

การวิเคราะห์สมรรถนะการส่งผ่านข้อมูลในระบบ MIMO-OFDM
บนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรลีย์

PERFORMANCE ANALYSIS OF DATA TRANSMISSION OVER
RAYLEIGH CHANNEL IN MIMO-OFDM SYSTEM

ธนพงศ์ คุ้มญาติ
TANAPONG KHOMYAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2259-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์สมรรถนะการส่งผ่านข้อมูลในระบบ MIMO-OFDM
บนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรลีย์

PERFORMANCE ANALYSIS OF DATA TRANSMISSION OVER
RAYLEIGH CHANNEL IN MIMO-OFDM SYSTEM



ธนพงศ์ คุ้มญาติ

TANAPONG KHOMYAT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...63416
วัน,เดือน,ปี. 28 ส.ค. 2549



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2259-2

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะการส่งผ่านข้อมูลในระบบ MIMO-OFDM บนช่องสัญญาณการจางหายแบบเรลีย์
นักศึกษา	นายธนพงศ์ คุ้มญาติ
รหัสนักศึกษา	47061003
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สิริชีวะภาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการส่งผ่านข้อมูล ของระบบ MIMO-OFDM (Multiple input Multiple output-OFDM) บนช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์ บนมาตรฐาน IEEE 802.16a โดยใช้วิธีโคเวอริจันต์เชิงสายอากาศแบบการเข้ารหัส STBC (Space-Time Block Code) ทำการจำลองระบบด้วยวิธีมอนติคาร์โล เพื่อหาค่าอัตราผิดพลาดของบิต และอัตราผิดพลาดสัญลักษณ์ เพื่อเปรียบเทียบกับแบบ SVD (Singular Value Decomposition) ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบ STBC มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ SVD เมื่อพิจารณาอัตราผิดพลาดของบิต แต่เมื่อพิจารณาในด้านอัตราความเร็วของการส่งผ่านข้อมูลแล้ว แบบ SVD ส่งข้อมูลได้เร็วกว่า ดังนั้นทั้งสองระบบจึงเป็นทางเลือกในการออกแบบระบบสำหรับใช้งานในระบบสื่อสารที่มีความต้องการแตกต่างกัน

Thesis Title	Performance Analysis of Data Transmission over Rayleigh Channel in MIMO-OFDM System
Student	Mr. Tanapong Khomyat
Student ID.	47061003
Degree	Master of Engineering
Programme	Telecommunications Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suvepon Sittichivapak

ABSTRACT

This thesis presents the simulation to analyze the performance of MIMO-OFDM system (Multiple input Multiple output-OFDM) over Rayleigh fading channel based on IEEE 802.16a standard. In this simulation, Monte-Carlo method is used to evaluate the Bit Error Rate (BER) of STBC (Space-Time Block code) scheme compared with SVD (Singular Value Decomposition) scheme. From the result, STBC provides less BER than SVD. On the other hand, SVD can transfer data at higher rate than STBC. Thus, both systems have different strength and weakness which can be occupied to serve different requirement.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุวิพล สิริชิวภาค เป็นอย่างสูงที่ให้ข้อมูลที่สำคัญมาก ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนช่วยชี้แนวทางในการทำวิจัย เป็นที่ปรึกษาและคอยกระตุ้นเตือนอยู่เสมอทำให้มีกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้คำสั่งสอน และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด ตั้งแต่เริ่มเข้าศึกษาจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ

ขอขอบคุณน้องๆ ที่ห้องแล็บ จุน จอ เปิ้ล ตาล น้องเต็ก และน้องสีฝุ่น ที่ให้คำแนะนำและข้อมูลต่างๆ และกำลังใจที่ทำให้เกิดผลสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณตุ้ม และ น้องสิทธ์ ที่แนะนำเทคนิคการเขียน โปรแกรมที่มีประโยชน์มากในการทำงานวิจัยนี้

คุณค่าและประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอบอบแด่บุคคลที่กล่าวถึงข้างต้น และทุกๆ คนที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ด้วย

ธนพงศ์ คุ้มญาติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	4
2.1 แบบจำลองช่องสัญญาณ.....	4
2.1.1 ช่องสัญญาณรบกวนขาวววกแบบเกาส์.....	4
2.1.2 ช่องสัญญาณจางหายแบบเรลลี.....	5
2.2 ช่องสัญญาณแบบหลายอินพุทหลายเอาต์พุท.....	8
2.3 ระบบ OFDM.....	9
2.3.1 คุณสมบัติของการตั้งฉาก.....	10
2.3.2 เครื่องส่งและเครื่องรับของระบบ OFDM.....	11
2.3.3 การแปลงฟูรีเยร์และการแปลงฟูรีเยร์ผกผันแบบเร็ว.....	14
2.3.4 การแทรกสัญญาณลักษณะช่วงเวลาป้องกัน.....	16
2.3.5 การประมาณช่องสัญญาณ.....	16
2.3.6 รูปแบบของแพ็คเกจข้อมูลที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	17
2.4 รูปแบบของการโคเวอร์ชีดที่ทางสายอากาศแบบต่างๆ.....	18
2.5 วิธีการจำลองระบบ.....	19
2.5.1 วิธีการจำลองแบบมอนติคาร์โล.....	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การไคเวอร์ซิติ์ทางสายอากาศ.....	22
3.1 การเข้ารหัสปริภูมิ-เวลา แบบ Alamouti.....	22
3.2 การเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา.....	26
3.2.1 การเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา สำหรับสัญลักษณ์ที่เป็นจำนวนจริง.....	27
3.2.2 การเข้ารหัสและถอดรหัส STBC สำหรับสัญลักษณ์ที่เป็นจำนวนเชิงซ้อน.....	28
3.2.3 การเข้ารหัส QUASI-ORTHOGONAL STBC.....	32
3.3 เทคนิคการส่งข้อมูล โดยการเข้ารหัส SVD.....	33
บทที่ 4 แบบจำลองของระบบ MIMO-OFDM.....	36
4.1 ระบบ MIMO-OFDM แบบการเข้ารหัส STBC.....	36
4.1.1 แบบจำลองเครื่องส่งของระบบ STBC MIMO-OFDM.....	36
4.1.2 แบบจำลองเครื่องรับของระบบ STBC MIMO-OFDM.....	38
4.2 ระบบ MIMO-OFDM แบบการเข้ารหัส SVD.....	40
4.2.1 แบบจำลองเครื่องส่งของระบบ SVD MIMO-OFDM.....	40
4.2.2 แบบจำลองเครื่องรับของระบบ SVD MIMO-OFDM.....	41
บทที่ 5 การหาค่าสมรรถนะของระบบ.....	43
5.1 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	43
5.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	44
5.3 การประมาณการตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณแบบ LS.....	45
5.3.1 สมรรถนะของระบบ SISO-OFDM เมื่อใช้การประมาณ ช่องสัญญาณแบบ LS.....	46
5.3.2 สมรรถนะของระบบ STBC MISO-OFDM และ STBC MIMO-OFDM เมื่อใช้การประมาณช่องสัญญาณแบบ LS.....	48
5.4 สมรรถนะอัตราความผิดของข้อมูลในระบบ.....	49
5.4.1 ผลกระทบจากค่าความถี่ดอปเปลอร์สูงสุดต่อระบบ SISO-OFDM.....	49
5.4.2 สมรรถนะของระบบ STBC MISO-OFDM และ STBC MIMO-OFDM.....	50
5.4.3 สมรรถนะของระบบ SVD MIMO-OFDM.....	57

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.4.4 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ STBC MIMO-OFDM และ SVD MIMO-OFDM.....	62
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	66
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก ก. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	71

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	44

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการการเกิดสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ.....5
2.2	แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณแบบเรลีย์.....6
2.3	แสดงการตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณแบบเรลีย์ที่มีค่า f_d ต่างกัน.....7
2.4	แสดงช่องสัญญาณ MIMO.....8
2.5	แสดงการเปรียบเทียบการใช้แถบความถี่ของระบบ FDM และระบบ OFDM..... 10
2.6	แสดงคลื่นพาห้ย่อยของ OFDM ที่มีความถี่ต่างกันบนแกนเวลา.....10
2.7	แสดงคลื่นพาห้ย่อยของสัญญาณ OFDM ที่ซ้อนกันบนแกนความถี่.....11
2.8	บล็อกไดอะแกรมเครื่องส่งแบบพื้นฐานระบบ OFDM.....12
2.9	บล็อกไดอะแกรมเครื่องรับแบบพื้นฐานระบบ OFDM.....12
2.10	บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งและเครื่องรับ OFDM ที่ใช้กระบวนการ IFFT และ FFT.....14
2.11	การแทรกสัญญาณลักษณะเวลาควบคุมในระบบ OFDM.....15
2.12	แสดงรูปแบบเฟรมข้อมูลของระบบ OFDM ในแกนเวลา.....16
2.13	แสดงรูปแบบของแพ็คเกจข้อมูลที่ใช้ในการจำลองระบบ.....18
2.14	รูปแบบของการโคเวอรัจที่ดีทางสายอากาศแบบต่างๆ.....18
2.15	แบบจำลองกระบวนการสุ่มแบบมอนติคาร์โล.....19
2.16	แผนผังการคำนวณอัตราผิดพลาดบิต.....20
3.1	การโคเวอรัจดีแบบ Alamouti ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ชุด และสายอากาศรับ 1 ชุด.....24
3.2	การโคเวอรัจดีแบบ Alamouti ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ชุด และสายอากาศรับ N_r ชุด.....25
3.3	โครงสร้างของระบบ STBC ที่เครื่องส่ง.....26
3.4	แสดงโครงสร้างของระบบ SVD.....33
3.5	แสดงระบบ SVD ที่ใช้สายอากาศส่งและรับเท่ากับ 2 และ 3 ตามลำดับ.....34
4.1	บล็อกไดอะแกรมทางด้านเครื่องส่งของระบบ STBC MIMO-OFDM.....37
4.2	แสดงสัญญาณ OFDM ในแกนความถี่เมื่อเข้ารหัส STBC.....38
4.3	บล็อกไดอะแกรมทางด้านเครื่องรับของระบบ STBC MIMO-OFDM.....39
4.4	บล็อกไดอะแกรมทางด้านเครื่องส่งของระบบ SVD MIMO-OFDM.....40
4.5	แสดงสัญญาณ OFDM ในแกนความถี่เมื่อเข้ารหัส SVD.....41
4.6	บล็อกไดอะแกรมทางด้านเครื่องรับของระบบ SVD MIMO-OFDM.....42
5.1	ช่องสัญญาณที่มีการประมาณช่องสัญญาณแบบ LS และช่องสัญญาณในอุดมคติ.....45

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2	แสดงการเปรียบเทียบอัตราผิดพลาดบิตของระบบ SISO เมื่อประมาณช่องสัญญาณแบบ LS เทียบกับแบบที่มีช่องสัญญาณในอุดมคติ.....46
5.3	แสดงการเปรียบเทียบอัตราผิดพลาดเฟ้คเกทข้อมูลของระบบ SISO เมื่อประมาณช่องสัญญาณแบบ LS เทียบกับแบบที่มีช่องสัญญาณในอุดมคติ.....47
5.4	สมรรถนะของระบบ MISO-OFDM และ MIMO-OFDM เมื่อใช้การประมาณช่องสัญญาณแบบ LS.....48
5.5	แสดงผลกระทบจากค่าความถี่ดอปเปลอร์สูงสุดต่อระบบ SISO-OFDM.....49
5.6	สมรรถนะของระบบ SISO-OFDM และ MISO-OFDM ที่ใช้สายอากาศที่เครื่องรับ 1 ชุด.....50
5.7	สมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของระบบ MISO-OFDM และ MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และ 4 ชุด.....51
5.8	สมรรถนะอัตราผิดพลาดเฟ้คเกทของระบบ MISO-OFDM และระบบ MIMO-OFDM เมื่อใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และ 4 ชุด.....52
5.9	สมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่งและด้านรับ 2 ชุด เมื่อใช้การมอดูเลทแบบ 16 QAM และ 64QAM.....53
5.10	สมรรถนะของระบบ STBC MIMO-OFDM ที่มีอัตราการใช้รหัสเท่ากับ 1 และใช้สายอากาศด้านส่งและด้านรับ 8 ชุด เปรียบเทียบกับระบบ SISO.....54
5.11	แสดงสมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของระบบ STBC MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 4 ชุดและรับ 2 ชุด เมื่อระบบใช้การเข้ารหัส STBC ที่มีอัตราแตกต่างกัน.....55
5.12	แสดงสมรรถนะอัตราผิดพลาดเฟ้คเกทของระบบ STBC MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 4 ชุดและรับ 2 ชุด เมื่อระบบใช้การเข้ารหัส STBC ที่มีอัตราแตกต่างกัน.....56
5.13	สมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 3 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK.....57
5.14	สมรรถนะอัตราผิดพลาดเฟ้คเกท ของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 3 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK.....58
5.15	สมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 4 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK.....59
5.16	สมรรถนะอัตราผิดพลาดเฟ้คเกท ของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 4 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK.....60

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17	แสดงสมรรถนะของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด เมื่อกำหนดให้ Eb/No คงที่ 6 dB และ 8 dB และเพิ่มจำนวนของสายอากาศด้านรับ.....61
5.18	แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD RS(7,3) ที่ใช้จำนวนสายอากาศด้านส่ง 2 ชุดและด้านรับ 3 ชุด.....62
5.19	แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD เมื่อใช้จำนวนสายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และด้านรับ 3 ชุด.....63
5.20	แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะอัตราผิดพลาดแพ็คเกทของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD เมื่อใช้จำนวนสายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และด้านรับ 3 ชุด.....64
5.21	แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD ที่ใช้จำนวนสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับเท่ากับ 2 ชุด และ 3 ชุดตามลำดับ เมื่อสมรรถนะของ SVD เป็นของชุดสัญญาณที่ 1.....65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการในการใช้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง มีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงมีการพัฒนาระบบใหม่ๆ ขึ้นมาเพื่อรองรับความต้องการในปัจจุบัน และอนาคต การให้บริการการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงสำหรับผู้ใช้งานในองค์กร หรือบริษัทขนาดเล็ก และในอาคารบ้านเรือนส่วนใหญ่จะใช้บริการ Digital Subscriber Line (xDSL) และ โมเด็มแบบใช้สาย ที่มีค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้งและซ่อมบำรุง

ในการสื่อสารแบบมัลติมีเดียแบบไร้สาย เป็นการส่งข้อมูลความเร็วสูง ผ่านช่องสัญญาณวิทยุ เป็นระบบที่ง่ายต่อการติดตั้งและซ่อมบำรุง แต่เมื่อมีการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงผ่านช่องสัญญาณมัลติพาท จะเกิดปัญหาขึ้นในระบบ คือการแทรกสอดกันระหว่างสัญลักษณ์ (Intersymbol Interference : ISI) ทำให้ทางด้านการรับได้ข้อมูลที่มีคุณภาพไม่ดี และสิ้นเปลืองกำลังส่งสัญญาณ ระบบ Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) [1], [2] เป็นระบบที่ใช้การส่งสัญญาณแบบหลายคลื่นพาห้ (Multi Carrier) ที่ทนต่อช่องสัญญาณจางแบบมัลติพาท สามารถแก้ไขปัญหาการเกิด ISI ได้ดี และมีอัตราความเร็วสูงในการส่งข้อมูล ระบบ OFDM ได้นำไปใช้งานในหลายมาตรฐาน เช่น IEEE 802.11a หรือ HIPERLAN/2 และ IEEE 802.16a หรือ HIPERMAN [3], [4] และนำไปใช้ในการถ่ายทอดสัญญาณเสียงระบบดิจิตอลภาคพื้นดิน (Digital Audio Broadcast : DAB) [5] และการถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิตอลภาคพื้นดิน (Digital Video Broadcast : DVB-T) ในยุโรป

ในปัจจุบันเริ่มมีเทคโนโลยีการเข้าถึงเครือข่ายไร้สายความเร็วสูงแบบ Broadband-Fixed Wireless Access (B-FWA) ที่ติดตั้งสายอากาศบนอาคารสูง เพื่อนำมาใช้แทนระบบใช้สายเดิมที่มีอยู่ โดยทำงานภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.16a ทำการส่งสัญญาณโดยระบบ OFDM ที่นำไปประยุกต์โดยใช้กับเทคนิคการโคเวอเรจซีดีทีเอทางสายอากาศแบบต่างๆ [6] เมื่อทางด้านเครื่องส่งและเครื่องรับประกอบไปด้วยสายอากาศจำนวนหลายชุด เพื่อให้ระบบมีสมรรถนะสูงขึ้นทั้งคุณภาพของข้อมูล และอัตราความเร็วในการส่งข้อมูล ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอเทคนิคการโคเวอเรจซีดีทีเอทางสายอากาศนำมาใช้ร่วมกับระบบ OFDM ทั้งแบบ Spatial Diversity (Space-Time Block Code : STBC) [7] ที่มีอัตราความผิดพลาดของข้อมูลต่ำ และแบบ Spatial Multiplexing (Singular Value Decomposition : SVD) [8] ที่อัตราการส่งข้อมูลมีความเร็วสูง เพื่อนำสมรรถนะของทั้งสองระบบมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกันในด้านต่างๆ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังที่จะทำการศึกษาดังต่อไปนี้

1.2.1 ศึกษากระบวนการสื่อสารที่ใช้การโคเดออร์ซิติ์ทางสายอากาศ เพื่อนำไปใช้กับระบบ OFDM รวมถึงการเข้ารหัสและถอดรหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา และแบบที่ใช้การเข้ารหัสโดยการคำนวณตัวแปรจากช่องสัญญาณ

1.2.2 ศึกษากระบวนการทำงานของระบบ MIMO-OFDM ที่ใช้เทคนิคการโคเดออร์ซิติ์ทางสายอากาศ 2 วิธี คือ แบบรหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา (STBC MIMO-OFDM) และแบบการเข้ารหัสโดยการคำนวณตัวแปรจากช่องสัญญาณ (SVD MIMO-OFDM)

1.2.3 ศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบที่จำลอง ทั้งสองระบบ เช่น จำนวนสายอากาศทางด้านเครื่องส่ง และด้านเครื่องรับ การหาสมรรถนะอัตราผิดพลาดของข้อมูล เมื่อผ่านช่องสัญญาณ และนำผลการจำลองระบบทั้งสอง มาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ในการส่งข้อมูลแบบการเข้ารหัสโดยการคำนวณตัวแปรจากช่องสัญญาณ (SVD MIMO-OFDM) เป็นระบบที่มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลสูง เนื่องจากสามารถส่งสัญญาณจากสายอากาศส่งหลายชุดได้ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นระบบน่าจะมีอัตราความผิดพลาดของข้อมูล มากกว่าแบบรหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา ดังนั้นถ้าระบบเลือกส่งสัญญาณเฉพาะช่องสัญญาณที่ดี น่าจะทำให้สมรรถนะของระบบเพิ่มขึ้นได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะจำลองระบบ MIMO-OFDM สองแบบ คือรหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา ที่ต้องอาศัยทฤษฎีการตั้งฉากของสัญญาณที่จะส่งออกอากาศ ที่ระบบจะต้องทำการถอดรหัสที่เครื่องรับโดยใช้การรวมสัญญาณ และระบบที่สอง คือระบบที่เข้ารหัสโดยการคำนวณตัวแปรจากช่องสัญญาณ (SVD MIMO-OFDM) หลักการสำคัญที่ใช้ คือการแยกเมตริกย่อยออกจากเมตริกวมของช่องสัญญาณ โดยใช้วิธีการแยกเมตริกแบบ SVD (Singular Value Decomposition)

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยฉบับนี้เสนอการส่งสัญญาณของระบบ MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศส่งและรับมากกว่า 1 ชุด สัญญาณที่ไปยังเครื่องรับจะมีหลายเส้นทางดังนั้น แบบจำลองของช่องสัญญาณจะเป็นแบบ MIMO (Multiple input Multiple output) ในการจำลองระบบจะสมมุติให้ช่องสัญญาณเป็นชนิดที่มีการจางหายช้าแบบเรย์ลี (Slow-varying channel) ที่ในชุดข้อมูลเดียวกัน จะได้รับผลกระทบ จากช่องสัญญาณเหมือนกัน หรืออาจเรียกว่า Flat Rayleigh fading channel

ในการจำลองจะไม่พิจารณาระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ ที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ และไม่พิจารณาค่าอัตราขยายของสายอากาศทั้งด้านเครื่องส่งและเครื่องรับ และสมมุติว่าระบบมีการประมาณช่องสัญญาณได้สมบูรณ์ หรือเป็นช่องสัญญาณในอุดมคติ และช่องสัญญาณแต่ละช่องมีความอิสระต่อกัน การจำลองระบบใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาสมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และแบบ SVD ในรูปของอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Rate : BER) เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทคือ

บทที่1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย เช่น คุณสมบัติของช่องสัญญาณจางหาย ช่องสัญญาณแบบ MIMO พื้นฐานของระบบ OFDM และหลักการพื้นฐานในการจำลองระบบ

บทที่3 กล่าวถึงการเข้ารหัสและการถอดรหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา และระบบที่เข้ารหัส โดยการคำนวณตัวแปรจากช่องสัญญาณ โดยการแยกเมตริกของช่องสัญญาณ ที่ใช้หลักการของ SVD (Singular Value Decomposition)

บทที่4 กล่าวถึงหลักการของแบบจำลองระบบ STBC MIMO-OFDM และระบบ SVD MIMO-OFDM แสดงหลักการของการส่งและรับข้อมูล แสดงขั้นตอนการเข้ารหัสและถอดรหัสที่เครื่องรับและเครื่องส่งแต่ละแบบ

บทที่5 กล่าวถึงการหาสมรรถนะของระบบ พารามิเตอร์ที่ใช้และผลการจำลองระบบ เพื่อนำมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบในรูปของอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Rate : BER)

บทที่6 เป็นการสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะของช่องสัญญาณที่ใช้ในการจำลองระบบ ช่องสัญญาณ MIMO และทฤษฎีพื้นฐานของระบบ OFDM ซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นในการที่จะนำไปจำลองระบบ เพื่อหาสมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM

2.1 แบบจำลองช่องสัญญาณ (Channel Model)

ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณจะส่งผ่านสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่อยู่โดยรอบทำให้เกิดสัญญาณรบกวน การหน่วงเวลา และการจางหายเนื่องจากสัญญาณที่ถูกสะท้อนจากสิ่งกีดขวาง (Scatterer) รวมถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น สัญญาณรบกวนขาวบวม ดังนั้นการจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เป็นผลมาจากช่องสัญญาณด้วย

2.1.1 ช่องสัญญาณรบกวนขาวบวมแบบเกาส์ (AWGN)

ในการจำลองช่องสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับนั้น จะกำหนดให้สัญญาณได้รับการรบกวนจากสัญญาณรบกวน AWGN ดังรูปที่ 1 จะได้สมการดังนี้

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (2.1)$$

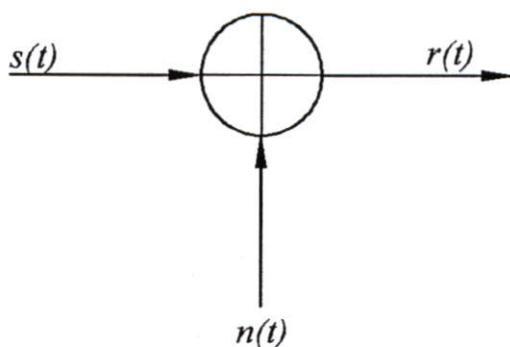
เมื่อ $r(t)$ คือสัญญาณที่เครื่องรับ

$s(t)$ คือสัญญาณจากเครื่องส่ง

$n(t)$ คือสัญญาณรบกวน ที่มีค่า Power Spectrum density ดังสมการต่อไปนี้

$$\Phi_{nn}(f) = \frac{1}{2} N_0 [W / Hz] \quad (2.2)$$

เมื่อ N_0 คือค่าคงที่หรือความหนาแน่นของพลังงานรบกวน และในการจำลองกำหนดให้ $n(t)$ มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ มีความแปรปรวนเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 2.1 กระบวนการการเกิดสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ

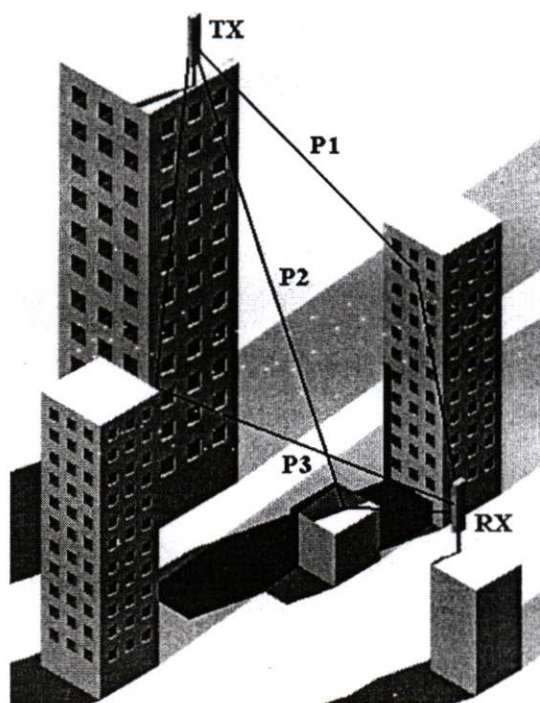
สัญญาณที่เครื่องรับจะเกิดความผิดพลาดเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนขาววอกแบบเกาส์ ทำให้การคืนสัญญาณเดิมเกิดความผิดพลาดขึ้น

2.1.2 ช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์ (Rayleigh Fading Channel)

การส่งข้อมูลจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับ สัญญาณจะได้รับผลกระทบจากการจางหายหลายวิธีของช่องสัญญาณ ระบบที่จำลองมีการส่งแบบกระจายสัญญาณ (Broadcasting) ซึ่งส่งสัญญาณออกไปในทิศทางที่กว้าง หรือส่งในสถานะไม่เป็นระดับสายตา (Non-LOS) ดังนั้นโอกาสที่สัญญาณเดียวกันหลายๆสัญญาณ จะสะท้อนวัตถุต่างๆในสิ่งแวดล้อมในระบบ ไปสู่เครื่องรับจึงมีมาก ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าวสมมุติได้ว่าช่องสัญญาณของระบบเป็นแบบเรลีย์ โดยที่ตัวแปรสำคัญของช่องสัญญาณคือ จำนวนวิถี (path) และค่าหน่วงเวลา (delay) ในระบบกำหนดให้ช่องสัญญาณมีการจางหายแบบช้า เนื่องจากระบบที่จำลองเป็นแบบ Fixed Broadband ทั้งเครื่องรับและเครื่องส่งมีตำแหน่งคงที่ อาจเรียกว่าช่องสัญญาณเป็นแบบ Flat Rayleigh Fading ที่ในช่วงเฟรมข้อมูลเดียวกันจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณเหมือนกัน สัญญาณที่เครื่องรับจะเป็นผลรวมของสัญญาณในแต่ละเส้นทาง (superposition) ซึ่งได้รับผลกระทบจากการจางหายของช่องสัญญาณแตกต่างกันด้วย ดังนั้นเมื่อช่องสัญญาณมีการแกว่งของระดับการจางหาย จะทำให้สัญญาณที่ได้รับอาจมีการเสริมกัน หรือหักล้างกันได้

จากรูปที่ 2.2 แสดงการส่งสัญญาณจาก TX ผ่านช่องสัญญาณ 3 เส้นทางคือ P1, P2 และ P3 สัญญาณทั้ง 3 เส้นทางที่มีทั้งขนาดและช่วงเวลาที่ต่างกันจะไปรวมกันที่ RX โดยสัญญาณในเส้นทางที่ n สามารถแสดงได้ดังนี้

$$r_n(t) = \text{Re}[\alpha_n(t) \exp(j2\pi f_c t)] \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองช่องสัญญาณแบบเรลลีย์

เมื่อ f_c คือความถี่ในการส่งสัญญาณและ $\alpha_n(t)$ คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของช่องสัญญาณ เมื่อสมการที่ (2.3) คือสัญญาณเส้นทางที่ n ดังนั้นสัญญาณรวมจำนวน N เส้นทางที่เครื่องรับสามารถแสดงได้ดัง สมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 r(t) &= \sum_{n=1}^N r_n(t) \\
 &= \text{Re} \left[\left(\sum_{n=1}^N \alpha_n(t) \right) \exp(j2\pi f_c t) \right] \\
 &= \text{Re} \left[(x(t) + jy(t)) (\cos 2\pi f_c t + j \sin 2\pi f_c t) \right] \\
 &= x(t) \cos 2\pi f_c t - y(t) \sin 2\pi f_c t
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

เมื่อ $x(t)$ และ $y(t)$ มีการแจกแจงแบบเรลลีย์ จะได้สมการเพื่อทำการจำลองช่องสัญญาณการจางหายแบบจำนวนเชิงซ้อน [9] ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 h(t) &= x(t) + j \cdot y(t) \\
 &= \left[\sqrt{\frac{2}{N+1}} \sum_{n=1}^N \cos\left(\frac{\pi n}{N}\right) \cos\left\{2\pi f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)t\right\} + \frac{1}{\sqrt{N+1}} \cos(2\pi f_d t) \right] \\
 &\quad + j \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{\pi n}{N}\right) \cos\left\{2\pi f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)t\right\}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

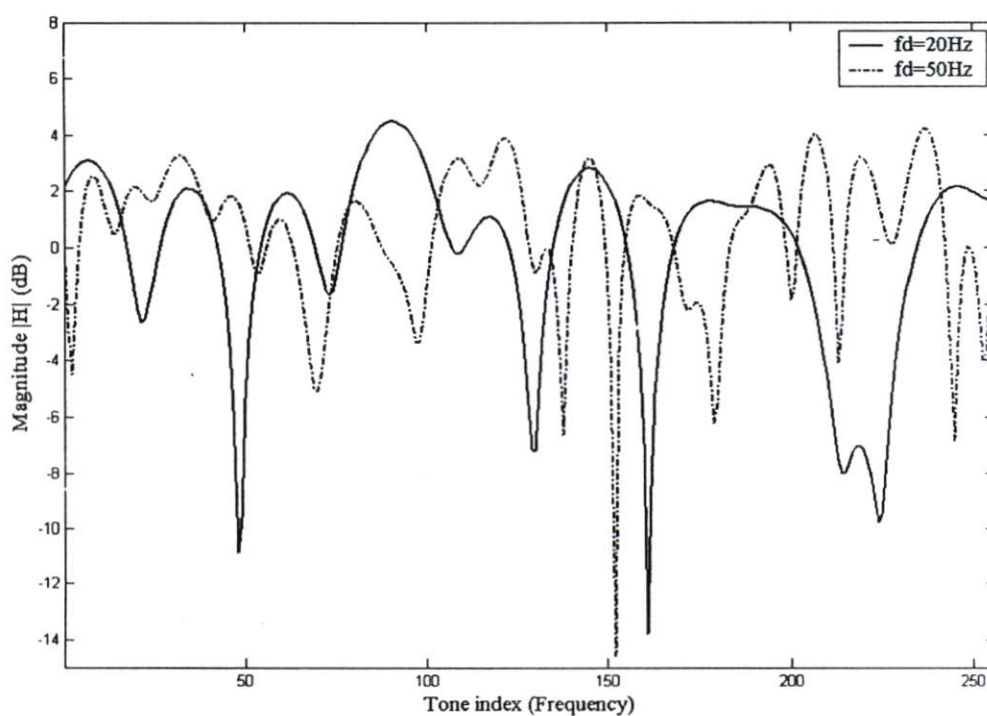
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองระบบที่ตำแหน่งของเครื่องส่งและเครื่องรับคงที่ ดังนั้นค่า f_d หรือความถี่ดอปเปลอร์ (Doppler Spread) ในสมการที่ (2.5) จึงกำหนดให้มีค่าน้อยสัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องรับ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$f_d = v / \lambda = v \cdot f_c / c \quad (2.6)$$

เมื่อ v คือความเร็วของเครื่องรับ ถ้าระบบส่งที่ความถี่ 5 GHz และกำหนด $v = 3$ m/s จะมีค่า f_d เท่ากับ 50 Hz ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่า f_d มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณจางหาย และได้นำไปพิจารณาเพื่อแบ่งชนิดของช่องสัญญาณที่จะจำลองกับระบบ ดังสมการต่อไปนี้

$$T_c = 1 / f_d \quad (2.7)$$

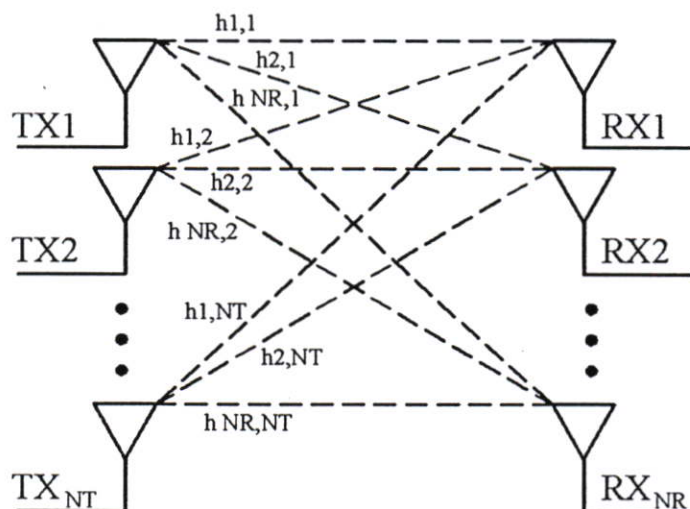
เมื่อ T_c คือ ค่าเวลาร่วมกัน (Coherent Time) ของช่องสัญญาณ ช่องสัญญาณจะเป็นการจางหายแบบช้า (Slow fading) ถ้าช่วงเวลาของแต่ละสัญลักษณ์ T_s มีค่าน้อยกว่าค่าเวลาร่วมกันของช่องสัญญาณ และในทางกลับกันจะเป็นการจางหายแบบเร็ว (Fast fading) ถ้าค่า $T_s > T_c$ ในการจำลองระบบมีช่วงสัญลักษณ์ T_s เท่ากับ 11.1us จากสมการที่ (2.7) มีค่า T_c เท่ากับ 20ms ดังนั้นการจำลองระบบมีช่องสัญญาณจางหายแบบช้า การเปลี่ยนแปลงของระดับการจางหายของช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับค่า f_d ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการตอบสนองทางความถี่ของช่องสัญญาณแบบเรลีย์ที่มีค่า f_d ต่างกัน

2.2 ช่องสัญญาณแบบหลายอินพุทหลายเอาต์พุท (MIMO)

เมื่อจำนวนสายอากาศที่เครื่องส่งและเครื่องรับมีจำนวนหลายชุด การพิจารณาช่องสัญญาณจะมีความซับซ้อนมากกว่าแบบระบบที่ใช้สายอากาศ 1 ชุด และในการถอดรหัสที่เครื่องรับจะต้องใช้เทคนิคในการโคเดอร์ซีดีทีทีที่มีรูปแบบสัมพันธ์กับด้านเครื่องส่ง ช่องสัญญาณ MIMO มีลักษณะดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 แสดงช่องสัญญาณ MIMO

จากรูปที่ 2.4 จำนวนของเส้นทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับมีค่าเท่ากับ $N_R \times N_T$ เส้นทาง เมื่อ N_T คือจำนวนสายอากาศด้านส่ง และ N_R คือจำนวนสายอากาศด้านรับ การกำหนดช่องสัญญาณรวมของ MIMO จะแสดงอยู่ในรูปของเมตริก ที่มีขนาดเท่ากับ $N_R \times N_T$ ดังสมการต่อไปนี้

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \cdots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

เมื่อ H คือเมตริกของช่องสัญญาณ MIMO ทุกเส้นทางที่มีสมาชิกภายในคือ h_{ij} (ได้จากสมการที่ 2.5) เป็นการตอบสนองของช่องสัญญาณจากสายอากาศส่งตัวที่ j ไปยังสายอากาศรับตัวที่ i เมื่อ h_{ij} มีค่าสัมพันธ์เชิงซ้อนของช่องสัญญาณที่มีการแจกแจงแบบเรลลีส์และมีการเปลี่ยนแปลงของการจางหายแบบช้า (Slow fading) และมีค่าประวิงเวลาของช่องสัญญาณน้อยเมื่อเทียบกับช่วงเวลาของสัญลักษณ์ โดยในช่วงเฟรมข้อมูลเดียวกันบิตข้อมูลจะได้รับผลจากการจางหายเหมือนกันทุกบิต

ในการจำลองระบบ สายอากาศด้านส่งแต่ละอันจะใช้กำลังงานเท่ากับ P/N_t เมื่อ P คือ กำลังส่งรวมของสถานี [10] และสายอากาศที่ด้านรับแต่ละต้นจะได้รับกำลังงานเท่ากับ P ดังนั้น ค่า SNR ที่เครื่องรับมีค่าเท่ากับ $\gamma = P/\sigma^2$ เมื่อ σ^2 คือกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ ในการส่งสัญญาณจะไม่พิจารณาการลดทอน (Attenuation) ที่เกิดจากการผ่านตัวกลาง ในการแพร่สัญญาณ หรือจะไม่พิจารณาระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ และไม่คำนึงถึง อัตราขยาย (Amplification) ของสายอากาศทั้งด้านส่งและด้านรับ

ระบบที่จำลองจะใช้แบบจำลองเชิงเส้น (Linear Model) กับสัญญาณที่ด้านเครื่องรับ เพื่อนำไปวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ ดังสมการต่อไปนี้

$$r = Hx + n \quad (2.9)$$

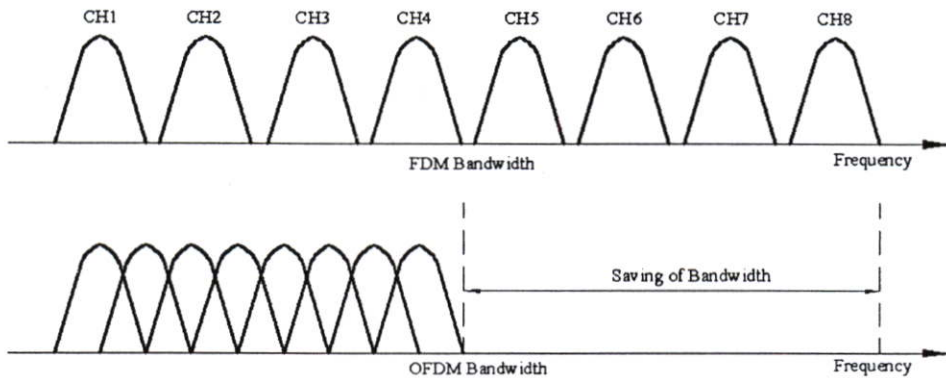
เมื่อ r คือสัญญาณด้านรับที่อยู่ในรูปคอลัมน์เมตริกมีขนาดเท่ากับ $N_r \times 1$, H คือเมตริกของช่องสัญญาณใน สมการที่ (2.8), x คือสัญญาณจากเครื่องส่งที่อยู่ในรูปคอลัมน์เมตริกมีขนาดเท่ากับ $N_t \times 1$ และ n คือสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับที่อยู่ในรูปคอลัมน์เมตริกมีขนาดเท่ากับ $N_r \times 1$

2.3 ระบบ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

การส่งสัญญาณแบบ OFDM [1], [2] ใช้เทคนิคการส่งแบบหลายคลื่นพาห์ (Multi-Carrier) ส่งผ่านช่องสัญญาณออกไปในช่วงเวลาเดียวกัน โดยส่งข้อมูลแบบขนาน แล้วทำการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบแบ่งช่วงความถี่ (Frequency division multiplexing : FDM) ในการส่งสัญญาณหลายคลื่นพาห์แบบเดิมนั้นจะแบ่งคลื่นพาห์ออกเป็นช่วงๆจะได้คลื่นพาห์ย่อย (Sub-carrier) จำนวนมากกว่าแบนด์วิดท์ที่มี โดยที่แต่ละคลื่นพาห์ย่อยจะไม่มีการซ้อนทับกันของสเปกตรัมความถี่ แล้วสัญญาณคลื่นพาห์ย่อยทั้งหมด จะส่งออกช่องสัญญาณโดยใช้การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ ตัวอย่างการใช้งานระบบ FDM เช่น การส่งสัญญาณของสถานีวิทยุคลื่น FM ที่แต่ละสถานีใช้คลื่นพาห์แตกต่างกันที่มีแถบความถี่จำกัด ส่งผ่านช่องสัญญาณออกไปโดยไม่มีการรบกวนซึ่งกันและกัน และที่ด้านเครื่องรับสามารถเลือกรับช่วงความถี่ที่ต้องการได้โดยใช้วงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน (Band pass filter) แล้วทำการดีมอดูเลทสัญญาณที่ต้องการคืนกลับมาได้

อย่างไรก็ตามการส่งแบบวิธี FDM ยังไม่สามารถใช้แถบความถี่ได้อย่างคุ้มค่า ดังนั้นจึงมีการคิดวิธีการส่งสัญญาณแบบขนาน และทำการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่เป็นคลื่นพาห์ย่อยจำนวนมากที่มีการซ้อนทับกัน โดยที่คลื่นพาห์ย่อยจำนวนมากนั้น จะมีคุณสมบัติการตั้งฉาก (Orthogonal) ซึ่งกันและกัน โดยที่ไม่มีการรบกวนกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 แสดงการใช้งานแถบความถี่ของวิธีการมัลติเพล็กซ์ทั้ง 2 วิธี ที่แบบ FDM แสดงแถบความถี่ที่ไม่ซ้อนทับกัน

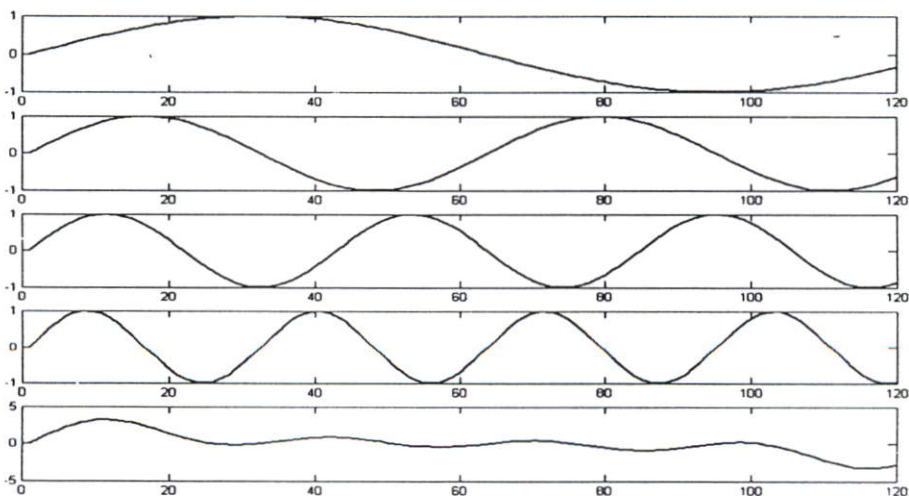
เปรียบเทียบกับแบบ OFDM ที่แถบความถี่ซ้อนทับกัน จะเห็นได้ว่าสามารถลดช่วงการใช้แถบความถี่ได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถใช้งานแถบความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าวิธีเดิม



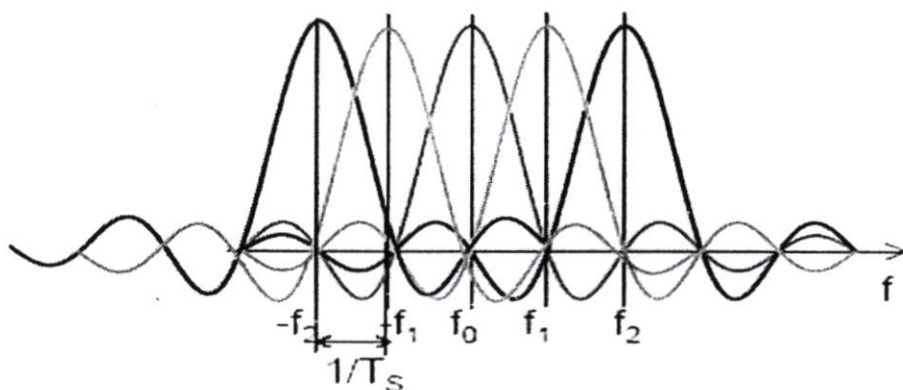
รูปที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบการใช้แถบความถี่ของระบบ FDM และระบบ OFDM

2.3.1 คุณสมบัติของการตั้งฉาก

ระบบ OFDM นั้นใช้การส่งคลื่นพาห่อย่อยที่มีคุณสมบัติตั้งฉากกันในแกนความถี่ (Frequency Domain) ทำให้สามารถส่งข้อมูลข่าวสารในคลื่นพาห่ที่แตกต่างกัน โดยไม่มีการรบกวนกัน สัญญาณ OFDM สามารถสร้างสัญญาณได้จากผลรวมของสัญญาณไซน์ (Sinusoid signal) หลายๆสัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณก็คือคลื่นพาห่อย่อยๆความถี่เบสแบนด์ (Base-band frequency) ของแต่ละคลื่นพาห่อย่อย จะกำหนดให้เป็นจำนวนเต็มของส่วนกลับของช่วงเวลาของสัญลักษณ์ โดยผลที่ได้จะทำให้แต่ละคลื่นพาห่อย่อยนั้นจะมีจำนวนรอบเป็นจำนวนเต็มในหนึ่งสัญลักษณ์ และผลที่ตามมาจะทำให้คลื่นพาห่อย่อยนั้นตั้งฉากกัน



รูปที่ 2.6 แสดงคลื่นพาห่อย่อยของ OFDM ที่มีความถี่ต่างกันบนแกนเวลา



รูปที่ 2.7 แสดงคลื่นพาห่อย่อยของสัญญาณ OFDM ที่ซ้อนกันบนแกนความถี่

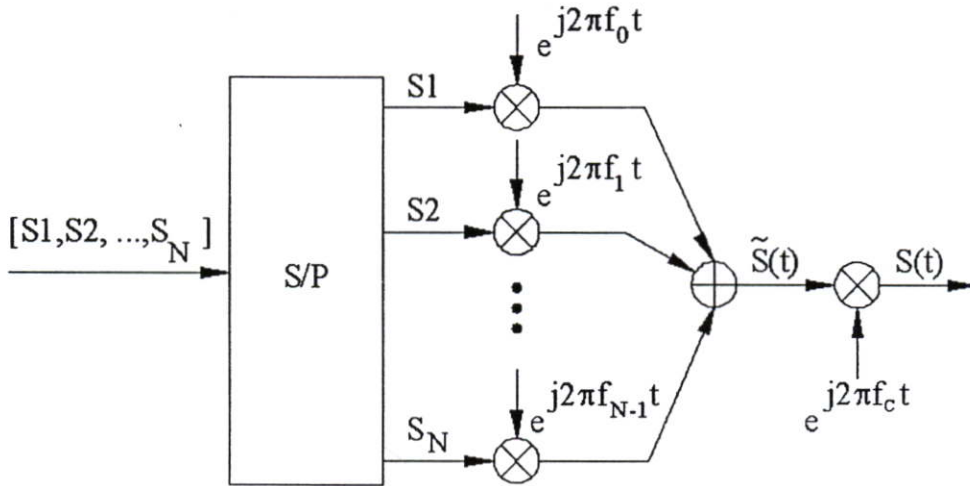
จากรูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบของสัญญาณ OFDM บนแกนเวลาที่มีคลื่นพาห่อย่อย 4 คลื่นพาห้ สังเกตว่าในแต่ละสัญญาณย่อยจะมีลูกคลื่นจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ลูกคลื่น ในช่วงเวลาหนึ่งสัญลักษณ์ โดยที่รูปด้านล่างสุด คือสัญญาณรวมของทั้ง 4 คลื่นพาห้ รูปที่ 2.7 แสดงคลื่นพาห่อย่อยบนแกนความถี่โดยใช้ FFT (Fast Fourier Transform)

คุณสมบัติของการตั้งฉากของสัญญาณ OFDM ก็คือเมื่อสัญญาณของคลื่นพาห่อย่อยแสดงบนแกนความถี่ ซึ่งสัญญาณแต่ละคลื่นจะมีลักษณะรูปคลื่นเป็นสัญญาณซิงค์ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 แต่ละคลื่นพาห้จะมีกึ่งกลางขอดคลื่นที่มีตำแหน่งตรงกับตำแหน่งที่สัญญาณอื่น ๆ มีระดับสัญญาณเป็นศูนย์ (Null) โดยที่จุดขอดคลื่นของแต่ละสัญญาณจะมีระยะห่างกันตามแกนความถี่เท่ากับ $1/T_s$ เมื่อ T_s คือช่วงเวลาของสัญลักษณ์ ดังนั้นคลื่นพาห่อย่อยของสัญญาณ OFDM มีระยะห่าง $\Delta f = 1/T_s$ เพราะฉะนั้นเครื่องรับจะต้องแซมเปิดสเปกตรัมของสัญญาณ OFDM ที่ตำแหน่งกึ่งกลางขอดคลื่นของแต่ละคลื่นพาห้อย่อย ดังนั้นการที่แถบความถี่ของคลื่นพาห้อย่อยซ้อนทับกัน จะไม่มีผลกระทบที่เครื่องรับ เพราะที่จุดขอดของคลื่นนั้น สัญญาณอื่นจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของการตั้งฉากกันของแต่ละคลื่นพาห้อย่อย

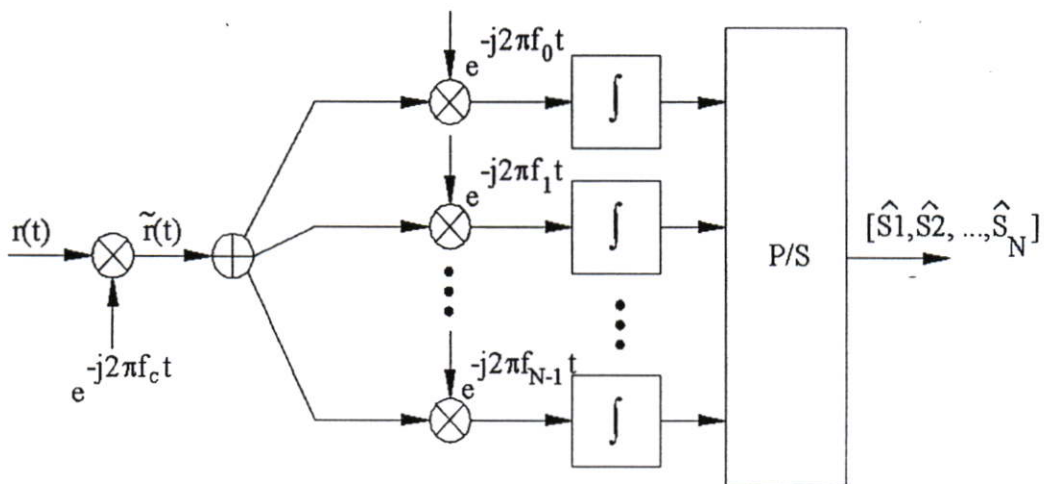
2.3.2 เครื่องส่งและเครื่องรับของระบบ OFDM

การส่งข้อมูลของระบบ OFDM จะมีเป็นแบบขนานที่มีโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 เมื่อรูปที่ 2.8 แสดงรูปเครื่องส่ง OFDM ที่มีสัญลักษณ์ที่เข้าไปในระบบในรูปแบบอนุกรม จำนวนชุดละ N สัญลักษณ์ ที่มีอัตราเร็วข้อมูลเท่ากับ R_s และมีช่วงเวลาสัญลักษณ์เท่ากับ T_s สัญลักษณ์แบบอนุกรมจะถูกแปลงรูปแบบจากอนุกรมเป็นขนาน (Serial to Parallel Converter : S/P) จำนวน N สัญลักษณ์ที่มีอัตราเร็วของข้อมูลเท่ากับ R_s/N แล้วจะถูกมอดูเลทกับคลื่นพาห้อย่อยที่มีความถี่ต่างกัน คือ $f_0, f_1, f_2, \dots, f_{N-1}$ โดยที่แต่ละคลื่นพาห้อย่อยจะห่างกันเท่ากับ $\Delta f = 1/NT_s$ ทำให้ช่วงห่างของแต่ละคลื่นพาห้อย่อยห่างกันเป็นจำนวนเท่าดังนี้ $f_0=f_0, f_1=f_0+\Delta f,$

$f_2=f_0+2\Delta f$, $f_3=f_0+3\Delta f$, ... , $f_{N-1}=f_0+(N-1)\Delta f$ การแปลงข้อมูลเป็นขนานจะทำให้ช่วงสัญญาณเพิ่มขึ้นจาก T_s เป็น NT_s จะทำให้สัญญาณของระบบ OFDM ได้รับผลกระทบจากการหน่วงเวลา (Delay spread) ของช่องสัญญาณน้อยลง หลังจากสัญญาณผ่านการมอดูเลตด้วยคลื่นพาห่อย่อยแล้วจะรวมสัญญาณกันก่อนที่จะส่งสัญญาณ OFDM ผ่านสายอากาศออกไปยังเครื่องรับ



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมเครื่องส่งแบบพื้นฐานระบบ OFDM



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมเครื่องรับแบบพื้นฐานระบบ OFDM

จากรูปที่ 2.8 สามารถแสดงสมการของสัญญาณส่ง OFDM ได้ดังต่อไปนี้

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} s_{k+1} \exp[j2\pi(f_k + f_c)t] \right\} \quad (2.10)$$

เมื่อ $0 \leq t \leq T_s$ จากสมการที่ (2.10) สามารถเขียนสมการ OFDM ในรูปสัญญาณแถบความถี่ต่ำ สมมูล ได้ดังสมการที่ (2.11)

$$\tilde{S}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} S_k \exp(j2\pi f_k t) \quad (2.11)$$

กำหนดให้ $f_k = f_0 + k\Delta f$ เมื่อ $k = 0, 1, \dots, N-1$ และ $\Delta f = 1/T = 1/NT_s$ สมการที่ (2.11) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

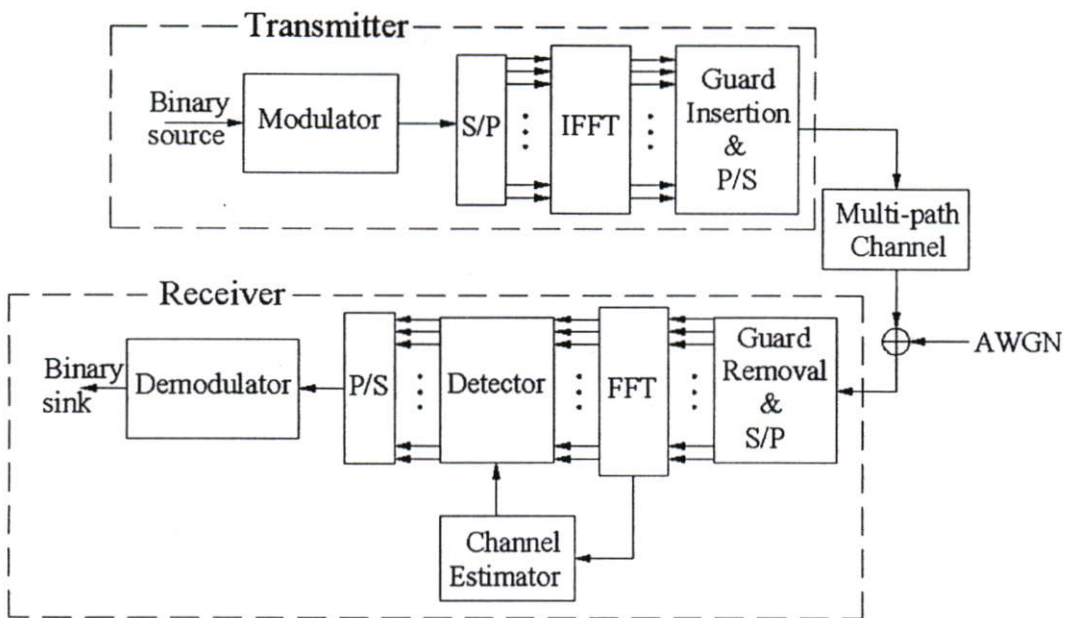
$$\tilde{S}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} S_k \exp\left[j2\pi\left(\frac{k}{NT_s}\right)t\right] \quad (2.12)$$

ถ้ามีการแซมเปิลสัญญาณ $\tilde{s}(t)$ ในสมการที่ (2.12) ที่ทุกๆเวลา $t = nT_s$ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} s_k \exp(j2\pi kn/N) = IDFT\{s_k\} \quad (2.13)$$

สมการที่ (2.13) เป็นสัญญาณ OFDM ที่ได้มาจากการผ่านกระบวนการ IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) และที่เครื่องรับจะใช้กระบวนการ DFT เนื่องจากการคำนวณทั้ง 2 กระบวนการใช้การคำนวณที่ซับซ้อน ดังนั้นที่เครื่องส่งและเครื่องรับ OFDM จะใช้กระบวนการ IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) และ FFT (Fast Fourier Transform) แทนแบบเดิมเพื่อลดจำนวนครั้งในการคำนวณ เมื่อแบบ IDFT และ DFT จะต้องมีการคูณกันแบบจำนวนเชิงซ้อนเท่ากับ N^2 ครั้ง สำหรับการคำนวณ N จุด ในขณะที่กระบวนการ IFFT [11] และ FFT จะมีการคำนวณเพียง $N \log_2 N$ เท่านั้น [12]

ในรูปที่ 2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งและเครื่องรับ OFDM ที่ใช้กระบวนการ IFFT และ FFT ที่มีการเพิ่มช่วงเวลาการป้องกัน (Guard time) เพื่อลดปัญหาการรบกวนกันระหว่างสัญลักษณ์ และการประมาณช่องสัญญาณ ดังที่จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งและเครื่องรับ OFDM ที่ใช้กระบวนการ IFFT และ FFT

2.3.3 การแปลงฟูรีเยร์และการแปลงฟูรีเยร์ผกผันแบบเร็ว

จากหัวข้อที่ผ่านมาการใช้ IDFT และ DFT เพื่อทำการมอดูเลตข้อมูลกับคลื่นพาห่อย่อยแบบขนาน มีความซับซ้อนมากในการคำนวณ ดังนั้นหัวข้อนี้จะแสดงรูปแบบของสัญญาณเมื่อมีการผ่านกระบวนการ IFFT และ FFT ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 ว่ามีรูปสมการของสัญญาณเป็นอย่างไร

2.3.3.1 การแปลงฟูรีเยร์ผกผันแบบเร็ว

เมื่อมีพิกข้อมูลถูกมอดูเลตสัญญาณที่ได้จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบของสัญญาณ I และ Q คือ

$$d_n = d_{i_n} + jd_{q_n} \quad (2.14)$$

เมื่อ d_i และ d_q คือ $\{1, -1\}$ ในกรณีการมอดูเลตแบบ QPSK และ $\{\pm 1, \pm 3\}$ สำหรับ 16QAM และ $\{\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7\}$ สำหรับ 64QAM จากนั้นสัญญาณแบบอนุกรมจะถูกแปลงเป็นขนานแล้วทำกับมอดูเลตกับคลื่นพาห่อย่อยโดยทำการแปลงฟูรีเยร์ผกผันแบบเร็ว ดังสมการต่อไปนี้

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{N-1} d_i(k) \exp(j2\pi f_i(t - kT_S)) f(t - kT_S) \quad (2.15)$$

เมื่อ N คือจำนวนคลื่นพาห่อย่อยที่ใช้ในระบบ ซึ่งใช้ $N = 256$ และ $f(t)$ คือสัญญาณพัลส์ของแต่ละสัญลักษณ์ซึ่งนิยามโดย

$$f(t) = \begin{cases} 1 & ; 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.16)$$

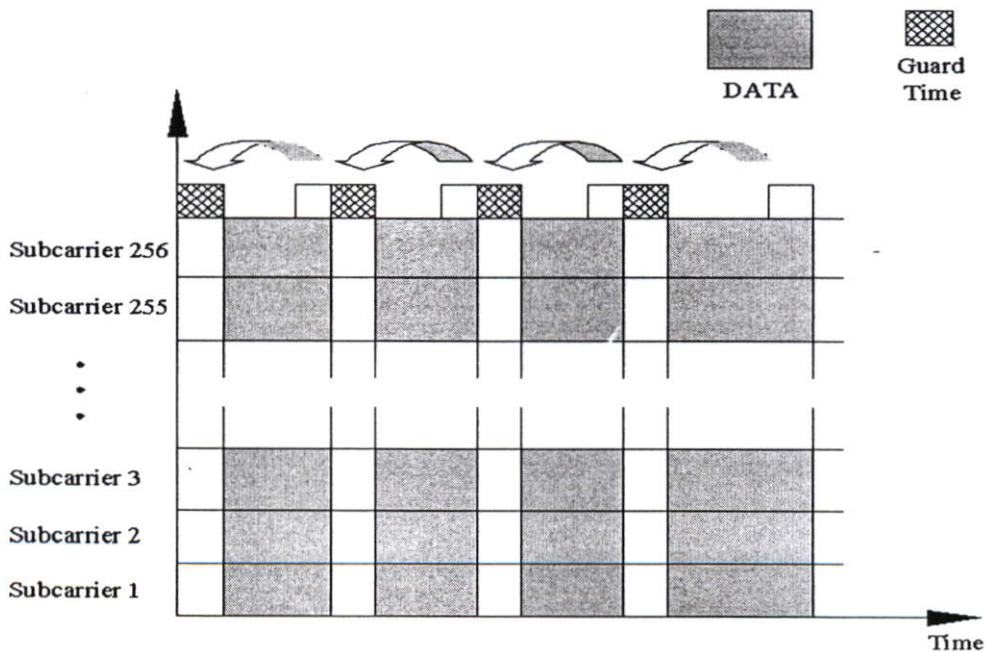
2.3.3.2 การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว

หลังจากที่สัญญาณ OFDM ผ่านช่องสัญญาณแล้ว เมื่อมาที่เครื่องรับ จะแปลงสัญญาณในแกนเวลา มาเป็นแกนความถี่โดยใช้การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว ดังสมการต่อไปนี้

$$r(t) = \int_0^{\infty} h(\tau, t) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (2.17)$$

ในส่วนเครื่องรับ สัญญาณที่รับได้ จะผ่านกระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วเพื่อแปลงสัญลักษณ์ กลับมาในแกนความถี่คือ

$$\hat{d}_i(k) = \frac{1}{T_s} \int_{kT_s}^{T_s+kT_s} r(t) \exp(-j2\pi f_i(t - kT_s)) dt \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.11 การแทรกสัญลักษณ์เวลาควบคุมในระบบ OFDM

2.3.4 การแทรกสัญลักษณ์ช่วงเวลาป้องกัน (Guard interval symbol)

เนื่องจากในทางปฏิบัติระบบ OFDM ยังมีการแทรกสอดของสัญลักษณ์ทำให้ข้อมูลที่ได้รับผิดพลาดมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการใช้วิธีที่จะลดผลกระทบจากการแทรกสอด โดยการเพิ่มคาบของสัญลักษณ์ให้มากขึ้น ใช้วิธีการแทรกกลุ่มบิตหรือสัญลักษณ์ที่ทราบค่าใส่เข้าไปด้านหน้าของสัญลักษณ์ OFDM ในทุกๆสัญลักษณ์ในแต่ละคลื่นพาห่อย่อยในแกนเวลา จะเป็นผลทำให้คาบของสัญลักษณ์กว้างมากขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11

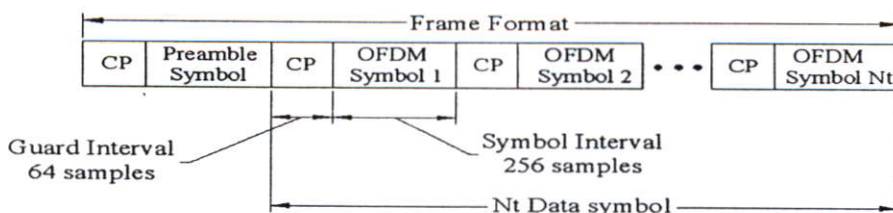
$$T_{\text{total}} = T_s + T_g \quad (2.19)$$

เมื่อค่า T_g คือช่วงเวลาป้องกัน [13] ดังนั้นสัญลักษณ์ OFDM จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกคือข้อมูลสัญลักษณ์ และส่วนที่สองอยู่ด้านหลังของสัญลักษณ์แล้วถูกคัดลอกมาประกอบที่ด้านหน้าของสัญลักษณ์ บางครั้งอาจเรียกว่า ไซคลิกพรีฟิก การกำหนดขนาดของช่วงเวลาป้องกันมีขนาดที่แตกต่างกันไปตามความต้องการของแต่ละระบบ ค่า T_g อาจมีค่าเท่ากับ $T_s/4$, $T_s/8$, $T_s/16$ หรือ $T_s/32$ ถ้าช่วงของเวลาป้องกันกว้างจะทำให้ทรูพุดของระบบลดลง แต่จะลดการเกิด ISI ได้ดี จากสมการที่ (2.15) เมื่อถูกแทรกด้วยสัญลักษณ์ช่วงเวลาป้องกัน จะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$s'(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{N-1} d_i(k) \exp(j2\pi f_i(t - kT_{\text{total}})) f'(t - kT_{\text{total}}) \quad (2.20)$$

2.3.5 การประมาณช่องสัญญาณ (Channel Estimate)

ที่เครื่องรับของระบบ OFDM จำเป็นที่จะต้องทราบการตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ เพื่อที่จะสามารถคืนข้อมูลกลับมาได้ ดังนั้นระบบจำเป็นต้องมีการประมาณช่องสัญญาณที่เครื่องรับ วิธีการโดยทั่วไปคือให้ด้านเครื่องส่ง ทำการส่งสัญลักษณ์ทดสอบหรือสัญลักษณ์ปริเอมเบิล (Preamble symbol) [14] [15] ที่มีรูปแบบตายตัว โดยแทรกสัญญาณทดสอบเข้าไปในเฟรมข้อมูลของสัญลักษณ์ OFDM ดังที่แสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อกำหนดให้ในช่วงหนึ่งเฟรมข้อมูลช่องสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลง เพราะเป็นช่องสัญญาณจางหายแบบช้า ในขณะที่เดียวกันที่เครื่องรับก็ทราบว่าสัญลักษณ์ทดสอบนั้นมีรูปแบบอย่างไร



รูปที่ 2.12 แสดงรูปแบบเฟรมข้อมูลของระบบ OFDM ในแกนเวลา

เมื่อสัญญาณ ไปถึงเครื่องรับจะผ่านกระบวนการ FFT สามารถเขียนสมการด้านรับในรูปของสมการเชิงเส้นได้ดังแสดงในสมการที่ (2.21)

$$Y(K) = H(k)X(k) + N_0(k) \quad (2.21)$$

- เมื่อ k คือลำดับของคลื่นพาห่อย่อย ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$)
- $Y(k)$ คือสัญญาณของสัญลักษณ์ทดสอบที่รับได้จากเครื่องรับ
- $H(k)$ คือการตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ
- $X(k)$ คือสัญลักษณ์ทดสอบจากเครื่องส่ง
- $N_0(k)$ คือสัญญาณรบกวนขาวววกแบบเกาส์

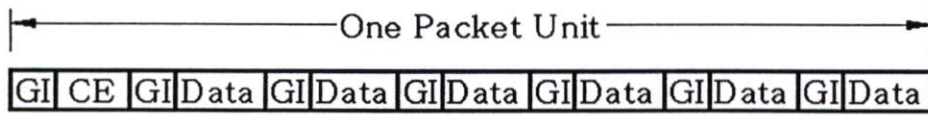
เมื่อเครื่องรับทราบรูปแบบของสัญญาณ $X(k)$ ที่มาจากเครื่องส่ง และมีสัญญาณทดสอบ $Y(k)$ ที่ผ่านช่องสัญญาณมาถึงเครื่องรับจะสามารถทำการประมาณช่องสัญญาณอย่างง่ายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\tilde{H}(k) = \frac{Y(k)}{X(k)} \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.22) ค่าประมาณของช่องสัญญาณที่ได้ คือการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึมแบบ LS (Least Square) [13] [16] เมื่อได้ค่าประมาณของช่องสัญญาณ แล้วนำไปผ่านกระบวนการคืนข้อมูลเดิมจะได้ข้อมูลที่มีอัตราความผิดพลาดสูงเนื่องจากค่าประมาณของช่องสัญญาณ ที่คำนวณได้นั้นมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย นั่นคือ $N_0(k) / X(k)$ ดังนั้นการประมาณช่องสัญญาณสำหรับในทางปฏิบัติจะต้องใช้เทคนิคอื่นที่สามารถตัดสัญญาณรบกวนได้ เพื่อให้ข้อมูลที่คืนกลับมีความผิดพลาดน้อยลง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสมมุติว่าที่เครื่องรับสามารถประมาณช่องสัญญาณได้อย่างสมบูรณ์ หรือเป็นช่องสัญญาณในอุดมคติ

2.3.6 รูปแบบของแพ็คเกจข้อมูลที่ใช้ในการจำลองระบบ

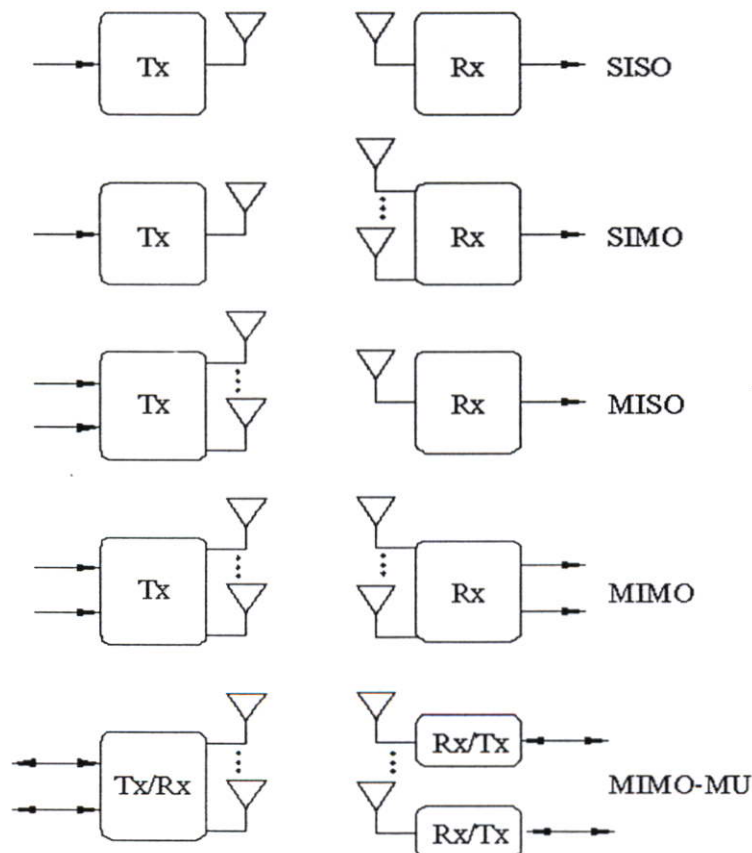
ในการจำลองระบบกำหนดให้ในหนึ่งแพ็คเกจข้อมูลที่ส่งออกจากเครื่องส่ง ประกอบไปด้วยสัญลักษณ์ OFDM จำนวน 6 สัญลักษณ์ และช่วงเวลาป้องกัน (Guard interval symbol) โดยรูปแบบของแพ็คเกจข้อมูลได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 จากรูปกำหนดให้ GI คือ ช่วงเวลาป้องกันของสัญลักษณ์ OFDM และ CE คือสัญลักษณ์ทดสอบสำหรับประมาณช่องสัญญาณ และ Data คือหนึ่งสัญลักษณ์ OFDM ที่มี 256 คลื่นพาห่อย่อย



รูปที่ 2.13 แสดงรูปแบบของแพ็คเกจข้อมูลที่ใช้ในการจำลองระบบ

2.4 รูปแบบของการไคเวอร์ซิติ์ทางสายอากาศแบบต่างๆ

การไคเวอร์ซิติ์ทางสายอากาศ [6] มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มค่า SNR ทำให้ระบบสามารถลดค่าอัตราผิดพลาดข้อมูลได้ การไคเวอร์ซิติ์แบบนี้เรียกว่า Spatial Diversity โดยอาศัยการเข้ารหัสรูปแบบต่างๆ เช่น รหัส STTC, STBC และแบบ SFBC นอกจากนี้ยังมีการไคเวอร์ซิติ์แบบ Spatial Multiplexing ที่มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลสูง อาทิเช่น V-BLAST, D-BLAST [17] และ SVD [18] ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะจำลองสมรรถนะของระบบ Spatial Diversity แบบ STBC และระบบ Spatial Multiplexing แบบ SVD เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกัน แต่ก่อนจะกล่าวถึงรายละเอียดในบทที่ 3 ในหัวข้อนี้จะแสดงรูปแบบโดยสรุปของการไคเวอร์ซิติ์ทางสายอากาศ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปแบบของการไคเวอร์ซิติ์ทางสายอากาศแบบต่างๆ

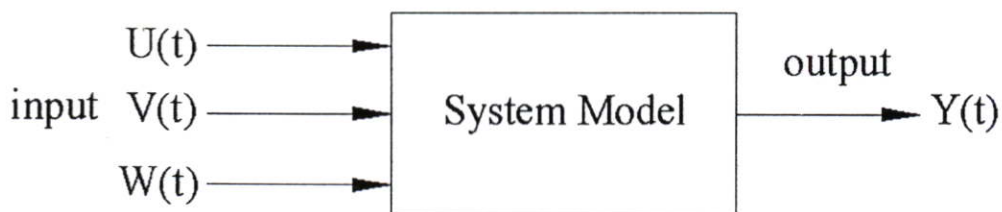
จากรูปที่ 2.14 แสดงระบบที่มีรูปแบบแตกต่างกัน โดยแบ่งตามลักษณะของอินพุต และเอาต์พุต ของระบบ เมื่อ SISO คือ Single Input Single Output, SIMO คือ Single Input Multiple Output, MISO คือ Multiple Input Single Output, MIMO คือ Multiple Input Multiple Output และแบบ MIMO-MU คือ Multiple Input Multiple Output – Multiuser ซึ่งแบบ SISO, MISO และ MIMO จะนำไปจำลองระบบเพื่อหาสมรรถนะ

2.5 วิธีการจำลองระบบ

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบสามารถทำได้สามวิธี หนึ่งคือการคำนวณจากสูตรที่มีสมการซับซ้อน (Evaluation of complex formula) วิธีการที่สอง คือการสร้างระบบ และทดลองวัด (Fabricating and Measurement) และและวิธีที่สาม คือการจำลองระบบ (Simulation of system) ซึ่งวิธีนี้จะทำให้การวิเคราะห์ระบบ ทำได้รวดเร็ว อีกทั้งยังเหมาะกับระบบที่มีความซับซ้อน หรือวิเคราะห์สูตรสมการออกมาได้ยาก ทั้งนี้ระยะเวลาในการจำลองระบบ จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วย เพราะการจำลองจะต้องทำการคำนวณแบบวนรอบจำนวนมาก และการจำลองจะต้องใช้วิธีการที่ถูกต้องตามหลักทฤษฎีด้วย

เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากที่สุด ในการจำลองระบบ จะต้องสร้างแบบจำลองขึ้นมาให้มีความสอดคล้องกับระบบ MIMO-OFDM ตามหลักการและทฤษฎี จากนั้นทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ โดยพิจารณาจากค่าอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูล

กระบวนการในการจำลองทั้งหมดจะกระทำบนโปรแกรม MATLAB โดยอาศัยการจำลองระบบโดยวิธีการมอนติคาร์โล (Montecarlo Simulation : MC) สำหรับหลักการของการจำลองระบบแบบมอนติคาร์โล จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.15 แบบจำลองกระบวนการสุ่มแบบมอนติคาร์โล

2.5.1 วิธีการจำลองแบบมอนติคาร์โล

วิธีการมอนติคาร์โลเกี่ยวข้องกับการกำเนิดเลขแบบสุ่ม (Random number generator) แบ่งออกเป็นหลายวิธีการ แต่โดยพื้นฐานแล้ววิธีมอนติคาร์โลจะสอดคล้องกับการทดลองหรือจำลองเหตุการณ์แบบสุ่ม โดยใช้ค่าเฉลี่ยสังเคราะห์ (Artificial mean) โดยไม่จำเป็นต้องทำการทดลองสุ่มทั้งหมด ซึ่งการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างหนึ่ง คือการประมาณค่าอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูลใน

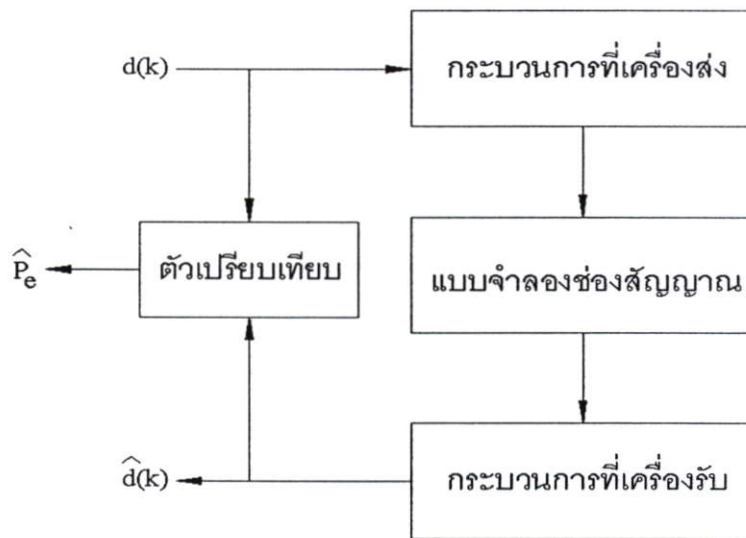
ระบบสื่อสาร ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.15 ให้ $U(t)$ $V(t)$ และ $W(t)$ เป็นอินพุทของเหตุการณ์แบบสุ่ม ในกระบวนการสุ่ม (Random process) สิ่งที่เราต้องการหาคือ ค่าสถิติของเอาต์พุท $Y(t)$ ซึ่งมักจะเป็นค่าคาดหวัง $E[Y(t)]$ ของ $Y(t)$ นั่นเอง โดยการทดลองส่งอินพุทที่แปรผันตามเวลาเข้าไปในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวกำเนิดตัวแปรแบบสุ่ม เพื่อสร้างเป็นอินพุท ดังนั้นผลของการประมาณ หรือค่าคาดหวังที่ได้จากการจำลองแบบมอนติคาร์โล คือ

$$E\left[g(\hat{Y}(t))\right] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(Y(i)) \quad (2.23)$$

ซึ่งงานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะวิเคราะห์หาค่าอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูล ของระบบในสถานะต่างๆ โดยขั้นตอนในการหาอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูลจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.5.1.1 การคำนวณอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูล

ในการคำนวณอัตราผิดพลาดบิตของระบบสื่อสาร โดยวิธีการจำลองระบบแบบมอนติคาร์โล มีหลักการดังรูปที่ 2.16 โดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2.16 แผนผังการคำนวณอัตราผิดพลาดบิต

1. สร้างลำดับบิตข้อมูลแบบสุ่ม (Random bit sequence) โดยจะใช้ตัวกำเนิดตัวแปรแบบสุ่มแสดงได้เป็น $d(k)$ และสัญญาณรบกวน $n(k)$ เมื่อ $k = 1, 2, 3, \dots, N$ เมื่อลำดับบิตข้อมูลแบบสุ่มสร้างโดยฟังก์ชัน `rand()` ของโปรแกรม MATLAB ที่ลักษณะการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มในช่วง $[0,1]$ จากการตัดสินใจโดยค่า `threshold 0.5`

2. ป้อนบิตข้อมูลแบบสุ่มให้กับระบบ โดยผ่านกระบวนการต่างๆ และผ่าน
 สัญญาณรบกวนในระบบ แล้วประมาณค่าบิตเอาต์พุต $\hat{d}(k)$
3. ประมาณค่าคาดหวังได้ดังสมการที่(2.24)

$$\hat{P}_e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N g(\hat{d}(k)) \quad (2.24)$$

โดยที่ $g(Y(k)) = 1$ ถ้า $\hat{d}(k) \neq d(k)$
 และ $g(Y(k)) = 0$ ถ้า $\hat{d}(k) = d(k)$

ความแม่นยำของการจำลองระบบของวิธีมอนติคาร์โล จะขึ้นอยู่กับวิธีการประมาณขนาด
 ของตัวอย่าง N รวมถึงการประมาณค่า และการตั้งสมมุติฐานของระบบ ซึ่งความแม่นยำของ
 วิธีการจะเป็นสัดส่วนกับค่า $1/\sqrt{N}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความแม่นยำจะแปรผันตามจำนวนบิตที่ส่ง
 เข้าสู่ระบบ ซึ่งหมายความว่าถ้าต้องการให้มีความแม่นยำสูง จะต้องใช้เวลาในการจำลองระบบ
 นานขึ้น

บทที่ 3

การโคเวอรัชิตีทางสายอากาศ

เดิมการสื่อสารแบบไร้สายจะใช้สายอากาศที่เครื่องส่งหนึ่งชุด และที่ด้านรับหนึ่งชุด หรือบางครั้งอาจเรียกว่าระบบ SISO (Single input-Single output) ในปัจจุบันมีการสื่อสารแบบมัลติมีเดียที่มีความเร็วสูง เมื่อใช้ระบบ SISO ทำการมอดูเลทในระดับสูงๆ เช่น 16QAM, 64QAM หรือ 256QAM จะต้องสิ้นเปลืองกำลังส่งของสถานีมาก อีกทั้งยังมีอัตราผิดพลาดของข้อมูลสูง ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าเพื่อหาเทคนิคในการเพิ่มสมรรถนะให้เครื่องส่งและเครื่องรับ ในปี ค.ศ. 1998 ได้มีการเสนอแนวคิดของการโคเวอรัชิตีทางเครื่องส่งเป็นครั้งแรกในปี 1998 โดย S. M. Alamouti [19] โดยที่โครงสร้างของระบบทางเครื่องส่งจะใช้สายอากาศ 2 ชุด และใช้สายอากาศด้านรับ 1 ชุด ที่สามารถเพิ่มสมรรถนะในการโคเวอรัชิตีได้ใกล้เคียงกับระบบที่ใช้เครื่องรับแบบอัตรารวมสูงสุด (Maximum Ratio Combining : MRC) ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 1 ชุด และด้านรับ 2 ชุด ต่อมาได้มีการพัฒนาโครงสร้างของระบบที่เครื่องส่ง โดยใช้สายอากาศมากกว่า 2 ชุดที่ทำให้สมรรถนะของระบบดีกว่าเดิม และไม่ต้องใช้แถบความถี่เพิ่ม แต่การเข้ารหัสและถอดรหัสที่เครื่องส่งและเครื่องรับ มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น ระบบนี้เรียกว่า “การเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา” [20] หรือ STBC (Space-Time Block Code)

ระบบ STBC เป็นการโคเวอรัชิตีแบบ Spatial Diversity ที่ใช้ในการลดอัตราผิดพลาดของข้อมูล โดยที่เครื่องส่งไม่จำเป็นต้องรู้การตอบสนองของช่องสัญญาณ ในปีเดียวกันกับที่อลามูตีเสนอแนวคิดการโคเวอรัชิตีทางเครื่องส่ง G.J. Foschini ได้เสนอการโคเวอรัชิตีแบบ Spatial Multiplexing [17] ที่มีอัตราการส่งข้อมูลความเร็วสูงกว่าแบบ STBC ระบบที่เสนอคือ Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time (V-BLAST) ที่เครื่องส่งจะต้องรู้การตอบสนองของช่องสัญญาณ และต่อมาได้พัฒนาเทคนิคที่สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงและมีอัตราความผิดพลาดของข้อมูลต่ำกว่า คือระบบ SVD (Singular Value Decomposition) [18] เป็นระบบที่ต้องใช้การคำนวณที่ซับซ้อนกว่าแบบเดิม

ในบทนี้จะแสดงหลักการของเทคนิคการโคเวอรัชิตีแบบการเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา (STBC) และแบบ SVD ว่ามีการเข้ารหัสและถอดรหัสอย่างไร

3.1 การเข้ารหัสปริภูมิ-เวลา แบบ Alamouti

การเข้ารหัสแบบนี้จะใช้สายอากาศที่เครื่องส่ง 2 ชุด ข้อมูลไบนารีที่เข้ามาในระบบจะถูกมอดูเลท เป็นสัญลักษณ์ นำสัญลักษณ์ที่ได้มาจัดทีละ 2 สัญลักษณ์ คือ S_1 และ S_2 ให้อยู่ในรูปของเมตริก ดังสมการที่แสดงดังต่อไปนี้

$$X = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

เมื่อคอลัมน์ของเมตริก X คือช่วงเวลาในการส่งข้อมูล และแถวของเมตริกใช้แทนข้อมูลที่ส่งผ่านสายอากาศสายอากาศอื่นที่ 1 หรือ 2 และ s_1^* คือการสังยุคเชิงซ้อน (Complex Conjugate) หลักการคือในช่วงเวลาสัญลักษณ์ที่ 1 สายอากาศอันแรกจะส่งสัญลักษณ์ s_1 ออกอากาศ และในขณะเดียวกันสายอากาศตัวที่ 2 จะส่งสัญลักษณ์ s_2 ออกไป เมื่อมาถึงช่วงเวลาสัญลักษณ์ช่วงที่ 2 สายอากาศอันแรกจะส่งสัญลักษณ์ $-s_2^*$ ออกไป และในเวลาเดียวกันสายอากาศตัวที่สอง จะส่งสัญลักษณ์ s_1^* ออกไป

สัญลักษณ์ในแถวของเมตริก X หรือข้อมูลจากสายอากาศทั้งสองจะมีความตั้งฉากกันจากผลคูณเชิงสเกลลา (Inner product) ของทั้งสองแถวจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการต่อไปนี้

$$inner - product = S_i \cdot S_j = \sum_{l=1}^p X_{i,l} \cdot X_{j,l}^* = 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ $(x)'$ คือการคอนจูเกตทรานส์โพส จากสมการจะเห็นว่าสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศทั้งสองไม่มีการรบกวนซึ่งกันและกัน เมื่อสัญลักษณ์ส่งผ่านช่องสัญญาณออกไปจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณ โดยกำหนดให้ช่องสัญญาณระหว่างสายอากาศอื่นที่ 1 และอื่นที่ 2 ไปยังเครื่องรับ คือ $h_1(t)$ และ $h_2(t)$ ตามลำดับ โดยสมมติให้ระบบมีการจางหายแบบช้า ดังนั้นช่องสัญญาณที่ช่วงเวลาติดกันจะคงที่ [19] [21] ดังสมการต่อไปนี้

$$h_1(t) = h_1(t+T) = h_1 = |h_1| \exp(j\theta_1) \quad (3.3)$$

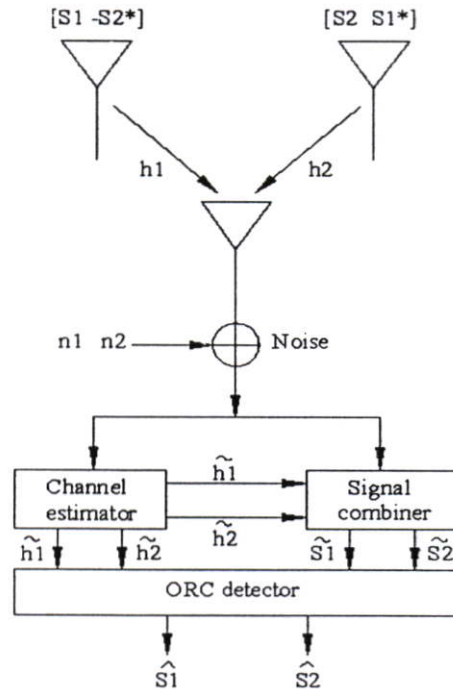
$$h_2(t) = h_2(t+T) = h_2 = |h_2| \exp(j\theta_2) \quad (3.4)$$

เมื่อ $|h_i|$ และ θ_i คือขนาดและเฟสที่เปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ หลังจากนั้นที่ด้านรับจะกำหนดเป็น r_1 และ r_2 เมื่อกำหนดให้ r_1 คือสัญญาณที่รับได้ในช่วงเวลาแรก และให้ r_2 คือสัญญาณที่รับได้ในช่วงเวลาที่สอง สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$r_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \quad (3.5)$$

$$r_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + n_2 \quad (3.6)$$

เมื่อ n_1 คือ n_2 สัญญาณรบกวน AWGN ที่เกิดขึ้นในเครื่องรับที่ช่วงเวลา t และ $t+T$ ตามลำดับ นำสัญญาณที่รับได้ทั้งสองช่วงเวลาไปถอดรหัสเพื่อคืนสัญลักษณ์เดิมกลับมาด้วยวิธีการรวมสัญญาณแบบคืนความตั้งฉาก (Orthogonal Restoring combining : ORC) การรวมสัญญาณแบบนี้ต้องอาศัยการประมาณของสัญญาณที่มีความแม่นยำ และการถอดรหัสสัญญาณจะต้องมีรูปแบบที่สัมพันธ์กับที่เครื่องส่ง [22] ดังสมการที่ (3.7)



รูปที่ 3.1 การโคเวอร์ซีตีแบบ Alamouti ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ชุด และสายอากาศรับ 1 ชุด

$$\begin{aligned}\tilde{S}_1 &= h_1^* r_1 + h_2 r_2^* \\ \tilde{S}_2 &= h_2^* r_1 - h_1 r_2^*\end{aligned}\quad (3.7)$$

นำค่าที่คำนวณจากสมการที่ (3.7) ไปหาค่าสัญลักษณ์คืนกลับมาจากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\hat{S}_1 &= \frac{\tilde{S}_1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \\ \hat{S}_2 &= \frac{\tilde{S}_2}{|h_1|^2 + |h_2|^2}\end{aligned}\quad (3.8)$$

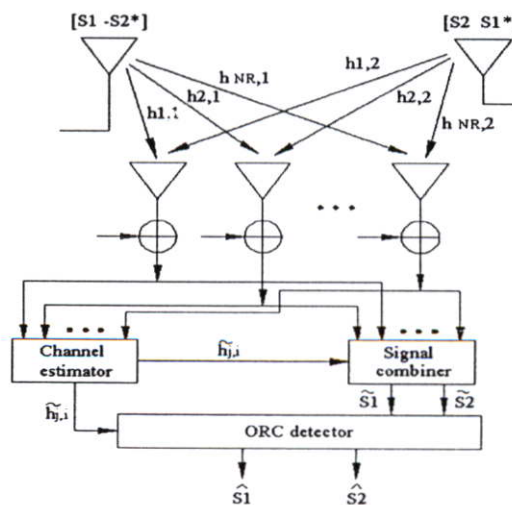
การโคเวอร์ซีตีแบบ Alamouti สามารถใช้สายอากาศด้านรับมากกว่า 1 ชุด เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการโคเวอร์ซีตี ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ที่เครื่องส่งจะทำการเข้ารหัสแบบเดิม คือสมการที่ (3.1) จำนวนเส้นทางในการส่งสัญญาณมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างจำนวนสายอากาศด้านส่งและจำนวนสายอากาศด้านรับ เมื่อสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไปที่เครื่องรับจะได้ค่าดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} r_j^1 &= h_{j,1}s_1 + h_{j,2}s_2 + n_j^1 \\ r_j^2 &= -h_{j,1}s_2^* + h_{j,2}s_1^* + n_j^2 \end{aligned} \tag{3.9}$$

จากสมการที่ (3.9) ค่า r_j^1 คือเครื่องรับที่ j ได้รับความสัญญาณในช่วงเวลาแรก และ r_j^2 คือเครื่องรับที่ j ได้รับความสัญญาณในช่วงเวลาที่สอง สัญญาณที่รับได้ทั้งหมดจะนำไปรวมกันที่เครื่องรวมสัญญาณแล้วจะได้สัญญาณดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \tilde{s}_1 &= \sum_{j=1}^{N_R} \{h_{j,1}^* r_j^1 + h_{j,2} (r_j^2)^*\} \\ &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_i + \sum_{j=1}^{N_R} \{h_{j,1}^* n_j^1 + h_{j,2} (n_j^2)^*\} \\ \tilde{s}_2 &= \sum_{j=1}^{N_R} \{h_{j,2}^* r_j^1 - h_{j,1} (r_j^2)^*\} \\ &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_2 + \sum_{j=1}^{N_R} \{h_{j,2}^* n_j^1 - h_{j,1} (n_j^2)^*\} \end{aligned} \tag{3.10}$$

นำค่าที่คำนวณจากสมการที่ (3.10) ไปหาค่าสัญลักษณ์คืนกลับมาโดยสมการที่ (3.8)



รูปที่ 3.2 การโคเวอร์ซีตีแบบ Alamouti ที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ชุด และสายอากาศรับ N_R ชุด

3.2 การเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา

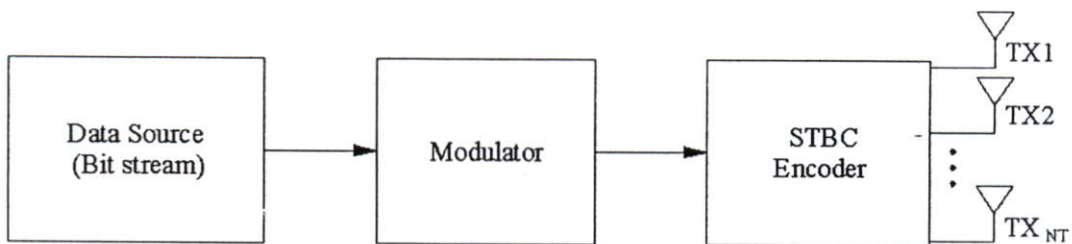
การโคเวอร์ซีดีแบบ Alamouti กำหนดให้สายอากาศด้านส่งมี 2 ชุดคงที่ จึงได้มีการพัฒนาระบบที่ใช้สายอากาศส่งมากกว่า 2 ชุด เรียกว่า การเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา (Space-Time Block Code : STBC) การเข้ารหัส STBC จะใช้ชุดข้อมูลบิตครั้งละ km บิต เพื่อนำไปมอดูเลตให้ได้สัญลักษณ์ จำนวนรูปแบบของสัญลักษณ์ขึ้นอยู่กับชนิดของการมอดูเลต เช่น 16QAM จะใช้ 4 บิตต่อสัญลักษณ์ ดังนั้นรูปแบบของสัญลักษณ์จะมีจำนวน 2^4 สัญลักษณ์ นำสัญลักษณ์ที่ได้ไปเข้ารหัสทีละ k สัญลักษณ์ ในระยะเวลาเท่ากับ p ช่วงเวลา สามารถจัดให้อยู่ในรูปเมตริกที่มีขนาดเท่ากับ N_T แถว และ p หลัก เมื่อ N_T คือจำนวนของสายอากาศด้านส่ง ระบบจะส่งสัญญาณออกจากสายอากาศทุกอันพร้อมๆกัน โดยมีรูปแบบตามที่กำหนด ในช่วงเวลาเท่ากับ p ช่วงเวลา นั้นหมายความว่าในช่วงเวลาเท่ากับ p ระบบส่งสัญลักษณ์ออกไปเท่า k สัญลักษณ์ ดังนั้นอัตราการเข้ารหัสของ STBC มีค่าเท่ากับ

$$R = k/p \quad (3.11)$$

และมีค่าประสิทธิภาพเชิงสเปกตรัม (Spectral efficiency) ของการเข้ารหัส STBC เท่ากับ

$$\eta = km/p \quad \text{bit/sec/Hz} \quad (3.12)$$

การเข้ารหัส STBC มีโครงสร้างอย่างง่าย ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของระบบ STBC ที่เครื่องส่ง

การเข้ารหัส STBC สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของสัญลักษณ์ที่ได้จากการมอดูเลต ถ้าระบบใช้การมอดูเลตทางแอมพลิจูดหรือเอเอสเค (Amplitude Shift Keying : ASK) สัญลักษณ์ที่ได้จะเป็นเลขจำนวนจริง [10] และถ้าระบบใช้การมอดูเลตทางเฟสหรือพีเอสเค (Phase Shift Keying : PSK) หรือแบบ QAM สัญลักษณ์ที่ได้จะเป็นจำนวนเชิงซ้อน โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.2.1 การเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา สำหรับสัญลักษณ์ที่เป็นจำนวนจริง

สำหรับการส่งสัญญาณจะส่งออกไปในลักษณะเมตริกที่ขนาดเท่ากับ $N_t \times p$ นำสัญลักษณ์จำนวนเท่ากับ k นำมาจัดรูปแบบบนช่วงเวลา ถ้าจำนวนเวลาที่เข้ารหัส เท่ากับจำนวนสายอากาศส่ง จะทำให้เมตริกเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังนั้นจะทำให้ระบบมีอัตราการใช้สเปกตรัมสูงสุด นั่นคือ $R = 1$ ดังที่แสดงในสมการ

$$X_2 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 \\ s_2 & s_1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) เป็นระบบที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ชุด และสมการที่ (3.14) และ (3.15) เป็นระบบที่ใช้สายอากาศส่งเท่ากับ 4 และ 8 ตามลำดับ

$$X_4 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 \\ s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 \\ s_4 & s_3 & -s_2 & s_1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$X_8 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & -s_5 & -s_6 & -s_7 & -s_8 \\ s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 & -s_6 & s_5 & s_8 & -s_7 \\ s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 & -s_7 & -s_8 & s_5 & s_6 \\ s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 & -s_8 & s_7 & -s_6 & s_5 \\ s_5 & s_6 & s_7 & s_8 & s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 \\ s_6 & -s_5 & s_8 & -s_7 & s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 \\ s_7 & -s_8 & -s_5 & s_6 & s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 \\ s_8 & s_7 & -s_6 & -s_5 & s_4 & s_3 & -s_2 & s_1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

จากสมการที่ผ่านมามีการจัดรูปแบบสัญลักษณ์เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ถ้าระบบต้องการส่ง 4 สัญลักษณ์ และมีสายอากาศส่ง 3 อัน จะต้องใช้ช่วงเวลา 4 ช่วงในการส่ง สามารถจัดข้อมูลได้ตามสมการที่ (3.16)

$$X_3 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 \\ s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

จากสมการที่ผ่านมาแต่ละแถวของเมตริกจะต้องตั้งฉากกัน อาจพิสูจน์ได้จากสมการที่ (3.17)

$$X_{NT} \cdot X_{NT}^T = \left(\sum_{i=1}^n |s_i|^2 \right) I_{NT} \quad (3.17)$$

เมื่อ X^T คือทรานโพสเมตริก, n คือจำนวนสัญลักษณ์ที่เข้ารหัส และ I_{NT} คือเมตริกเอกลักษณ์ขนาด $NT \times NT$

3.2.2 การเข้ารหัสและถอดรหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา สำหรับสัญลักษณ์ที่เป็นจำนวนเชิงซ้อน

สำหรับระบบที่ใช้การมอดูเลททางเฟส จะมีสัญลักษณ์เป็นจำนวนเชิงซ้อน ดังนั้นการเข้ารหัสจะมีรูปแบบของสัญลักษณ์ที่มีการคอนจูเกต ดังสมการต่อไปนี้

$$X_3^{1/2} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & s_1^* & -s_2^* & -s_3^* & -s_4^* \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 & s_2^* & s_1^* & s_4^* & -s_3^* \\ s_3 & s_4 & s_1 & s_2 & s_3^* & -s_4^* & s_1^* & s_2^* \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$X_4^{1/2} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & s_1^* & -s_2^* & -s_3^* & -s_4^* \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 & s_2^* & s_1^* & s_4^* & -s_3^* \\ s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 & s_3^* & -s_4^* & s_1^* & s_2^* \\ s_4 & s_3 & -s_2 & s_1 & s_4^* & s_3^* & -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

สมการที่ (3.18) คือการเข้ารหัสที่อัตรา $\frac{1}{2}$ [10] เมื่อใช้สายอากาศส่งจำนวน 3 ชุด มี 4 สัญลักษณ์ และใช้ช่วงเวลา 8 ช่วงในการส่งสัญญาณ และสมการที่ (3.19) คือการเข้ารหัสที่อัตรา $\frac{1}{2}$ เมื่อใช้สายอากาศส่งจำนวน 4 ชุด มี 4 สัญลักษณ์ และใช้ช่วงเวลา 8 ช่วงในการส่งสัญญาณ ระบบที่ใช้อัตรา $\frac{1}{2}$ จะมีสมรรถนะในการโคเวอร์ซิวิตี้สูงกว่าแบบอัตรารหัสเท่ากับ 1 ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับระบบที่ใช้การมอดูเลทในระดับสูง เช่น 32QAM หรือ 64QAM เป็นต้น

รหัส STBC สามารถถอดรหัสโดยการรวมสัญญาณแบบเชิงเส้นที่เครื่องรับ และใช้ค่าประมาณช่องสัญญาณ จากสมการที่ (3.18) คือระบบที่ใช้สายอากาศส่งจำนวน 3 ชุด เข้ารหัสที่

อัตรา ½ สามารถถอดรหัสได้ดังสมการที่ (3.20) ถึง (3.23) เมื่อกำหนดให้ r_j^p คือสัญญาณที่
เครื่องรับที่ j ในช่วงเวลาที่ p

$$\begin{aligned}
 \tilde{s}_1 &= \sum_{j=1}^{N_R} \{r_j^1 h_{j,1}^* + r_j^2 h_{j,2}^* + r_j^3 h_{j,3}^* + (r_j^5)^* h_{j,1} + \dots \\
 &\quad (r_j^6)^* h_{j,2} + (r_j^7)^* h_{j,3}\} \\
 &= 2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_1 + \sum_{j=1}^{N_R} \{n_j^1 h_{j,1}^* + n_j^2 h_{j,2}^* + n_j^3 h_{j,3}^* + \dots \\
 &\quad (n_j^5) h_{j,1} + (n_j^6) h_{j,2} + (n_j^7) h_{j,3}\} \tag{3.20}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{s}_2 &= \sum_{j=1}^{N_R} \{r_j^1 h_{j,2}^* - r_j^2 h_{j,1}^* + r_j^4 h_{j,3}^* + (r_j^5)^* h_{j,2} - \dots \\
 &\quad (r_j^6)^* h_{j,1} + (r_j^8)^* h_{j,3}\} \\
 &= 2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_2 + \sum_{j=1}^{N_R} \{n_j^1 h_{j,2}^* - n_j^2 h_{j,1}^* + n_j^4 h_{j,3}^* + \dots \\
 &\quad (n_j^5) h_{j,2} - (n_j^6) h_{j,1} + (n_j^8) h_{j,3}\} \tag{3.21}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{s}_3 &= \sum_{j=1}^{N_R} \{r_j^1 h_{j,3}^* - r_j^3 h_{j,1}^* - r_j^4 h_{j,2}^* + (r_j^5)^* h_{j,3} - \dots \\
 &\quad (r_j^7)^* h_{j,1} - (r_j^8)^* h_{j,2}\} \\
 &= 2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_3 + \sum_{j=1}^{N_R} \{n_j^1 h_{j,3}^* - n_j^3 h_{j,1}^* - n_j^4 h_{j,2}^* + \dots \\
 &\quad (n_j^5) h_{j,3} - (n_j^7) h_{j,1} - (n_j^8) h_{j,2}\} \tag{3.22}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{s}_4 &= \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ -r_j^2 h_{j,3}^* + r_j^3 h_{j,2}^* - r_j^4 h_{j,1}^* - (r_j^6)^* h_{j,3} + \dots \right. \\
&\quad \left. (r_j^7)^* h_{j,2} - (r_j^8)^* h_{j,1} \right\} \\
&= 2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_4 + \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ -n_j^2 h_{j,3}^* + n_j^3 h_{j,2}^* - n_j^4 h_{j,1}^* + \dots \right. \\
&\quad \left. (n_j^6) h_{j,3} + (n_j^7) h_{j,2} - (n_j^8) h_{j,1} \right\} \tag{3.23}
\end{aligned}$$

เมื่อได้ค่า $\tilde{s}_1, \tilde{s}_2, \tilde{s}_3$ และ \tilde{s}_4 แล้วสามารถคืนสัญลักษณ์ด้วยวิธีการรวมสัญญาณแบบคืนความตั้งฉาก (Orthogonal Restoring combining : ORC) ดังสมการต่อไปนี้

$$\hat{s}_1 = \frac{\tilde{s}_1}{2 \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2} \tag{3.24}$$

$$\hat{s}_2 = \frac{\tilde{s}_2}{2 \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2} \tag{3.25}$$

$$\hat{s}_3 = \frac{\tilde{s}_3}{2 \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2} \tag{3.26}$$

$$\hat{s}_4 = \frac{\tilde{s}_4}{2 \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2} \tag{3.27}$$

สมการที่ (3.19) ก็สามารถคืนสัญลักษณ์โดยใช้วิธีเดียวกันนี้ โดยถอดรหัสตามรูปแบบของการเรียงสัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการ ต่อมาในปี 2003 มีการเสนอการเข้ารหัส STBC ที่อัตรา $\frac{3}{4}$ ที่ใช้สายอากาศจำนวน 3 และ 4 ชุด [10] ดังสมการต่อไปนี้

$$X_3^{3/4'} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* & s_3^* & 0 \\ s_2 & s_1^* & 0 & -s_3^* \\ s_3 & 0 & -s_1^* & s_2^* \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$X_4^{3/4'} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & s_2 & -s_3 \\ 0 & s_1 & s_3^* & s_2^* \\ -s_2^* & -s_3 & s_1^* & 0 \\ s_3^* & -s_2 & 0 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

สมการที่ (3.29) ได้นำไปใช้ในการจำลองระบบ MIMO-OFDM เพื่อหาสมรรถนะ ได้แสดงไว้ใน บทที่ 5 และการถอดรหัสสมการที่ (3.29) ที่มีอัตราการใช้รหัสเท่ากับ $\frac{3}{4}$ โดยใช้สายอากาศส่ง 4 ชุด ส่งทีละ 3 สัญลักษณ์ ใน 4 ช่วงเวลา สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \tilde{s}_1 &= \sum_{j=1}^{N_R} \{ r_j^1 h_{j,1}^* + r_j^2 h_{j,2}^* + (r_j^3)^* h_{j,3} + (r_j^4)^* h_{j,4} \} \\ &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_1 + \dots \\ &\quad \sum_{j=1}^{N_R} \{ n_j^1 h_{j,1}^* + n_j^2 h_{j,2}^* + (n_j^3)^* h_{j,3} + (n_j^4)^* h_{j,4} \} \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \tilde{s}_2 &= \sum_{j=1}^{N_R} \{ -(r_j^1)^* h_{j,3} - r_j^2 h_{j,4}^* + r_j^3 h_{j,1}^* + (r_j^4)^* h_{j,2} \} \\ &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_2 + \dots \\ &\quad \sum_{j=1}^{N_R} \{ -(n_j^1)^* h_{j,3} - n_j^2 h_{j,4}^* + n_j^3 h_{j,1}^* + (n_j^4)^* h_{j,2} \} \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned}
\tilde{s}_3 &= \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ r_j^1 h_{j,4} - r_j^2 h_{j,3} + (r_j^3)^* h_{j,2} - r_j^4 h_{j,1} \right\} \\
&= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_3 + \dots \\
&\quad \sum_{j=1}^{N_R} \left\{ n_j^1 h_{j,4} - n_j^2 h_{j,3} + (n_j^3)^* h_{j,2} - n_j^4 h_{j,1} \right\}
\end{aligned} \tag{3.32}$$

3.2.3 การเข้ารหัส QUASI-ORTHOGONAL STBC

จากหัวข้อต่างๆที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการโคเวอร์ซีทีที่ใช้สายอากาศมากกว่า 2 ชุดยังไม่มีรูปแบบที่มีอัตราการใช้รหัสเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นอัตราที่ไม่ต้องสูญเสียแบนด์วิดท์ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการเข้ารหัส STBC แบบที่มีอัตราการใช้รหัสเท่ากับ 1 คือ Quasi-Orthogonal STBC [23] ที่อาศัยการใช้รูปแบบการเรียงสัญลักษณ์แบบ Alamouti ดังสมการต่อไปนี้

$$A_{12} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

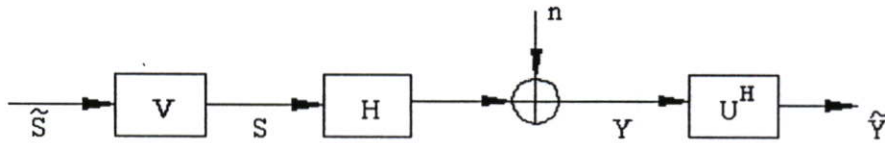
เมื่อกำหนดให้ A_{12} คือเมตริกสำหรับการส่งข้อมูล 2 สัญลักษณ์ จากนั้นกำหนดให้จำนวนสัญลักษณ์ที่จะส่งมีค่าเท่ากับช่วงเวลาในการส่ง คือ 4 จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$A = \begin{bmatrix} A_{12} & -A_{34}^* \\ A_{34} & A_{12}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* & -s_3^* & s_4 \\ s_2 & s_1^* & -s_4^* & -s_3 \\ s_3 & -s_4^* & s_1^* & -s_2 \\ s_4 & s_3^* & s_2^* & s_1 \end{bmatrix} \tag{3.34}$$

สัญญาณที่ส่งจะสายอากาศแต่ละชุดจะมีความตั้งฉากกัน โดยใช้สมการที่ (3.2) จะได้ค่าผลคูณเชิงสเกลาร์ มีค่าเป็นศูนย์ การถอดรหัสของ Quasi-Orthogonal จะสามารถทำได้เหมือนกับ STBC แบบเดิมที่ได้กล่าวไปแล้ว จะเห็นได้ว่าระบบนี้มีรูปแบบการวางสัญลักษณ์ในส่วนย่อยเหมือนกับแบบ Alamouti และระบบจะสามารถส่งได้ 4 สัญลักษณ์ ในช่วงเวลา 4 ช่วง ดังนั้นระบบจะไม่ต้องสูญเสียแบนด์วิดท์ขณะส่ง แต่สมรรถนะการโคเวอร์ซีทีจะดีกว่าแบบเดิม ซึ่งจะแสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะในแต่ละแบบในบทที่ 5 ของวิทยานิพนธ์

3.3 เทคนิคการส่งข้อมูลโดยการเข้ารหัส SVD

จากหัวข้อที่ผ่านมาคือการโคเวอริจันต์แบบปริภูมิ-เวลา ที่ใช้การประมาณช่องสัญญาณที่เครื่องรับเพื่อถอดรหัสถอดรหัส โดยที่เครื่องส่งไม่จำเป็นต้องรู้ว่าช่องสัญญาณ มีการตอบสนองอย่างไร การโคเวอริจันต์แบบปริภูมิ-เวลา หรือ STBC บางครั้งอาจเรียกว่าการส่งข้อมูลแบบ Spatial Diversity เป็นระบบที่มีสมรรถนะในการโคเวอริจันต์สูง แต่มีอัตราความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลค่านั้นก็ยังมีอัตราความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลเท่ากับระบบที่ใช้สายอากาศส่งและรับ 1 ชุด (SISO) การโคเวอริจันต์แบบ SVD (Singular Value Decomposition) หรืออาจเรียกว่าการส่งข้อมูลแบบ Spatial Multiplexing [18] เป็นระบบที่สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราที่เร็วกว่าแบบ STBC แต่ในขั้นตอนการส่งสัญญาณนั้น ที่เครื่องส่งจะต้องรู้การตอบสนองของช่องสัญญาณอย่างสมบูรณ์ (Full Channel State Information : Full CSI) สามารถทำได้โดยให้เครื่องรับส่งข้อมูลการตอบสนองของช่องสัญญาณกลับไปเครื่องส่ง และที่เครื่องรับจะต้องคำนวณหาค่าเมตริกย่อยจากค่าประมาณของช่องสัญญาณที่รับมา โครงสร้างของระบบ SVD ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของระบบ SVD

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าสัญญาณจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณ ที่เขียนในรูปเมตริกได้ดังสมการต่อไปนี้

$$H_R(k) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(k) & h_{1,2}(k) & \cdots & \cdots & h_{1,N_T}(k) \\ h_{2,1}(k) & h_{2,2}(k) & \cdots & \cdots & h_{2,N_T}(k) \\ h_{3,1}(k) & h_{3,2}(k) & \cdots & \cdots & h_{3,N_T}(k) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \cdots & \cdots & h_{N_R,N_T}(k) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

ระบบ SVD จำเป็นที่จะต้องมีการคำนวณเพื่อแยกเมตริกย่อยของช่องสัญญาณรวม $H_R(k)$ โดยใช้วิธีการแยกเมตริกที่มีชื่อว่า Singular Value Decomposition (SVD) ดังสมการต่อไปนี้

$$H_R(k) = U(k) \cdot D(k) \cdot V'(k) \quad (3.36)$$

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าที่เครื่องส่งและเครื่องรับของระบบจะต้องนำสัญญาณคูณกับเมตริก V และ U^H ซึ่งได้มาจากสมการที่ (3.36) เมื่อกำหนดให้ $U(k)$ และ $V(k)$ คือ Unitary matrices ที่มีค่า $UU^H=VV^H=I$ เมื่อ $U(k)$ และ $V(k)$ คือไอเกนเวกเตอร์ของ $H^H H$ และค่าไอเกนของ HH^H ตามลำดับ และเมตริก $D(k)$ คือ diagonal เมตริก ของ $H_R(k)$ ระบบ SVD แบบที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และด้านรับ 3 ชุด สามารถแสดงในรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าในหนึ่งช่วงเวลาจะมีการส่งสัญลักษณ์ 2 สัญลักษณ์พร้อมกัน คือ $S1$ และ $S2$ แล้วสัญญาณทั้ง 2 จะคูณกับเมตริก V แบบการคูณเมตริก จะได้สัญญาณ $X1$ และ $X2$ ส่งผ่านสายอากาศออกไปยังช่องสัญญาณ H ดังสมการต่อไปนี้

$$X(k) = V(k) \cdot S(k) \quad (3.37)$$

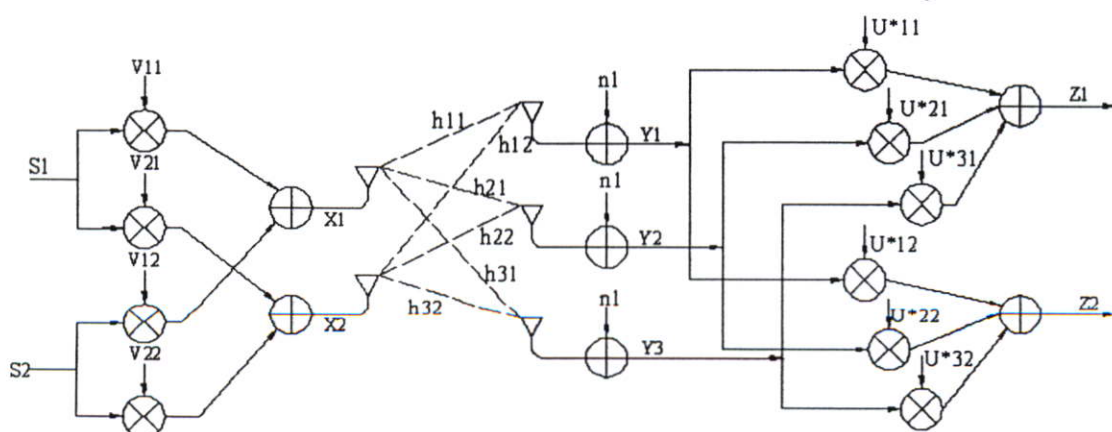
จากนั้นที่ด้านเครื่องรับจะได้รับสัญญาณ $Y(k)$ ดังสมการต่อไปนี้

$$Y(k) = H_R(k) \cdot X(k) + n(k) \quad (3.38)$$

เมื่อ $n(k)$ คือสัญญาณรบกวน AWGN และจะได้ค่าประมาณของสัญญาณดังสมการที่ (3.39)

$$\begin{aligned} Z(k) &= U'(k) \cdot Y(k) = U'(k)H_R(k)X(k) + U'(k)n(k) \\ &= U'(k)U(k)D(k)V'(k)V(k)S(k) + U'(k)n(k) \\ &= D(k)S(k) + U'(k)n(k) \end{aligned} \quad (3.39)$$

สมการที่ (3.39) ได้มาจากคุณสมบัติของเมตริก $U(k)$ และ $V(k)$ คือจากสมการ $UU^H=VV^H=I$ เมื่อ I คือ เมตริกเอกลักษณ์ ดังนั้นจะได้ค่าประมาณของสัญลักษณ์กลับคืนมา



รูปที่ 3.5 แสดงระบบ SVD ที่ใช้สายอากาศส่งและรับเท่ากับ 2 และ 3 ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าระบบสามารถส่งสัญลักษณ์ได้ครั้งละ 2 สัญลักษณ์พร้อมๆกัน หรือสามารถส่งได้ N_T สัญลักษณ์พร้อมๆกันใน 1 ช่วงเวลา ดังนั้นระบบ SVD จึงเป็นระบบที่มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลสูงกว่าแบบ STBC ที่ต้องใช้ช่วงเวลา 2 ช่วงในการส่ง 2 สัญลักษณ์

แต่อย่างไรก็ตาม ในแต่ละชุดสัญลักษณ์ที่ส่งผ่านช่องสัญญาณไปยังเครื่องรับ จะมีค่าอัตราผิดพลาดของข้อมูลในแต่ละชุดสัญลักษณ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของการเข้ารหัส SVD เมื่อพิจารณาในสมการที่ (3.39) จะเห็นได้ว่าค่าประมาณของสัญญาณที่ถอดรหัสจะเป็นผลคูณระหว่างเวกเตอร์ของสัญญาณอินพุตกับเมตริกย่อย $D(k)$ ของรหัส SVD ดังที่แสดงในสมการที่ (3.40)

$$D(k) = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{N_T} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

จากสมการที่ (3.40) เป็นเมตริกขนาด $N_T \times N_T$ ที่มีค่า diagonal เป็นจำนวนจริง N_T ค่า เมื่อสมาชิกใน diagonal ของเมตริกจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ยกตัวอย่างระบบ SVD ระบบหนึ่งที่ใช้สายอากาศส่ง 6 ชุด ระบบจะมีค่า diagonal ในช่วงเวลาใดๆ ที่มีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังนี้

$$D(k) = \begin{bmatrix} 4.8818 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.209 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.2499 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.6964 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.6958 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.3734 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

ผลจากการลดลงของค่าสมาชิกใน diagonal จะทำให้แต่ละชุดสัญลักษณ์ที่ส่ง มีค่าสัมประสิทธิ์อัตราขยายไม่เท่ากัน ดังนั้นในระบบ SVD สัญลักษณ์ชุดแรกของระบบ จะมีอัตราผิดพลาดของข้อมูลต่ำที่สุด และชุดสัญลักษณ์ถัดมาจะมีประสิทธิภาพลดลงเรื่อยๆตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ชุดสัญลักษณ์ที่ 1 และ 2 จึงสามารถใช้การมอดูเลทที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์จำนวนมากได้ เช่น 64QAM หรือ 256QAM วิธีการที่ส่งบิตข้อมูลมากกว่าในช่องสัญญาณที่ดีอาจเรียกว่าการใช้เทคนิค Bit Loading [18] ดังนั้นจุดนี้เองจึงเป็นคุณสมบัติของระบบ SVD โดยจะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในการจำลองระบบ ของบทที่ 5

บทที่ 4

แบบจำลองของระบบ MIMO-OFDM

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงหลักการของการโคเวอริจันต์ทางสายอากาศวิธีต่างๆ เพื่อทำการเพิ่มสมรรถนะทั้งอัตราขยายของการโคเวอริจันต์ และเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการส่งข้อมูล ระบบ OFDM เป็นระบบที่ใช้ในการสื่อสารหลายมาตรฐาน เพื่อทำการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง และลดค่าการแทรกสอดของสัญญาณ (ISI) สามารถนำไปใช้ในมาตรฐานต่างๆ เช่น IEEE 802.11a, IEEE 802.16 และ IEEE 802.16a [3] [4] ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการจำลองระบบ ที่ทำงานภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.16a ที่เป็นระบบบรอดแบนด์ไร้สาย (Fixed Broadband Wireless Access : FBWA) ที่ให้บริการข้อมูลด้านมัลติมีเดีย และให้บริการอินเทอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูงที่ใช้ระบบ OFDM ในการส่งสัญญาณ บนช่วงความถี่ 2-11 GHz มีการแบ่งช่องสัญญาณแบบ OFDM 256 IFFT POINT มาตรฐานนี้สามารถนำวิธีการโคเวอริจันต์ทางสายอากาศเข้ามาใช้ร่วมกับระบบ OFDM ได้ เพื่อให้ระบบมีสมรรถนะที่สูงขึ้น ทั้งอัตราขยายของการโคเวอริจันต์ และเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการส่งข้อมูล ระบบ OFDM ที่ใช้ร่วมกับการโคเวอริจันต์ทางสายอากาศ จะเรียกว่าระบบ MIMO-OFDM (Multiple input Multiple output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงหลักการของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC (Space-Time block code) และแบบ SVD (Singular Value Decomposition) เพื่อทำความเข้าใจว่าทั้งสองระบบมีหลักการการเข้ารหัส และถอดรหัสอย่างไร และจะได้นำไปจำลองระบบในบทที่ 5 เพื่อหาสมรรถนะ และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองระบบต่อไป

4.1 ระบบ MIMO-OFDM แบบการเข้ารหัส STBC

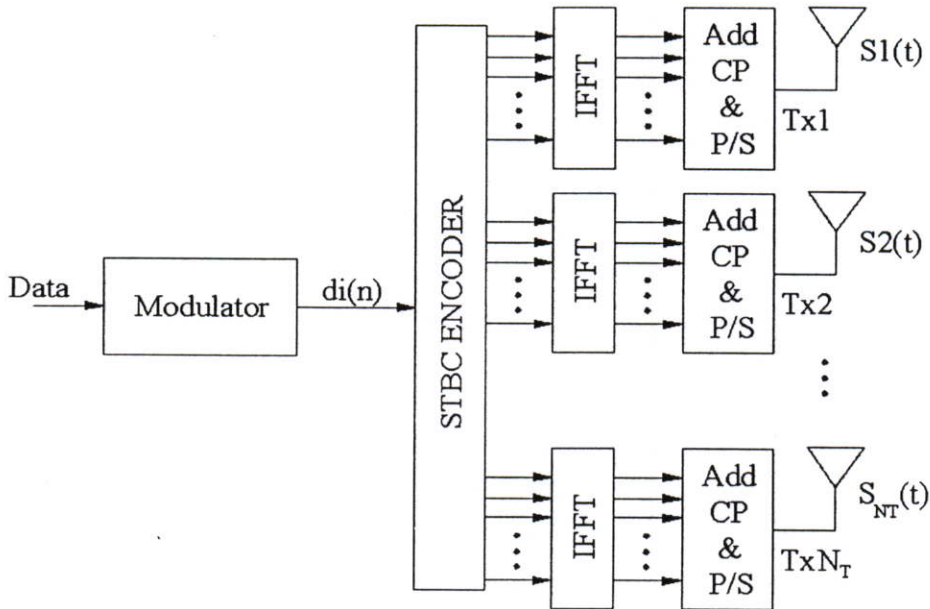
จากบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงทฤษฎีของระบบ OFDM และเทคนิคการโคเวอริจันต์ทางสายอากาศ ซึ่งเมื่อนำมาสร้างเป็นระบบ MIMO-OFDM จะมีหลักการที่ต้องศึกษาเพิ่มเติม ในหัวข้อนี้จะอธิบายหลักการของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC ว่ามีวิธีการส่ง และรับข้อมูลอย่างไร

4.1.1 แบบจำลองเครื่องส่งของระบบ STBC MIMO-OFDM

ในรูปที่ 4.1 คือการแสดงรูปบล็อกไดอะแกรมเครื่องส่งของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC หลักการในการจำลองระบบจะเริ่มที่ด้านอินพุต ที่มีข้อมูลเข้ามาในระบบเป็นขบวนของบิตข้อมูลแบบสุ่ม สามารถแสดงได้ในสมการต่อไปนี้

$$\text{Data Input} = [0\ 0110011001011100\dots] \quad (4.1)$$

สมการที่ (4.1) คือบิตข้อมูลแบบสุ่มที่มีค่าเป็น 0 และ 1 กำหนดให้เป็นข้อมูลที่ด้านอินพุทของระบบ จากนั้นบิตข้อมูลจะถูกมอดูเลท เพื่อเปลี่ยนจากบิต เป็นสัญลักษณ์ เมื่อวิธีการมอดูเลทในการจำลองระบบจะใช้แบบ QPSK 16QAM และ 64QAM

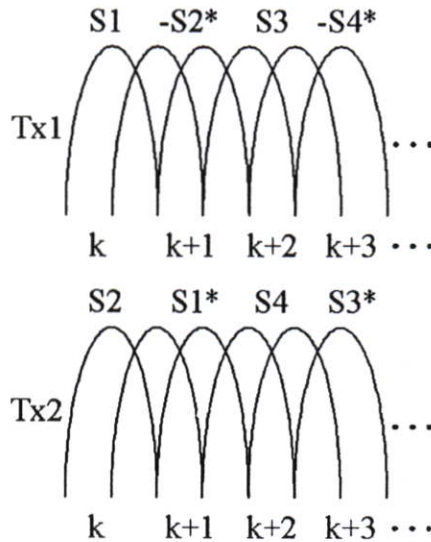


รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมทางด้านเครื่องส่งของระบบ STBC MIMO-OFDM

หลังจากผ่านการมอดูเลทจะได้สัญลักษณ์ $d_i = d_1 + jd_0$ เมื่อ d_1 และ d_0 คือ $\{1, -1\}$ เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK และ $\{\pm 1, \pm 3\}$ สำหรับ 16 QAM และ $\{\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7\}$ สำหรับ 64 QAM หลังจากได้สัญลักษณ์แล้ว จะไปเข้ารหัส STBC โดยมีรูปแบบตามที่แสดงไว้ในบทที่ 3 ถ้าในกรณีที่มีระบบมีสายอากาศด้านส่ง 2 ชุด ระบบจะจัดชุดทีละ 2 สัญลักษณ์ กำหนดให้เป็น S_1 และ S_2 สัญลักษณ์ที่อินพุทของ IFFT ชุดแรกจะเป็น S_1 และถัดไปคือ $-S_2^*$ และสัญลักษณ์ที่อินพุทของ IFFT ชุดที่สองจะเป็น S_2 และถัดไปคือ S_1^* โดยที่ระบบจะทำการเข้ารหัสสัญลักษณ์อย่างต่อเนื่อง สัญลักษณ์ที่เข้ารหัสแล้ว จะผ่านกระบวนการ IFFT เพื่อแปลงสัญญาณจากแกนความถี่เป็นแกนเวลา สัญญาณ OFDM แต่ละชุดสามารถแสดงได้ตามสมการต่อไปนี้

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{N-1} d_i(k) \exp(j2\pi f_i(t - kT_s)) f(t - kT_s) \quad (4.2)$$

จากนั้นสัญญาณจะมีการเพิ่มช่วงเวลาป้องกัน ที่เป็นช่วงเวลาแบบวน (Cyclic prefix) เพื่อป้องกันการแทรกสอดกันระหว่างสัญลักษณ์ที่เป็นผลมาจากการผ่านช่องสัญญาณแบบมัลติพาท ในขณะที่สัญญาณผ่านช่องสัญญาณจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณ OFDM ในแกนความถี่เมื่อเข้ารหัส STBC

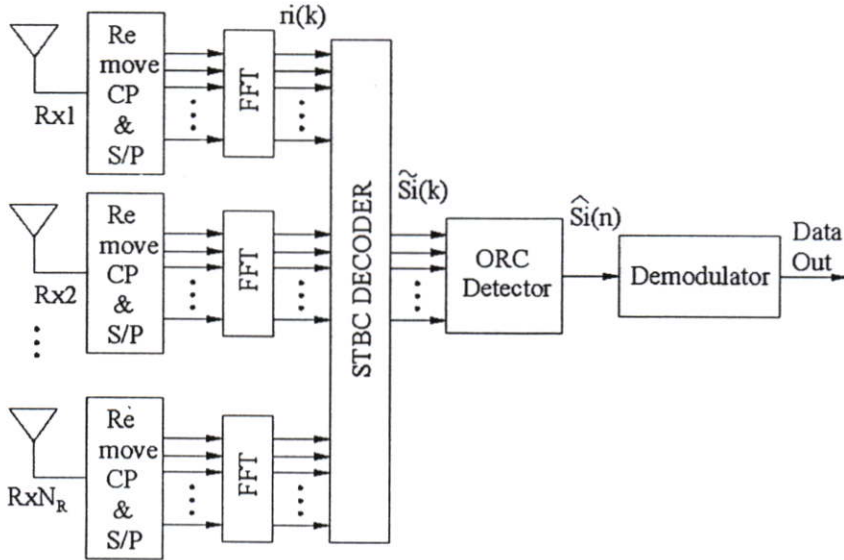
จากรูปที่ 4.2 เป็นการแสดงรูปสัญญาณ OFDM ในแกนความถี่ ในกรณีที่เข้ารหัส STBC แบบที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ชุด สัญญาณรูปบนในรูปคือ สัญญาณที่ผ่านสายอากาศชุดแรกออกอากาศ และสัญญาณรูปด้านล่าง คือ สัญญาณที่ผ่านสายอากาศชุดที่สองออกอากาศ จะเห็นได้ว่าการเรียงลำดับของสัญลักษณ์เป็นรูปแบบของรหัส STBC และ k คือลำดับของคลื่นพหุย่อย โดยที่สัญญาณจะส่งออกไปแบบต่อเนื่อง และเข้ารหัสทีละ 2 สัญลักษณ์ ตามจำนวนของสายอากาศส่ง

4.1.2 แบบจำลองเครื่องรับของระบบ STBC MIMO-OFDM

สัญญาณ OFDM จากสายอากาศส่งแต่ละชุดจะผ่านช่องสัญญาณ MIMO ที่มีการจางหายของสัญญาณแบบซ้ำ โดยที่ในชุดข้อมูลชุดเดียวกัน จะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณเหมือนกัน สัญญาณที่ด้านรับจะมีรูปแบบของสัญญาณแบบ Superposition หรือเป็นสัญญาณรวมที่มาจากสายอากาศหลายชุด สัญญาณจะถูกแปลงข้อมูลจากอนุกรมเป็นขนาน แล้วตัดช่วงเวลาป้องกันออกไป จากนั้นสัญญาณจะผ่านกระบวนการ FFT เพื่อแปลงสัญญาณจากแกนเวลาไปเป็นแกนความถี่ โดยสัญญาณในช่วงเวลาแรก และช่วงที่สอง แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} r_j^1(k) &= H_1(k)S_1(k) + H_2(k)S_2(k) + N_1(k) \\ r_j^2(k) &= -H_1(k)S_2(k)^* + H_2(k)S_1(k)^* + N_2(k) \end{aligned} \quad (4.3)$$

เมื่อ r_j^p คือสัญญาณที่สายอากาศรับชุดที่ j ในช่วงเวลาที่ p เมื่อ $H_n(k)$ คือผลตอบสนองความถี่จากสายอากาศทางด้านส่งชุดที่ n และ $N(k)$ คือสัญญาณรบกวน AWGN ที่ผ่านกระบวนการ FFT



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมทางด้านเครื่องรับของระบบ STBC MIMO-OFDM

สัญญาณที่ผ่านกระบวนการ FFT แล้วจะเข้าไปถอดรหัส STBC โดยใช้ค่าประมาณของช่องสัญญาณแต่ละเส้นทาง นำมาถอดรหัส ทีละสองชุด สำหรับคลื่นพาห่อย่อยลำดับที่ k แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\tilde{S}_1(k) &= r_1 H_1^*(k) + r_2^*(k) H_2(k) \\ \tilde{S}_2(k) &= r_1 H_2^*(k) + r_2^*(k) H_1(k)\end{aligned}\quad (4.4)$$

ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.4) [22] จะถูกส่งไปรวมสัญญาณ และตีเทกต์สัญญาณ ที่มีการรวมสัญญาณแบบคืนความตั้งฉาก (Orthogonal Restoring Combining : ORC) จะสามารถคืนสัญญาณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\hat{S}_n(k) = \frac{\tilde{S}_n(k)}{\sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_R} |H_{j,i}|^2}\quad (4.5)$$

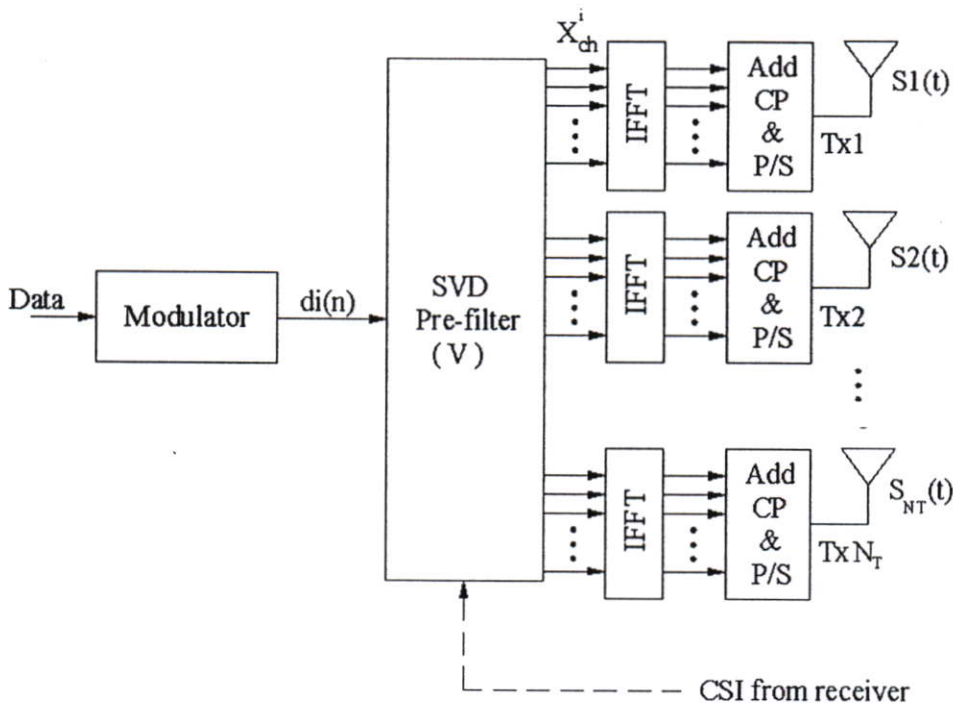
สัญญาณที่ได้คืนกลับมา จะถูกตีคิมอดูลกลับเป็นบิทข้อมูล เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

4.2 ระบบ MIMO-OFDM แบบการเข้ารหัส SVD

จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นระบบ OFDM ที่ใช้รหัส STBC ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบนี้สามารถถอดรหัสโดยที่เครื่องรับรู้การตอบสนองของช่องสัญญาณ ในหัวข้อนี้จะเป็นการใช้รหัส SVD ที่ทั้งเครื่องส่ง และเครื่องรับจำเป็นต้องรู้การตอบสนองของช่องสัญญาณ เพื่อที่จะนำตัวแปรที่คำนวณได้จากช่องสัญญาณไปสร้างเมตริกที่ด้านเครื่องส่ง และเครื่องรับ ซึ่งได้กล่าวถึงรายละเอียดของทฤษฎีระบบ SVD ไว้แล้วในบทที่ผ่านมา จะแสดงโครงสร้างของเครื่องส่งและเครื่องรับของระบบ OFDM ที่ใช้รหัส SVD ในหัวข้อถัดไป ดังต่อไปนี้

4.2.1 แบบจำลองเครื่องส่งของระบบ SVD MIMO-OFDM

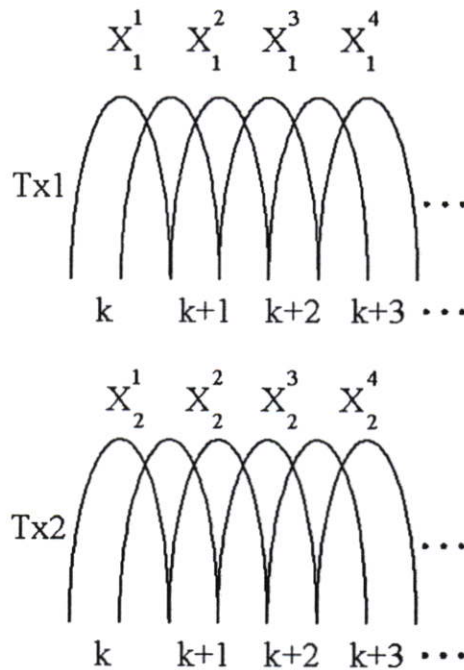
การเข้ารหัสแบบ SVD หรือระบบที่เรียกว่า Spatial Multiplexing คือระบบที่สามารถส่งสัญญาณหลายสัญญาณได้พร้อมกันในช่วงเวลาเดียว โดยที่เครื่องส่งจะต้องรู้การตอบสนองของช่องสัญญาณทุกเส้นทาง (Full Channel State Information : Full CSI) สามารถทำได้โดยเครื่องรับจะส่งค่าตัวแปรของช่องสัญญาณที่คำนวณได้ กลับไปยังเครื่องส่ง เมื่อโครงสร้างของเครื่องส่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมทางด้านเครื่องส่งของระบบ SVD MIMO-OFDM

ข้อมูลที่ด้านอินพุตในการจำลองระบบ คือขบวนการที่ข้อมูลแบบสุ่มที่จะถูกมอดูเลต เป็นสัญลักษณ์ ลักษณะเดียวกับในหัวข้อที่ 4.1.1 สัญลักษณ์ที่ได้จะนำไปคูณแบบเมตริกที่ Pre-filter

(V) จะได้สัญลักษณ์ X_{ch}^i ที่เอาท์พุทของ Pre-filter เมื่อ ch คือตำแหน่งช่องเอาท์พุทของสัญลักษณ์ SVD และ i คือลำดับของสัญลักษณ์ที่เข้ามา เมื่อชุดสัญญาณ X ได้จากการคูณแบบเมตริกของเมตริก V และชุดสัญญาณ $d(n)$ จากนั้นสัญลักษณ์ที่ได้จะผ่านกระบวนการ IFFT เพื่อแปลงสัญญาณจากแกนความถี่เป็นแกนเวลา สัญญาณ OFDM แต่ละชุดสามารถแสดงในสมการที่ (4.2) จากนั้นสัญญาณจะมีการเพิ่มช่วงเวลาป้องกัน ที่เป็นช่วงเวลาแบบวน (Cyclic prefix) เพื่อป้องกันการแทรกสอดกันระหว่างสัญลักษณ์ ที่เป็นผลมาจากการผ่านช่องสัญญาณแบบมัลติพาท ในขณะที่สัญญาณผ่านช่องสัญญาณจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.5



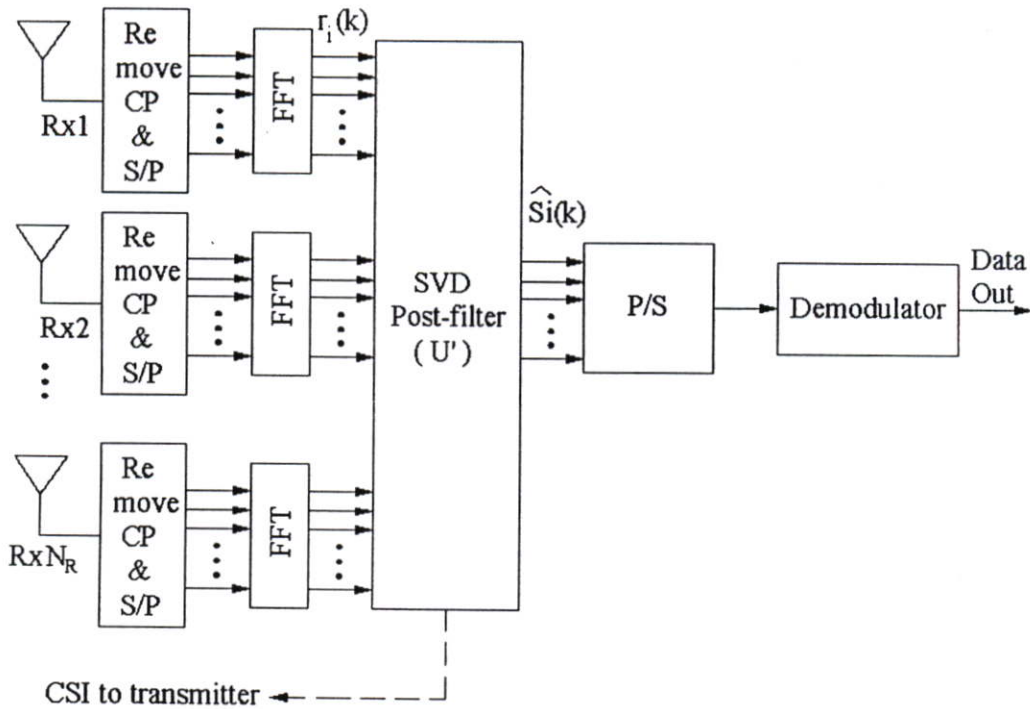
รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณ OFDM ในแกนความถี่เมื่อเข้ารหัส SVD

จากรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงรูปสัญญาณ OFDM ในแกนความถี่ ในกรณีที่เข้ารหัส SVD แบบที่ใช้สายอากาศส่ง 2 ชุด สัญญาณรูปบนในรูปคือ สัญญาณที่ผ่านสายอากาศชุดแรกออกอากาศ และสัญญาณรูปด้านล่าง คือ สัญญาณที่ผ่านสายอากาศชุดที่สองออกอากาศ จะเห็นได้ว่าระบบจะส่งสัญลักษณ์เรียงลำดับกันไป และ k คือลำดับของคลื่นพาห่อย่อย โดยที่สัญญาณจะส่งออกไปแบบต่อเนื่อง และเข้ารหัสที่ละ N_T สัญลักษณ์ ตามจำนวนของสายอากาศส่ง

4.2.2 แบบจำลองเครื่องรับของระบบ SVD MIMO-OFDM

สัญญาณ OFDM จากสายอากาศส่งแต่ละชุดจะผ่านช่องสัญญาณ MIMO ที่มีการจางหายของสัญญาณแบบซ้ำ โดยที่ในชุดข้อมูลชุดเดียวกัน จะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณเหมือนกัน สัญญาณที่ด้านรับจะมีรูปแบบของสัญญาณแบบ Superposition หรือเป็นสัญญาณรวม

ที่มาจากสายอากาศหลายชุด และจะได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวน AWGN ที่เครื่องรับ สัญญาณจะถูกแปลงข้อมูลจากอนุกรมเป็นขนาน แล้วตัดช่วงเวลาป้องกันออกไป จากนั้นสัญญาณจะผ่านกระบวนการ FFT เพื่อแปลงสัญญาณจากแกนเวลาไปเป็นแกนความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมทางด้านเครื่องรับของระบบ SVD MIMO-OFDM

จากรูป สัญญาณ $r_i(k)$ คือผลคูณของสัญญาณที่รับมาจากสายอากาศกับค่าการตอบสนองความถี่บนแกนความถี่ และเป็นสัญญาณที่คลื่นพหุข้อยที่ k นำชุดสัญญาณ $r_i(k)$ ไปคูณแบบเมตริกโดยเมตริก U' จะได้สัญลักษณ์ที่เอ๊าท์พุท โดยใช้สมการที่ (3.39) ในบทที่ 3 จากนั้นสัญลักษณ์จะถูกตีโมดูเลท ได้บิทข้อมูลคืนกลับมา

บทที่ 5

การหาค่าสมรรถนะของระบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ ที่ทำงานภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.16a ระบบที่ใช้จำลองเพื่อหาสมรรถนะมีสองแบบ คือระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD ผลการจำลองที่ได้คือค่าอัตราผิดพลาดของข้อมูล นำผลที่ได้ของทั้งสองระบบมาเปรียบเทียบกัน เมื่อสัญญาณผ่านสภาพแวดล้อมที่มีการจางหายของช่องสัญญาณแบบมัลติพาท

5.1 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองระบบ

แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองระบบเพื่อหาค่าสมรรถนะของอัตราผิดพลาดข้อมูลจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี โดยกรณีแรกจะเป็นระบบ OFDM ที่ใช้สายอากาศส่งและรับ 1 ชุด หรืออาจเรียกว่าระบบ SISO (Single input Single output) OFDM ได้แสดงบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.10 และในกรณีที่สองเป็นระบบ MISO (Multiple input Single output) OFDM เป็นกรณีที่มีการไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศที่เครื่องส่ง โดยใช้สายอากาศที่เครื่องส่งมากกว่า 1 ชุด และสายอากาศด้านรับ 1 ชุด มีการเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา (STBC) ได้แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งและเครื่องรับในรูปที่ 4.1 และ 4.3 และกรณีที่สามเป็นระบบ MIMO (Multiple input Multiple output) OFDM เป็นกรณีที่มีการไดเวอร์ซิตีทางสายอากาศที่เครื่องส่งและเครื่องรับ โดยใช้สายอากาศที่เครื่องส่งและเครื่องรับมากกว่า 1 ชุด มีการเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา (STBC) และการเข้ารหัสโดยอาศัยวิธีการแยกเมตริกช่องสัญญาณแบบ SVD (Singular value Decomposition) ได้แสดงบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งและเครื่องรับในรูปที่ 4.4 และ 4.6 โดยในการจำลองระบบจะใช้รูปแบบการรวมสัญญาณแบบ ORC และการประมาณช่องสัญญาณจะใช้ 2 วิธีคือ

1. ใช้วิธีการแยกผลตอบสนองของช่องสัญญาณ จากสายอากาศทางด้านเครื่องส่งแต่ละชุดด้วยสัญญาณทดสอบ แล้วทำการประมาณช่องสัญญาณด้วยอัลกอริทึมแบบ LS (Least square) ซึ่งเป็นวิธีการแบบพื้นฐาน
2. สมมุติให้เครื่องรับทราบผลตอบสนองของช่องสัญญาณอย่างสมบูรณ์ (Perfect Channel Estimation) ซึ่งเป็นการประมาณช่องสัญญาณในอุดมคติ

5.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

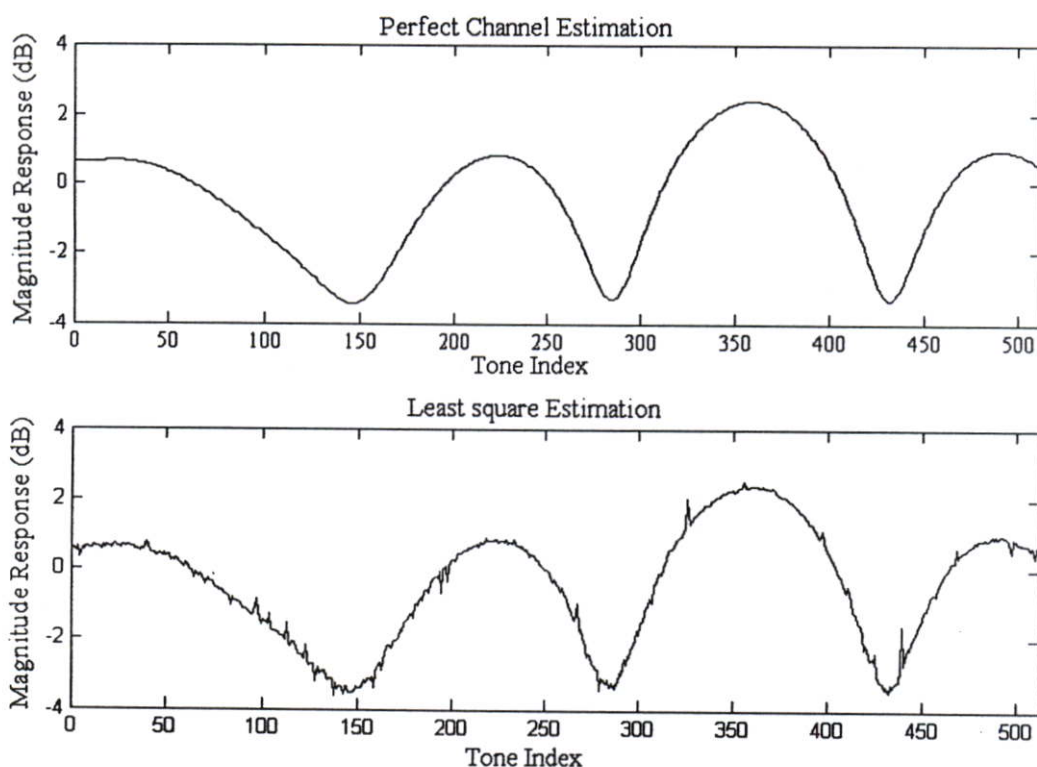
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ MIMO-OFDM ซึ่งจะอ้างอิงมาตรฐานทางกายภาพ (Physical Layer) ของมาตรฐาน IEEE 802.16a [3], [4] ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองระบบ

System Parameters	Values
Modulation Scheme	QPSK, 16QAM, 64QAM
Number of FFT Point (N)	256
System Bandwidth	20 MHz
Sub-carrier Spacing	119 kHz
Symbol Duration	11.1 μ s
Effective Symbol Duration	8.4 μ s
Guard Time Interval	2.7 μ s
Carrier Frequency	5 GHz
Channel Model	AWGN and Rayleigh fading

5.3 การประมาณการตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณแบบ LS (Least Square)

ในหัวข้อนี้ การจำลองระบบจะแสดงสมรรถนะของระบบ SISO-OFDM และ STBC MIMO-OFDM เมื่อที่ด้านรับมีการประมาณช่องสัญญาณแบบ LS และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะกับระบบที่มีช่องสัญญาณในอุดมคติ (Perfect Channel Estimation) รูปที่ 5.1 แสดงช่องสัญญาณที่มีการประมาณ ช่องสัญญาณแบบ LS และช่องสัญญาณในอุดมคติ

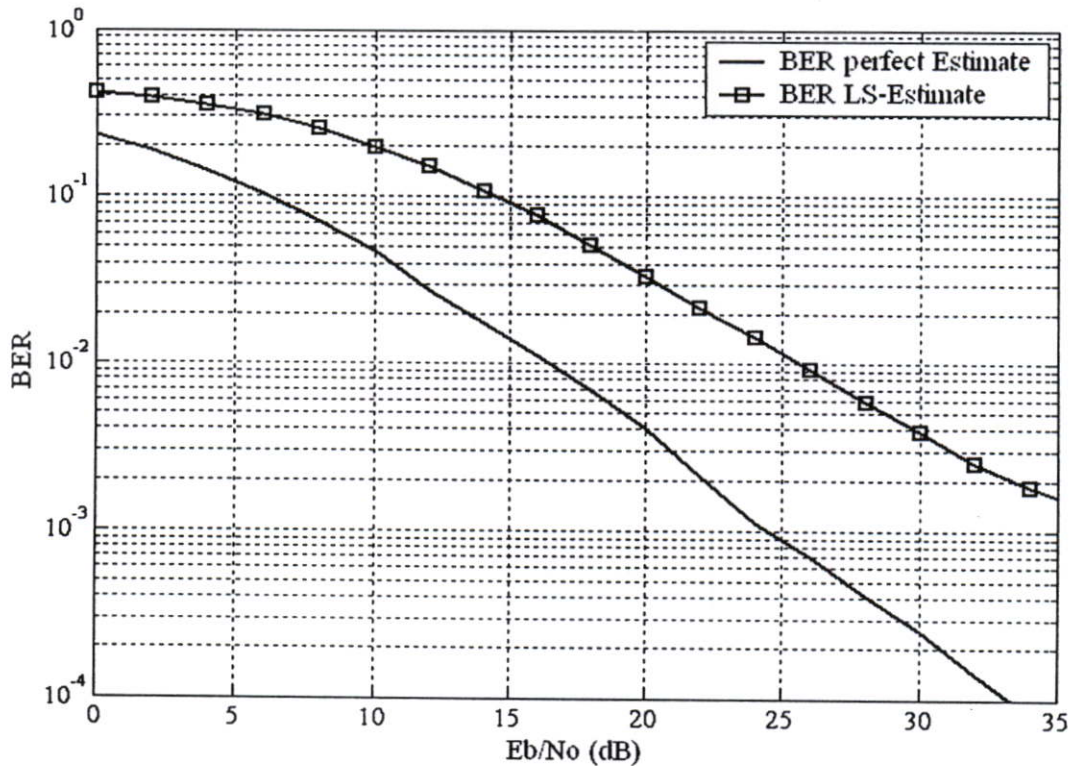


รูปที่ 5.1 ช่องสัญญาณที่มีการประมาณช่องสัญญาณแบบ LS และช่องสัญญาณในอุดมคติ

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าการประมาณช่องสัญญาณแบบ LS ยังมีสัญญาณรบกวนอยู่ในค่าที่ประมาณได้ เมื่อเทียบกับช่องสัญญาณในอุดมคติจะทำให้เห็นความแตกต่างได้ชัดเจน การประมาณช่องสัญญาณมีความสำคัญต่อระบบการสื่อสารแบบไร้สายเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะระบบที่มีการโคเวอรัจจี้ทางสายอากาศ จำเป็นที่จะต้องอาศัยค่าประมาณของช่องสัญญาณ เพื่อทำการถอดรหัส ในการคืนสัญญาณเดิมกลับมา จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าประมาณยังมีสัญญาณรบกวนอยู่ในค่าที่ประมาณได้ เมื่อเปรียบเทียบกับช่องสัญญาณในอุดมคติ ดังนั้นถ้าระบบมีการประมาณช่องสัญญาณที่ไม่มีความแม่นยำ ย่อมมีผลกระทบต่อสมรรถนะ โดยรวมของระบบ ด้วยเหตุนี้การประมาณช่องสัญญาณจึงควรใช้แบบที่มีสมรรถนะสูงกว่าแบบ LS

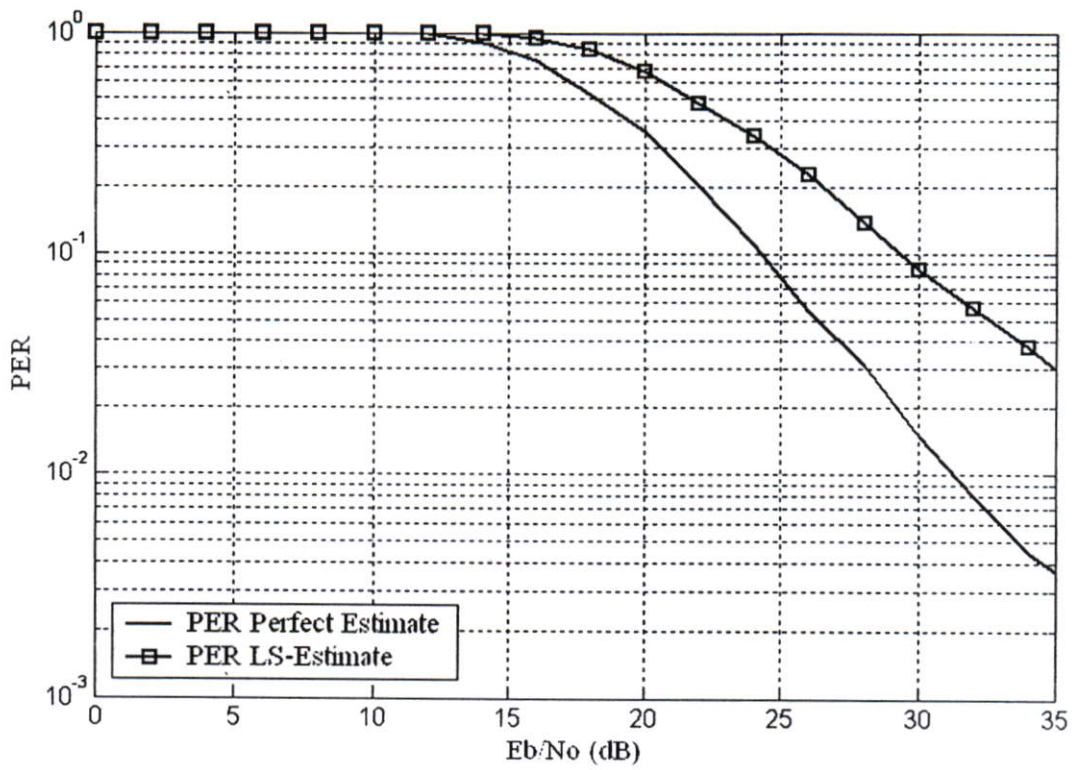
5.3.1 สมรรถนะของระบบ SISO-OFDM เมื่อใช้การประมาณช่องสัญญาณแบบ LS

ในรูปที่ 5.2 แสดงผลกระทบของการประมาณช่องสัญญาณแบบ LS เทียบกับแบบที่มีช่องสัญญาณในอุดมคติ ระบบระบบใช้การมอดูเลตแบบ QPSK เมื่อแสดงสมรรถนะในรูปของอัตราผิดพลาดของบิต และในรูปที่ 5.3 แสดงอัตราผิดพลาดของแพ็คเกจข้อมูล



รูปที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบอัตราผิดพลาดบิตของระบบ SISO เมื่อประมาณ ช่องสัญญาณแบบ LS เทียบกับแบบที่มีช่องสัญญาณในอุดมคติ

จากรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้การประมาณช่องสัญญาณแบบอุดมคติมีสมรรถนะของอัตราผิดพลาดของบิตที่มีค่า E_b/N_0 ต่ำกว่าระบบที่ประมาณช่องสัญญาณแบบ LS ประมาณ 8 dB ที่ค่า $BER = 10^{-2}$ จะเห็นได้ว่าการออกแบบระบบเพื่อใช้งานจริง จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องรับที่มีสมรรถนะสูงในการประมาณช่องสัญญาณ เพื่อเพิ่มสมรรถนะโดยรวมของระบบ

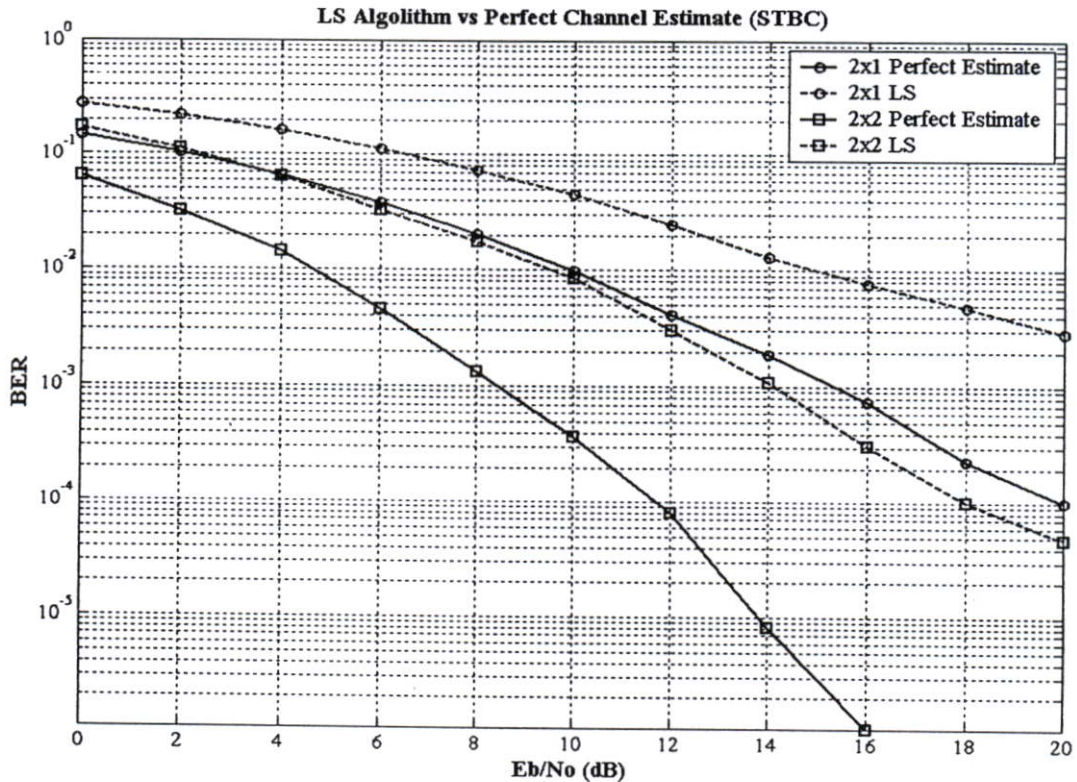


รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบอัตราผิดพลาดแพ็คเกจข้อมูลของระบบ SISO เมื่อประมาณช่องสัญญาณแบบ LS เทียบกับแบบที่มีช่องสัญญาณในอุดมคติ

จากรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้การประมาณช่องสัญญาณแบบอุดมคติมีประสิทธิภาพของอัตราผิดพลาดของแพ็คเกจมีค่า E_b/N_0 ต่ำกว่าระบบที่ประมาณช่องสัญญาณแบบ LS ประมาณ 7 dB ที่ค่า $BER = 10^{-2}$ เมื่อระบบส่งสัญญาณ OFDM จำนวน 6 สัญญาณต่อแพ็คเกจ

5.3.2 สมรรถนะของระบบ STBC MISO-OFDM และ STBC MIMO-OFDM เมื่อใช้การประมาณช่องสัญญาณแบบ LS

ระบบที่ใช้จำลองคือ ระบบ MISO-OFDM ที่เข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา ที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1 ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และสายอากาศด้านรับ 1 ชุด และระบบ MIMO-OFDM ที่เข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา ที่ใช้สายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับ 2 ชุด ระบบใช้การมอดูเลทแบบ QPSK และใช้การสัญญาณแบบ ORC แสดงผลการจำลองในรูปที่ 5.4



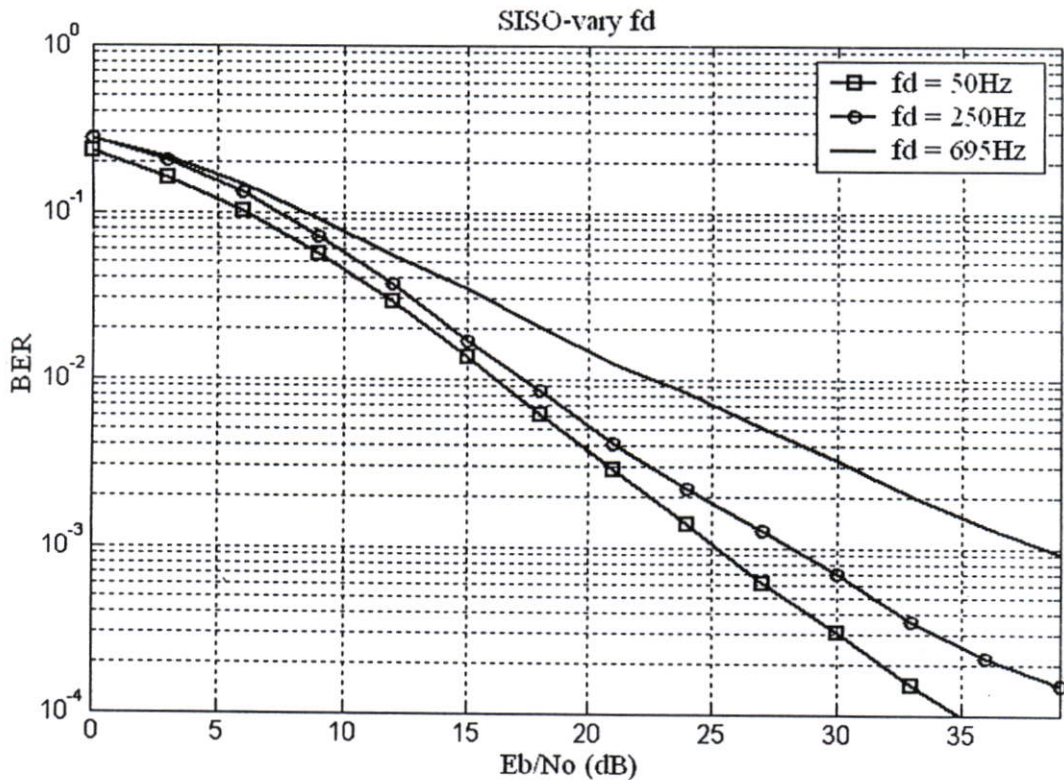
รูปที่ 5.4 สมรรถนะของระบบ MISO-OFDM และ MIMO-OFDM เมื่อใช้การประมาณช่องสัญญาณแบบ LS

จากรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าระบบ MISO-OFDM ที่ใช้การประมาณช่องสัญญาณแบบอุดมคติ มีสมรรถนะของอัตราผิดพลาดของบิตที่มีค่า E_b/N_0 ต่ำกว่าระบบที่ประมาณช่องสัญญาณแบบ LS ประมาณ 7 dB ที่ค่า $BER = 10^{-3}$ และระบบ MIMO-OFDM ที่ใช้การประมาณช่องสัญญาณแบบอุดมคติ มีสมรรถนะของอัตราผิดพลาดของบิตที่มีค่า E_b/N_0 ต่ำกว่าระบบที่ประมาณช่องสัญญาณแบบ LS ประมาณ 6 dB ที่ค่า $BER = 10^{-4}$

5.4 สมรรถนะอัตราความผิดพลาดของข้อมูลในระบบ

5.4.1 ผลกระทบจากค่าความถี่คอปเปลอร์สูงสุดต่อระบบ SISO-OFDM

ในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณมัลติพาธ ค่าความถี่คอปเปลอร์สูงสุด [13] หรือค่า f_d จะมีผลกระทบต่อความเร็วในการเปลี่ยนแปลงระดับของการจางหายในช่องสัญญาณ ในหัวข้อนี้ จะแสดงผลกระทบจากค่าความถี่คอปเปลอร์สูงสุด ต่อระบบ SISO-OFDM ดังรูปที่ 5.5

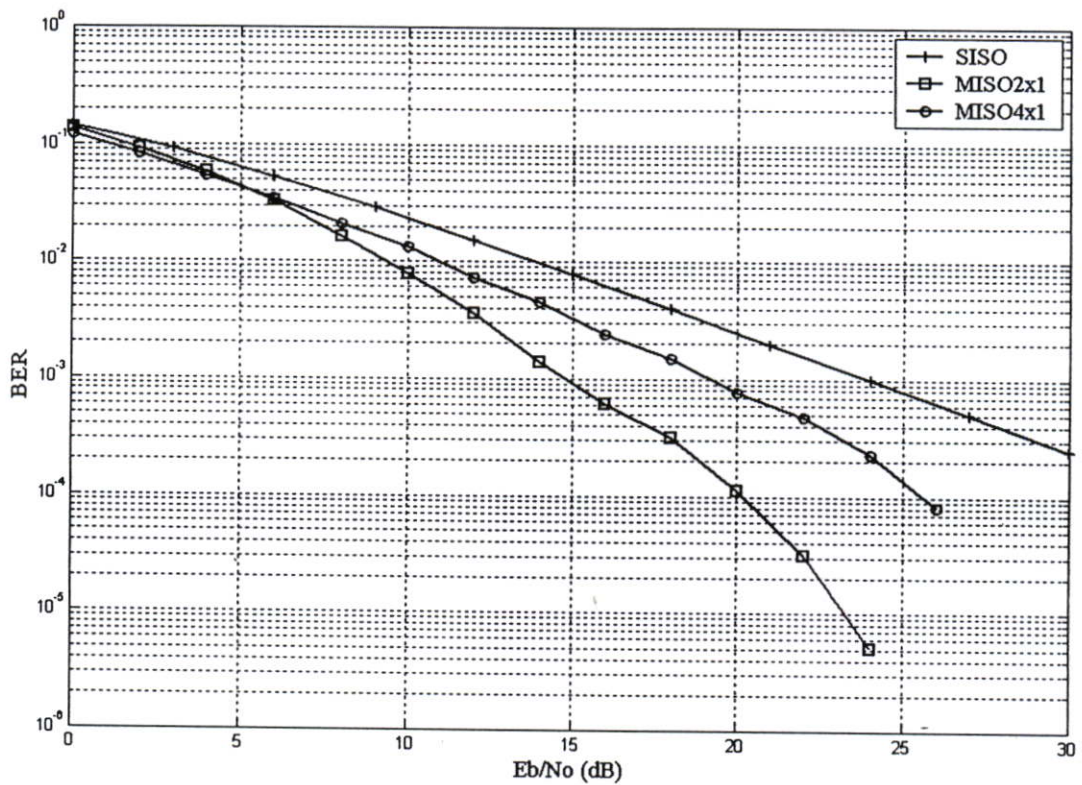


รูปที่ 5.5 แสดงผลกระทบจากค่าความถี่คอปเปลอร์สูงสุดต่อระบบ SISO-OFDM

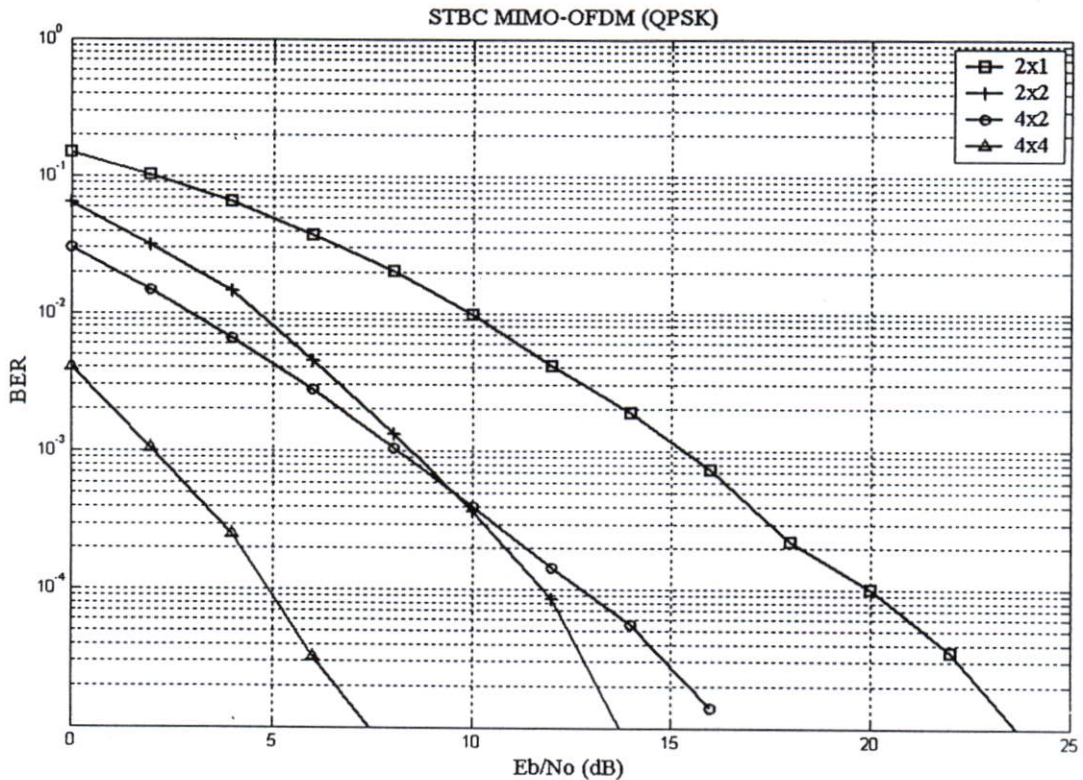
จากรูปที่ 5.5 แสดงสมรรถนะอัตราผิดพลาดของระบบ SISO-OFDM ที่ใช้การมอดูเลตแบบ QPSK สังเกตเส้นกราฟที่มีค่า $f_d = 50\text{Hz}$ จะมีอัตราผิดพลาดของบิตน้อยกว่าระบบที่มีค่า f_d สูงๆ สาเหตุเป็นเพราะระบบที่มีค่า f_d มากจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับของการจางหายในช่องสัญญาณอย่างรวดเร็ว ทำให้บิตข้อมูลในเฟรมได้รับผลจากการจางหายแตกต่างกันมาก ในช่วงบิตที่ติดกัน ส่งผลให้อัตราผิดพลาดของบิตสูงขึ้น

5.4.2 สมรรถนะของระบบ STBC MISO-OFDM และ STBC MIMO-OFDM

จากรูปที่ 5.6 แสดงสมรรถนะอัตราผิดพลาดบิต ของระบบ OFDM ที่ใช้การมอดูเลทแบบ QPSK ใช้สายอากาศที่เครื่องรับ 1 ชุด คือระบบ SISO-OFDM และระบบ MISO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และ 4 ชุด เมื่อระบบเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา ที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1 จะเห็นได้ว่าระบบ MISO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุดมีสมรรถนะสูงสุด โดยสังเกตที่อัตราผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-4} จะมีค่า E_b/N_0 ดีกว่าระบบ MISO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 4 ชุด ประมาณ 6 dB และดีกว่า SISO-OFDM ประมาณ 15 dB จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนจำนวนของสายอากาศด้านรับต่อสายอากาศด้านส่ง จะมีผลต่อสมรรถนะของระบบด้วย ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามาก จะทำให้อัตราผิดพลาดของระบบลดลง

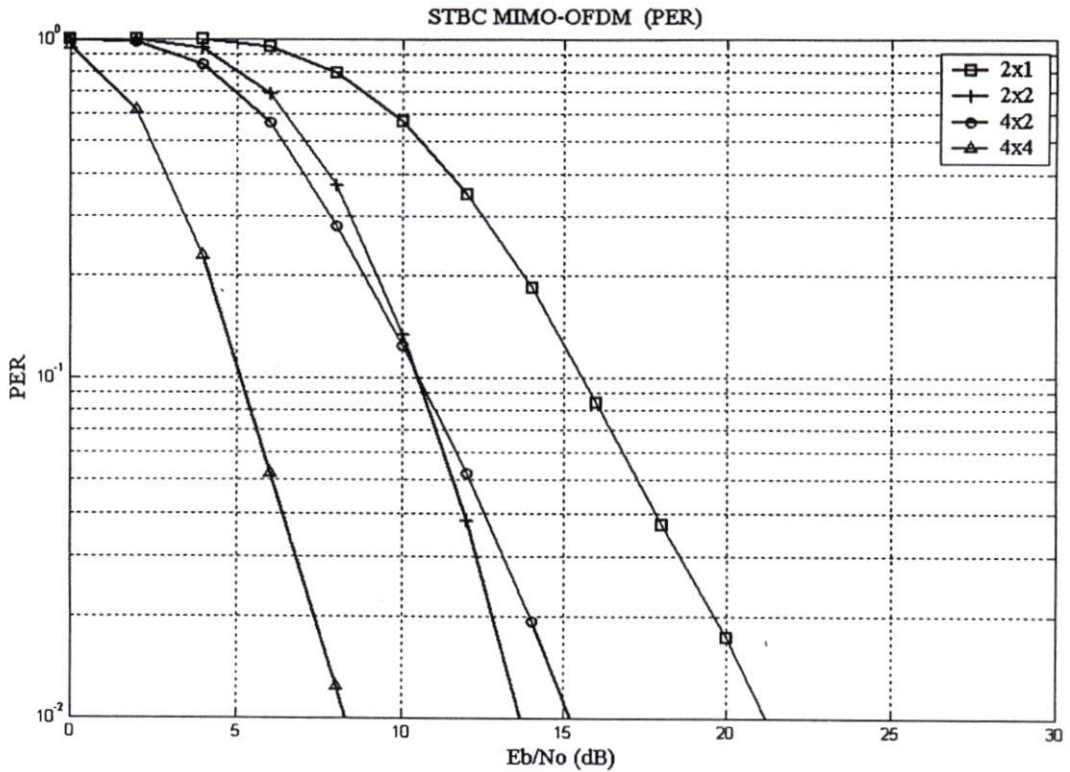


รูปที่ 5.6 สมรรถนะของระบบ SISO-OFDM และ MISO-OFDM ที่ใช้สายอากาศที่เครื่องรับ 1 ชุด



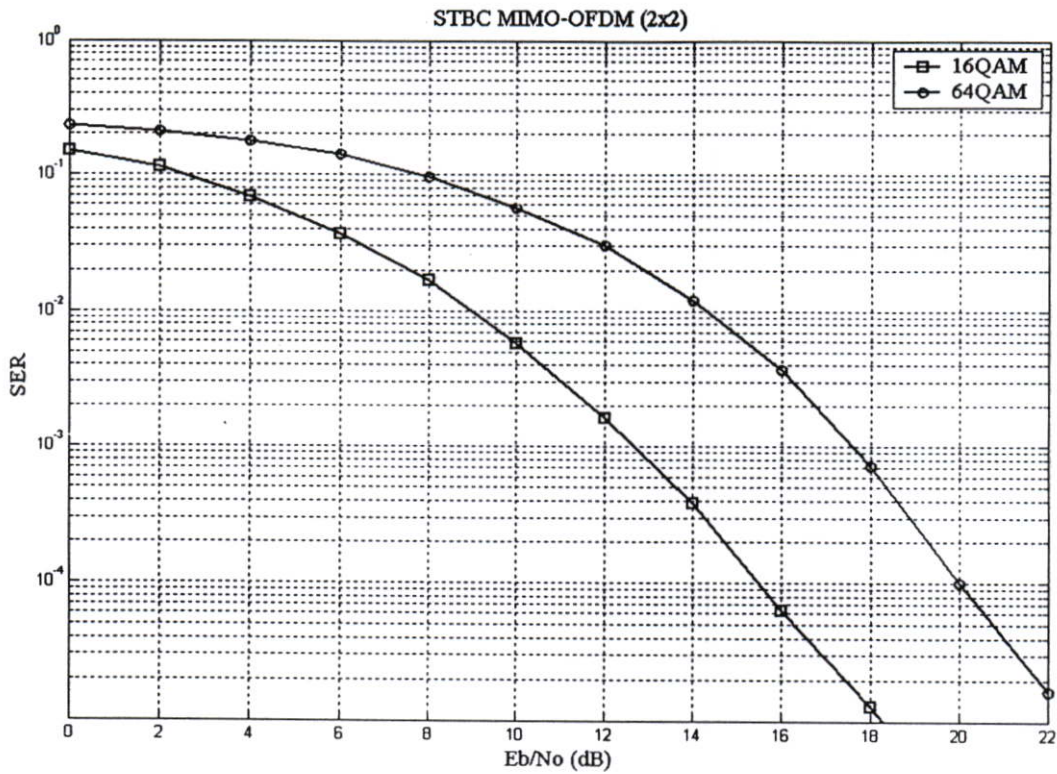
รูปที่ 5.7 สมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของระบบ MISO-OFDM และระบบ MIMO-OFDM เมื่อใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และ 4 ชุด

จากรูปที่ 5.7 แสดงสมรรถนะของระบบ MISO-OFDM และระบบ MIMO-OFDM ที่ใช้การมอดูเลตแบบ QPSK และมีจำนวนสายอากาศแตกต่างกัน เมื่อระบบทั้งหมดมีการเข้ารหัสแบบบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนของจำนวนสายอากาศด้านรับต่อจำนวนสายอากาศด้านส่งมีผลต่อสมรรถนะของระบบ ถ้าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามาก จะทำให้อัตราผิดพลาดของระบบลดลง จากรูประบบที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และใช้สายอากาศด้านรับจำนวนต่างกันคือ 1 ชุด และ 2 ชุด ระบบที่ใช้ด้านรับ 2 ชุด จะมีสมรรถนะดีกว่า 8 dB ที่ $BER = 10^{-4}$ และระบบที่ใช้สายอากาศส่งและรับ 4 ชุดจะมีสมรรถนะสูงสุดคือ $BER=10^{-4}$ ที่ 5 dB



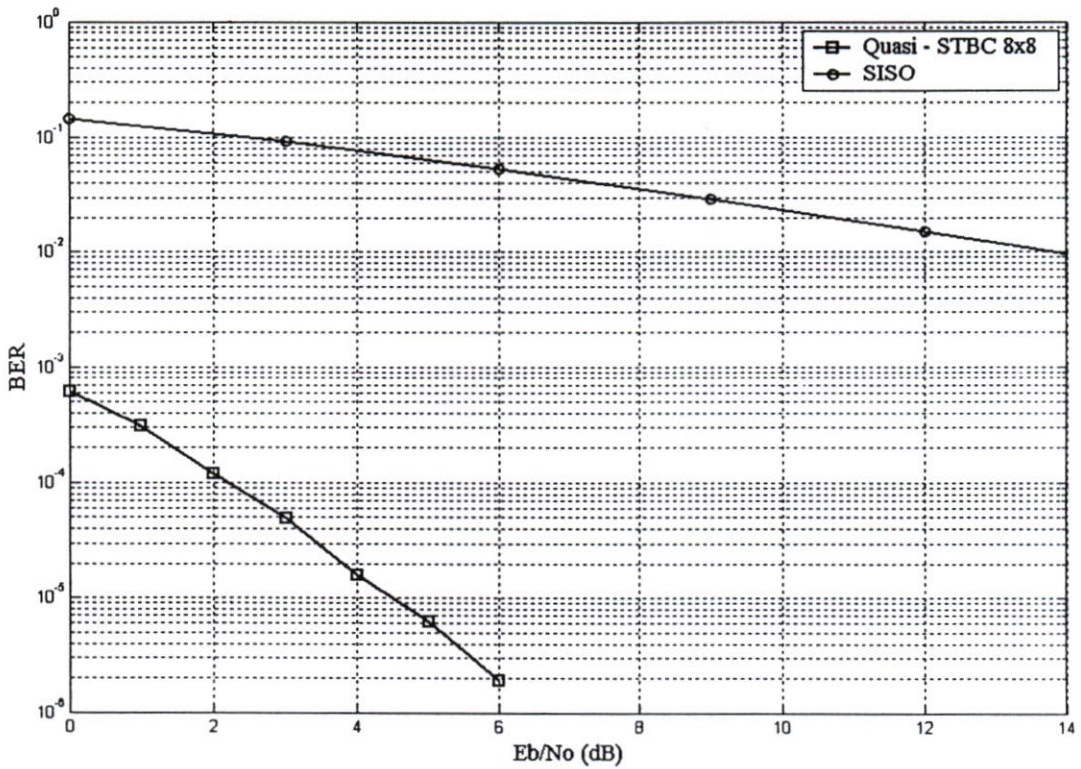
รูปที่ 5.8 สมรรถนะอัตราผิดพลาดแพ็คเกจของระบบ MISO-OFDM และระบบ MIMO-OFDM เมื่อใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และ 4 ชุด

จากรูปที่ 5.8 แสดงสมรรถนะของระบบ MISO-OFDM และระบบ MIMO-OFDM ที่ใช้การมอดูเลทแบบ QPSK เมื่อระบบส่งสัญญาณ OFDM จำนวน 6 สัญญาณต่อแพ็คเกจ และมีจำนวนสายอากาศแตกต่างกัน เมื่อระบบทั้งหมดมีการเข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1 จากรูประบบที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และใช้สายอากาศด้านรับจำนวนต่างกันคือ 1 ชุด และ 2 ชุด ระบบที่ใช้ 2 ชุด จะมีสมรรถนะดีกว่า 6 dB ที่ $PER = 10^{-2}$ และระบบที่ใช้สายอากาศส่งและรับ 4 ชุดจะมีสมรรถนะสูงสุดคือ $PER=10^{-2}$ ที่ 8 dB



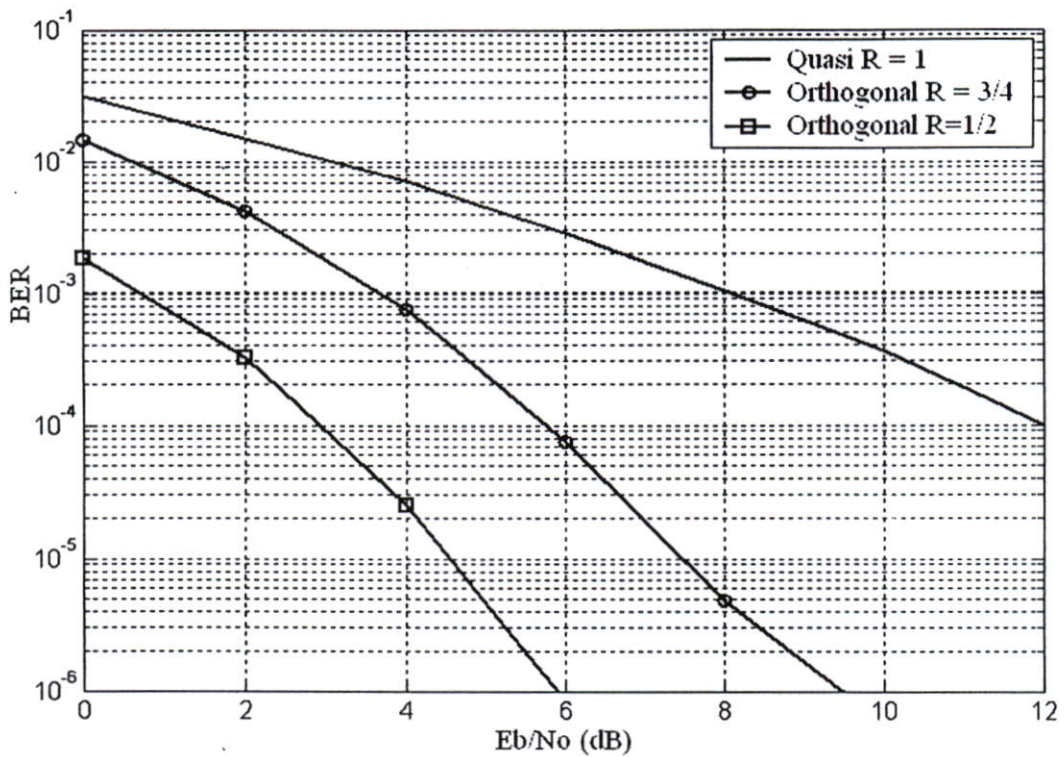
รูปที่ 5.9 สมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่งและด้านรับ 2 ชุด เมื่อใช้การมอดูเลทแบบ 16 QAM และ 64QAM

ระบบ OFDM ที่เข้ารหัสบล็อกแบบปริภูมิ-เวลา (STBC MIMO-OFDM) มีสมรรถนะสูงในการโคเวอร์ซีดี ดังนั้นระบบจึงสามารถใช้อัตราข้อมูลที่เพิ่มจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ได้ เมื่อระบบใช้กำลังงานต่ำ จึงทำให้ระบบสามารถเพิ่มอัตราเร็วในการส่งข้อมูลได้ จากรูปที่ 5.9 แสดงสมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่งและด้านรับ 2 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ 16 QAM และ 64QAM จะเห็นได้ว่าระบบที่มอดูเลทแบบ 16 QAM จะมีสมรรถนะดีกว่า 5 dB ที่ $SER = 10^{-4}$ ระบบที่มอดูเลทแบบ 16 QAM และ 64QAM จะมีอัตราเร็วในการส่งข้อมูล 72 Mbps และ 108 Mbps ตามลำดับ



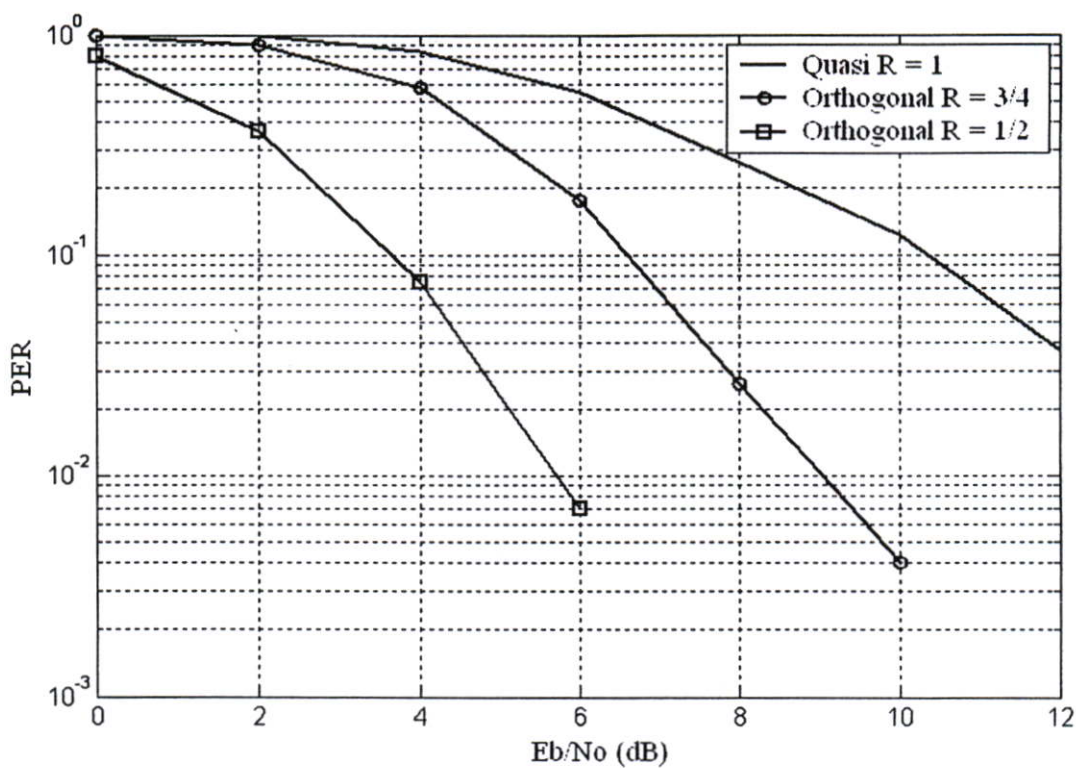
รูปที่ 5.10 สมรรถนะของระบบ STBC MIMO-OFDM ที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1 และใช้สายอากาศด้านส่งและด้านรับ 8 ชุด เปรียบเทียบกับระบบ SISO

จากรูปที่ 5.10 แสดงสมรรถนะของระบบ STBC MIMO-OFDM ที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1 และใช้สายอากาศด้านส่งและด้านรับ 8 ชุด เปรียบเทียบกับระบบ SISO ที่ทั้งสองระบบมอดูเลทแบบ QPSK จะเห็นได้ว่าระบบ STBC MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่งและด้านรับ 8 ชุด มีสมรรถนะดีกว่าแบบ SISO ประมาณ 32 dB ที่ $BER = 10^{-4}$ ดังนั้นระบบ STBC MIMO-OFDM ที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1 และใช้สายอากาศด้านส่งและด้านรับ 8 ชุด สามารถใช้การมอดูเลทที่เพิ่มจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ได้ เมื่อระบบใช้กำลังงานต่ำ อาจใช้การมอดูเลทแบบ 64 QAM หรือ 256 QAM เพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการส่งข้อมูล



รูปที่ 5.11 แสดงสมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของระบบ STBC MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศ ด้านส่ง 4 ชุดและรับ 2 ชุด เมื่อระบบใช้การเข้ารหัส STBC ที่มีอัตราแตกต่างกัน

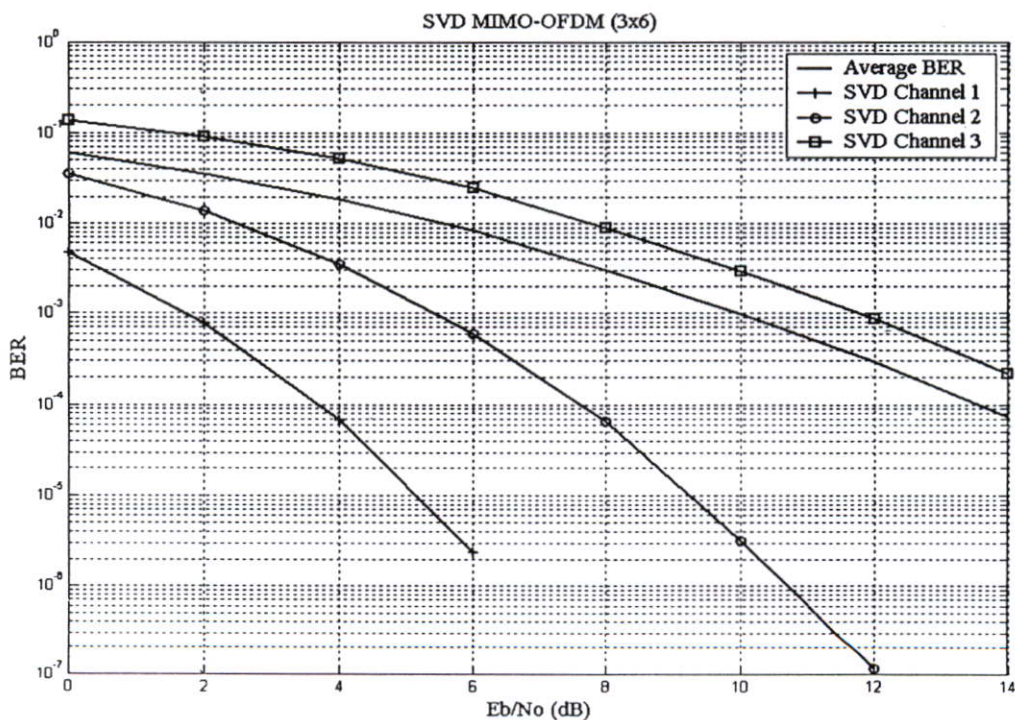
การเข้ารหัส STBC มีอัตราการเข้ารหัสสูงสุดเท่ากับ 1 นั่นคือเป็นการรหัสแบบ Quasi-Orthogonal ที่ส่งสัญลักษณ์ 4 สัญลักษณ์ ในช่วงเวลาสัญลักษณ์ 4 ช่วง และแบบทั่วไปก็คือที่อัตราเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ที่ส่งสัญลักษณ์ 4 สัญลักษณ์ ในช่วงเวลาสัญลักษณ์ 8 ช่วง และที่อัตรา $\frac{3}{4}$ ที่ส่งสัญลักษณ์ 3 สัญลักษณ์ ในช่วงเวลาสัญลักษณ์ 4 ช่วง หลักการของการเข้ารหัสที่อัตราต่างๆ ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 จากรูปที่ 5.11 แสดงสมรรถนะของระบบ STBC MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 4 ชุดและด้านรับ 2 ชุด เมื่อระบบใช้การเข้ารหัส STBC ที่มีอัตราการเข้ารหัส จะเห็นได้ว่าระบบที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $\frac{1}{2}$ มีสมรรถนะของระบบดีที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราอื่น โดยที่มีค่า E_b/N_0 ดีกว่าระบบที่เข้ารหัสด้วยอัตรา $\frac{3}{4}$ เท่ากับ 3 dB และดีกว่าระบบ Quasi-Orthogonal เท่ากับ 9 dB ที่ $BER=10^{-4}$ และเมื่อพิจารณาอัตราความผิดพลาดเฟ้คเกทในรูปที่ 5.12 ระบบที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $\frac{1}{2}$ มีสมรรถนะของระบบดีที่สุด เมื่อเทียบกับอัตราอื่น โดยที่มีค่า E_b/N_0 ดีกว่าระบบที่เข้ารหัสด้วยอัตรา $\frac{3}{4}$ เท่ากับ 3 dB และดีกว่าระบบ Quasi-Orthogonal เท่ากับ 8 dB ที่ $PER=10^{-2}$ แต่เมื่อพิจารณาที่อัตราเร็วในการส่งข้อมูล แบบ Quasi-Orthogonal จะมีสมรรถนะสูงสุด เพราะมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1



รูปที่ 5.12 แสดงสมรรถนะอัตราผิดพลาดแพ็คเกจของระบบ STBC MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 4 ชุดและรับ 2 ชุด เมื่อระบบใช้การเข้ารหัส STBC ที่มีอัตราแตกต่างกัน

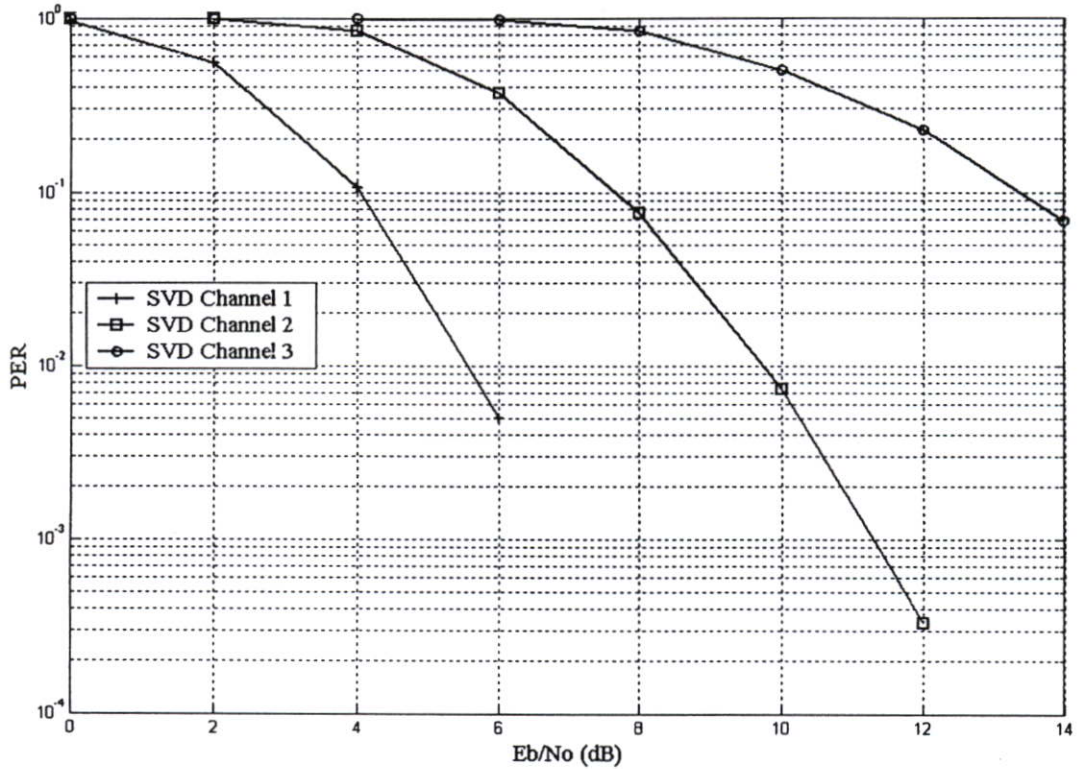
5.4.3 สมรรถนะของระบบ SVD MIMO-OFDM

ระบบ SVD MIMO-OFDM เป็นระบบที่สามารถเลือกวิธีการมอดูเลตข้อมูลแตกต่างกันในแต่ละชุดสัญญาณได้ เพราะว่าชุดสัญญาณแต่ละชุดจะมีอัตราผิดพลาดที่แตกต่างกันหลังจากที่ถอดรหัสแล้ว สมรรถนะของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 3 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลตแบบ QPSK การส่งข้อมูลแบบรหัส SVD จะส่งข้อมูลได้ที่ละ N_T สัญญาณ (ระบบนี้ส่งได้ที่ละ 3 สัญญาณ) ในหนึ่งช่วงเวลา จากรูปที่ 5.13 แสดงสมรรถนะของระบบ ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 3 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลตแบบ QPSK เมื่อเส้นกราฟด้านล่างสุดคืออัตราผิดพลาดบิต ของสัญญาณชุดที่ 1 จะมีสมรรถนะดีที่สุด คือ ประมาณ 3.5 dB ที่ $BER=10^{-4}$ เส้นกราฟถัดขึ้นไปคือ อัตราผิดพลาดบิต ของสัญญาณชุดที่ 2 ที่ใช้กำลังงานประมาณ 7.5 dB ที่ $BER=10^{-4}$ จากนั้นเส้นกราฟที่สามถัดไปคือ อัตราผิดพลาดบิตเฉลี่ยของระบบโดยรวม ที่ใช้กำลังงานประมาณ 13.5 dB ที่ $BER=10^{-4}$ และกราฟเส้นบนสุดคือ อัตราผิดพลาดบิต ของสัญญาณชุดที่ 3 จะมีสมรรถนะต่ำสุด ประมาณ 15 dB ที่ $BER=10^{-4}$ ดังนั้นระบบสามารถทำการมอดูเลตสัญญาณชุดแรก หรือชุดที่สองด้วยการมอดูเลตในระดับที่สูงขึ้น เช่น 256QAM, 64QAM หรือ 16QAM เพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการส่งข้อมูล การส่งบิตข้อมูลจำนวนไม่เท่ากันในแต่ละชุดสัญญาณ จะเรียกว่าวิธี Bit Loading ซึ่งระบบจะต้องมีความยืดหยุ่น ในการเปลี่ยนวิธีการมอดูเลต

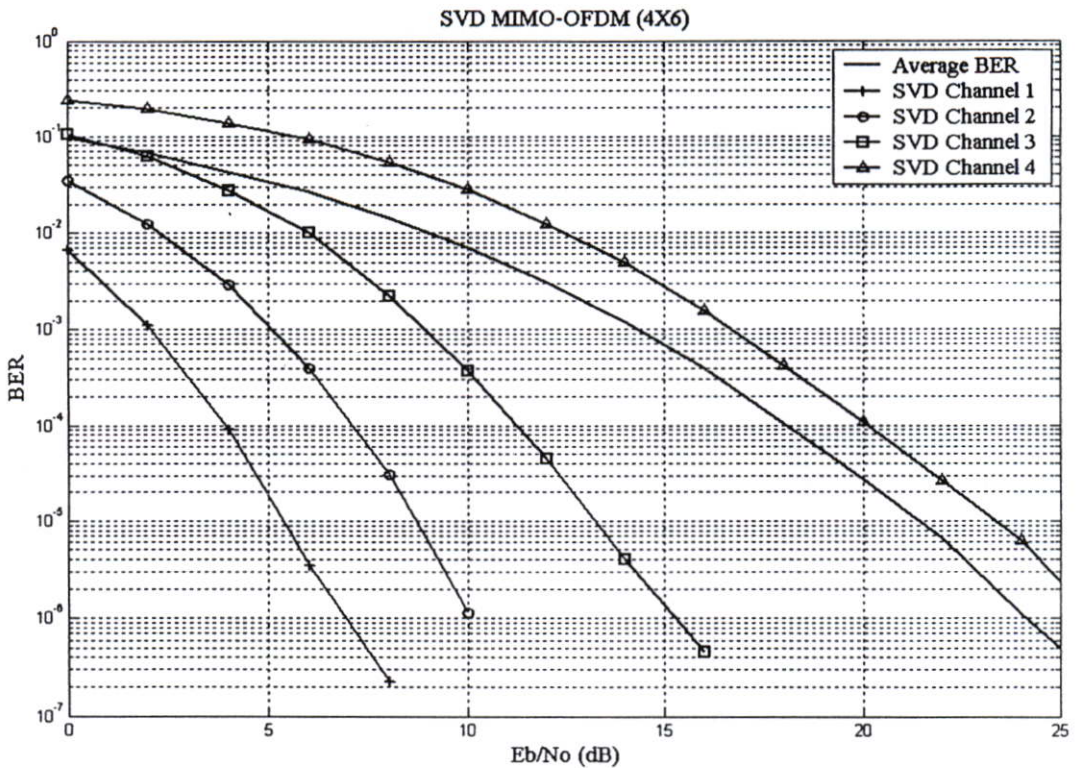


รูปที่ 5.13 สมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 3 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลตแบบ QPSK

จากรูปที่ 5.14 แสดงสมรรถนะอัตราผิดพลาดแพ็คเกจ ของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 3 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK เส้นกราฟ 3 เส้นจากล่างขึ้นบน เป็นสมรรถนะอัตราผิดพลาดแพ็คเกจของชุดสัญญาณที่ 1 ชุดสัญญาณที่ 2 และชุดสัญญาณที่ 3 ตามลำดับจะเห็นได้ว่ากราฟของชุดสัญญาณที่ 1 มีสมรรถนะดีที่สุด คือดีกว่าสัญญาณชุดที่ 2 และสัญญาณชุดที่ 3 เท่ากับ 4 dB และ 10 dB ที่ $PER=10^{-2}$ ตามลำดับ



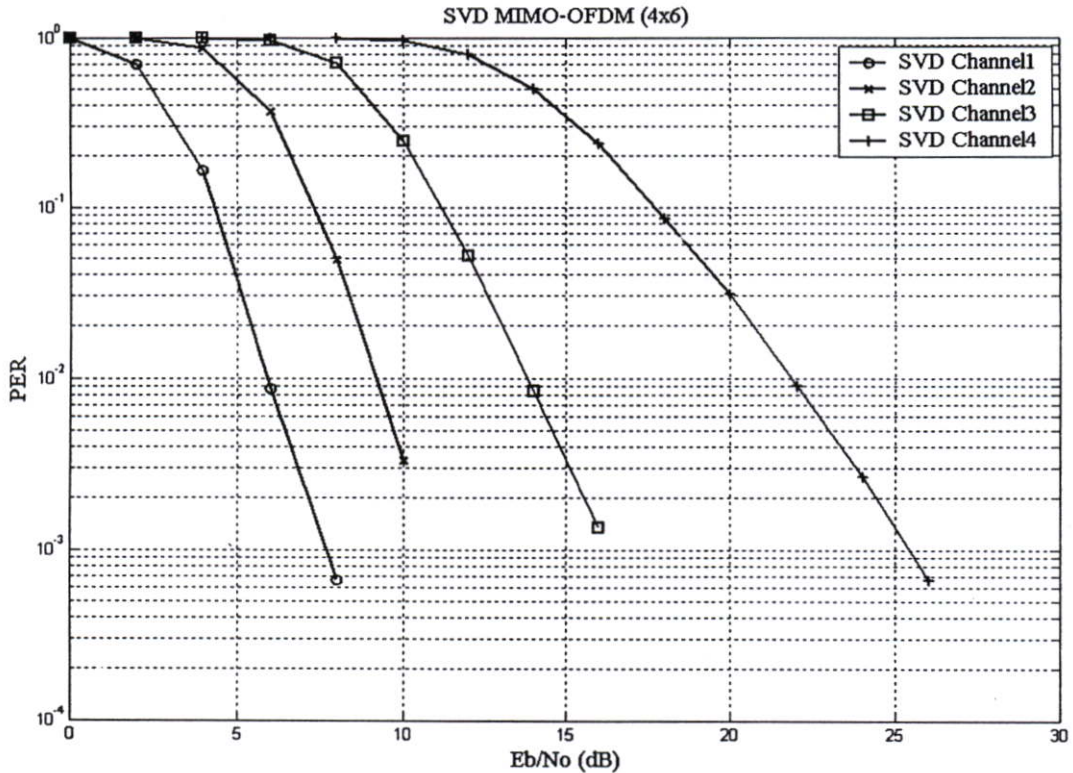
รูปที่ 5.14 สมรรถนะอัตราผิดพลาดแพ็คเกจ ของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 3 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK



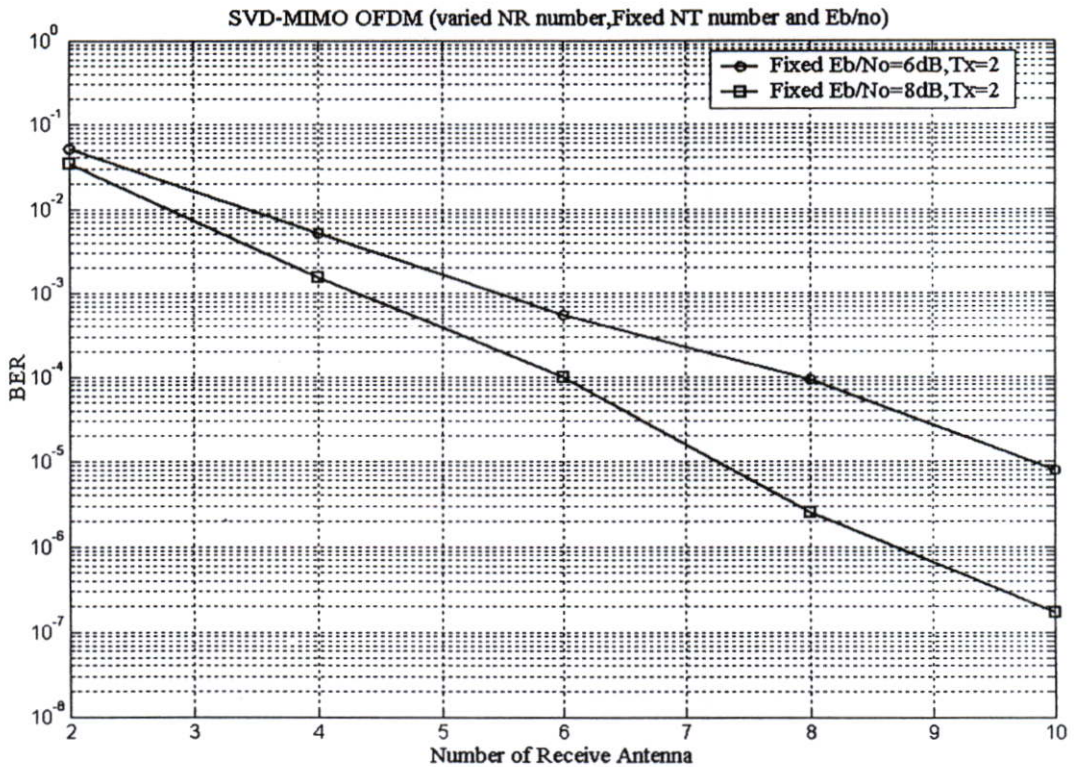
รูปที่ 5.15 สมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 4 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK

จากรูปที่ 5.15 แสดงสมรรถนะของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 4 ชุด และด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK เส้นกราฟด้านล่างสุดคืออัตราผิดพลาดบิตของสัญลักษณ์ชุดที่ 1 จะมีสมรรถนะดีที่สุด คือ ประมาณ 4 dB ที่ $BER=10^{-4}$ เส้นกราฟที่สองถัดขึ้นไป คือ อัตราผิดพลาดบิตของสัญลักษณ์ชุดที่ 2 ที่ใช้กำลังงานประมาณ 7 dB ที่ $BER=10^{-4}$ เส้นกราฟที่สามถัดขึ้นไป คืออัตราผิดพลาดบิต ของสัญลักษณ์ชุดที่ 3 ที่ใช้กำลังงานประมาณ 11.5 dB ที่ $BER=10^{-4}$ เส้นกราฟที่สี่ คืออัตราผิดพลาดบิตเฉลี่ยของระบบโดยรวม ที่ใช้กำลังงานประมาณ 18 dB ที่ $BER=10^{-4}$ และกราฟเส้นบนสุดคือ คืออัตราผิดพลาดบิต ของสัญลักษณ์ชุดที่ 4 จะมีสมรรถนะต่ำสุด ประมาณ 20 dB ที่ $BER=10^{-4}$ ดังนั้นระบบสามารถทำการมอดูเลทสัญลักษณ์ชุดแรก หรือชุดที่สองด้วยการมอดูเลทในระดับที่สูงขึ้นได้

จากรูปที่ 5.16 แสดงสมรรถนะอัตราผิดพลาดเฟ้คเกท ของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้าน ส่ง 4 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK เส้นกราฟ 4 เส้นจากซ้ายไปขวา เป็นสมรรถนะอัตราผิดพลาดเฟ้คเกทของชุดสัญญาณที่ 1 ชุดสัญญาณที่ 2 ชุดสัญญาณที่ 3 และ ชุดสัญญาณที่ 4 ตามลำดับจะเห็นได้ว่ากราฟของชุดสัญญาณที่ 1 มีสมรรถนะดีที่สุด คือ ดีกว่าสัญญาณชุดที่ 2 สัญญาณชุดที่ 3 และสัญญาณชุดที่ 4 เท่ากับ 3 dB, 8 dB และ 16 dB ที่ $PER=10^{-2}$ ตามลำดับ



รูปที่ 5.16 สมรรถนะอัตราผิดพลาดเฟ้คเกท ของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้าน ส่ง 4 ชุดและด้านรับ 6 ชุด เมื่อมอดูเลทแบบ QPSK

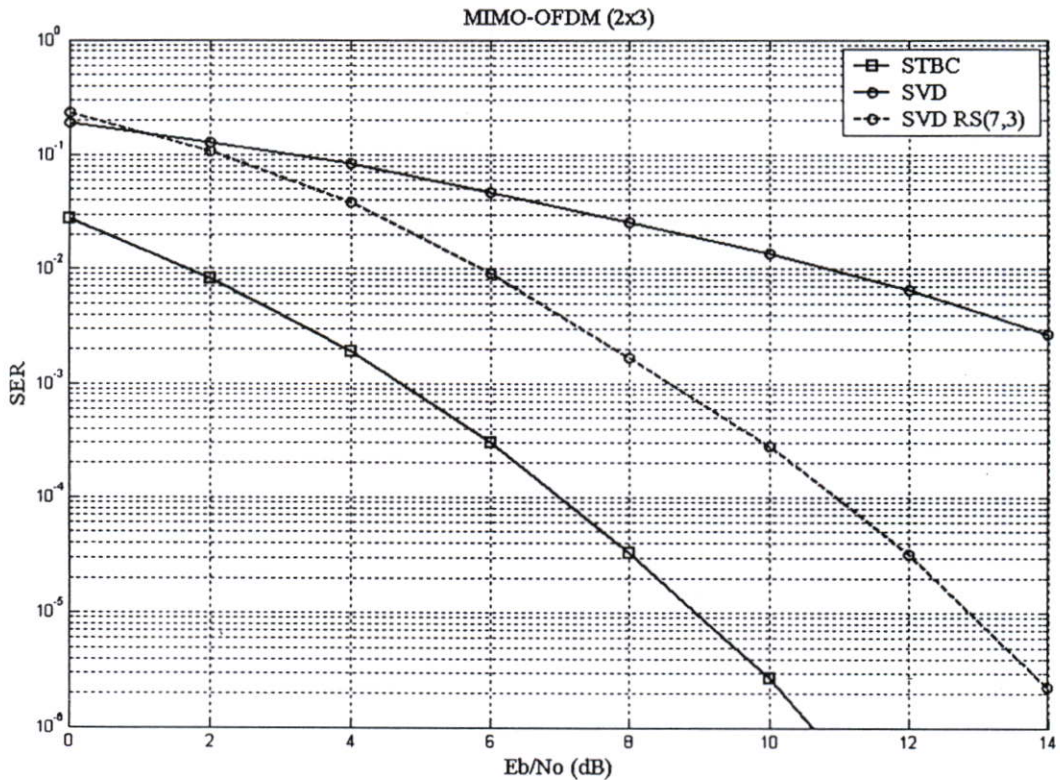


รูปที่ 5.17 แสดงสมรรถนะของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด เมื่อกำหนดให้ค่า Eb/No คงที่ 6 dB และ 8 dB และเพิ่มจำนวนของสายอากาศด้านรับ

จากรูปที่ 5.17 แสดงสมรรถนะของระบบ SVD MIMO-OFDM ที่ใช้สายอากาศด้านส่ง 2 ชุด เมื่อกำหนดให้ Eb/No คงที่ 6 dB และ 8 dB และเพิ่มจำนวนของสายอากาศด้านรับ จะเห็นได้ว่าสมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตมีค่าดีขึ้น เมื่อใช้สายอากาศด้านรับ 10 ชุด จะมีค่าอัตราผิดพลาดบิตประมาณ 10^{-7} และเมื่อใช้สายอากาศด้านรับ 6 ชุด จะมีค่าอัตราผิดพลาดบิตประมาณ 10^{-4} เมื่อค่า Eb/No = 8 dB

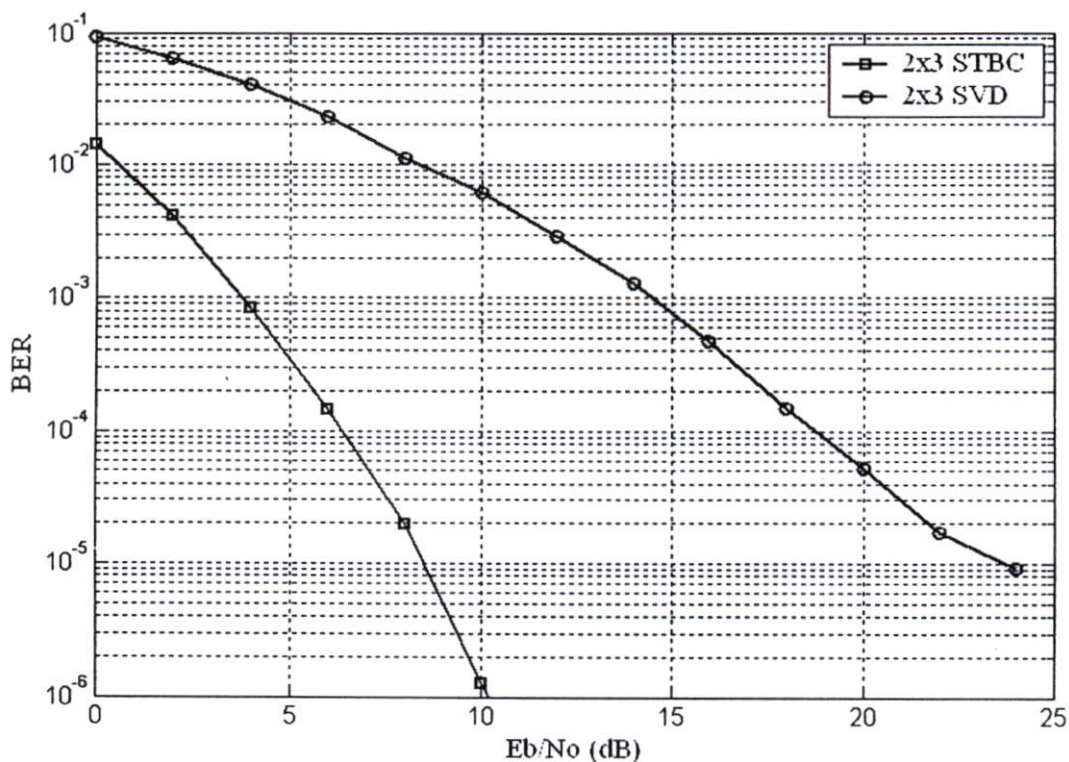
5.4.4 เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ STBC MIMO-OFDM และ SVD MIMO-OFDM

จากรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC มีสมรรถนะอัตราผิดพลาดสัญลักษณ์ดีกว่าแบบ SVD ประมาณ 10 dB ที่ $SER=10^{-3}$ เมื่อทั้งสองระบบใช้การมอดูเลตแบบ QPSK และไม่มีการเข้ารหัสช่องสัญญาณ และค่า SER ของระบบ SVD คือค่าอัตราผิดพลาดสัญลักษณ์เฉลี่ยของชุดสัญลักษณ์รวมในระบบ แต่จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบ SVD เข้ารหัสช่องสัญญาณแบบรีดโซโลมอน [24] ที่อัตรา $\frac{1}{2}$ โดยเข้ารหัสมีความยาว 7 สัญลักษณ์ และข้อมูลมีความยาว 3 สัญลักษณ์ แต่ละสัญลักษณ์ใช้ 3 บิต จะทำให้สมรรถนะอัตราผิดพลาดสัญลักษณ์ดีขึ้น โดยต่างกับแบบ STBC ประมาณ 4 dB ที่ $SER=10^{-4}$ ถ้าในการเข้ารหัสรีดโซโลมอนมีการเพิ่มความยาวรหัสจะทำให้สมรรถนะของระบบสูงขึ้นอีก

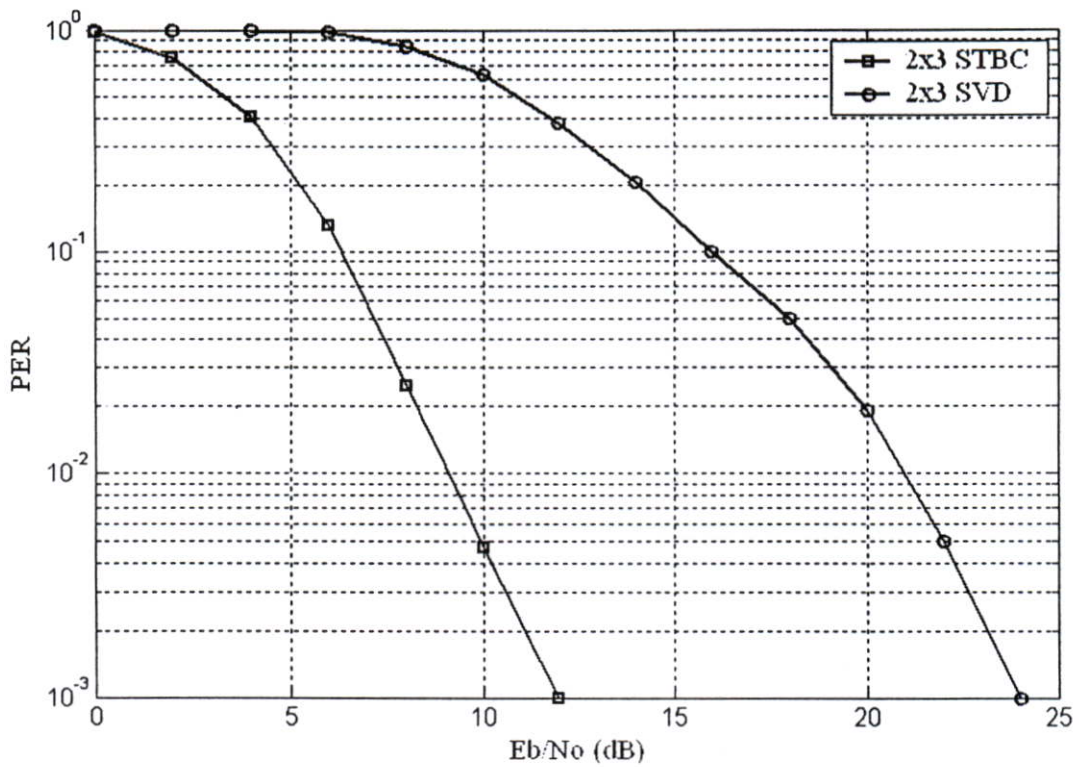


รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD RS(7,3) ที่ใช้จำนวนสายอากาศด้านส่ง 2 ชุดและด้านรับ 3 ชุด

จากรูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD ทั้งสองระบบใช้จำนวนสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับเท่ากับ 2 ชุด และ 3 ชุด ตามลำดับ ระบบ STBC มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลเท่ากับ 36 Mbps และระบบ SVD มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลเท่ากับ 72 Mbps เมื่อทั้งสองระบบใช้การมอดูเลทแบบ QPSK เหมือนกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ระบบ SVD ส่งข้อมูลที่มีอัตราเร็วสูงกว่าแบบ STBC แต่สมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของ STBC จะดีกว่า SVD ประมาณ 11 dB ที่ BER=10⁻⁴ เมื่อค่า BER ของระบบ SVD คือค่าอัตราผิดพลาดเฉลี่ยของชุดสัญลักษณ์รวมในระบบ

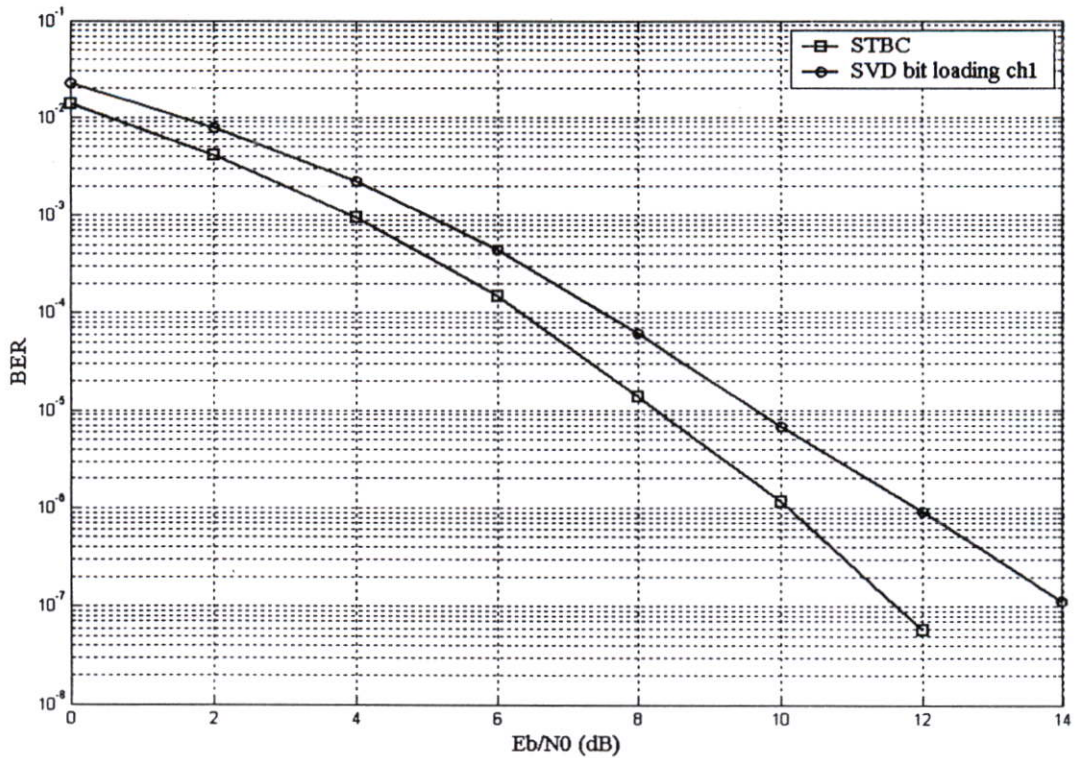


รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะอัตราผิดพลาดบิตของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD เมื่อใช้จำนวนสายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และด้านรับ 3 ชุด



รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะอัตราผิดพลาดแพ็คเกจของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD เมื่อใช้จำนวนสายอากาศด้านส่ง 2 ชุด และด้านรับ 3 ชุด

จากรูปที่ 5.20 เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะอัตราผิดพลาดแพ็คเกจ ของระบบเดียวกับที่แสดง ในรูปที่ 5.19 ซึ่งแบบ STBC มีสมรรถนะดีกว่า 12dB ที่ $PER=10^{-2}$



รูปที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD ที่ใช้จำนวนสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับเท่ากับ 2 ชุด และ 3 ชุดตามลำดับ เมื่อสมรรถนะของ SVD เป็นของชุดสัญญาณที่ 1

จากรูปที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM แบบ STBC และ SVD ที่ใช้จำนวนสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับเท่ากับ 2 ชุด และ 3 ชุดตามลำดับ ใช้การมอดูเลทแบบ QPSK เมื่อสมรรถนะของ SVD เป็นของชุดสัญญาณที่ 1 ผลจากการเปรียบเทียบทั้งสองระบบมีสมรรถนะใกล้เคียงกัน คือระบบ STBC ดีกว่าประมาณ 1 dB ที่ $BER=10^{-4}$

บรรณานุกรม

- [1] R. W. Chang and R. A. Gibby “A Theoretical Study of the Performance of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme.” IEEE ‘Trans. Commu., Vol. COM-16, No.4, pp.527-540, Aug 1968.
- [2] R. W. Chang “Synthesis of Band-limited Orthogonal Signal for Multichannel Data Transmission.” Bell System Tech, Journal, Vol.45 pp.1775-1796, Dec 1966.
- [3] IEEE P802.16a Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems – Medium Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz, 2003.
- [4] ETSI TR 101 856: Broadband Radio Access Networks (BRAN); Functional Requirements for Fixed Wireless Access systems below 11 GHz: HIPER-MAN, 2001.
- [5] R. Van Nee, G. Awater, M. Morikura, H. Takanashi, M. Webster and K. W. Halford, “New high-rate wireless LAN standards, “ IEEE Commun. Mag., pp.82-88, Dec 1999.
- [6] Z. Yang, B. Lu and X. Wang, “Bayesian Monte carlo multiuser receiver for Space-Time coded multicarrier CDMA systems, “IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 19, no. 8, pp. 1625-1637, Aug 2001.
- [7] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. R. Carderbank, “Space-Time Block Coding for wireless communication: Performance Results, “IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17 , no. 3, pp.451-459, Mar 1999.
- [8] S. Nanda, R. Walton, J. Ketchum, M. Wallace and S. Howard, Qualcomm, Inc. “A High-Performance MIMO OFDM wireless LAN”, IEEE Commu., Magazine, pp.101-109, Feb 2005.
- [9] H. Harada, R. Prasad, **Simulation and Software radio for Mobile Communication**, Boston Artech House, 2002
- [10] B. Vucetic and J. Yuan, **Space-Time Coding**, Chichester, John Wiley, 2003.
- [11] G. V. Rangaraj, M. R. Raghavendra and K. Giridhar, “Improved Channel Estimation for OFDM Based WLAN Systems, “Proceeding of the International Conference on Wireless Communication Network ICWCN, Chennai, India, June 2003.
- [12] E. C. Ifeachor and B. W. Jervis, **Digital signal processing: a practical approach**, Addison-Wesley Publishers, 1993.

ภาคผนวก ก.

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- 1 ธนพงศ์ คุ่มญาติ สุวิพล สิทธิชีวภาค และเกรียงไกร วงศ์โรจนภรณ์ “การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ MIMO-OFDM สำหรับมาตรฐาน IEEE 802.16a” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44 สาขาวิศวกรรมศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพฯ หน้า 44-51
30 มกราคม-2 กุมภาพันธ์ 2549
- 2 **K. Tanapong**, S. Suvepon, V. Kriengkai, “Performance of MIMO-OFDM System for Broadband Metropolitan Area Networks.” 2006 ECTI International Conference (ECTI-CON 2006), 10-13 May 2006.

ประวัติผู้เขียน

นายธนพงศ์ คุ่มญาติ เกิดเมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดตาก สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547