้อมูลของผู้ใช้บริการรายเดียวกัน เปรียบเสมือนการดักน้ำที่ปลายท่อ ซึ่งต้นทางอาจมีการเก็บสะสมน้ำสีต่างๆ 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 จึงคล้ายกับเป็นการคิดนอกกรอบออกจากมาตรฐาน Spread Spectrum โดยมีการส่งข้อมูลในแนวนอนแทนที่จะเป็นการส่งต่อเป็นทอด ๆ หรือที่เรียกกันว่าเป็นอนุกรม



รูปที่ 2.2 OFDM เปรียบเทียบกับการสื่อสารแบบ Spread Spectrum ชนิด Single Carrier Mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การมัลติเพล็กซ์แบบ โอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคที่ทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็วสูง โดยอาศัยหลักการการส่งผ่านแบบหลายคลื่นพาห์ (multi-carrier) อีกทั้งยังใช้ย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะแต่ละคลื่นพาห์ย่อยที่ใช้ในการส่งสัญญาณจะมีสเปกตรัมเลื่อมกัน โดยช่องสัญญาณ ความถี่จะถูกแบ่งออกเป็นความถี่คลื่นพาห์ย่อย (subcarrier) หลายๆความถี่ โดยแต่ละความถี่คลื่นพาห์ย่อยจะตั้งฉาก ซึ่งกันและกัน ทำให้มันเป็นอิสระต่อกัน ความถี่ที่คลื่นพาห์ที่ตั้งฉากกันนั้นทำให้ไม่มีปัญหาการซ้อนทับกันของ สัญญาณที่อยู่ติดกัน โดยมีคุณสมบัติของการตั้งฉาก (Orthogonal properties) ซึ่งกันและกันระหว่างคลื่นพาห์ย่อยดังแสดง ในรูปที่ 2.3



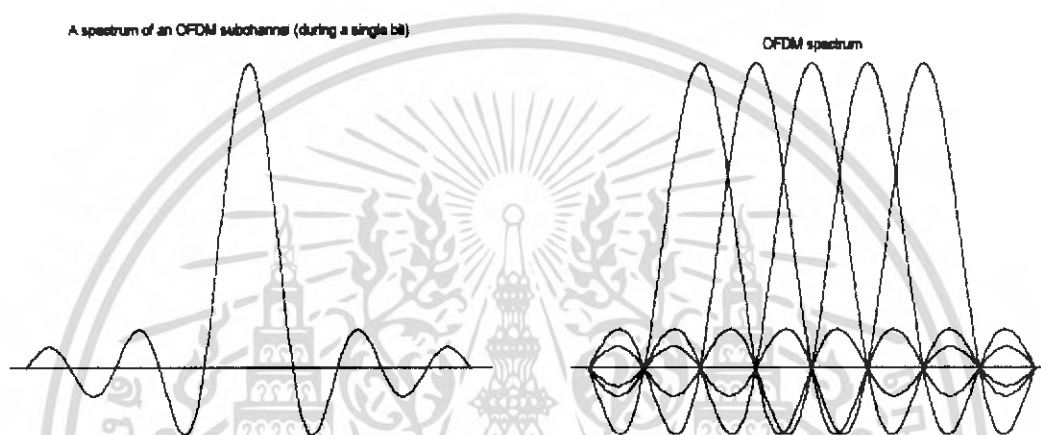
รูปที่ 2.3 การมัลติเพล็กซ์แบบ โอเอฟดีเอ็ม

OFDM เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งความถี่ เมื่อช่องความถี่ถูกแบ่งออกเป็นขนาดเล็กๆ N ช่อง แต่ละช่องมีขนาดเท่ากับขนาดของสัญลักษณ์ (bit rate) ดิจิตอล ทางด้านส่งจะมีสัญญาณดิจิตอล ความเร็วสูงที่ถูก แบ่งออกเป็นกลุ่มข้อมูลย่อยๆ ที่มีความถี่ต่ำกว่า จะถูกมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นพาห์ย่อย 1 สัญญาณ และนำสัญญาณ ทั้งหมดส่งขนานกันออกไป รูปแบบในการมอดูเลตสัญญาณคลื่นพาห์ย่อยที่นิยมทั่วไปได้แก่ QAM, 16 QAM หรือ 64 QAM เป็นต้น ใน OFDM กลุ่มของข้อมูลจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบขนานกัน โดยการมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นพาห์ ย่อย ดังนั้น จะกลายมาเป็นสัญญาณบนแกนความถี่ ซึ่งการแปลงสัญญาณกลับให้อยู่บนแกนเวลาอีกครั้งโดยการ แปลงกลับฟูเรียร์ (IFFT) จากนั้นจะสัญลักษณ์บนแกนเวลาจะถูกมัลติเพล็กซ์เข้าด้วยกันให้เป็นอนุกรมของ สัญญาณ แล้วจึงส่งสัญญาณออกไปทางเสาอากาศ

หลังจากการมอดูเลตแบบ OFDM จะมีการสอดแทรกช่วงแถบป้องกันแคบๆ เพื่อลดสัญญาณรบกวน ระหว่างสัญลักษณ์ (Inter symbol Interference: ISI) ที่เกิดจากสัญญาณหลายเส้นทาง (multi-path) เรียกแถบ ป้องกันแคบๆนี้ว่า การเสริมไซคลิก (cyclic prefix) ส่วนในเครื่องรับจะ

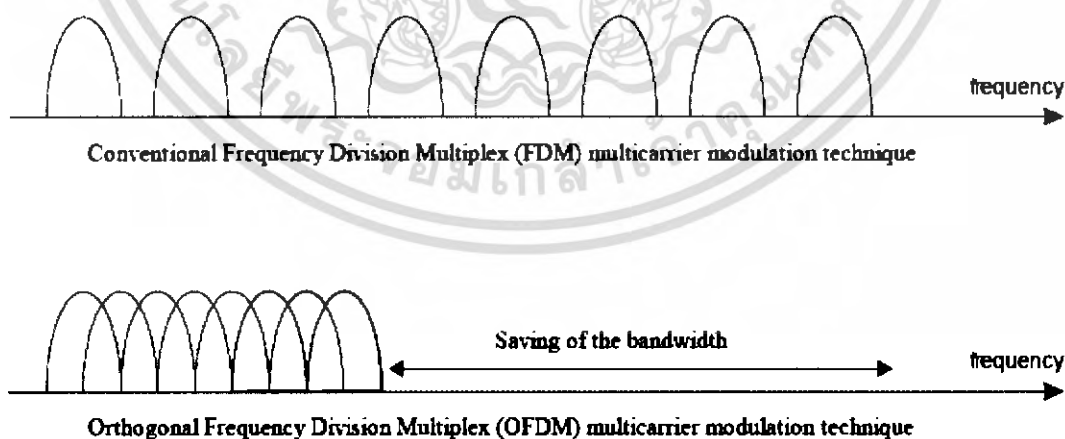
ดำเนินกระบวนการตรงข้ามกับเครื่องส่ง ในเครื่องรับจะใช้การแปลงฟาสท์ฟูเรียร์แปลงสัญญาณที่อยู่บนแกนเวลาไปเป็นแถบความถี่สมมูลย์

ข้อดีของ OFDM คือสามารถใช้งานแถบความถี่ในระบบที่เคยใช้สัญญาณคลื่นพาห์เดี่ยวได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ (spectral efficiency), สามารถป้องกันผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของสัญญาณหลายเส้นทาง (immunity to multi-path) และมีความไวต่ำต่อการเลือนหายไปของความถี่ที่เลือก (less sensitivity to frequency selective fading)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของ OFDM spectrum (a) single subchannel (b) 5 carriers

2.1.2 ความแตกต่างระหว่าง OFDM และ FDM



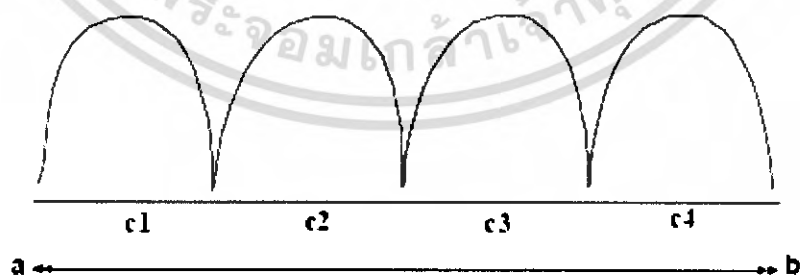
รูปที่ 2.5 การเปรียบเทียบระหว่าง FDM และ OFDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบทั่วไปของการส่งข้อมูลแบบขนานโดยวิธี Frequency Division Multiplexing (FDM) แถบความถี่ของสัญญาณทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็นช่องสัญญาณย่อยตามความถี่ซึ่งไม่มีการเหลื่อมล้ำกัน โดยแต่ละช่องสัญญาณย่อยจะถูกมอดูเลตด้วยคุณลักษณะและสัญลักษณ์ที่แตกต่างกันซึ่งเหมือนเป็นวิธีที่ดีในการหลีกเลี่ยงการเหลื่อมล้ำกันของสัญญาณความถี่ใกล้เคียงเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนที่จะเกิดระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้นำไปสู่การใช้งานแถบความถี่ที่ไม่มีประสิทธิภาพซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการใช้งานแถบความถี่ที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้หลักการของการตั้งฉากซึ่งกันและกัน (orthogonality) ซึ่งทำให้สัญญาณความถี่ใกล้เคียงสามารถที่จะเหลื่อมล้ำกันและไม่เกิดการรบกวนซึ่งกันและกันระหว่างช่องสัญญาณที่อยู่ติดกันได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างในการใช้งานแบนด์วิดท์ระหว่างการส่งผ่านแบบหลายคลื่นพาห์แบบเดิมที่ไม่มีการเหลื่อมล้ำกันและแบบที่มีการเหลื่อมล้ำกันได้ จากรูป 2.5 จะเห็นได้ว่าสามารถลดแบนด์วิดท์ได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถใช้งานแถบสเปกตรัมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดได้

การมัลติเพล็กซ์แบบ โอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ที่คล้ายกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ (Frequency Division Multiplexing) โดยที่ระบบโอเอฟดีเอ็มนั้นจะใช้พื้นฐานของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ที่ทำให้สามารถส่งข่าวสารได้หลายข่าวสารไปในช่องสัญญาณช่องเดียวกันซึ่งเป็นการใช้ย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ (FDM) นั้นจะใช้ช่องทางการสื่อสารร่วมกัน ด้วยการแบ่งความกว้างของช่องสัญญาณเป็นหลายช่องทางขนานกัน กำหนดและแยกด้วย guard band ของความถี่ที่แตกต่างกัน สัญญาณทั้งหมดจะถูกส่งไปพร้อมๆ กัน เช่นสมมติว่ามีแบนด์วิดท์ความถี่ตั้งแต่ a ถึง b สามารถแบ่งความถี่นี้ออกเป็นความถี่สี่ช่องเท่าๆ กันดังรูป



รูปที่ 2.6 FDM carrier

ความถี่ a และ b ไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c_n = n \times c_1$$

ดังนั้น

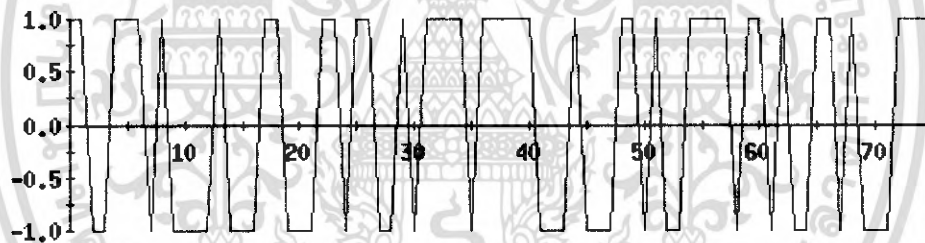
$$c_2 = 2c_1$$

$$c_3 = 3c_1$$

$$c_4 = 4c_1$$

ความถี่ทั้งสามเป็น harmonic กับ c_1 ในกรณีนี้คลื่นพาห้ทั้งหมดตั้งฉากต่อกัน ดังนั้นเมื่อนำมารวมกันจึงทำให้สัญญาณไม่รบกวนซึ่งกันและกัน แต่ใน FDM ไม่มีความถี่ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ข้างต้นทำให้มีการรบกวนกันของสัญญาณจากคลื่นพาห้ข้างเคียง ทำให้ต้องใช้ guard band เพื่อแยกสัญญาณให้ห่างกัน และลดการรบกวนของสัญญาณ

ใน OFDM สามารถใช้คลื่นพาห้ได้ N ตัว ซึ่ง N เป็นได้ตั้งแต่ 16 ถึง 1024 ตามตัวอย่างข้างล่างจะใช้ คลื่นพาห้ 4 ตัว โดยที่สัญญาณมี อัตราข้อมูลเท่ากับ 1 และ ความถี่ sampling เท่ากับ 1 sample/symbol



รูปที่ 2.7 Bit stream ซึ่งจะถูกมอดูเลทโดยใช้ OFDM ซึ่งมี 4 carriers

มีบิตตั้งต้นดังต่อไปนี้ 1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,...

ทำการเปลี่ยนจาก serial เป็น parallel ได้โดยการเขียนบิตข้างต้นได้เป็น 4 คอลัมน์

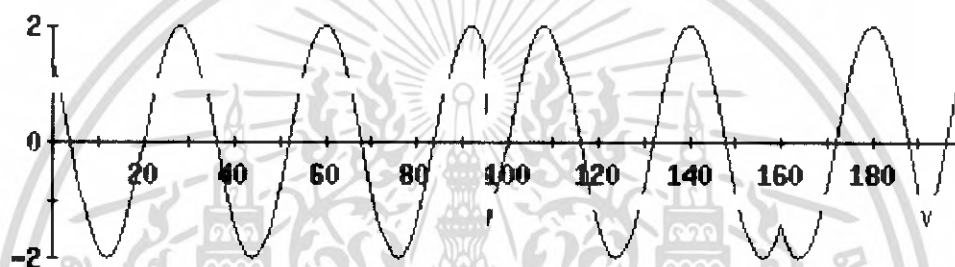
c1	c2	c3	c4
1	1	-1	-1
1	1	1	-1
1	-1	-1	-1
-1	1	-1	-1
-1	1	1	-1
-1	-1	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละคอดัมน์แสดงบิตที่ถูกส่งไปในหนึ่งคลื่นพหุข้อย่อย จากทฤษฎีของ Nyquist ทำให้ทราบว่า ความถี่ต่ำสุดที่สามารถส่งข้อมูลได้จะต้องเป็นสองเท่าของอัตราข้อมูล ในกรณีนี้ อัตราข้อมูลต่อหนึ่งคลื่นพหุข้อย่อยเท่ากับ $1/4$ หรือ 1 symbol ต่อ วินาทีสำหรับคลื่นพหุข้อย่อยทั้งสิ้น ดังนั้นความถี่ต่ำสุดที่สามารถใช้ได้คือ $1/2$ Hz แต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะใช้ 1 Hz ดังนั้น harmonic จะเท่ากับ 1, 2, 3 และ 4 Hz

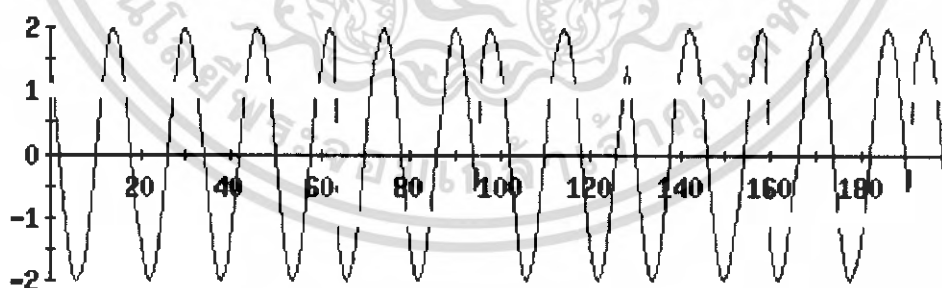
ในกรณีนี้เลือกใช้การมอดูเลชันแบบ BPSK (สามารถเลือกใช้การมอดูเลชันแบบ ไทเนกก็ได้เช่น QPSK, 8PSK, 32-QAM ฯลฯ)

ในคลื่นพหุแรก (c1) ส่ง 1, 1, 1, -1, -1, -1 เมื่อผ่านการมอดูเลชันแบบ BPSK จะเป็นดังนี้



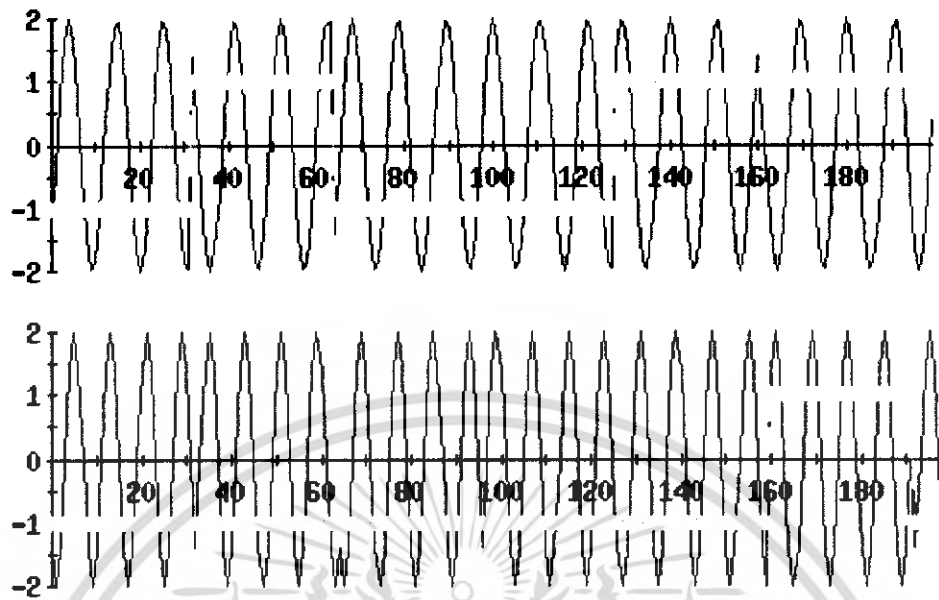
รูปที่ 2.8 Sub-carrier 1 และบิตที่มอดูเลท

คลื่นพหุที่ 2 (c2) จะมีความถี่เท่ากับ 2 Hz ซึ่งจะเป็นฮาร์โมนิกและตั้งฉากกับความถี่ของคลื่นพหุแรกซึ่งเท่ากับ 1 Hz นำบิตในคอดัมน์ที่สองมามอดูเลทจะได้ดังนี้

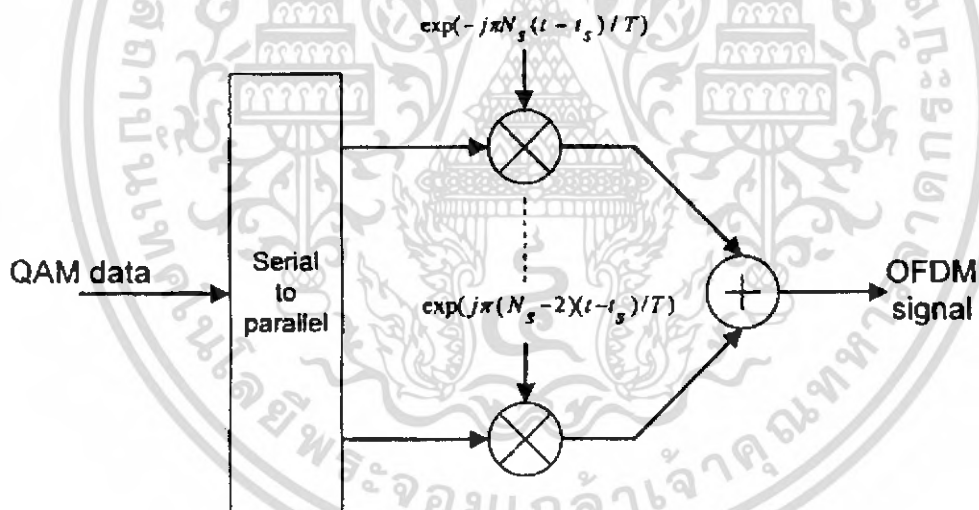


รูปที่ 2.9 Sub-carrier 2 และบิตที่มอดูเลท

คลื่นพหุที่ 3 (c3) ความถี่จะเท่ากับ 3 Hz และ คลื่นพหุที่ 4 (c4) ความถี่จะเท่ากับ 4 Hz c3 จะมอดูเลทกับ -1, 1, 1, -1, -1, 1 และ c4 กับ -1, -1, -1, -1, -1, 1

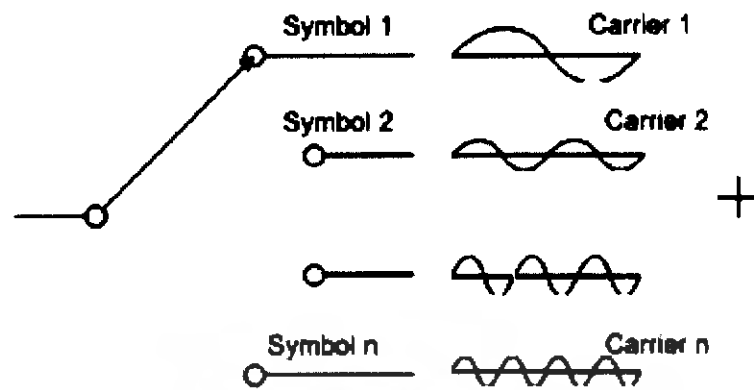


รูปที่ 2.10 Sub-carrier 3 และ 4 และบิตที่มอดูเลต

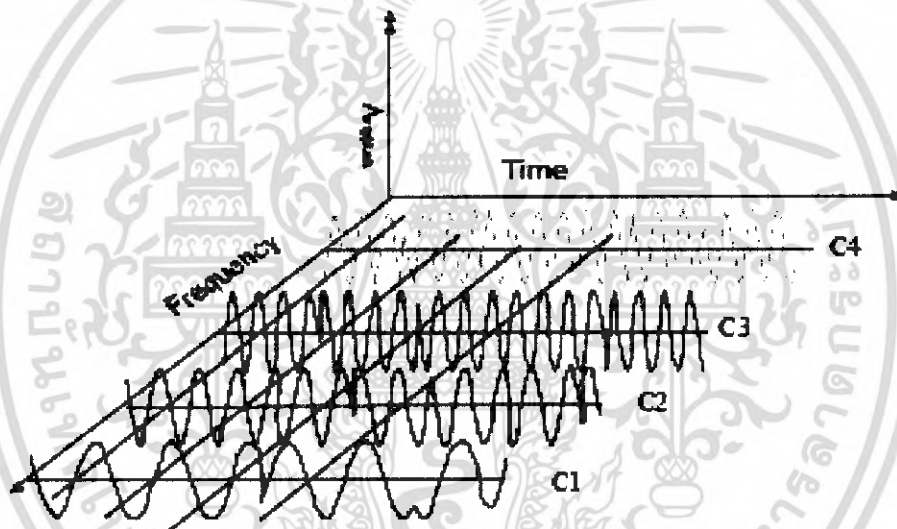


รูปที่ 2.11 การมอดูเลตสัญญาณ OFDM

นำบิตสตรีมมากระจายทีละบิตไปยังความถี่คลื่นพาห่อย่อยทั้งสี่ โดยการใช้ความถี่คลื่นพาห่อย่อยที่เป็นอิสระต่อกัน (c1-c4) ของความถี่ซึ่งตั้งฉากกันตั้งแต่ความถี่ที่ 1-4 Hz มามอดูเลตได้รูปตามข้างล่าง



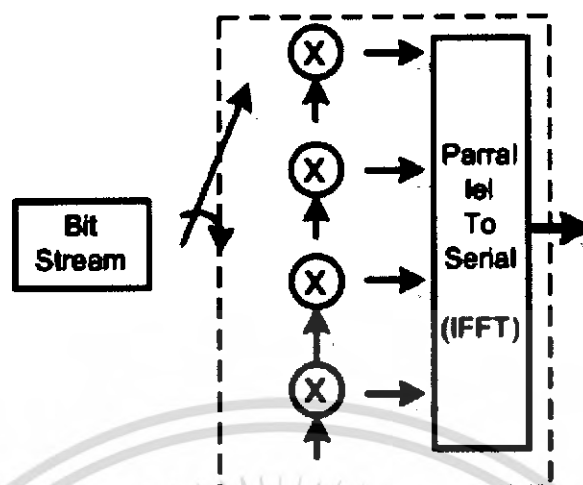
รูปที่ 2.12 ความถี่หัดั้งมอดูเลท



รูปที่ 2.13 OFDM ใน time และ frequency domain

รวมความถี่คลื่นพาห้ย่อยที่มอดูเลทแล้วทั้งสี่เพื่อสร้างสัญญาณ OFDM (ส่วนใหญ่สร้างโดย IFFT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 Function diagram ของการสร้างสัญญาณ OFDM ในเส้นประจะเรียกว่า IFFT block



รูปที่ 2.15 สัญญาณ OFDM ที่ถูกสร้างขึ้นมา

สามารถเขียนสมการได้เป็น

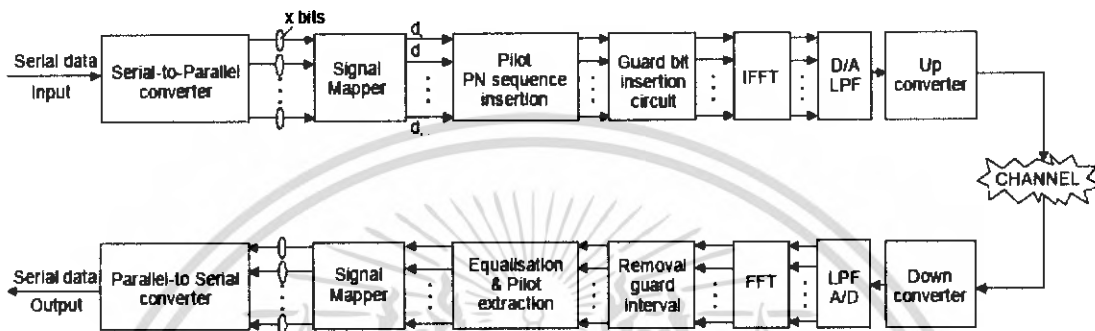
$$c(t) = \sum_{n=1}^N m_n(t) \sin(2\pi n t)$$

ซึ่งก็คือสมการของ Inverse FFT นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การใช้ Inverse FFT สร้างสัญญาณ OFDM

เมื่อทำการมอดูเลตสัญญาณจนกลายเป็นสัญญาณบนแกนความถี่ ให้แปลงสัญญาณกลับให้อยู่บนแกนเวลาอีกครั้ง โดยการ แปลงกลับฟาส์ฟูเรียร์ (IFFT) เพื่อที่จะนำสัญลักษณ์บนแกนเวลามามัลติเพล็กซ์เข้าด้วยกันให้เป็นอนุกรมของ สัญญาณ



รูปที่ 2.16 Block diagram ของระบบ OFDM ซึ่งใช้ FFT, pilot PN sequence และใส่ guard bit

2.1.4 Orthogonality

สัญญาณจะออร์โธโกนอลกันถ้ามีความเป็นอิสระร่วมกัน (mutually independent) ของแต่ละสัญญาณ คุณสมบัติของการออร์โธโกนอลจะทำให้สามารถส่งสัญญาณหลายๆ สัญญาณรวมกันไปในช่องสัญญาณการสื่อสารเดียวกันและสามารถที่จะกู้สัญญาณกลับมาได้โดยไม่มีแทรกสอดซึ่งกันและกัน ปกติแล้วส่วนมากการมัลติเพล็กซ์รูปแบบต่างๆ จะมีคุณสมบัติของการออร์โธโกนอลโดยธรรมชาติ ตัวอย่างเช่นการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา (TDM: Time Division Multiplexing) ซึ่งสามารถที่จะส่งสัญญาณข่าวสารหลายๆ สัญญาณไปในช่องการสื่อสารเดียวกันโดยอาศัยการส่งคนละช่วงเวลา (time slot) คือในระหว่างที่ส่งสัญญาณข่าวสารสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งนั้นจะไม่มีการส่งสัญญาณข่าวสารสัญญาณอื่น ส่วนสัญญาณข่าวสารอื่นๆ นั้นจะส่งที่ช่วงเวลาถัดไปดังนั้นจึงทำให้ไม่เกิดแทรกสอดระหว่างสัญญาณข่าวสารที่ส่งเพราะระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลานั้นมีลักษณะของการออร์โธโกนอล ในส่วนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ (FDM: Frequency Division Multiplexing) นั้นสัญญาณข่าวสารแต่ละสัญญาณจะออร์โธโกนอลกันโดยไม่เกิดการแทรกสอดซึ่งกันและกัน โดยการส่งที่คลื่นพาห้คนละความถี่และแถบความถี่ที่ห่างกันเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันระหว่างสัญญาณที่ใช้คลื่นพาห้ที่มีความถี่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าวิธีการเหล่านี้จะมีความเป็นออร์โธโกนอลในส่วนของระบบ ไอเอฟดีเอ็มจะเป็นรูปแบบการมัลติเพล็กซ์ของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่โดยที่คลื่นย่อยๆ ของสัญญาณ ไอเอฟดีเอ็มจะมี สเปกตรัมที่ซ้อนทับกันซึ่งมี

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีถ้าสามารถที่จะรักษาคุณสมบัติของการออร์โธโกนอลระหว่างคลื่นพาห่อย่อยเหล่านั้นได้

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มนั้นจะมีคุณสมบัติของการออร์โธโกนอลในแกนความถี่โดยสามารถที่จะส่งสัญญาณข่าวสารไปในคลื่นพาห่อย่อยที่ต่างกันโดยไม่เกิดการรบกวนกัน สัญญาณโอเอฟดีเอ็มสามารถสร้างจากผลรวมของสัญญาณไซน์ซอซอซด์ (Sinusoid signal) หลายๆ สัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณก็คือคลื่นพาห่อย่อยแต่ละตัวนั่นเอง ความถี่เบสแบนด์ของแต่ละคลื่นพาห่อย่อยจะกำหนดให้เป็นจำนวนเต็มของส่วนกลับของช่วงเวลาของสัญลักษณ์หนึ่งสัญลักษณ์ (symbol time) โดยผลที่ได้จะทำให้แต่ละคลื่นพาห่อย่อยนั้นมีจำนวนของไซเคิลเป็นจำนวนเต็มในหนึ่งสัญลักษณ์ และผลที่ตามมาจะทำให้แต่ละคลื่นพาห่อย่อยๆ นั้นออร์โธโกนอลกัน

ใน OFDM นั้นจะเลือกความถี่คลื่นพาห่กับข้อมูลซึ่งมอดูเลทแล้วตั้งฉากต่อกัน ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ guard band อีกต่อไป ด้วยลักษณะแบบนี้จึงทำให้ออกแบบภาครับและภาคส่งของ OFDM นั้นง่ายขึ้น และไม่จำเป็นต้องใช้ filter แยกสำหรับแต่ละช่องสัญญาณย่อยเหมือนกับ FDM

การตั้งฉากกันของคลื่นพาห่ยังทำให้สามารถใช้ความจุได้ใกล้เคียงกับ Nyquist rate โดยที่สามารถใช้ความจุได้เกือบทั้งหมดของย่านความถี่นั้น

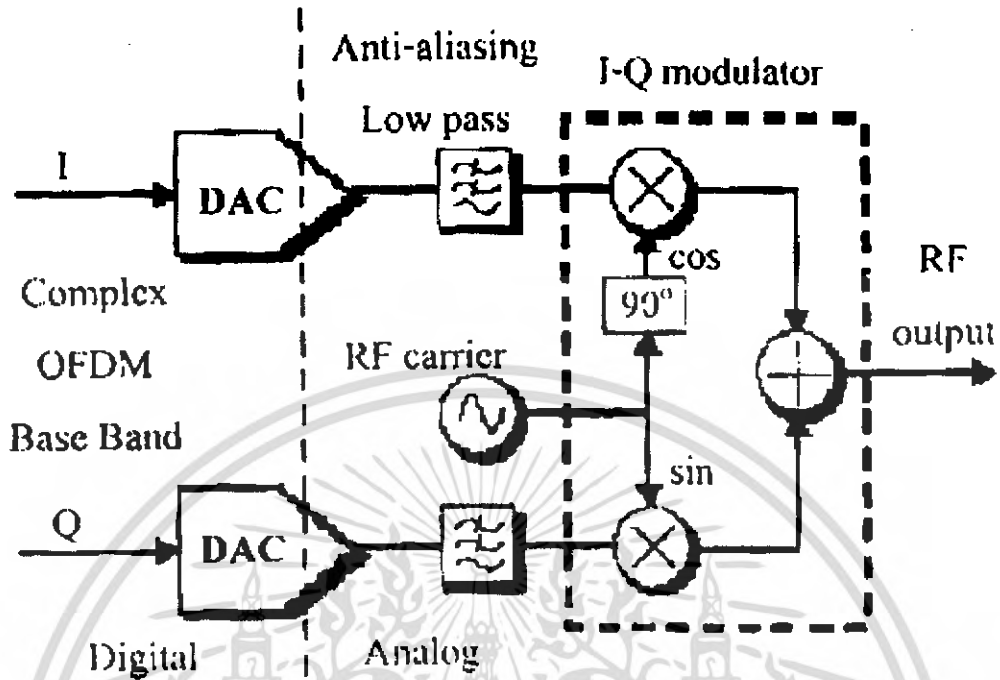
ประสิทธิภาพของ OFDM อาจถูกลดทอนเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเนื่องจาก Doppler Shift ของความถี่คลื่นพาห่อาจทำให้สูญเสียความ orthogonal ไป และทำให้เกิด Inter-carrier-interference (ICI) เช่นการ cross-talk ระหว่าง ช่องสัญญาณย่อย

OFDM จำเป็นต้องใช้การ synchronize ความถี่ ซึ่งมีความแม่นยำสูงในเครื่องรับ ถ้าเกิดความผิดพลาดขึ้นอาจทำให้คลื่นพาห่ย่อยนั้นไม่ ตั้งฉากกันอีกต่อไป ซึ่งเป็นการลดประสิทธิภาพของ OFDM

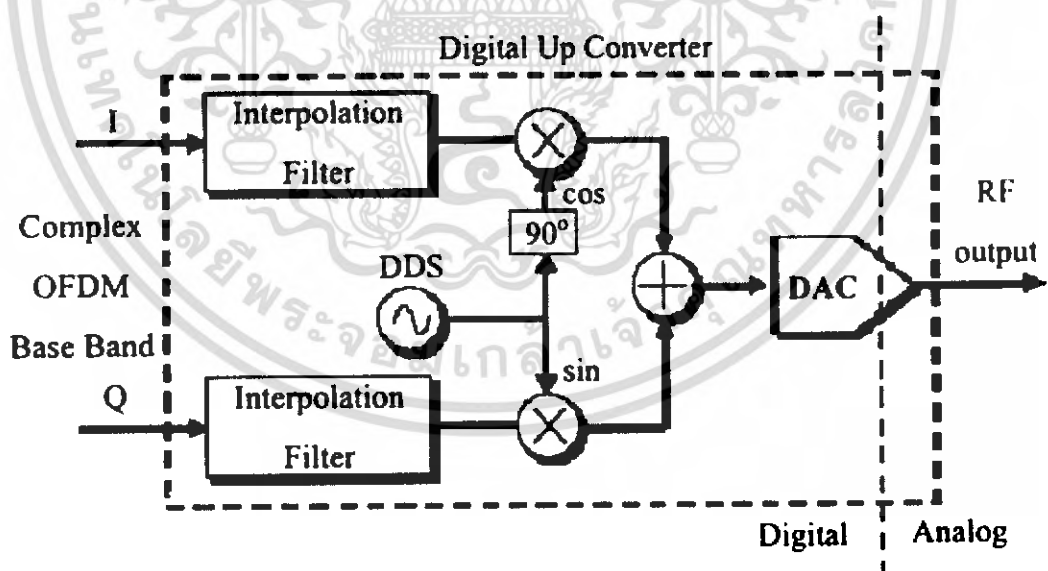
2.1.5 การมอดูเลตสัญญาณอาร์เอฟ

สัญญาณ OFDM ที่ได้นั้นจะอยู่ในรูปของสัญญาณเบสแบนด์ ในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณวิทยุจะต้องทำการผสมความถี่ให้สูงขึ้นที่จะทำให้สามารถส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไปได้ โดยสามารถใช้เทคนิคแบบอนาลอกคั้งแสดงในรูปที่ 2.17 หรือเทคนิคการแปลงความถี่ให้สูงขึ้นแบบดิจิตอลคั้งแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งทั้งสองวิธีจะให้ผลการทำงานที่คล้ายกัน แต่อย่างไรก็ตามสมรรถนะของการมอดูเลตแบบดิจิตอลนั้นจะมีความแม่นยำมากกว่าแบบอนาล็อก

72297



รูปที่ 2.17 การมอดูเลตสัญญาณอาร์เอฟโดยเทคนิคแบบอนาล็อก

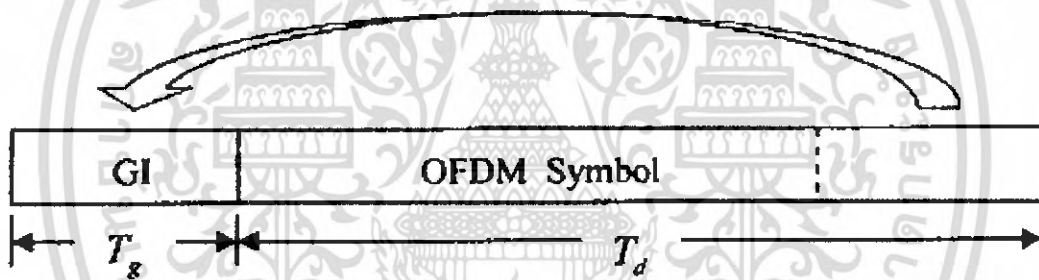


รูปที่ 2.18 การมอดูเลตสัญญาณอาร์เอฟโดยเทคนิคแบบดิจิทัล (DDS: Direct Digital Synthesis)

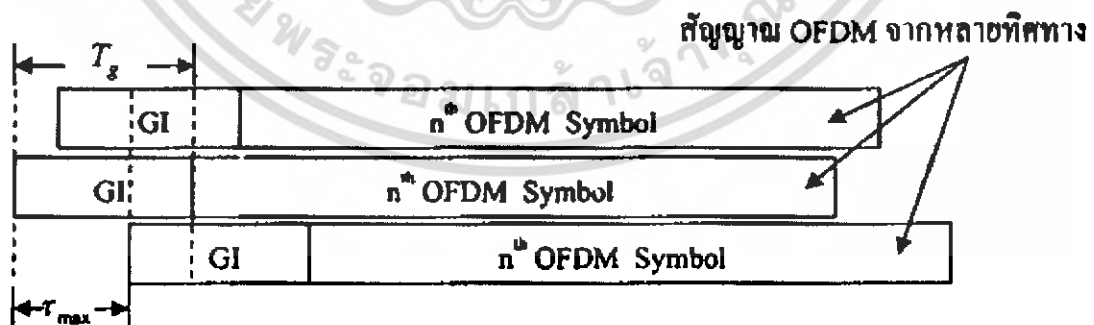
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 ช่วงเวลาป้องกัน

หนึ่งในเหตุผลที่สำคัญของการนำ OFDM มาใช้งานก็คือมีความทนทานต่อการแผ่กว้างของการประวิงแบบหลายทิศทาง โดยการแบ่งชุดข้อมูลตามจำนวนของคลื่นพาห่อย่อย N ซึ่งช่วงเวลาสัญลักษณ์จะเพิ่มขึ้น N เท่า ในการกำจัดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ได้อย่างสมบูรณ์นั้นจะมีการเพิ่มช่วงเวลาป้องกัน (Guard Time) เข้าไปในช่วงสัญลักษณ์ OFDM แต่ละช่วง โดยช่วงเวลาป้องกันจะถูกกำหนดให้มีขนาดใหญ่กว่าการแผ่กว้างของการประวิง กล่าวคือองค์ประกอบของสัญญาณจากหลายทิศทางจากสัญลักษณ์หนึ่งไม่สามารถแทรกสอดกับสัญลักษณ์ถัดไปได้ การกำจัดการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห่นั้น ทำได้โดยการใส่ส่วนขยายแบบย้อนกลับ (Cyclic Prefix) ของช่วงสัญลักษณ์ OFDM ในช่วงเวลาป้องกัน โดยคัดลอกข้อมูลที่อยู่ส่วนท้ายของช่วงสัญลักษณ์ OFDM แล้วนำมาวางไว้หน้าช่วงสัญลักษณ์ OFDM เดิม ทำให้แน่ใจว่าสัญลักษณ์ OFDM ซึ่งถูกประวิงมาจะมีจำนวนรอบคลื่นเป็นจำนวนเต็มในคาบเวลาของ FFT เสมอ จึงไม่สามารถก่อให้เกิดการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห่ได้



รูปที่ 2.19 การส่งส่วนขยายแบบย้อนกลับในช่วงเวลาป้องกัน



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างสัญญาณ OFDM ที่ได้รับจากช่องสัญญาณแบบหลายทิศทาง

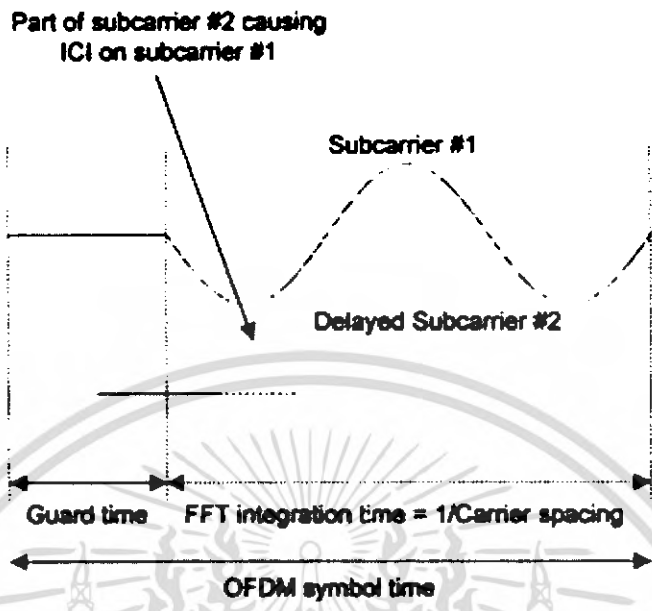
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 ช่วงเวลาคูลและส่วนหน้าแบบวน

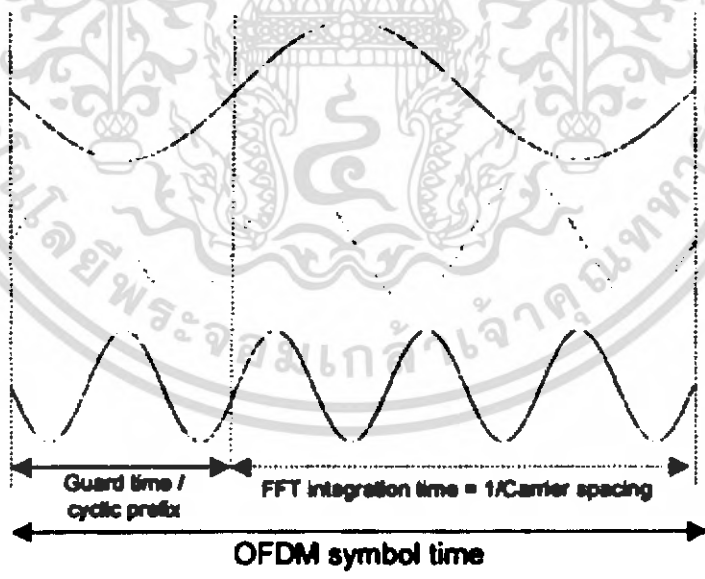
หนึ่งในเหตุผลที่สำคัญของการนำ OFDM มาใช้งานคือมีความทนทานต่อการแผ่กว้างของการประวิงแบบหลายวิถี (multipath delay spread) ด้วยวิธีการแบ่งชุดข้อมูลอินพุตออกตามจำนวนของคลื่นพาห่อย่อย N_s เท่ากับว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์จะถูกแบ่งออกเป็นช่วงแคบๆ ตาม N_s เช่นกัน ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดการเกิดการประวิงแบบหลายวิถี สำหรับการกำจัดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ที่สมบูรณ์แบบนั้นได้มีการนำช่วงเวลาคูลมาใช้ในแต่ละสัญลักษณ์ OFDM โดยที่เวลาคูลจะถูกกำหนดให้มีค่ามากกว่าการแผ่กว้างของการประวิงเวลาตามที่คาดหมายไว้ (ปกติจะกำหนดให้มีค่ามากกว่า 4 เท่าของค่าประวิงเวลาการแผ่กว้างโดยเฉลี่ย) จนกระทั่งส่วนประกอบในหลายวิถีจากสัญลักษณ์หนึ่งไม่สามารถไปรบกวนสัญลักษณ์ต่อไปได้ อย่างไรก็ตามอาจจะไม่มีสัญญาณอยู่ในช่วงเวลาคูลทั้งหมด ในกรณีเช่นนี้อาจทำให้เกิดปัญหาการแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห่ได้ ซึ่งหมายถึงคลื่นพาห่อย่อยได้เสียคุณลักษณะการตั้งฉากไปนั่นเอง โดยผลกระทบนี้ถูกแสดงดังรูปที่ 2.22 จะเห็นได้ว่าคลื่นพาห่อย่อยที่ 2 เกิดการประวิงเวลาออกไปนอกส่วนของช่วงเวลาคูล ดังนั้นเมื่อเครื่องรับต้องการตีמודูเลตคลื่นพาห่อย่อยที่ 1 จะพบว่าเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นจากคลื่นพาห่อย่อยที่ 2 ได้ เพราะภายในคาบเวลาของ FFT นั้นได้เกิดจำนวนรอบที่ไม่เป็นจำนวนเต็มส่งผลทำให้เกิดผลต่างขึ้นและในเวลาเดียวกันนั่นเองคลื่นพาห่อย่อยที่ 1 จะไปรบกวนคลื่นพาห่อย่อยที่ 2 ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกัน

เทคนิคในการต่อสู้กับความเสียหายที่เกิดจาก ICI นั้นคือการใช้เทคนิคการเพิ่มเติมส่วนหน้าแบบวนซึ่งเป็นการลอกแบบส่วนท้ายสุดของสัญลักษณ์ OFDM ก่อนหน้านี้มาต่อไว้ที่ส่วนหน้าของสัญลักษณ์ OFDM ถัดไป ซึ่งถูกนำไปใช้ในช่วงของเวลาคูลโดยกำหนดความยาวให้มีค่าเท่ากันหรือมากกว่าค่าสูงสุดของการประวิงเวลา (delay) ที่แผ่กว้างออกดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งวิธีนี้ทำให้แน่ใจได้ว่าสัญลักษณ์ OFDM จะมีค่าเป็นจำนวนเต็มของรอบคลื่นภายในคาบเวลาของ FFT อย่างแน่นอน

ในส่วนทางด้านเครื่องรับจะทำการถอดช่วงเวลาคูลและส่วนหน้าแบบวนออก ซึ่งมีความยาวของช่วงเวลา ตามที่กำหนดไว้ในการป้องกันการเกิด ISI และ ICI ยิ่งถ้ากำหนดความยาวไว้มากจะสามารถป้องกันปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อเสียนั้นคือทำให้ช่วงเวลาในการส่งข้อมูลมีค่าลดลง เนื่องจากต้องสิ้นเปลืองไปกับการใช้ช่วงเวลาคูลที่เพิ่มขึ้นทำให้สูญเสียกำลังในการส่งผ่านข้อมูลและแถบความถี่ใช้งานไปโดยเปล่าประโยชน์ ฉะนั้นจึงต้องมีการกำหนดช่วงเวลาคูลให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณด้วยเช่นกันเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

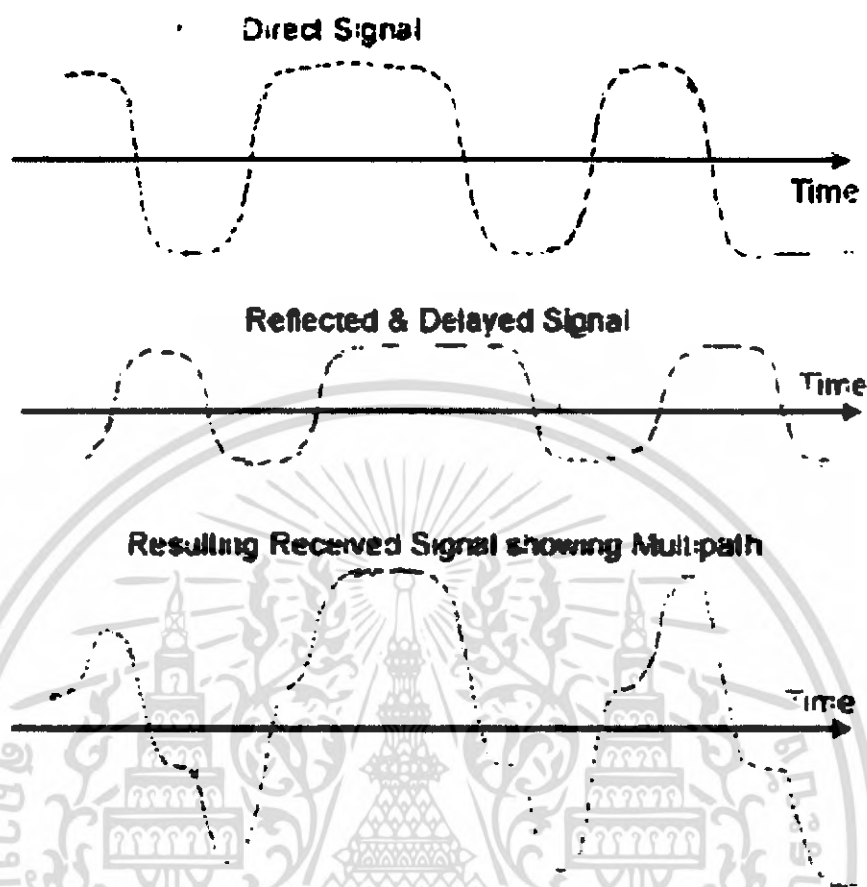


รูปที่ 2.21 ผลกระทบที่เกิดจากการประวิงหลายวิถีที่ออกนอกเหนือเวลาคูม



รูปที่ 2.22 สัญลักษณ์ OFDM กับ การขยายส่วนหน้าแบบวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงผลของการแผ่กว้างของการประวิงแบบหลายทิศทาง

2.1.8 การซิงโครไนซ์ (Synchronization)

ก่อนที่เครื่องรับ OFDM จะสามารถตีความคลื่นพาห่อย่อยออกมาได้ จะต้องมีการซิงโครไนซ์อย่างน้อยสองครั้ง โดยครั้งแรกใช้เพื่อหาของเขตของสัญลักษณ์และเวลา (timing) ที่เหมาะสม เพื่อให้ผลกระทบที่เกิดจาก ISI และ ICI มีค่าน้อยที่สุดในขณะนั้น ส่วนครั้งที่สองใช้เพื่อการประมาณค่า และการตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งเกิดมาจากความเบี่ยงเบนทางความถี่ของคลื่นพาห่เพื่อใช้ในการหลีกเลี่ยงการเกิด ICI สำหรับเครื่องรับร่วมนัย (coherent receivers) เฟสของคลื่นพาห่ต้องมีการซิงโครไนซ์เพื่อใช้ในการตรวจวัดขนาดและเฟสของคลื่นพาห่ย่อยทั้งหมด จนถึงใช้ในการกำหนดขอบเขตสำหรับแผนผัง QAM ของแต่ละคลื่นพาห่ย่อย โดยปกติสัญญาณ OFDM ที่รับได้จะมีค่าความเบี่ยงเบนทางความถี่ซึ่งผลลัพท์ทันทีในรูปของการเกิด ICI ทำให้คลื่นพาห่ย่อยสูญเสียคุณลักษณะของการตั้งฉากซึ่งกันและกัน ซึ่งนำไปสู่การเกิดสัญญาณรบกวนทางเฟส ส่งผลทำอัตราส่วนสัญญาณรบกวนทางเฟสและทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

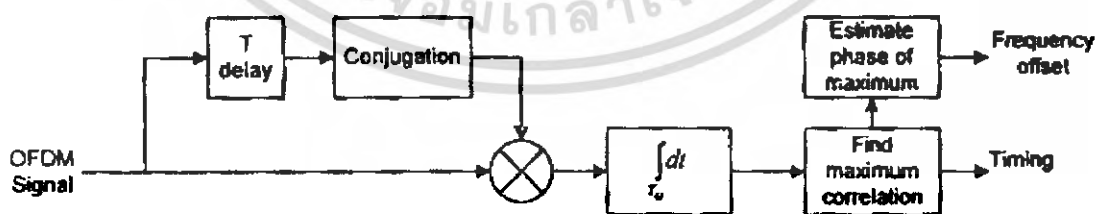
ความถี่เมื่อเทียบกับระบบที่ส่งแบบคลื่นพาห์เดี่ยว สำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าวได้มีการนำเทคนิคการเพิ่มเติมส่วนหน้าแบบวน หรือชุดสัญลักษณ์ (training symbols) แบบพิเศษ มาใช้ในการซิงโครไนซ์ทั้งแบบความถี่และแบบเวลา เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากสัญญาณรบกวนทางเฟสและทางความถี่ให้มีค่าน้อยที่สุด

การเพิ่มเติมส่วนหน้าแบบวนถูกนำมาใช้เพื่อการซิงโครไนซ์นั้นคือ ช่วงเวลา T_s ของแต่ละสัญลักษณ์ถูกทำให้เหมือนกันในส่วนหลังสุด ซึ่งคุณลักษณะนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์สำหรับการซิงโครไนซ์แบบเวลาและแบบความถี่ของระบบได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 โดยพื้นฐานอุปกรณ์เหล่านี้เกี่ยวข้องกับความยาว T_s ของสัญญาณและช่วงเวลาที่ถูกระวัง T ซึ่งเอาท์พุท สามารถเขียนได้ดังนี้

$$x(t) = \int_0^{T_s} r(t-\tau)r(t-\tau-T)d\tau$$

การเกิดสัญญาณรบกวนของตัวประมาณค่าความเบี่ยงเบนทางความถี่ถูกกำหนดสำหรับสัญญาณอินพุต $r(t)$ ซึ่งประกอบด้วยสัญญาณ OFDM $s(t)$ ด้วยกำลัง P รวมกับสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian noise) ที่เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นกำลังเชิงสเปกตรัมด้านหนึ่งของ N_0 ภายใต้แบนด์วิดท์ของสัญญาณ OFDM นั่นคือ

$$r(t) = s(t) + n(t)$$



รูปที่ 2.24 การซิงโครไนซ์ด้วยการใช้การเพิ่มเติมส่วนหน้าแบบวน

ตัวประมาณค่าความเบี่ยงเบนทางความถี่ถูกนำมาคูณกับสัญญาณอินพุตด้วยค่าประวิงและค่าสังยุค (conjugate) ทำให้เกิดสัญญาณ $y(t)$ ตาม

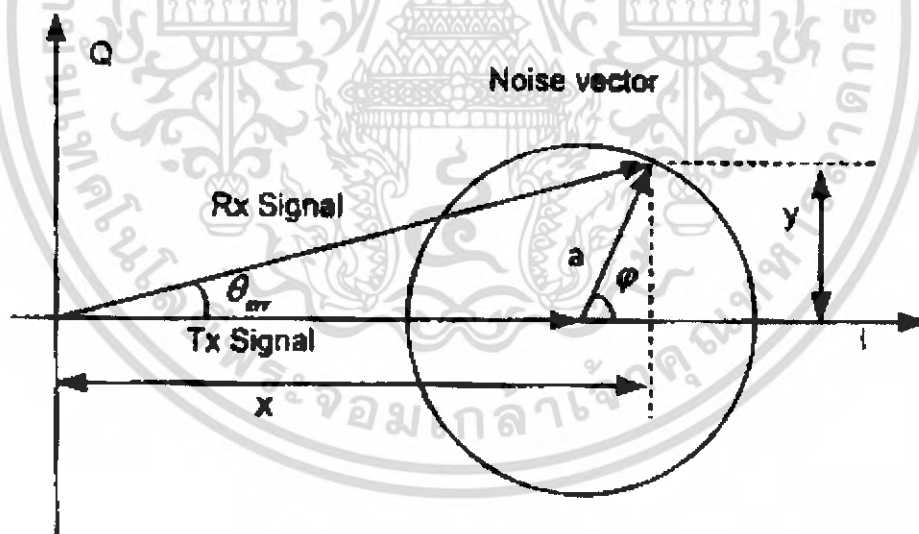
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= |s(t)|^2 \exp(-\eta) - n(t) |s(t-T) - n(t-T)|^2 |s(t) - n(t)|^2 - T$$

เทอมแรกด้านขวามือของสมการคือ ส่วนประกอบเอาต์พุตกับค่าเฟสที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งมีค่าเท่ากับเฟสที่เลื่อนไปบนช่วงเวลา T และกำลังมีค่าเท่ากับกำลังของสัญญาณยกกำลังสอง สำหรับอีกสองเทอมถัดไปเป็นผลมาจากสัญญาณและสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน ซึ่งถูกสุ่มด้วยเวลาที่ต่างกันทำให้ไม่มีความเกี่ยวข้องกัน ในส่วนเทอมสุดท้ายค่ากำลังมีค่าเท่ากับกำลังสองของสัญญาณรบกวนยกกำลังสอง แต่ถ้าค่า SNR ของอินพุตมีค่ามากกว่าหนึ่งมากๆ ค่ากำลังของสัญญาณรบกวนจะถูกเฉลยไป

ความเบี่ยงเบนทางความถี่ถูกประมาณด้วยค่าเฉลี่ย $y(t)$ บนช่วงเวลาที่เท่ากับช่วงเวลาคุม T_G และค่าเฟสที่ประมาณได้จาก $y(t)$ เพราะเป็นส่วนประกอบเอาต์พุตที่ออกแบบไว้เป็นค่าแวกเตอร์คงที่ ค่าเฉลี่ยที่ได้จะช่วยลดสัญญาณรบกวนและเพิ่มค่าแวกเตอร์นี้ได้ สมมติให้ส่วนประกอบของสัญญาณรบกวนถูกเฉลย ดังนั้นเอาต์พุต SNR จะถูกประมาณโดย

$$\text{SNR} = \frac{P^2}{2PN_0/T_G} = \frac{PT_G}{2N_0}$$



รูปที่ 2.25 ผลกระทบของสัญญาณรบกวนบนค่ามูเฟสที่รับได้

รูปที่ 2.25 บนแสดงผลกระทบของสัญญาณรบกวนบนค่ามูเฟสที่รับได้ ถ้ากำหนดให้สัญญาณทางด้านส่งมีค่าเป็น 1 และความยาวของแวกเตอร์สัญญาณรบกวนมีค่าเป็น a กับมุม ϕ ฉะนั้นค่าผิดพลาดของเฟสที่รับได้คือ θ_{err}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตรีโกณมิติ

$$x = 1 + a \cos \varphi$$

$$y = a \sin \varphi$$

เมื่อ $\theta_{\text{err}} = \tan^{-1} \frac{y}{x}$

เพราะฉะนั้น

$$\theta_{\text{err}} = \tan^{-1} \frac{a \sin \varphi}{1 + a \cos \varphi}$$

อัตราส่วนสัญญาณกำหนดตามขนาดของสัญญาณที่รับได้และระดับของสัญญาณรบกวนเมื่อสัญญาณถูกสเกลให้มีขนาดเท่ากับ 1 ดังนั้นขนาดของสัญญาณรบกวนคือ

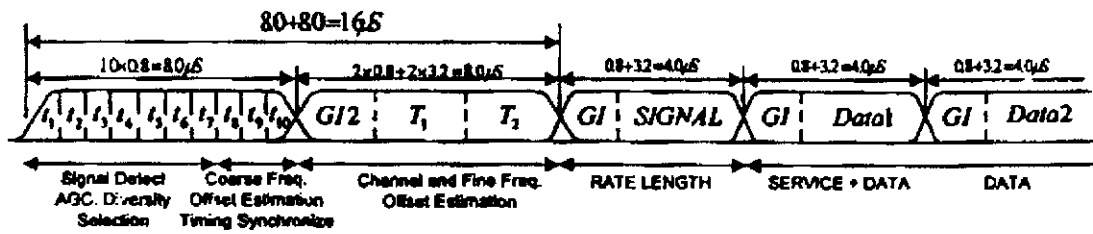
$$a = \frac{1}{\text{SNR}}$$

SNR อยู่บนพื้นฐานขนาดของสัญญาณ ดังนั้นสเกลที่ถูกต้องจึงจัดให้อยู่ในรูปของ dB แทนค่า
ใน

$$\theta_{\text{err}} = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\text{SNR}} \frac{\sin \varphi}{1 + \left(\frac{1}{\text{SNR}} \right) \cos \varphi} \right)$$

เทคนิคการชิงโครโมในชั้นพื้นฐานของการเพิ่มส่วนขยายแบบวน เป็นวิธีที่เหมาะสมเป็นพิเศษกับการชิงโครโมที่ไม่ชัดเจนในการติดต่อ ซึ่งไม่มีการใช้งานสัญญาณชุดแบบพิเศษ แต่สำหรับระบบการส่งผ่านแบบแฟ็กเกอนั้นจำเป็นต้องมีการชิงโครโมที่แน่นอน โดยเฉลี่ยจะใช้สัญลักษณ์ OFDM จำนวนมากกว่า 10 สัญลักษณ์ในการชิงโครโมเพื่อให้ได้ค่า SNR ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการส่งผ่านแฟ็กเกความเร็วสูง เวลาการชิงโครโมจำเป็นต้องเป็นช่วงสั้นซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้สัญลักษณ์ OFDM จำนวนเล็กน้อยภายในบรรจุด้วยข้อมูลซึ่งเครื่องรับสามารถรับรู้ข้อมูลเหล่านี้ได้ โดยสัญญาณชุดที่ได้รับทั้งหมดจะถูกนำมาใช้ในการชิงโครโม ซึ่งวิธีการเพิ่มส่วนหน้าแบบวนจะใช้เฉพาะบางส่วนของแต่ละสัญลักษณ์เท่านั้น รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างการใช้สัญลักษณ์แบบสั้นและแบบยาวในการชิงโครโม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 โครงสร้างชุดข้อมูล OFDM

ซึ่งโครโมโซมจะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ

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

การตรวจจับเฟรม (frame detection) ใช้สำหรับการหาจุดเชื่อมต่อของสัญญาณแต่ละสัญลักษณ์ เพื่อให้สามารถที่จะทำการสุ่มค่าของแต่ละสัญลักษณ์ได้อย่างถูกต้อง

เนื่องจากความแตกต่างของความถี่คลื่นพาห์ของเครื่องส่งและเครื่องรับทำให้การสุ่มสัญญาณแต่ละครั้งในเวลา t จะประกอบด้วยค่าเฟคเตอร์ของเฟส (phase factor) ที่ไม่รู้ค่าๆ หนึ่งโดยสามารถเขียนได้เป็น $e^{j\theta}$ โดยที่ θ คือค่าของความถี่ออฟเซตของคลื่นพาห์ (carrier frequency offset) ที่ไม่รู้ค่า ฉะนั้นค่าของเฟคเตอร์ที่ไม่รู้ค่านี้จะต้องทำการประมาณค่าและชดเชยสำหรับการสุ่มแต่ละครั้ง ก่อนที่จะนำสัญญาณที่ได้จากการสุ่มไปผ่านกระบวนการ FFT ไม่อย่างนั้นจะทำให้สูญเสียคุณสมบัติของการออร์โธโกนอล (Orthogonality) ระหว่างช่องสัญญาณย่อยๆ

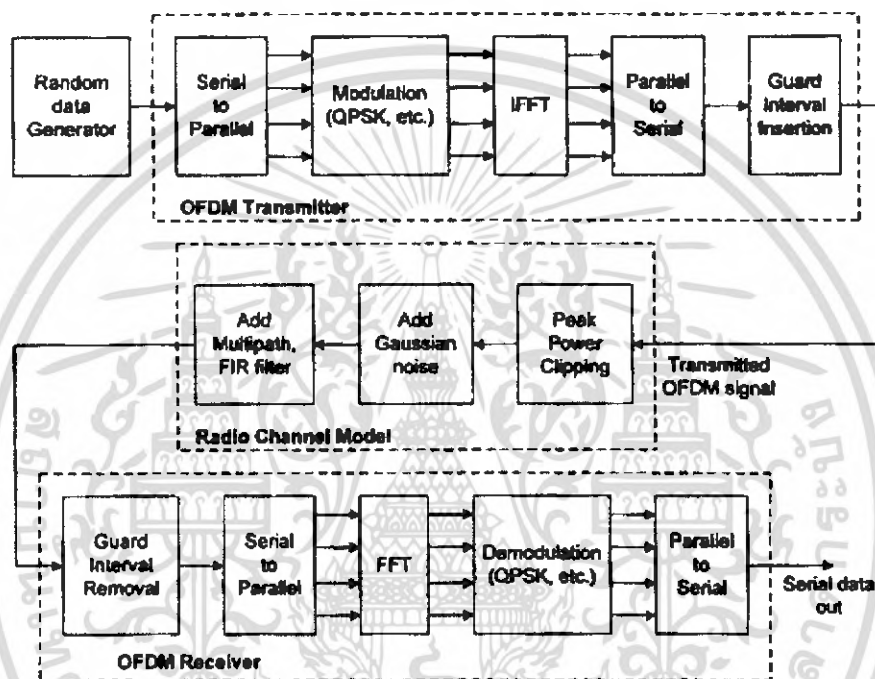
2.1.9 ระบบ OFDM

รูปที่ 2.27 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องรับ-ส่งสัญญาณ OFDM โดยที่ส่วนด้านบนเป็นชุดเครื่องส่งและส่วนด้านล่างเป็นชุดเครื่องรับ และเมื่อสังเกตพบว่า IFFT ทำหน้าที่คล้ายกับการมอดูเลตสัญญาณอินพุตตามจำนวนของคลื่นพาห์ย่อยและ FFT ทำหน้าที่เหมือนการดีมอดูเลตสัญญาณ ซึ่งตรงกันข้ามกับ IFFT โดยไม่จำเป็นต้องนำ Equalizer มาใช้งาน ทำให้สามารถลดความยุ่งยากซับซ้อนรวมถึงลดต้นทุนทางด้านอุปกรณ์เครื่องรับได้

ในส่วนของด้านเครื่องส่ง สัญญาณอินพุตที่มีความเร็วสูงและมีแบนด์วิดท์กว้างจะถูกแบ่งออกตามจำนวนของชุดข้อมูล (data streams) ที่มีความเร็วต่ำและมีแบนด์วิดท์ค่อนข้างแคบ โดยนำไปเข้ารหัส (coding) และทำการวางสลับ (interleaving) รวมถึงการจัดวางรูปแบบการมอดูเลต (mapping) และมีการเพิ่มเติมในส่วนของสัญญาณ ซึ่งถูกใช้ในการซิงโครไนซ์ระหว่างเครื่องส่งและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องรับ ในส่วนของ IFFT จะทำหน้าที่แปลงสเปกตรัมความถี่ให้อยู่ในรูปโดเมนเวลาพร้อมกับทำการเพิ่มเติมช่วงเวลาคูมและส่วนหน้าแบบวนเพื่อป้องกันการเกิด ISI และ ICI แล้วจึงนำไปเข้ากับตัวแปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นอนาล็อก พร้อมทั้งทำการกรองความถี่เพื่อเลือกเฉพาะความถี่ที่ต้องการส่งออกไปเท่านั้น ในส่วนของเครื่องรับก็จะทำงานตรงกันข้ามกับทางด้านส่ง จะแตกต่างกันตรงที่ต้องเพิ่มเติมส่วนของการตรวจสอบการซิงโครไนซ์เท่านั้น



รูปที่ 2.27 บล็อกไดอะแกรมของระบบ OFDM

2.1.10 ประโยชน์ของระบบการส่งสัญญาณแบบ OFDM

- OFDM ทนทานต่อการจางหายแบบหลายวิถี การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ การแทรกสอดระหว่างคลื่นพาห์ และไม่ไวต่อการจางหายเฉพาะความถี่
- การใช้งานแถบความถี่ที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากยอมให้มีการเหลื่อมล้ำกันได้และมีการใช้งานแบนด์วิดท์ที่แคบ (ประมาณ 1 กิโลเฮิร์ต) ทำให้ช่องสัญญาณเกิดการจางหายแบบเรียบ (flat fading) และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า
- รองรับผู้ใช้บริการได้เป็นจำนวนมากและสนับสนุนอัตราการส่งผ่านข้อมูลความเร็วสูงได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้จำนวนคลื่นพาห์ย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.11 ข้อเสียของ OFDM เมื่อเทียบกับการมอดูเลตแบบคลื่นพาห์เดียว

- OFDM มีความไวเป็นอย่างมากต่อความเบี่ยงเบนทางความถี่และสัญญาณรบกวนทางเฟส
- OFDM เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนค่าเฉลี่ยสูงสุดของกำลัง ซึ่งนำไปสู่ปัญหาในการทำงานของตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) ของระบบความถี่วิทยุ RF

2.1.12 การประมาณค่าสัญญาณที่ส่งตามหลักการของความน่าจะเป็นสูงสุด

พิจารณาสัญญาณที่ได้รับในช่วงสัญลักษณ์ OFDM ที่ i ซึ่งแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อ M คือจำนวนเส้นทางของสัญญาณที่ได้รับ ณ เครื่องรับ, $s(t)$ คือสัญญาณที่ส่งบน N คลื่นพาห์ย่อย ณ เวลา t คือสัญญาณรบกวนอื่นๆ ณ เวลา t , $h_{i,m}$ คือค่า Scaling Factor หรือ พารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ Path ที่ m ในช่วงสัญลักษณ์ OFDM ที่ i และ T_s คือช่วงเวลาที่ใช้ในการสุ่มสัญญาณ 1 Sample

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

$$\begin{aligned} x_i &= [x(iL) \ x(iL + 1) \ \dots \ x((i + 1)L - 1)]^T \\ &= A_c B_i A_d h_i + n_i \end{aligned}$$

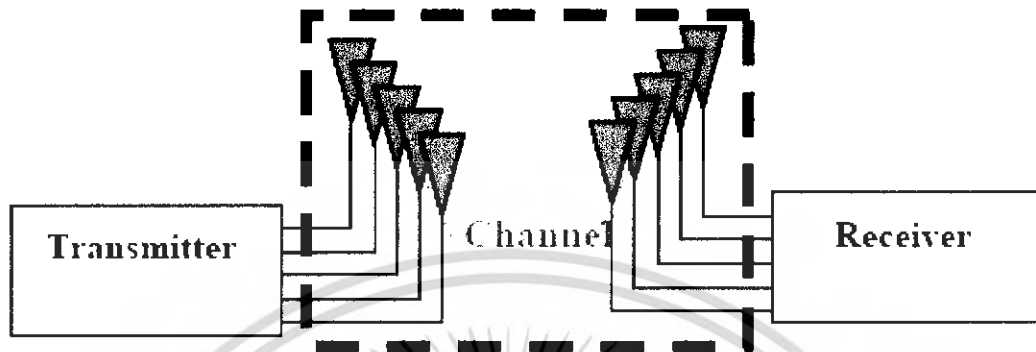
2.2 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

Multiple-input multiple-output หรือ MIMO เป็นเทคโนโลยีการส่งข้อมูลที่สามารถเพิ่มช่องส่งสัญญาณและพื้นที่ได้โดยใช้เสาอากาศหลายๆ ตัว

2.2.1 MIMO Capacity

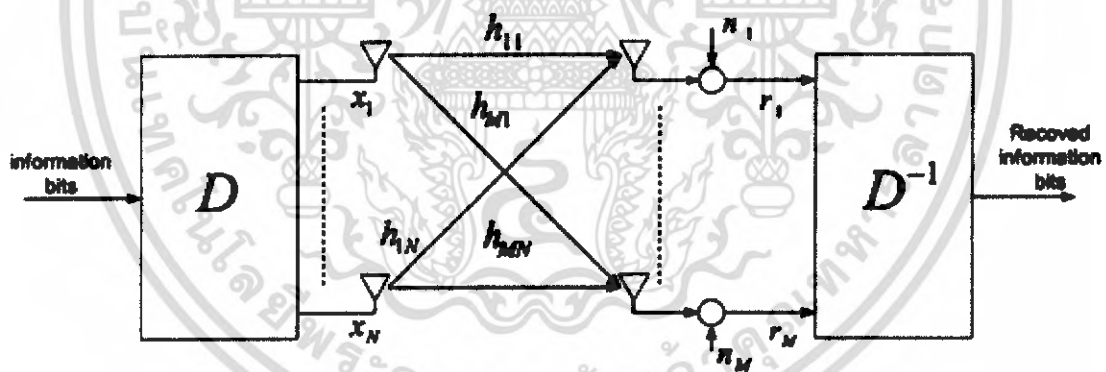
ความจุช่องสัญญาณของระบบ MIMO จะแปรผันตามจำนวนของสายอากาศ ซึ่งก็คือเมื่อมีสายอากาศมากขึ้น ความจุก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

2.2.2 MIMO Encoding



รูปที่ 2.28 สถาปัตยกรรม MIMO

สมมติว่ามีเสาอากาศ N เสาที่ภาคส่ง และ M ตัวที่ภาครับ M Block Diagram ของ MIMO จะเป็นดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 MIMO system block diagram

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

$$r = H_x + n$$

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

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

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

$$\gamma = \frac{P_r}{\sigma_n^2} = \frac{P_t \sum_{i=1}^N E[|h_{ij}|^2]}{\sigma_n^2}$$

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

$$\sum_{i=1}^N E[|h_{ij}|^2] = N, j = 1, \dots, M$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่สุดสัญญาณที่ถูกลงส่งโดยเสาอากาศคนละตัวจะได้รับพร้อมกันที่ด้านรับ ดังนั้นสัญญาณที่ถูกลงส่งจากเสาอากาศ i ($i=1, \dots, N$) จะถูกรบกวนโดยสัญญาณจากเสาอากาศที่เหลือในช่องสัญญาณเดียวกัน

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

$$y = H^H r = H^H H x + n$$

Correlation matrix คือ

$$G = H^H H = \begin{bmatrix} G_{1,1} & \dots & h_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N,1} & \dots & G_{N,N} \end{bmatrix}$$

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

2.2.3 ข้อดีของ MIMO

การเพิ่มความเร็วจะไม่ต้องถูกจำกัดด้วยย่านความถี่คลื่นวิทยุที่รัฐบาลเป็นผู้จัดสรรให้อีกต่อไป ซึ่งเป็นการก้าวข้ามทฤษฎีเก่าๆ โดยสิ้นเชิงเพราะแต่ก่อนนี้คนเคยเชื่อกันว่า เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วในการรับ – ส่ง ข้อมูลก็ต้องเพิ่มความกว้างของช่วงความถี่ในการสื่อสาร (Bandwidth) เท่านั้น แต่เนื่องจากการใช้งานคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ต่างๆนั้น รัฐบาลของแต่ละประเทศมีการควบคุมอย่างเข้มงวดโอกาสที่จะเพิ่มความเร็วจึงแทบเป็นไปได้เลย

2.2.4 ข้อเสียของ MIMO

คือความยุ่งยากในการออกแบบและผลิตเสาอากาศที่ต้องมีความเที่ยงตรงเป็นอย่างยิ่ง และเนื่องจากการจัดวางขนาดและระยะตำแหน่งของเสาอากาศในระบบ MIMO ต้องเหมือนกันจึงจะสามารถสื่อสารกันได้

2.3 คุณลักษณะทางการแพร่ของช่องสัญญาณวิทยุ

บนช่องสัญญาณวิทยุ สัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลง ไประหว่างการส่งผ่าน ไปบนช่องสัญญาณ โดยสัญญาณที่ได้รับจะประกอบด้วย

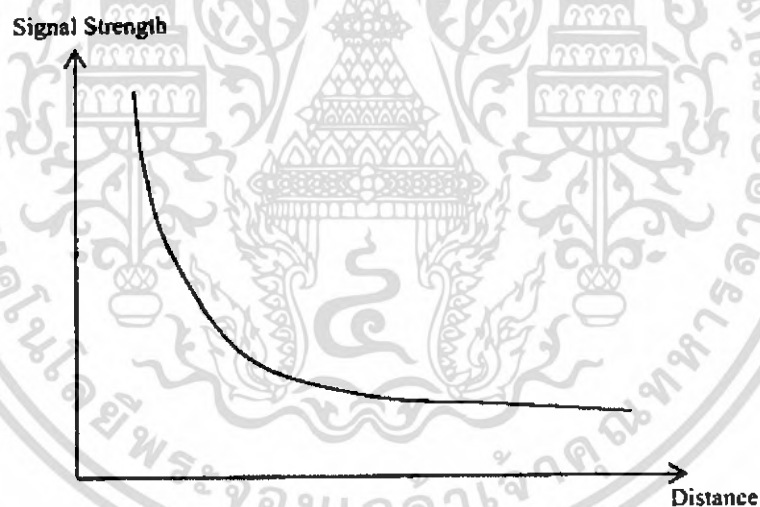
1. การรวมตัวกันของสัญญาณซึ่งเกิดจากการลดทอน การสะท้อน การหักเห และการแตกตัวของสัญญาณที่ส่ง
2. สัญญาณรบกวน ซึ่งเกิดจากการส่งผ่านช่องสัญญาณ
3. การเลื่อนความถี่ของคลื่นพาห้ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของเครื่องส่งหรือเครื่องรับ

2.3.1 การลดทอน

การลดทอนของสัญญาณแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.3.1.1 การสูญเสียทิศทาง (Pathloss)

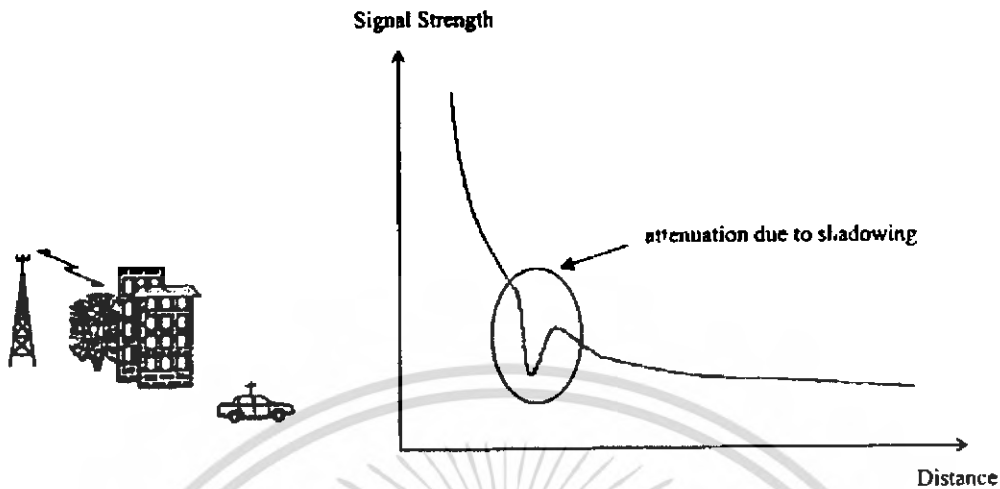
เป็นการลดทอนของสัญญาณที่กำลังส่งของสัญญาณจะลดลงอย่างคงที่ตามระยะทางในการส่งสัญญาณ



รูปที่ 2.30 กราฟแสดงผลของการสูญเสียทิศทางที่มีต่อสัญญาณ

2.3.1.2 การบดบัง (Shadowing)

เป็นการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากมีสิ่งกีดขวางระหว่างเส้นทางในการส่งสัญญาณ เช่น อาคาร ต้นไม้ ภูเขา ฯลฯ



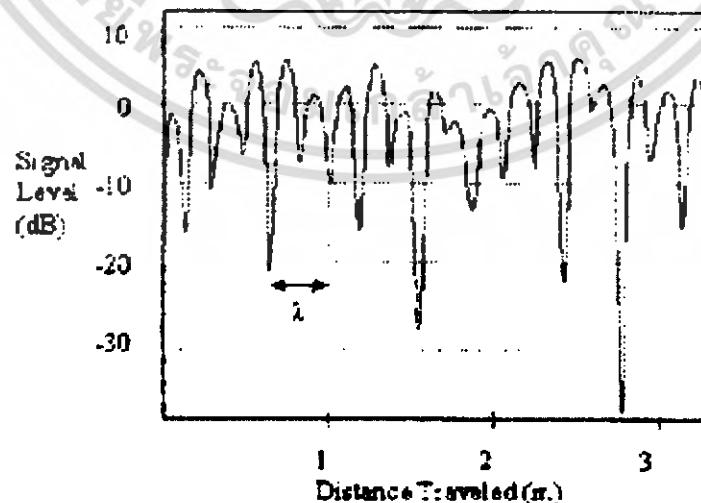
รูปที่ 2.31 กราฟแสดงผลของการสูญเสียทิศทางและการบดบังที่มีต่อสัญญาณ

2.3.1.3 ผลกระทบของสัญญาณจากหลายทิศทาง (Multipath Effect)

เกิดจากการสะท้อนของสัญญาณ (ชนกับวัตถุหรือสิ่งกีดขวาง) ทำให้สัญญาณที่ได้รับเกิดจากการรวมตัวกันของสัญญาณจากหลายทิศทาง แบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

2.3.1.3.1 การจางหายแบบเร็ว

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



รูปที่ 2.32 กราฟแสดงผลของการจางหายแบบเรย์ลีเมื่อ Mobile Unit มีการเคลื่อนที่

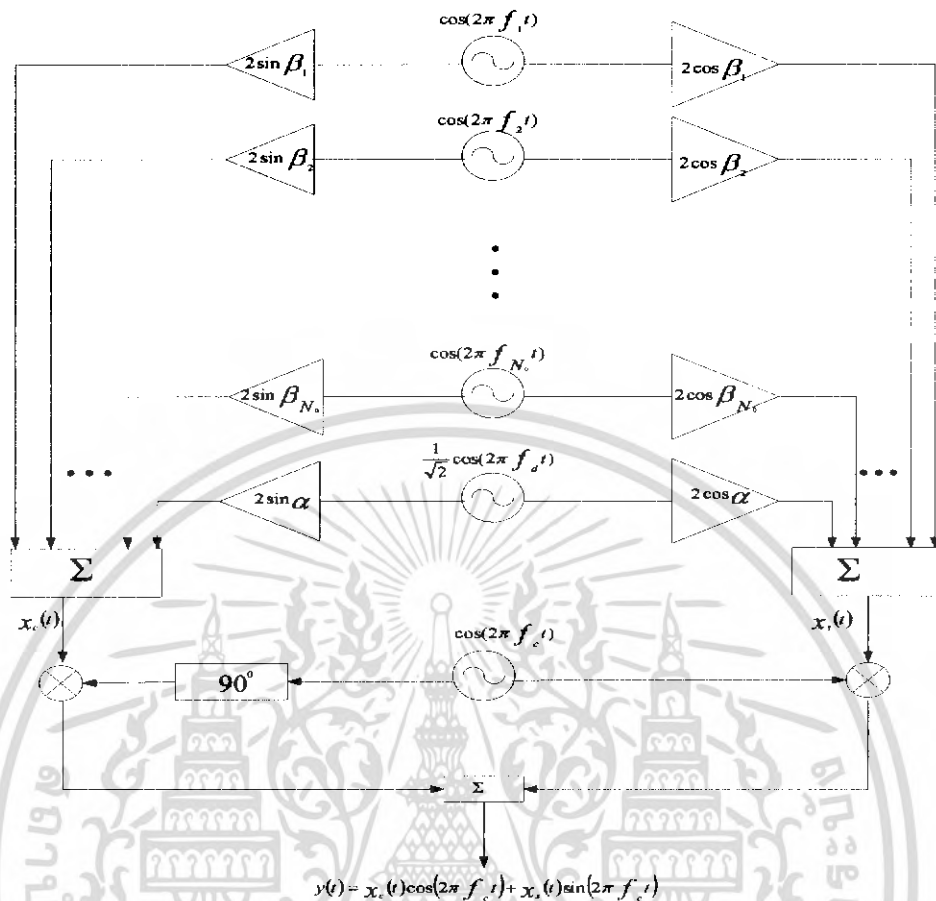
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.3.2 การจางหายแบบเฉพาะความถี่

การจางหายเฉพาะความถี่ การสะท้อนของสัญญาณจากวัตถุที่อยู่ใกล้เคียง เช่น พื้นดิน อาคาร ต้นไม้ ฯลฯ ทำให้สัญญาณจากหลายทิศทางมีกำลังของสัญญาณเท่ากับสัญญาณตรง (สัญญาณซึ่งเดินทางจากเครื่องส่งมายังเครื่องรับโดยตรง) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการจางหายเฉพาะความถี่ (Frequency Selective Fading) กล่าวคือ กำลังของสัญญาณรวมที่ได้รับเป็นจุดต่ำของระดับสัญญาณ เนื่องจากการแทรกสอดแบบหักล้างสำหรับการส่งสัญญาณที่มีช่วงกว้างของแถบสัญญาณแคบนั้น ถ้าจุดต่ำของระดับสัญญาณเกิดขึ้นที่ความถี่ที่ส่งแล้ว ข้อมูลที่ส่งไปทั้งหมดจะสูญหายไป ดังนั้นจึงสามารถแก้ไขได้ 2 วิธี คือ

2.3.1.3.3 แบบจำลองของเจ็ค(Jake's Model)

ปกติการสร้างแบบจำลองของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบหลายวิถีโดยใช้วิธีการสร้างฮาร์ดแวร์ (Hardware) หรือ ซอฟต์แวร์ software) นั้นจะมีประโยชน์อย่างมาก วิธีการสร้างแบบจำลองของสัญญาณโดยส่วนใหญ่จะใช้หลักการมอดูเลตแบบอินเฟส และ ควอดเรเจอร์ ลักษณะสัญญาณที่ใช้ จะใช้การสร้างแบบจำลองจะต้องมีสเปกตรัมและคุณสมบัติต่างๆ ที่ใกล้เคียงกับสัญญาณที่ได้จากการวัด



รูปที่ 2.33 โครงสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีตามแบบของเจ็ค

สำหรับวิธีการของเจ็คนั้น จะอาศัยโครงสร้างของแบบจำลองช่องสัญญาณหลายวิถีตามรูปที่ 2.29 เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วยวงจรรอซซิลเลเตอร์ความถี่ต่ำจำนวน N_0 ชุด ที่มีค่าความถี่เท่ากับ คอปปเลอร์ชิฟต์ต่างๆ กัน และวงจรรอซซิลเลเตอร์อีกหนึ่งตัวที่ความถี่คอปเปอร์ชิฟต์สูงสุดมีค่าเท่ากับ f_d องค์ประกอบทางความถี่ทั้งหมดนี้มีหน้าที่จำลองสัญญาณความถี่ที่เลื่อนไปจากความถี่คลื่นพาห้ f_0 สังเกตว่าองค์ประกอบทางความถี่ของออสซิลเลเตอร์ N_0 ชุด จะกำหนดให้มีแอมพลิจูดเป็น 1 ทั้งหมด ส่วนองค์ประกอบทางความถี่ ตัวสุดท้ายจะมีแอมพลิจูดเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ สำหรับค่าความถี่ของออสซิลเลเตอร์แต่ละตัวกำหนดให้มีค่าเท่ากับ [6,9]

$$f_n = f_d \cos(2 \pi n / N)$$

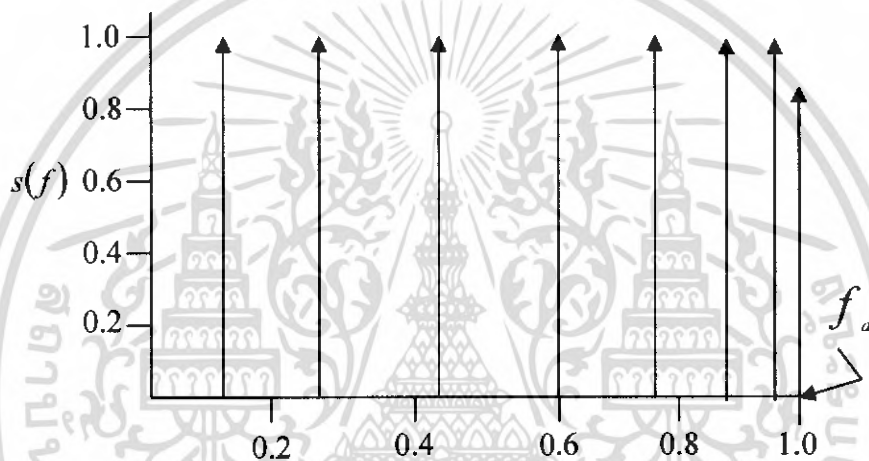
โดย $f_d = \frac{v}{d}$ ซึ่งเป็นค่าคอปเปอร์ชิฟต์สูงสุดและ N มีความสัมพันธ์ กับ N_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยมีข้อกำหนดอีกคือว่า $N/2$ ต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มคี่

เมื่อนำองค์ประกอบความถี่ทั้งหมดที่ได้มาว่าเป็นตัวอย่างรูปสเปกตรัมความถี่จะมีลักษณะดัง
ในรูปที่ 2.30 ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นลักษณะที่กำหนดให้ $N_0 = 8$ และ $N = 34$



รูปที่ 2.34 สเปกตรัมความถี่ของออสซิลเลเตอร์สำหรับกรณี $N_0=8$ และ $N=34$

สำหรับค่าของเฟส β_n จะได้รับการกำหนดให้มีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกับสภาพที่ต้องการคือ
กำหนดให้แต่ละเฟสมีการกระจายแบบยูนิฟอร์มระหว่าง $0 - 2\pi$ คือมีความน่าจะเป็นในการเกิด
ของเฟสแต่ละค่าเท่า ๆ กันซึ่งเท่ากับ $\frac{1}{2\pi}$ ดังนั้น β_n จึงกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\frac{\pi n}{N_0}$ สำหรับ $n=1, 2, \dots, N_0$

จากรูปที่ 2.34 แสดงให้เห็นว่า $x_c(t)$ และ $x_s(t)$ มีค่าเท่ากับ [6,19]

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างสัญญาณ $y(t)$ ให้มีเฟสเป็นแบบแรนดอมและมีการกระจายแบบยูนิฟอร์มระหว่าง $0-2\pi$ จะต้องทำให้เงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริงนั่นคือ $\langle x_c^2 \rangle \approx \langle x_s^2 \rangle$ และ $\langle x_s x_c \rangle \approx 0$

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ของค่า $\langle x_c^2 \rangle$, $\langle x_s^2 \rangle$ และ $\langle x_s x_c \rangle$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\langle x_c^2 \rangle &= 2 \sum_{n=1}^{N_0} \cos^2 \beta_n + \cos^2 \alpha \\ &= N_0 + \cos^2 \alpha + \sum_{n=1}^{N_0} \cos 2\beta_n \\ \langle x_s^2 \rangle &= 2 \sum_{n=1}^{N_0} \sin^2 \beta_n + \sin^2 \alpha \\ &= N_0 + \sin^2 \alpha + \sum_{n=1}^{N_0} \cos 2\beta_n \\ \langle x_s x_c \rangle &= 2 \sum_{n=1}^{N_0} \sin \beta_n \cos \beta_n + \sin \alpha \cos \alpha\end{aligned}$$

จากความสัมพันธ์ที่ได้นี้สามารถกำหนดค่า β_n และ α ที่เหมาะสมเพื่อให้เงื่อนไขทั้งสองข้อข้างต้นเป็นจริงได้

1. ส่งสัญญาณที่มีช่วงกว้างของแถบสัญญาณกว้าง หรือมีการแผ่กว้างของแถบความถี่ (Spread Spectrum) การลดลงของแถบความถี่ส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังของสัญญาณเพียงบางส่วนเท่านั้น ไม่ได้สูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมด
2. แบ่งช่องสัญญาณไปเป็นช่องสัญญาณย่อยๆ ที่มีช่วงกว้างของแถบสัญญาณเล็กลง การเกิดจุดต่ำของระดับสัญญาณที่แถบความถี่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้กับทุกๆ ความถี่คลื่นพาห์ ทำให้มีเพียงบางคลื่นพาห์ที่สูญเสียข้อมูลไป ซึ่งข้อมูลของคลื่นพาห์ที่เสียไปสามารถกู้คืนได้โดยใช้การเข้ารหัสสำหรับแก้ไขข้อผิดพลาด (Error Correction Coding: ECC)

2.3.2 การแผ่กว้างของการประวิง

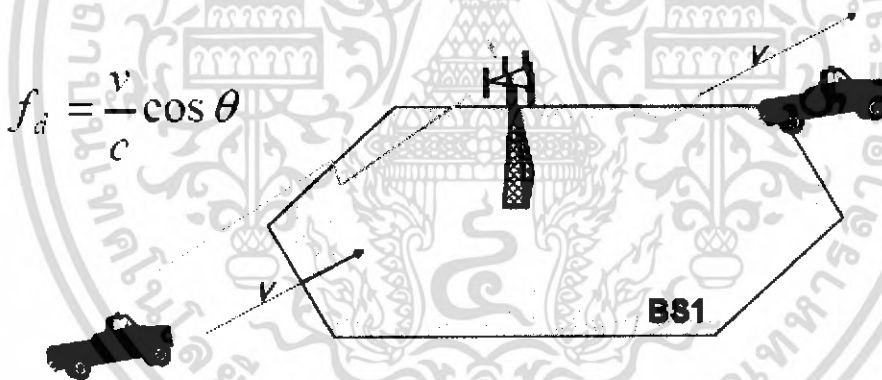
สัญญาณวิทยุที่ได้รับจากเครื่องส่งประกอบด้วยสัญญาณตรง และสัญญาณสะท้อนที่สะท้อนจากวัตถุिक्षวางต่างๆ เช่น อาคาร ภูเขา และวัตถุอื่นๆ สัญญาณสะท้อนจะมาถึงเครื่องรับช้ากว่า

สัญญาณตรง ซึ่งการแผ่กว้างของการประวิง (Delay Spread) ก็คือการแผ่กว้างของเวลาระหว่างสัญญาณจากหลายทิศทางที่มาถึงเครื่องรับเป็นสัญญาณแรกและสัญญาณสุดท้าย

ในระบบดิจิทัลการแผ่กว้างของการประวิงสามารถก่อให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ซึ่งมีสาเหตุมาจากการซ้อนทับกันของสัญญาณจากหลายทิศทางที่ประวิงมากับสัญญาณของช่วงสัญลักษณ์ใหม่ที่ส่งมา การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์นี้จะมึบทบาทมากในระบบที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา (TDM) นอกจากนี้ยิ่งเครื่องส่งมีอัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้นก็ยิ่งทำให้มีการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์เพิ่มมากขึ้น

การลดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์สามารถทำได้โดยการลดอัตราการส่งสัญลักษณ์ โดยการลดอัตราการส่งข้อมูลของแต่ละช่องสัญญาณ หรืออาจจะใช้รูปแบบของการเข้ารหัสเพื่อให้นานขึ้นต่อการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ดังในกรณีของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงรหัสก็ได้

2.3.3 การเคลื่อนไปของคอปเปลอร์ (Doppler Shift)



รูปที่ 2.35 การเกิดคอปเปลอร์

ปรากฏการณ์ Doppler Shift คือปรากฏการณ์ที่เกิดการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันระหว่างจุดส่งคลื่นและจุดรับคลื่น ซึ่งจะทำให้ความถี่ที่จุดรับได้แตกต่างไปจากความถี่จริงที่ส่งคลื่นออกมาผลกระทบจาก Doppler Shift ความเร็วของการแพร่ของคลื่นการเคลื่อนไปของคอปเปลอร์ของความถี่สามารถแสดงได้ดังสมการ

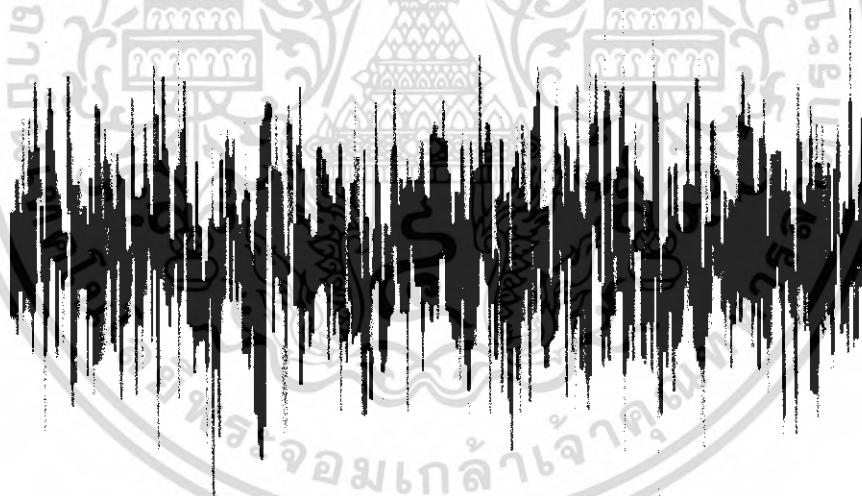
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta f \approx \pm f_0 \frac{v}{c}$$

เมื่อ Δf คือความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของสัญญาณจากเครื่องส่งกับสัญญาณที่เครื่องรับได้รับ f_0 คือความถี่ของสัญญาณจากเครื่องส่ง v คือความเร็วที่แตกต่างกันระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับที่มีการเคลื่อนที่ และ c คือความเร็วแสง

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



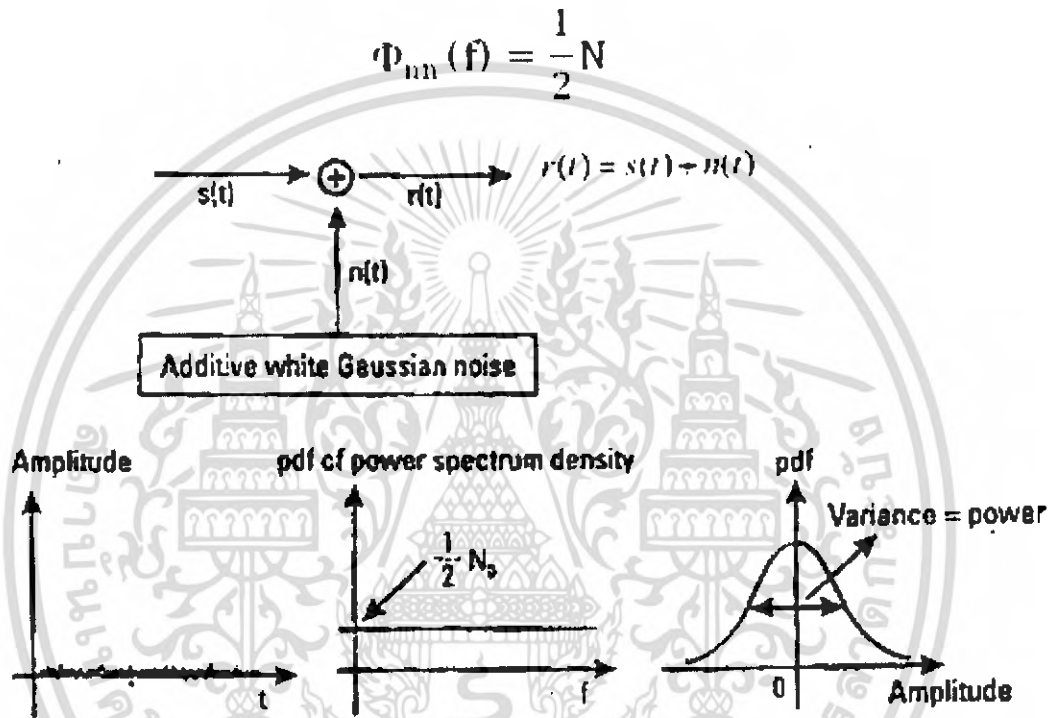
รูปที่ 2.36 สัญญาณรบกวนแบบ white noise

2.3.5 AWGN Channel Block

สัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารนั้นส่วนมากจะจำลองให้เป็นสัญญาณรบกวนแบบขาวววก (AWGN: Additive White Gaussian Noise) ซึ่งจะมีความหนาแน่นของสเปกตรัมเป็นแบบยูนิฟอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(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

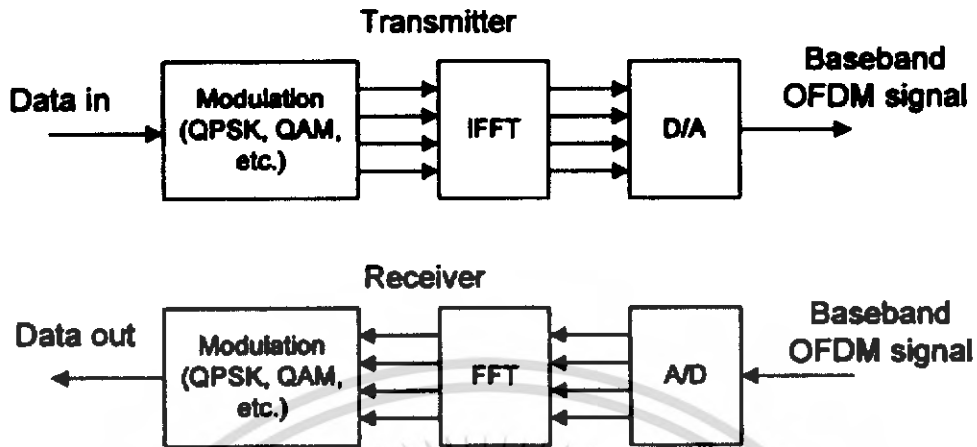


รูปที่ 2.37 คุณสมบัติของสัญญาณรบกวนแบบขาววอก

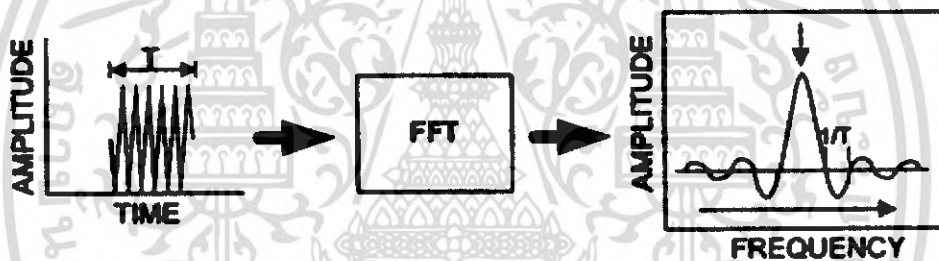
2.4 Fast Fourier Transform (FFT)

FFT ก็คือ DFT แต่เป็นการสลับตำแหน่งข้อมูลและเทคนิคการรวมสัญญาณ เพื่อช่วยให้จำนวนการแปลงลดรูปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



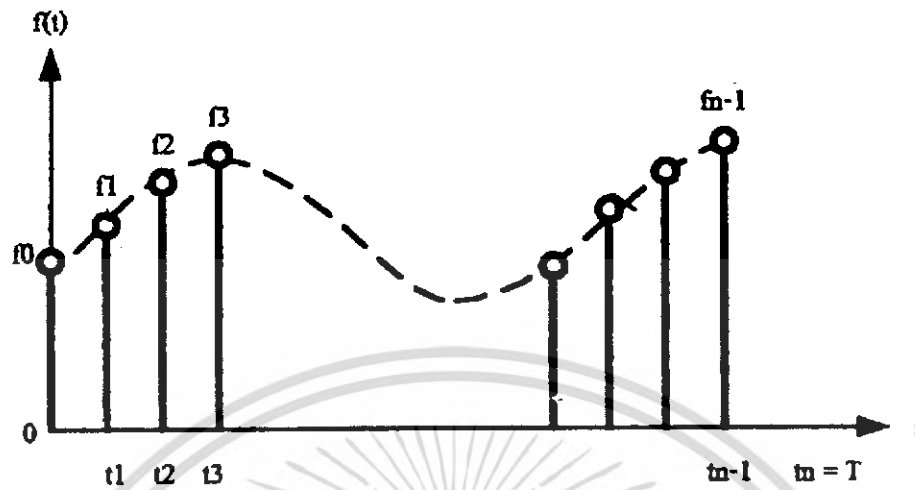
รูปที่ 2.38 หลักการพื้นฐานในการนำ IFFT และ FFT มาใช้งานกับระบบ OFDM



รูปที่ 2.39 การเปลี่ยนรูปจากสัญญาณ โดเมนเวลามาเป็นสเปกตรัมความถี่โดยใช้ FFT

2.4.1 Discrete Fourier Transform

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



รูปที่ 2.40 Discrete Fourier Transform

โดยสามารถเขียนสมการ DFT ได้ดังนี้

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-ik\omega_0 n}$$

โดยค่า $k=0$ ถึง 1

โดยค่า $\omega_0 = 2\pi/N$ และการแปลงค่า DFT จากสมการต้องทำการคำนวณเป็นจำนวน N^2 โดยข้อมูลต้องอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนเพื่อให้คอมพิวเตอร์คำนวณได้ง่าย

2.4.2 ทฤษฎี Fast Fourier Transform

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

FFT จะคำนวณเร็วกว่าดีสครีทฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มประมาณ 10 เท่า โดยจะใช้วิธีการแบบบัตเตอร์ฟลายหรือวิธีการของกุกเลย์-ตุคีย์

โดยสมมติให้ $N=2M$ โดย M เป็นค่าจริงใดๆ จะได้ $F_k = x(k)$, $f_m = x(n)$ จะได้สมการใหม่ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)nk}$$

ถ้าให้ $e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)nk} = W^{nk}$ ได้สมการใหม่ดังนี้

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W^{nk}$$

แบ่งสมการได้เป็นสองส่วนดังนี้

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n)W^{nk} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1)W^{(2n+1)k}$$

N แทนขนาดความยาวของการสุ่มตัวอย่าง และแทนสมการทั้งสองด้วยสมการคู่และสมการคี่ ได้สมการใหม่คือ

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} X_{ev}(n)W_{N/2}^{nk} + \sum_{n=0}^{N/2-1} X_{od}(n)W_{N/2}^{nk}$$

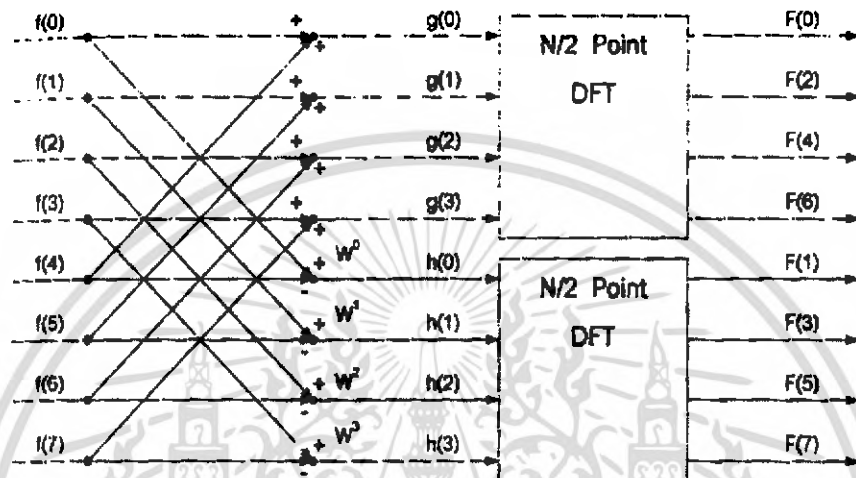
ในการนี้จะใช้ $N/2$ จุดเท่านั้นเพื่อคำนวณหาค่า $X(k)$ โดย k ต้องมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง $N-1$ อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของสมการคู่ และสมการคี่หาได้จาก

$$X_{ed}(k) = X_{ev}\left(k - \frac{N}{2}\right) \rightarrow \text{for } \frac{N}{2} \leq k \leq (N-1)$$

ผลลัพธ์ของการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่องสามารถทำซ้ำๆ จนกระทั่งเหลือข้อมูลแค่ตัวเดียว โดยต้องมีอินพุต 2 ตัวเพื่อใช้ในการคำนวณตลอดเวลา

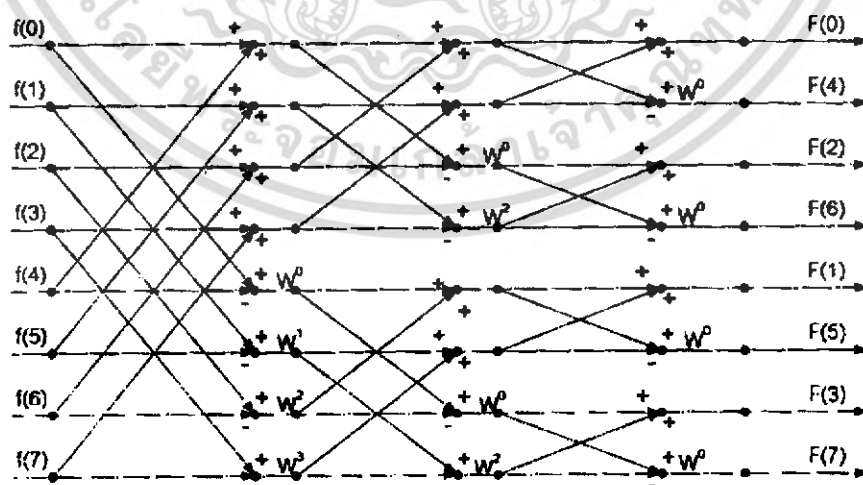
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.41 การหาค่า 8 จุดฟาสต์ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม

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



รูปที่ 2.42 การหาค่า 8 จุดฟาสต์ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างบนเมื่อคำนวณช่วงแรกเสร็จจะคำนวณช่วงที่ 2 ต่อ โดยมีวิธีการคำนวณดังรูปและจะใช้ข้อมูลในการคำนวณทั้งสิ้นประมาณ $N \log_2 N$ สามารถหาจำนวนบิตเตอร์ฟลายได้ดังนี้

$$\text{จำนวนบิตเตอร์ฟลาย} = N \log_2 N$$

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

$$\log_2 N = \text{จำนวนหลักของบิตเตอร์ฟลาย}$$

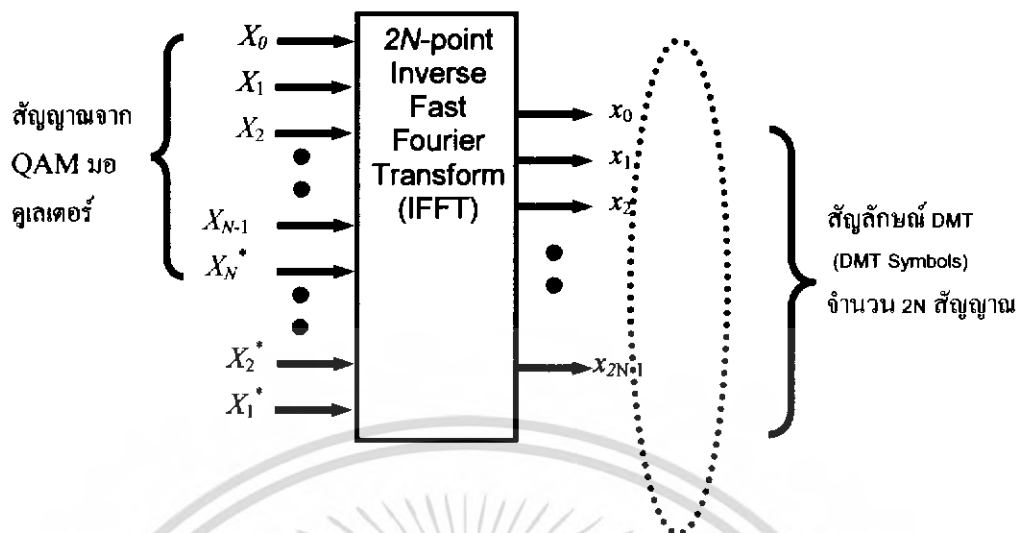
แต่ละบิตเตอร์ฟลายต้องมี 2 อินพุทเท่านั้น

2.5 การแปลงผกผันฟูเรียร์แบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform)

ตรงการทำการแยกแบนด์ย่อย DMT นี้เองที่จะใช้ประโยชน์จากกรรมวิธีที่สำคัญอันหนึ่งของ ทฤษฎีการประมวลผลดิจิทัล นั่นก็คือใช้ การแปลงผกผันฟูเรียร์แบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform : IFFT) กับสัญญาณเชิงซ้อนจาก QAM modulator การแปลงผกผันฟูเรียร์จะหมายถึง การหาค่าองค์ประกอบของสัญญาณใน โดเมนเวลา (time domain) ซึ่งก็คือ สัญญาณที่จะส่งผ่านช่อง การสื่อสาร จากสัญญาณใน โดเมนความถี่ (frequency domain) ซึ่งได้ เป็นเอาต์พุทของ QAM มอดูเลเตอร์ เหตุที่สัญญาณนี้ถือว่าเป็นสัญญาณใน โดเมนความถี่ นั้นหมายความว่า ในแต่ละสัญญาณสุ่ม (Sample) ของสัญญาณ จะถือว่าเป็นองค์ประกอบทางความถี่หนึ่งค่า ที่ภาครับก็จะใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ซึ่งเป็นการแปลงกลับของ IFFT เพื่อแปลงสัญญาณในโดเมนเวลานั้นกลับไปเป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ เพื่อเป็นสัญญาณอินพุท ให้กับ QAM demodulator

เมื่อลำดับสัญญาณจาก QAM modulator ถูกนำเข้าตัวแปลงอนุกรม/ขนาน (S/P) สัญญาณก็จะเรียงลำดับออกเป็น N สัญญาณคือ X_1 ถึง X_N ซึ่งจะถูกลบเป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน (complex coefficients) ของการแปลง IFFT เพื่อการมอดูเลตกับคลื่นพาห่อย่อยจำนวน N คลื่นพาหุ ซึ่งสัญญาณเอาต์พุทของการแปลง 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 ที่เป็นเอาต์พุทของ IFFT นี้ เรียกว่า เป็น สัญญาณ DMT (DMT symbol) ซึ่งมีจำนวน $2N$ สัญลักษณ์ การเลือกให้ สัญญาณเชิงซ้อนมีลักษณะเป็นสมมาตรเช่นนี้จะทำให้ได้สัญญาณ x_0 ถึง x_{2N-1} ที่เป็นสัญญาณจริง (real signal) ในโดเมนเวลา

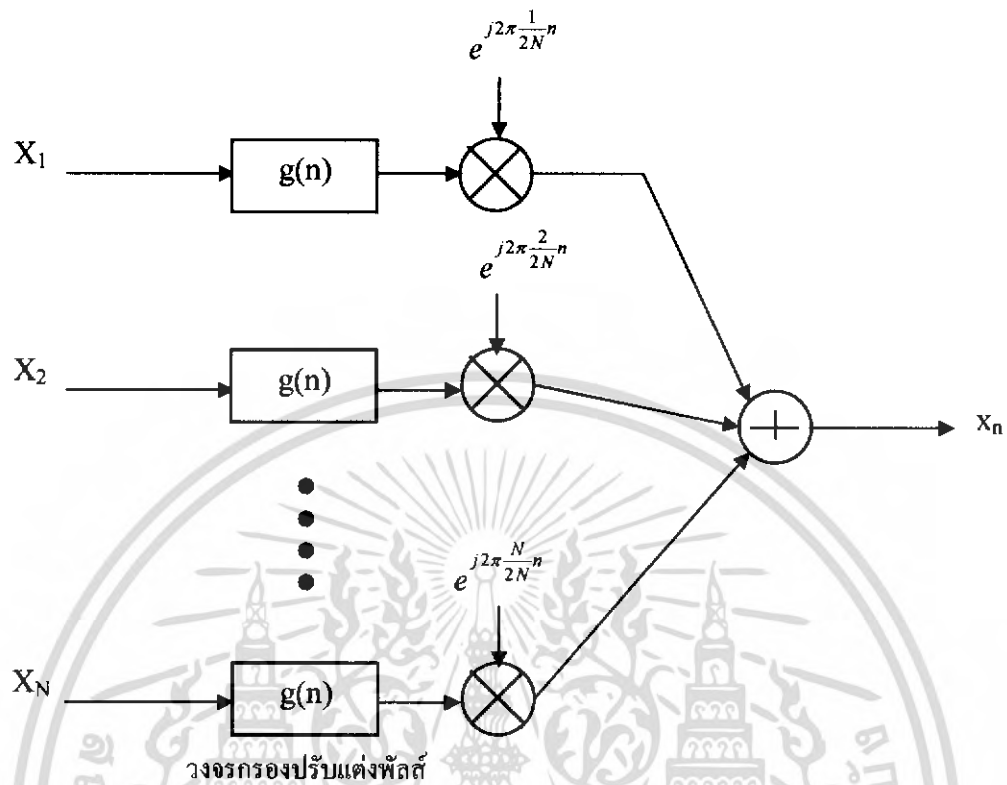


รูปที่ 2.43 สัญลักษณ์เชิงซ้อน โดเมนความถี่ จำนวน $2N$ สัญลักษณ์ ถูกแปลงฟูเรียร์ผกผัน (IFFT) ขนาด $2N$ จุด ทำให้ได้เป็น สัญลักษณ์จริงโดเมนเวลา $2N$ สัญลักษณ์

การแปลงผกผันฟูเรียร์ IFFT จะแสดงสมการข้างล่าง

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

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



รูปที่ 2.44 การมอดูเลต แบบ มัลติแคเรียร์ โดยใช้ การแปลงผกผันฟูเรียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน

เนื่องจากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีของระบบทั้ง Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) และ Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) แล้วจะเห็นได้ว่าทฤษฎีของทั้ง 2 ระบบเป็นนวัตกรรมระดับสูงสำหรับยุคสมัยนี้เป็นอย่างมาก โดย OFDM นั้นมีความโดดเด่นในการนำเอาไปใช้งานจริงเป็นอย่างมาก มีความจุของสเปกตรัมที่เกิดขีดจำกัดทางด้านทรัพยากรความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด ส่วนทางด้านระบบ MIMO นั้น ใช้ algorithm space-time ชั้นสูง เช่น MMSE (Minimum Mean Squared Error) ทำให้การรวมระบบของ 2 ระบบนี้อย่างลงตัวส่งสัญญาณให้มีอัตราเร็วที่ข้ามระดับความเป็น 3rd Generation ไปถึงระดับชั้น 4th Generation เลยทีเดียว คือ Bandwidth ระดับ 2 Mbps. ที่ความถี่ 2 GHz

3.1 หลักการออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDM System

ลักษณะเด่นของระบบ OFDM มีการแยกเป็น sub carrier โดยแต่ละ carrier ตั้งฉากซึ่งกันและกัน (orthogonal) ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของความจุสเปกตรัมหรือ Bandwidth มีค่าสูงขึ้น เพิ่มความเร็วในการส่งอีกทั้งยังทนทานต่อการจางแบบหลายวิถีได้ดี เพราะส่งในรูปของความถี่หลายๆความถี่ เนื่องจากการออกแบบระบบ OFDM เราพบปัญหาหลายประการ เช่น ความจุของ spectrum จะต้องมากพอ โดยมีเงื่อนไขเกี่ยวข้องเนื่องกับการเข้า IFFT ยิ่งเข้า IFFT แบบ 2^N จุดมากเท่าใดก็เกิดค่า Bit Error Rate มากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นเราจึงต้องปรับให้มีความเหมาะสม ปัญหา Inter Symbol Interference ที่ต้องแก้ด้วย Cyclic Prefix อีกทั้งระบบทางภาคส่งจะต้องมี Equalizer ที่สามารถปรับแก้ไขหลังจากผ่านช่องสัญญาณ Fading ซึ่งได้ออกแบบให้ทดลองผ่านช่องสัญญาณแบบ Slow Fading ทำการ Detect สัญญาณผ่าน Equalizer เพื่อกรองสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบเดิมทางภาครับ แล้วได้นำสัญญาณ OFDM ที่ได้นั้น มาทำกระบวนการกลับให้อยู่ในรูปแบบเดิมผ่านเข้า FFT เพื่อกลับมาเป็นสัญญาณเดิม

ลักษณะเด่นของระบบ MIMO คือมีการแยกส่งข้อมูลหลายเสาอากาศ โดยแต่ละเสามีข้อมูลการส่งที่แตกต่างกัน ส่งไปยังภาครับที่มีจำนวนเสาอากาศรับเท่ากัน ทำให้ส่งข้อมูลได้รวดเร็วขึ้นในแต่ละเฟรม และยังใช้ความถี่ที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า เนื่องจากการส่งแบบหลายเสาทำให้มีการ Detect สัญญาณที่ไม่ต้องการเข้ามาด้วยในแต่ละเสา ดังนั้นเราจึงต้องมีการกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป และยังมีการเกิด Co-Channel Interference อีกด้วย ดังนั้นเราอาจจะสรุปถึงปัญหาและวิธีการแก้ไขได้โดยสังเขปดังนี้

3.1.1 การออกแบบระบบ OFDM System จะต้องคำนึงถึงอะไรบ้าง

1. ความจุของ spectrum ที่ใช้จะต้องมีประสิทธิภาพสูง
2. มีการความเร็วในการส่งที่สูง
3. ภาครับต้องต้องรับข้อมูลโดยให้เกิด Bite Error Rate (BER) และ Frame Error Rate ให้น้อยที่สุด
4. สามารถแก้ไขปัญหา Inter Symbol Interference และการรบกวนของสายอากาศอื่นที่ส่งได้

3.1.2 ปัญหาที่พบในการรวมระบบ OFDM เข้ากับระบบ MIMO

1. ในระบบ MIMO มีการส่งสัญญาณจากทางด้านส่งหลายสายอากาศ ทำให้ภาครับไม่ทราบว่าจะ Detect สัญญาณที่เสาอากาศไหนส่งมา ดังนั้นจึงต้องทำการ Equalization เพื่อขจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป
2. ในระบบ OFDM มีการเกิด ISI และ Fading เนื่องจากการส่งแบบ Multipath ส่งไปสะท้อนกับวัตถุที่มีขนาดใหญ่
3. ในระบบ OFDM นั้นมีการใช้ FFT ซึ่งการเข้าถึงนั้นเป็นแบบ $N=2^M$ จุด

3.1.3 แก้ไขด้วยวิธีอะไร

1. Inter-Symbol Interference แก้ไขโดยการเพิ่ม แถบป้องกันที่เรียกว่า Cyclic Prefix เพื่อป้องกันการเลื่อมล้ำกันของเฟรม ทำให้ภาครับ Detect สัญญาณที่ผิดไป
2. Fading แก้ไขโดยการเพิ่ม Amplifier ให้กับ sub carrier เพื่อให้มีกำลังในการส่งมากพอ ภาครับใช้ Equalizer ในการกรองสัญญาณให้เหมือนทางภาคส่งมากที่สุด
3. การรบกวนของเสาอากาศข้างเคียง ทำการติดตั้ง Detector โดยใช้หลักการ เช่น mean-squared error, minimum mean-squared error, channel estimate ในฝั่งภาครับเพื่อ detect สัญญาณที่ต้องการ

3.1.4 หน้าที่การทำงานในแต่ละส่วน

3.1.4.1 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการ Symbol Mapper หรือ การ Modulation ข้อมูลรวมเข้ากับคลื่นพาห์ ซึ่งในที่นี้ใช้หลักการ Bi Phase Shift Keying ในการ Modulation สัญญาณ Digital ให้อยู่ในรูปของ Analog
4. ส่งเข้า Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) แปลง Frequency Domain ให้อยู่ในรูปของ Time Domain และ ทำการเพิ่ม Cyclic Prefix (CP) แทรกแถบป้องกันแคบๆ เพื่อลด Inter-Symbol Interference (ISI) แล้วทำการ Serial to Parallel ก็จะได้สัญญาณ OFDM ออกมา
5. รวมสัญญาณ OFDM เข้ากับ MIMO ด้วย Transmitter Combiner ส่ง Sub carrier ออกไป

3.1.4.2 ภาครับ (Receiver) จะต้องทำหน้าที่ตามลำดับดังนี้

1. รับสัญญาณจากภาครับ โดยระบบ MIMO ฝั่งรับมีสายอากาศรับหลายสาย ถอดสัญญาณ OFDM
2. สัญญาณ OFDM ทำการถอด Cyclic Prefix ออกแล้วเข้า Fast Fourier Transform (FFT) แปลงสัญญาณจาก Time Domain เป็น Frequency Domain
3. ทำการ Detect สัญญาณเพื่อหาสัญญาณที่ต้องการหรือการทำ Equalization ปรับ Amplitude และ Phase ของสัญญาณ
4. แล้วทำการแปลง Sub Channel ให้อยู่ในรูปของ bit stream ข้อมูลเดิมอีกครั้ง

3.2 ออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDM ที่มีการส่งเสาอากาศแบบ SISO

หลังจากเข้าใจถึงหลักการการออกแบบระบบ OFDM แล้วจึงได้ออกแบบ Block Diagram ขึ้นมาในลักษณะต่างๆ กัน ทั้งหมด 3 ระบบและนำทั้ง 3 ระบบมาเทียบสมรรถภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์หาระบบที่ดีที่สุดก่อนนำไปรวมกับระบบ MIMO ที่มีค่าความแปรปรวนและจางหายในช่องสัญญาณมาก

3.2.1 ออกแบบ Block diagram ทดสอบระบบที่ 1

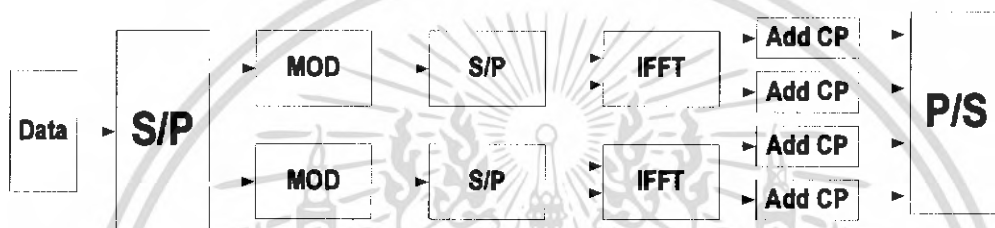
ลักษณะออกแบบ Block Diagram มีขั้นตอนการดำเนินงานของระบบดังนี้

3.2.1.1 ออกแบบทางภาคส่ง

1. ทำการส่ง Data Stream ผ่านเข้า Serial to Parallel แยกเป็น 2 สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการ Modulation ในแต่ละสายหลังจากนั้น เข้า Serial to Parallel อีกทีแยกเป็น 2 สาย
3. ในแต่ละสายทำการ IFFT 2 จุด
4. ทำการ Add Cyclic Prefix ลงไป
5. สุดท้ายทำการ Parallel to Serial ให้เหลือ 1 สายส่งเป็น High Rate จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาคส่งได้ดังนี้

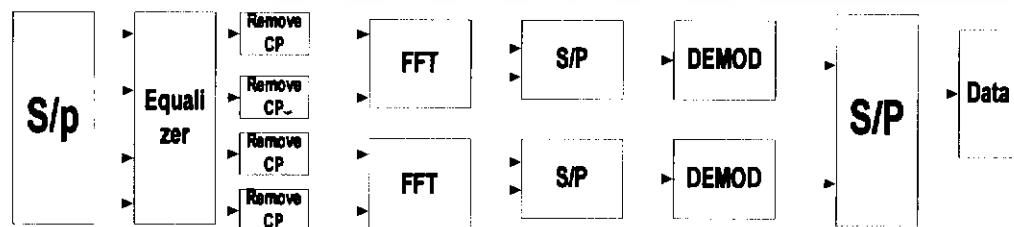


รูปที่ 3.1 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาคส่งระบบที่ 1

3.2.1.2 ออกแบบทางภาครับ

1. ทำการรับสัญญาณจากภาครับมา ผ่านเข้า Serial to Parallel ออกเป็น 4 สาย
2. เข้าสู่วงจรการทำ Equalization เพื่อทำการปรับ Amplitude และ Phase ของสัญญาณที่ผิดเพี้ยน
3. ทำการถอด Cyclic Prefix ออก
4. ทำการเข้า FFT 2 จุด แล้วทำการ Serial to Parallel กลับมาเป็น 2 สายดังเดิม
5. ทำการ Demodulation สัญญาณ Digital ให้กลับมาเป็น Analog
6. ส่งเข้า Serial to Parallel ออกมาเป็น Data Stream

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาครับได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาครับระบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

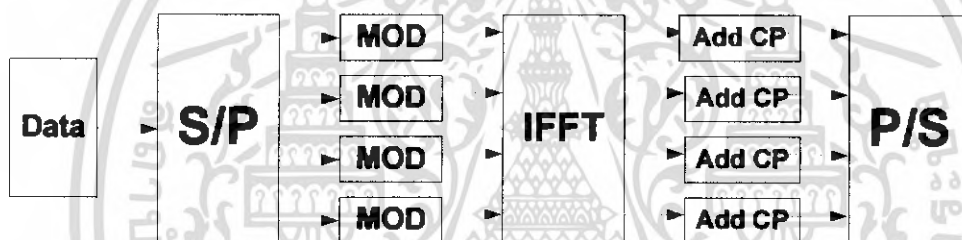
3.2.2 ออกแบบ Block diagram ทดสอบระบบที่ 2

ลักษณะออกแบบ Block Diagram มีขั้นตอนการดำเนินงานของระบบดังนี้

3.2.2.1 ออกแบบทางภาคส่ง

1. ทำการส่ง Data Stream ผ่านเข้า Serial to Parallel แยกเป็น 4 สาย Low Data Rate
2. ทำการ Modulation ในแต่ละสาย
3. ทำการเข้า IFFT แบบ 4 จุด
4. ทำการ Add Cyclic Prefix ลงไป ในแต่ละสาย
5. สุดท้ายทำการ Parallel to Serial ให้เหลือ 1 สายส่งเป็น High Data Rate

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาคส่งได้ดังนี้

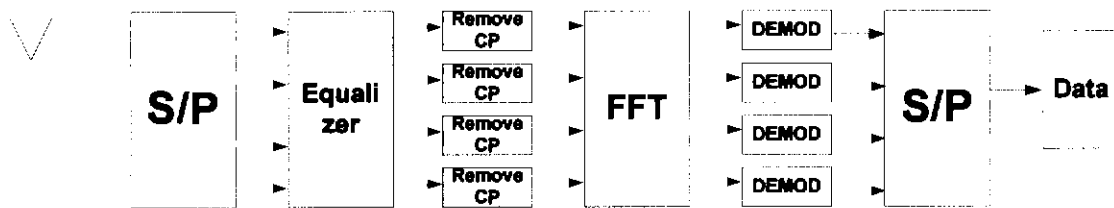


รูปที่ 3.3 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาคส่งระบบที่ 2

3.2.2.2 ออกแบบทางภาครับ

1. ทำการรับสัญญาณจากภาครับมา ผ่านเข้า Serial to Parallel ออกเป็น 4 สาย
2. เข้าสู่วงจรการทำ Equalization เพื่อทำการปรับ Amplitude และ Phase ของสัญญาณที่ผิดเพี้ยน
3. ทำการถอด Cyclic Prefix ออก
4. ทำการเข้า FFT 4 จุด
5. ทำการ Demodulation สัญญาณ Analog ให้กลับมาเป็น Digital
6. ส่งเข้า Parallel to Serial ออกมาเป็น Data Stream

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาครับได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาครับระบบที่ 2

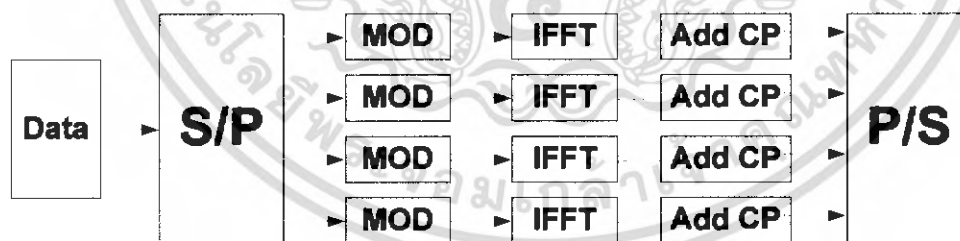
3.2.3 ออกแบบ Block diagram ทดสอบระบบที่ 3

ลักษณะออกแบบ Block Diagram มีขั้นตอนการดำเนินงานของระบบดังนี้

3.2.3.1 ออกแบบทางภาคส่ง

1. ทำการส่ง Data Stream ผ่านเข้า Serial to Parallel แยกเป็น 4 สาย Low Data Rate
2. ทำการ Modulation ในแต่ละสาย
3. ทำการเข้า IFFT แบบ 1 จุด
4. ทำการ Add Cyclic Prefix ลงไป ในแต่ละสาย
5. สุดท้ายทำการ Parallel to Serial ให้เหลือ 1 สายส่งเป็น High Data Rate

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาคส่งได้ดังนี้



รูปที่ 3.5 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาคส่งระบบที่ 3

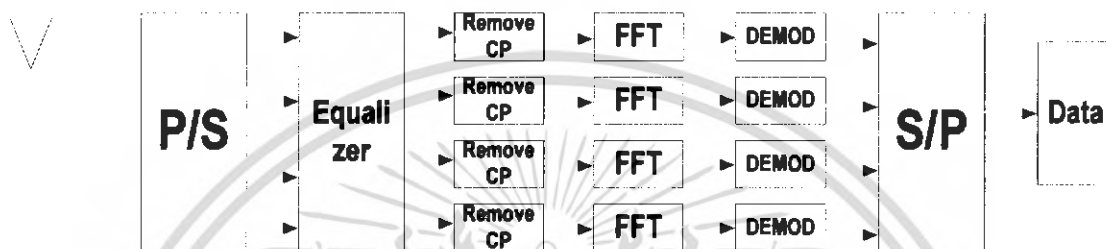
3.2.2.2 ออกแบบทางภาครับ

1. ทำการรับสัญญาณจากภาครับมา ผ่านเข้า Serial to Parallel ออกเป็น 4 สาย
2. เข้าสู่วงจรการทำ Equalization เพื่อทำการปรับ Amplitude และ Phase ของสัญญาณที่ผิดเพี้ยน
3. ทำการถอด Cyclic Prefix ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการเข้า FFT 1 จุด
5. ทำการ Demodulation สัญญาณ Analog ให้กลับมาเป็น Digital
6. ส่งเข้า Parallel to Serial ออกมาเป็น Data Stream

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาครับ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM SISO ทางภาครับระบบที่ 3

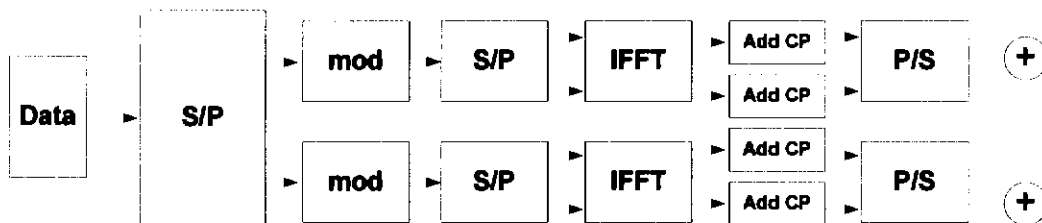
3.3 ออกแบบ Block Diagram ของระบบ OFDM รวมเข้ากับระบบ MIMO

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

3.3.1 ออกแบบทางภาคส่ง

1. ทำการส่ง Data Stream ผ่านเข้า Serial to Parallel แยกเป็น 2 สาย เพื่อแยกแต่ละสายในการส่งในแต่ละเสา
2. ทำการ Modulation จากสัญญาณ Digital เป็น Analog ในแต่ละสาย แต่ละสายทำ Serial to Parallel แยกออกเป็น 2 สายอีกต่างหาก
3. ในแต่ละทำการเข้า IFFT แบบ 2 จุด
4. ทำการ Add Cyclic Prefix ลงไป ในแต่ละสาย
5. สุดท้ายทำการ Parallel to Serial ให้เหลือ 2 สายส่งเป็น High Data Rate ออกไปทั้งหมด 2 เสา

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาคส่ง ได้ดังนี้

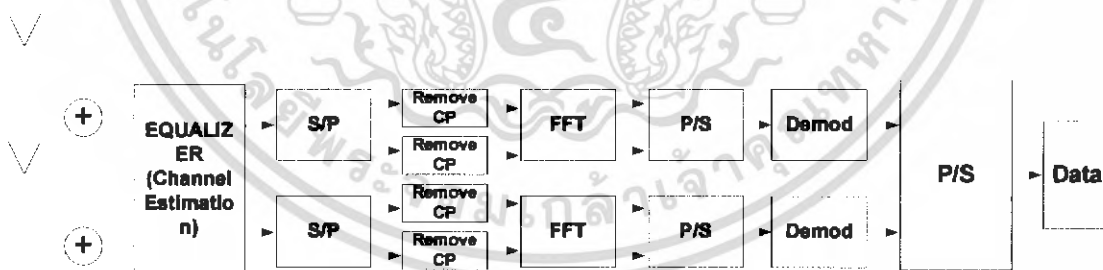


รูปที่ 3.7 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM MIMO ทางภาคส่ง

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

จากลำดับหน้าที่ทำการออกแบบ Block Diagram ทางภาครับ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.8 แสดงการออกแบบ Block Diagram OFDM MIMO ทางภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 หลักการทำ Iterative

หลักการทำ Iterative ช่วยในการตัดค่าสัญญาณที่ไม่ต้องการของเสานั้นออกโดยนำค่าสัญญาณจากอีกเสาหนึ่งมาลบแล้วทำการวนซ้ำหลายๆ รอบเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกับสัญญาณทางภาคส่งมากที่สุด ขั้นตอนการทำมีดังนี้

1. ในแต่ละเสาอากาศของระบบ MIMO นั้นเสาอากาศหนึ่งมีการรับค่าของอีกเสาอากาศหนึ่ง ดังสมการ

$$r_1 = h_{11}x_1 + h_{12}x_2$$

$$r_2 = h_{21}x_1 + h_{22}x_2$$

จากสมการจะพบได้ว่าเสาอากาศ r_1 ต้องการที่จะ detect ข้อมูล x_1 แต่เนื่องจาก r_1 มีค่าของข้อมูล x_2 อยู่ด้วย

2. สมมติว่ารู้ค่าของช่องสัญญาณจะทำการปรับแอมพลิจูดและเฟสดังสมการตามรูป

$$\bar{x}_1 = h_{11}^{-1}[h_{11}x_1 + h_{12}x_2]$$

$$\bar{x}_2 = h_{22}^{-1}[h_{21}x_1 + h_{22}x_2]$$

จะเห็นได้ว่าเสาอากาศแรกทำการปรับแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณโดยคูณเข้ากับ Inverse Matrix ของ h_{11} และเสาอากาศที่สองทำการปรับแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณ โดยการคูณเข้ากับ Inverse Matrix ของ h_{22} จะได้ค่าของ \bar{x}_1 ของเสาที่หนึ่ง แต่จะติดค่าของ $h_{11}^{-1}(h_{12}x_2)$ ในทำนองเดียวกันจะได้ค่าของ \bar{x}_2 ของเสาที่สอง แต่จะติดค่าของ $h_{22}^{-1}(h_{21}x_1)$

3. นำค่า \bar{x}_1 และ \bar{x}_2 ที่ได้จากขั้นตอนที่สองมาคูณกับ Matrix h_{11} และ h_{21} ตามลำดับ แล้วลบกับค่า \bar{x}_1 และ \bar{x}_2 ตามสมการ

$$\bar{x}_1 = h_{11}^{-1}[r_1 - h_{12}\bar{x}_2]$$

$$\bar{x}_2 = h_{22}^{-1}[r_2 - h_{21}\bar{x}_1]$$

4. ทำตามขั้นตอนที่หนึ่งถึงสามจนกว่าจะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับสัญญาณทางภาคส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการทดลอง

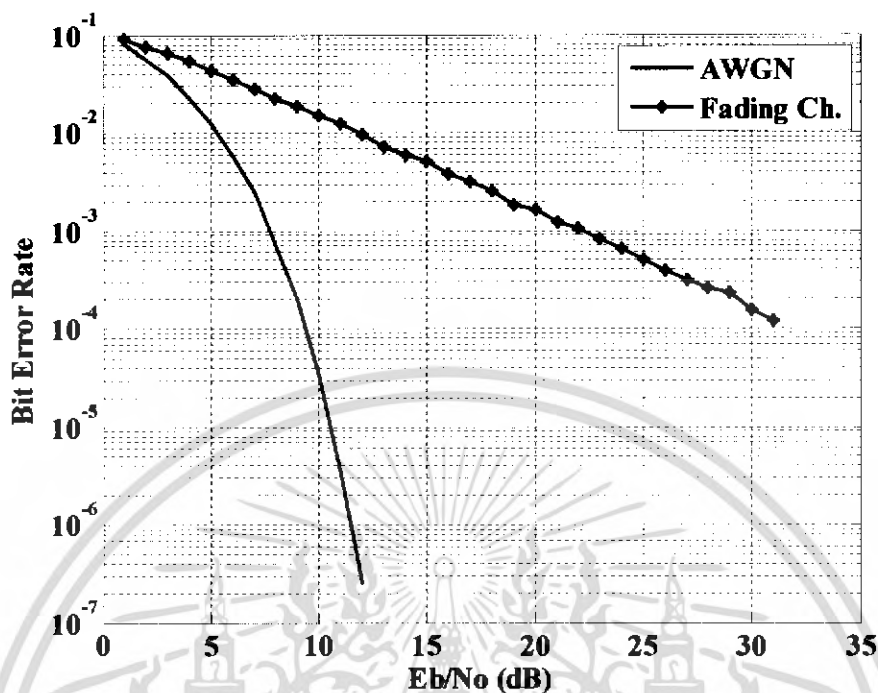
หลังจากทำการออกแบบและทำแบบจำลองระบบ OFDM และทำแบบจำลองระบบ OFDM รวมเข้ากับระบบ MIMO แล้วนั้น ในบทนี้นำเสนอสมรรถนะของระบบที่ได้ทำการทดลอง ด้วยการเขียนโปรแกรม MATLAB ในการทดสอบหาค่า Bit Error Rate, Frame Error Rate ของระบบ OFDM SISO และ ระบบ OFDM MIMO ลงในช่องสัญญาณ (Channel) ในลักษณะต่างๆ อาทิเช่น ช่องสัญญาณแบบ Fading และ ช่องสัญญาณ AWGN ของทั้ง 2 ระบบ แล้วนำมาเปรียบเทียบค่ากันเพื่อทราบถึงประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบ รวมทั้งนำเอา Equalizer มาทำการปรับค่า Amplitude และ Phase ของสัญญาณเพื่อลดค่า Bit Error Rate, Frame Error Rate และนำวิธีการ Iterative สัญญาณ เพื่อให้ภาครับตัดสัญญาณที่ไม่ต้องการของเสานั้นออกเหลือแค่สัญญาณที่ใกล้เคียงกับภาคส่งมากที่สุด ในรูปแบบการมอดูเลทแบบ BPSK เท่านั้น โดยทำการกำหนดการส่งข้อมูลจำนวน 120 Bit ผ่านการ IFFT แบบ 1 จุด 2 จุด และ 4 จุดตามลำดับ กำหนด Frame Error ไม่เกิน 2000 เฟรม ผ่านเข้าช่องสัญญาณแบบ Slow Fading แล้วนำระบบที่ดีที่สุดมารวมกะ MIMO ทดลองการผ่านเข้า Channel ทั้ง 3 แบบ คือ Quasi Static Fading Channel , Slow Fading Channel และ Fast Fading Channel เพื่อศึกษาแนวโน้มของค่า Bit Error Rate ที่เกิดขึ้นหา ระบบที่ดีที่สุด

4.1 การทดลองเปรียบเทียบการออกแบบวงจร OFDM SISO

ทำการทดลองการออกแบบในลักษณะต่างๆ ผ่านช่องสัญญาณ AWGN หรือมีการรบกวนของสัญญาณที่มีอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น และผ่านช่องสัญญาณ Fading เพื่อดูสมรรถภาพของระบบ OFDM SISO ที่เหมาะสมกับระบบ MIMO โดยเขียนผ่านโปรแกรม MATLAB สร้าง Block Diagram ตามบทที่ 3 ผลการทดลองที่ออกมาได้ดังนี้

4.1.1 ทำการทดลอง Block diagram ทดสอบระบบที่ 1

เป็นการแยกสัญญาณจาก High Rate เป็น Low Rate 4 แถว ทำการส่งเข้า IFFT แบบ 1 จุด

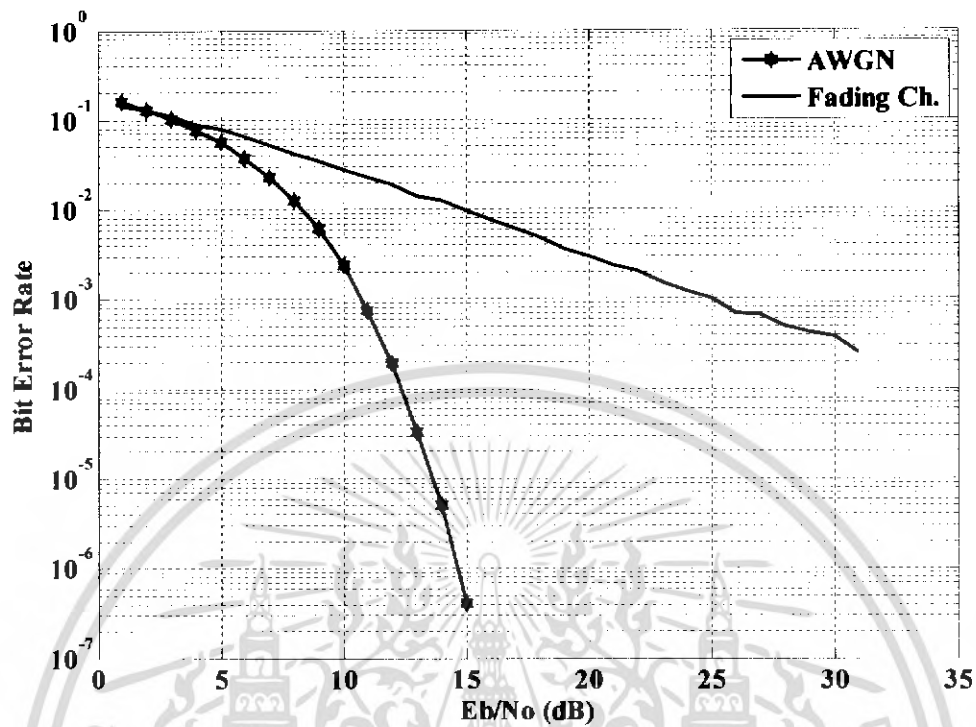


รูปที่ 4.1 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ AWGN และช่องสัญญาณ Fading Channel

จากกราฟที่แสดงจะพบว่าค่า Bit Error Rate ที่ 10^{-5} ของช่องสัญญาณ AWGN จะมีค่า Signal to Noise Ratio อยู่ที่ประมาณ 11 dB ส่วนช่องสัญญาณ Fading ค่า Bit Error Rate ที่ 10^{-3} อยู่ที่ 22 dB เปรียบเทียบค่า Bit Error Rate มีความแตกต่างกันอยู่มาก

4.1.2 ทำการทดลอง Block diagram ทดสอบระบบที่ 2

เป็นการแยกสัญญาณจาก High Rate เป็น Low rate 2 แถว โดยในแต่ละแถวทำการมอดูเลตแล้วส่งเข้า IFFT แบบ 2 จุด

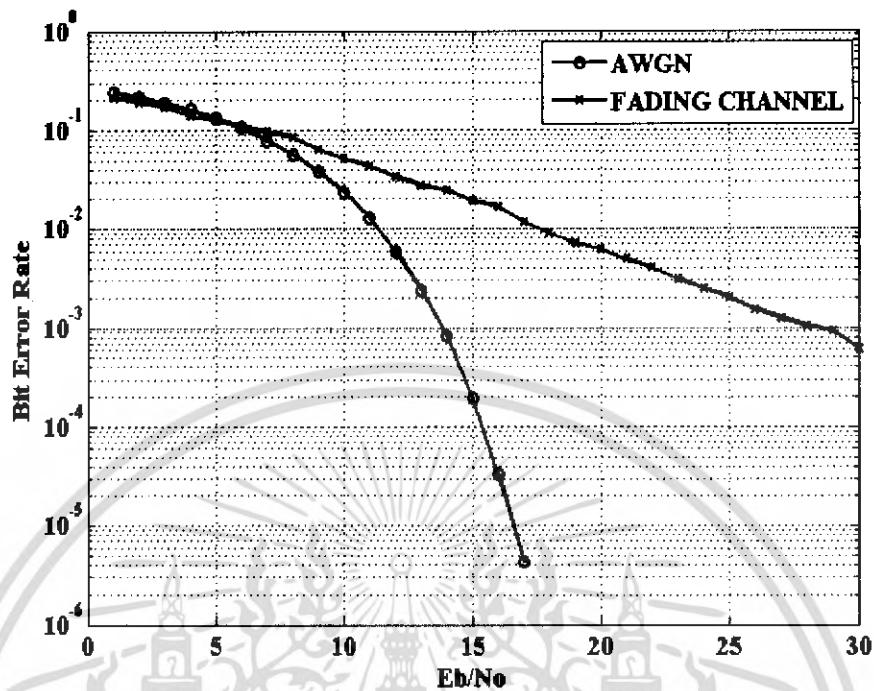


รูปที่ 4.2 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ AWGN และช่องสัญญาณ Fading Channel

จากกราฟที่แสดงจะพบว่าค่า Bit Error Rate ที่ 10^{-5} ของช่องสัญญาณ AWGN จะมีค่า Signal to Noise Ratio อยู่ที่ประมาณ 14 dB ส่วนช่องสัญญาณ Fading ค่า Bit Error Rate ที่ 10^{-3} อยู่ที่ 25 dB เปรียบเทียบค่า Bit Error Rate มีความแตกต่างกันอยู่มาก

4.1.3 ทำการทดลอง Block diagram ทดสอบระบบที่ 3

เป็นการแยกสัญญาณจาก High Rate เป็น Low Rate 4 แฉว โดยในแต่ละแฉวทำการมอดูเลต



รูปที่ 4.3 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ AWGN และช่องสัญญาณ Fading Channel

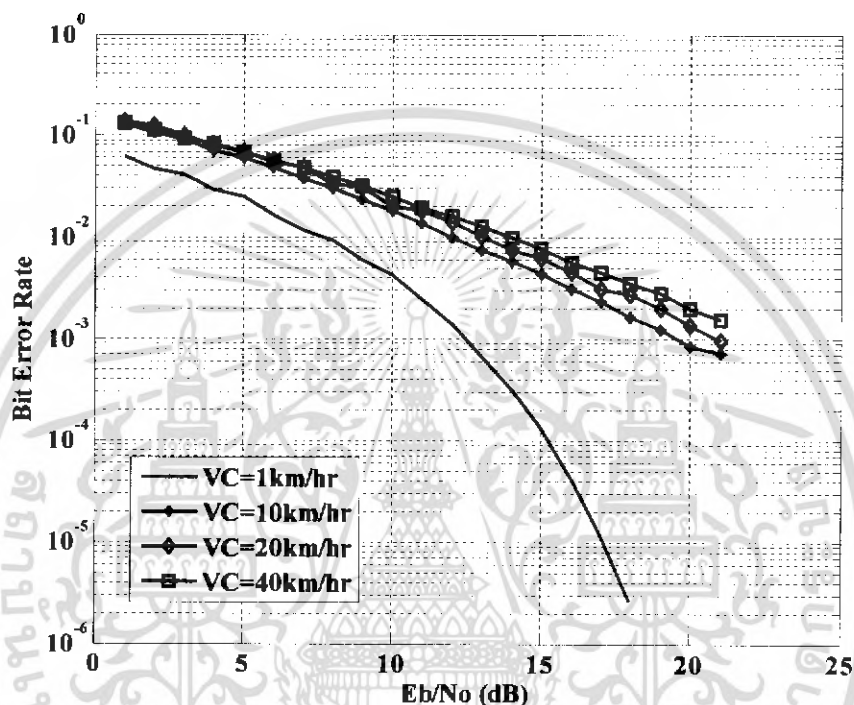
จากกราฟที่ 4.3 จะพบว่าค่า Bit Error Rate ที่ 10^{-5} ของช่องสัญญาณ AWGN จะมีค่า Signal to Noise Ratio อยู่ที่ประมาณ 18 dB ส่วนช่องสัญญาณ Fading ค่า Bit Error Rate ที่ 10^{-3} อยู่ที่ 28 dB

จากกราฟทั้ง 3 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่า กราฟในระบบที่ 1 มีค่า Bit Error Rate น้อยที่สุด แต่ความจุสเปคตรัมก็จะน้อยเช่นเดียวกัน ส่วนกราฟในระบบที่ 2 นั้นมีค่า Bit Error Rate พอสมควร แต่ความจุสเปคตรัมนั้นมากกว่าระบบที่ 1

4.2 การทดลองวงจร OFDM SISO ผ่านช่องสัญญาณในลักษณะต่างๆ

ทำการทดลองสมรรถนะของ OFDM ผ่านช่องสัญญาณที่มีลักษณะการจางหายของช่องสัญญาณ จากการทดลองที่ 4.1 นั้น จึงได้การทดลองระบบที่ 2 มีคุณสมบัติทั้งด้านความจุ Spectrum และค่า Bit Error Rate ที่ยังใช้ได้และยังสามารถนำไปรวมระบบ MIMO ได้อย่างสะดวก โดยสามารถกำหนดให้ block หนึ่ง

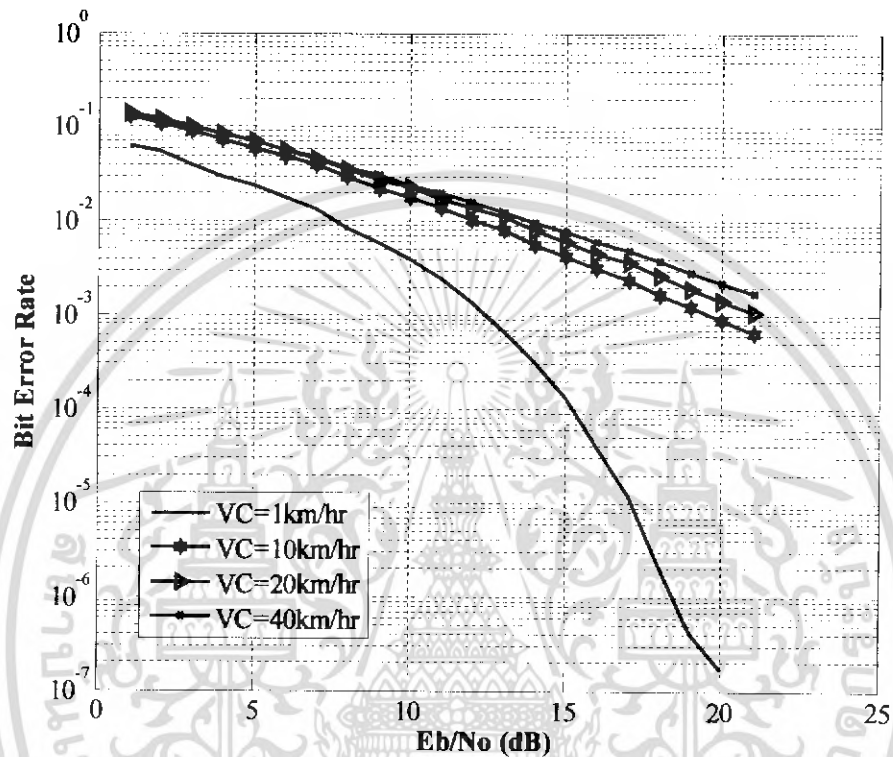
4.2.1 Quasi Static Fading Channel



รูปที่ 4.4 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ สัญญาณ Quasi Fading Channel ที่ความเร็วต่างๆ

จากรูป การทดลองในการเข้าช่องสัญญาณ Fading แบบ Quasi Static Fading Channel ที่ความเร็ว 1 km/hr สัญญาณ ถึง 10 km/hr มีค่า Bit Error Rate น้อย

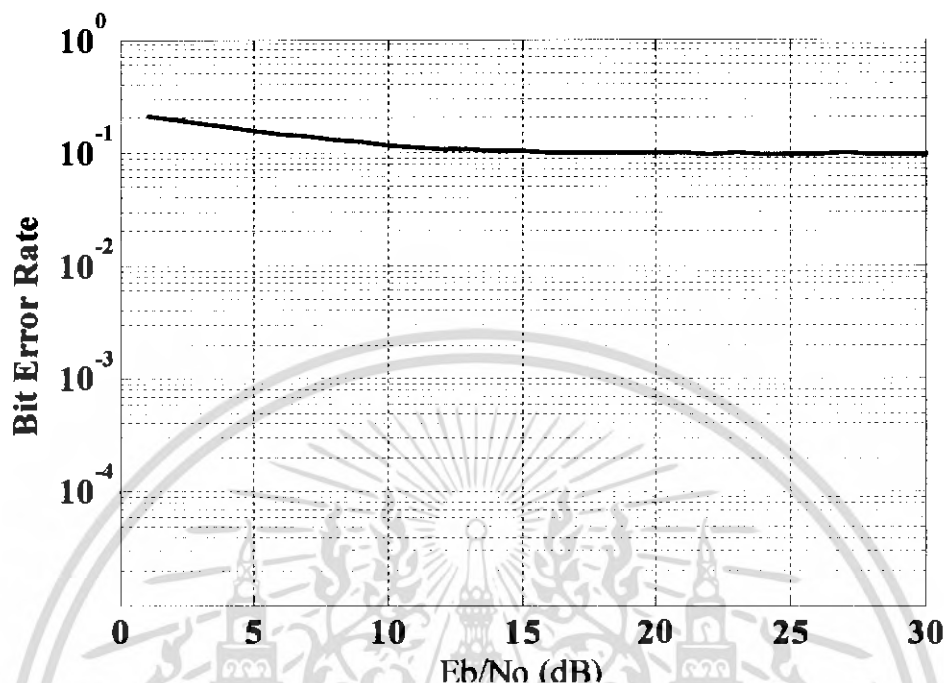
4.2.2 Slow Fading Channel



รูปที่ 4.5 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ สัญญาณ Slow Fading Channel

จากรูป การทดลองในการเข้าช่องสัญญาณ Fading แบบ Slow Fading Channel ที่ความเร็ว 1 km/hr สัญญาณ ถึง 10 km/hr มีค่า Bit Error Rate น้อย

4.2.3 Fast Fading Channel

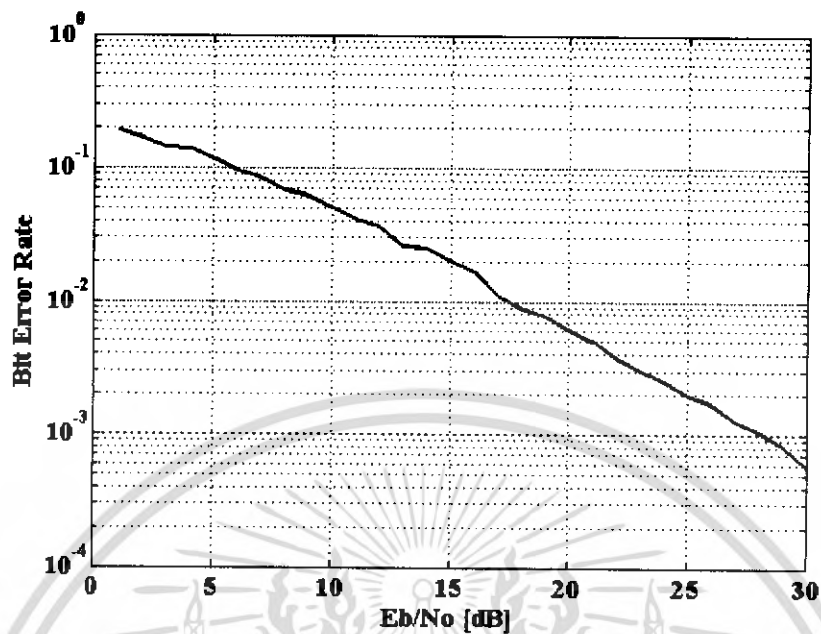


รูปที่ 4.6 แสดงอัตราการเกิดการผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณ สัญญาณ Fast Fading Channel

จากรูป การทดลองในการเข้าช่องสัญญาณ Fading แบบ Fast Fading Channel ที่ความเร็ว 100 km/hr จะพบว่า Equalizer ไม่สามารถ track สัญญาณได้เนื่องจากเกิด Doppler Shift สูง ทำให้ค่า Fade rate สูง จน Equalizer หยุดการทำงาน

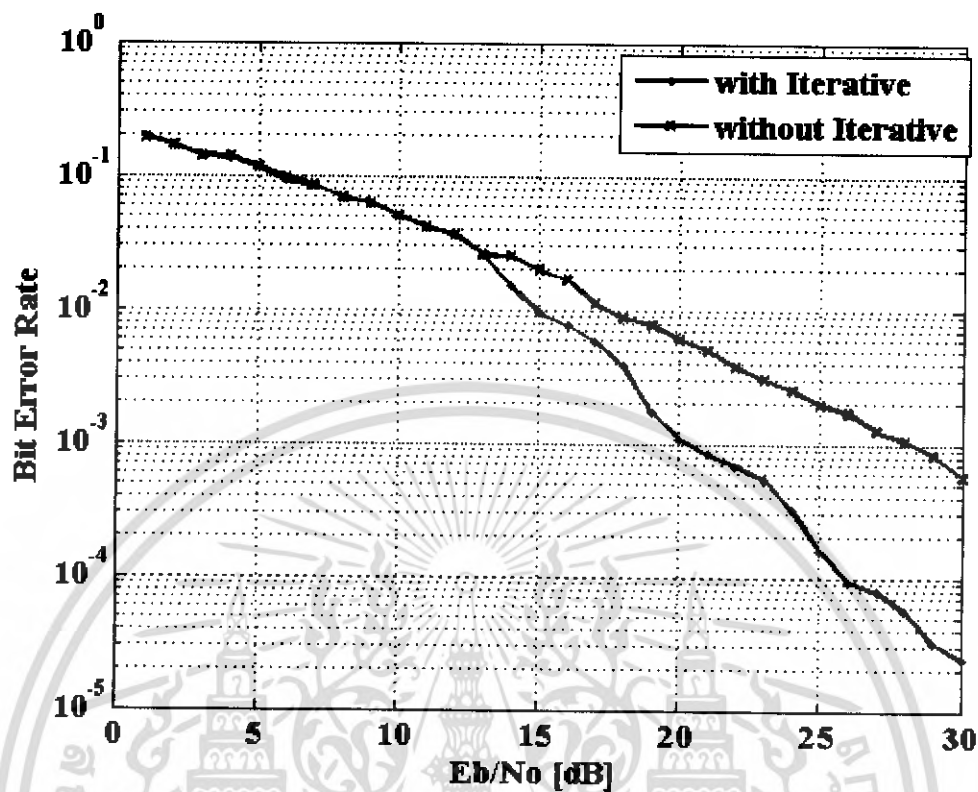
4.3 การทดลองรวมระบบ OFDM เข้ากับระบบ MIMO

หลังจากออกแบบระบบ OFDM แบบ SISO ได้ประสิทธิภาพที่เป็นที่น่าพึงพอใจแล้ว จึงนำระบบ OFDM มาทำการรวมเข้ากับระบบ MIMO เพื่อเพิ่มเข้าของ Bandwidth ให้มีประสิทธิภาพในการจุข้อมูลขึ้นอีกทั้งยังสามารถที่จะเพิ่มความเร็ว (Data Rate) ของข้อมูลให้มากขึ้นในการส่ง Frame ในแต่ละ Frame โดยนำเอาระบบที่เลือกไว้จากการทดลอง ข้อมูลในแต่ละบล็อกจะส่งไปต่อหนึ่งเสาอากาศ ในที่นี้ให้เสาอากาศภาคส่งเท่ากับ 2 และภาครับเท่ากับ 2 เช่นกัน



รูปที่ 4.7 แสดงอัตราการเกิดความผิดพลาดของบิต (BER) ในช่องสัญญาณแบบ Fading โดยใช้การทำ Equalization

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำระบบมารวมเข้าระบบ MIMO จะเกิดค่า BER ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นทางภาคส่งจึงต้องทำการ Detect สัญญาณ โดยใช้ Equalizer ในการปรับ Amplitude และ Phase ของสัญญาณให้กลับมาเหมือนทางภาคส่งกำหนดให้รู้ค่าของช่องสัญญาณใช้หลักการ Iterative การทำสัญญาณย้อนกลับเพื่อตัดค่าที่ไม่ต้องการของเสาแรกและเสาที่สองออกทำให้การ Detect สัญญาณมี ประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าเดิม



รูปที่ 4.8 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้หลักการของ Iterative

จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่า Bit Error Rate ของการทำ Iterative นั้นจะมีค่าน้อยกว่า Equalization เนื่องจากการทำ Iterative มีการนำค่าของอีกเสาอากาศมาลบกับค่าที่ได้จากเสาอากาศนั้น เพื่อลดทอนสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป โดยการวนลบบ่อยๆจนกว่าจะได้ค่าที่ใกล้เคียงหรือพึงพอใจ เปรียบค่า Bit Error Rate ที่ 10^{-4} การทำ Iterative ใช้ค่า SNR ที่ประมาณ 27 dB แต่ถ้าเกิดทำ Equalization จะพบจะต้องใช้ค่ามากกว่า 30 dB

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุป

5.1.1 สรุปผลการทดลองที่ 4.1

จากผลการทดลองในบทที่ 4 ที่ผ่านมามพบว่าระบบ OFDM มีส่วนช่วยเพิ่มสมรรถภาพของแบนด์วิดท์เป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถส่ง sub carrier ได้มากเท่าไรสัญญาณก็จะยิ่ง orthogonal ซึ่งกันและกันมาก ในการทดลองเปรียบเทียบการออกแบบวงจร OFDM SISO ทั้ง 3 ระบบที่ออกแบบมานั้นต่างกันที่รูปแบบของการเข้าสู่ Inverse Fast Fourier Transform โดยเป็นแบบ 1 จุด 2 จุด และ 4 จุดตามลำดับเพื่อเปรียบเทียบค่า Bit Error Rate ซึ่งแต่ละแบบจะเห็นข้อแตกต่างกันได้ดังนี้

ระบบที่ 1 ค่า Bit Error Rate จะมีปริมาณต่ำหรือแทบจะไม่มีเลยก็ว่าได้ แต่เนื่องจากระบบที่ 1 มี Sub Stream เพียง 1 ลูก ทำให้ประสิทธิภาพการใช้ความจุสเปกตรัมใช้ไม่คุ้มเท่ากับระบบ MIMO ดังนั้นจึงไม่เลือกระบบนี้เข้ามาใช้

ระบบที่ 3 มี Sub Stream ถึง 4 ลูก สามารถใช้ประสิทธิภาพของความจุสเปกตรัมอย่างคุ้มค่า แต่เนื่องจาก Bit Error Rate มีค่าที่ค่อนข้างสูง เมื่อนำไปใช้ในระบบ MIMO ที่ใช้เสาอากาศหลายเสาแล้ว ปรากฏว่าเกิดค่า Bit Error Rate ที่สูงมาก ทำให้ระบบนี้ก็ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้

ดังนั้นจึงเลือกระบบที่ 2 มาใช้งานเพราะนอกจากความจุสเปกตรัมมีค่าพอประมาณแล้ว ค่า Bit Error Rate ก็เป็นที่น่าพอใจ และสามารถใช้ร่วมกับ MIMO ได้เป็นอย่างดีโดยสามารถที่จะแยกสายการส่งแต่ละสายนั้นให้เป็นการส่งต่อหนึ่งเสาอากาศ

5.1.2 สรุปผลการทดลองที่ 4.2

จากผลการทดลอง 4.1 พบว่าได้ระบบที่เหมาะสมกับการรวมเข้ากับระบบ MIMO แล้วจึงทำการทดสอบผ่านระบบ Fading Channel ใน 3 ลักษณะคือ Quasi Static Fading Channel, Slow Fading Channel และ Fast Fading Channel

ผลการทดลองสรุปได้ว่าถ้าช่องสัญญาณมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อย จะมีผลทำให้ Bit Error Rate มีค่าน้อย ถ้าช่องสัญญาณมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมาก จะมีผลทำให้ Bit Error Rate มีค่ามากตามไปด้วย การรบกวนกันของสัญญาณเสาข้างเคียงค่า และการเกิดปรากฏการณ์ Doppler Shift จะ มีผลทำให้ Bit Error Rate มีค่ามาก มีผลทำให้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดการ Fading ของสัญญาณมากขึ้น ซึ่งจะแปรผันตามความเร็วของเสาอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quasi Static Fading Channel เกิดจากช่องสัญญาณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใน Frame แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในทุกๆ Frame ในสภาพของช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงภายในช่องสัญญาณ จากการทดลองระบบพบว่า ค่า Bit Error Rate ที่ได้ในความเร็วของเสาอากาศที่มีการเคลื่อนที่ไม่เกิน 10 km/hr ยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่

Slow Fading Channel เกิดจากช่องสัญญาณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ โดยค่าในแต่ละช่องสัญญาณจะมีค่าไม่เท่ากันแต่จะมีช่วงใกล้เคียงกับสัญญาณข้างเคียง หรือ อาจถือว่าเปลี่ยนแปลงได้ช้ามาก ผลจากการทดลองระบบพบว่าค่า Bit Error Rate ที่ได้ในความเร็วของเสาอากาศที่มีการเคลื่อนที่ไม่เกิน 10 km/hr ยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่

Fast Fading Channel เกิดจากช่องสัญญาณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยค่าในช่องสัญญาณใกล้เคียงจะต่างกันค่อนข้างมาก จากการทดลองพบว่าระบบ OFDM MIMO จะมีค่า Bit Error Rate สูงมาก ถ้าจะนำไปใช้จะต้องผ่านอุปกรณ์เสียก่อน

5.1.3 สรุปผลการทดลองที่ 4.3

จากการทดลอง โดยใช้การทำ Equalization ปรับ Amplitude และ Phase ของสัญญาณ พบว่าตัว Equalizer สามารถปรับค่า Bit Error Rate ที่เกิดมาจากการ Detect สัญญาณและการรบกวนกันของสัญญาณของเสาข้างเคียง รวมถึงช่องสัญญาณแบบ Fading ด้วยแล้วนั้น ปรากฏว่าค่าที่ออกมาจากการเพิ่มวิธีการ Iterative เข้าไปในการ Equalization พบว่าประสิทธิภาพในการ Detect สัญญาณดีขึ้น เพราะฉะนั้นจึงสามารถเลือกใช้หลักการนี้เข้ามาช่วยลดปัญหาของการ Detect สัญญาณเพิ่มเข้าไปในส่วนของการ Equalization ได้

5.2 สรุปการพัฒนาโครงการ

สิ่งที่ได้พัฒนาขึ้นมาในภาคการศึกษานี้คือการสร้างโปรแกรมจำลองสัญญาณของระบบ OFDM-MIMO System โดยทดลองหาค่า Bit Error Rate ของในแต่ละแบบ แล้วนำมาใช้ทดสอบการผ่านช่องสัญญาณแบบ Fading ทั้ง 3 ชนิด นำหลักการ Iterative ช่องสัญญาณที่เป็นสมการคณิตศาสตร์ ปรับใช้เข้ากับตัว Equalizer เพื่อลดอัตราการเกิด Bit Error Rate ของสัญญาณภาครับให้ดีขึ้น

5.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นในด้านเทคนิค

1. การออกแบบโปรแกรม MATLAB ของระบบ OFDM ค่อนข้างมีความซับซ้อนในการสร้างระบบเนื่องจากปัญหาทางด้านตัวเลข ซึ่งเก็บในรูปแบบของ short e ทำให้การหารหรือคูณตัวเลขในบางครั้ง อาจมีการคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย
2. โปรแกรม MATLAB ไม่สามารถออกแบบสัญญาณ OFDM ให้ Orthogonal กันได้โดยตรง จึงต้องเขียนอยู่ในรูปของสัญญาณที่ถูก Parallel to Serial แล้ว
3. จำนวน Frame ที่ใช้ในการรันยังไม่พอเพียงต่อการทำให้ค่า Bit Error Rate มีความเที่ยงตรงมากกว่าที่เป็นอยู่ ซึ่งดูได้จากกราฟที่ออกมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

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

Chang, R. W. and Gibbey, R. A. 1968. **A theoretical study of performance of an orthogonal multiplexing data transmission scheme.** IEEE Transactions on Communications Technology 16 (4), 529-540.

Saltzberg, B. R. 1967. **Performance of an efficient parallel data transmission system.** IEEE Transactions on Communications Technology 15 (6), 805-811.

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

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

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