

การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มโดยส่งผ่าน
ระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก

SUBCHANNEL POWER CONTROL IN OFDM OVER MIMO SYSTEM



T132151



ปิยรัตน์ อุ่นกาเย็น
PIYARAT UNKAYEN

วพ.
๑๖๑ก
๒๕๕๕

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 132151
วัน,เดือน,ปี..3.0...สิ..๗...2557

b. 12584993
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2555
KMITL-2012-EN-M-010-195

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUBCHANNEL POWER CONTROL IN OFDM OVER MIMO SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-EN-M-010-195

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มโดยส่งผ่านระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปิยรัตน์ อุ่นกาเย็น
รหัสประจำตัว	51060923
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สิริชีวะภาค

บทคัดย่อ

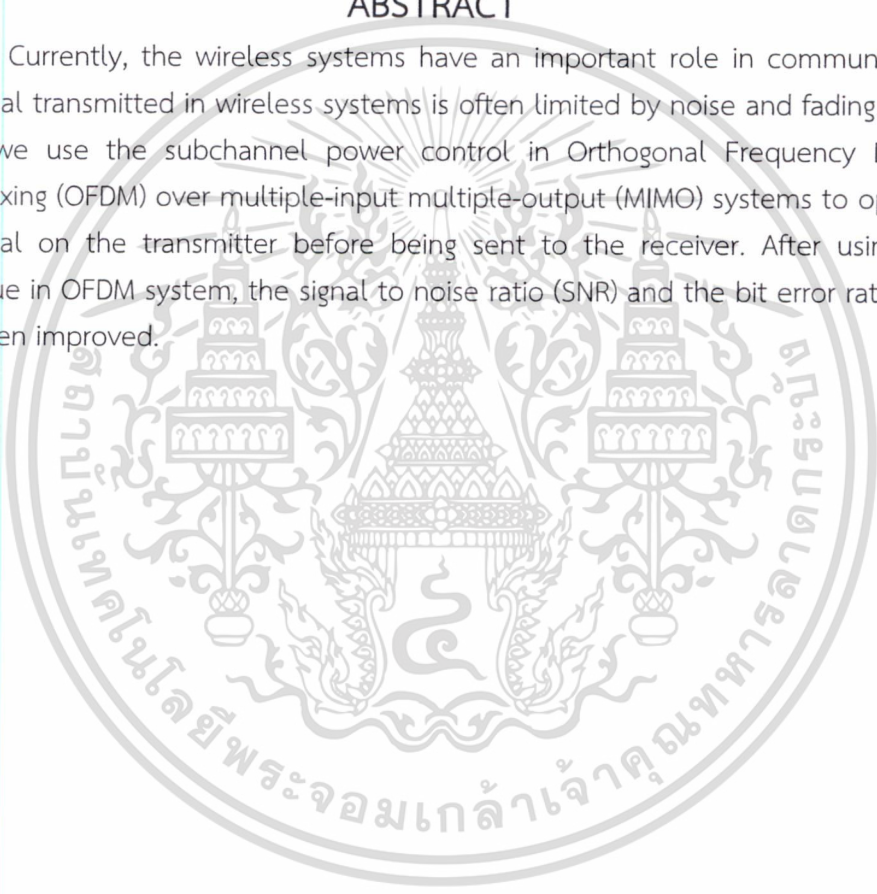
ในปัจจุบันระบบสื่อสารไร้สายมีบทบาทสำคัญในการติดต่อสื่อสาร การส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายมักถูกจำกัดด้วยสัญญาณรบกวน (noise) และการจางหายของสัญญาณ (fading) ซึ่งอุปสรรคดังกล่าวมาเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบสื่อสารไร้สายลดลง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ไขอุปสรรคของการสื่อสารไร้สายในระบบโอเอฟดีเอ็ม โดยการนำเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณทางด้านภาคส่งก่อนที่ถูกส่งออกอากาศ อีกทั้งยังนำมาประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (multiple-input multiple-output: MIMO) โดยผลจากการจำลองระบบ แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยมาใช้ในระบบโอเอฟดีเอ็มมีผลทำให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio: SNR) ที่ภาครับนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่าระบบโอเอฟดีเอ็มที่ไม่ใช้การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยที่อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (bit error rate: BER) มีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	SUBCHANNEL POWER CONTROL IN OFDM OVER MIMO SYSTEM
Student	Miss Piyarat Unkayen
Student ID.	51060923
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Suvepon Sittichivapak

ABSTRACT

Currently, the wireless systems have an important role in communication. The signal transmitted in wireless systems is often limited by noise and fading. In this thesis, we use the subchannel power control in Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) over multiple-input multiple-output (MIMO) systems to optimize the signal on the transmitter before being sent to the receiver. After using that technique in OFDM system, the signal to noise ratio (SNR) and the bit error rate (BER) have been improved.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุวิพล สิริชิวภาค และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และประการที่ดีแก่ข้าพเจ้า จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณเศรษฐกร กาเมือง ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำหัวข้อของ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON33)

ขอขอบคุณ คุณบรรจง โยสภา คุณผุสดี กิรติพงษ์วุฒิ คุณธงชัย วิจิตรพรชัย ดร.วันวิสาข์ ไทยวิโรจน์ คุณฐาปณี ไทยวิโรจน์ และคุณกิตติพงษ์ เนคมานุรักษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำใน เรื่องการเรียน การสอบ และการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บิดามารดาที่เคารพยิ่ง น้องสาว พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจให้ เสมอ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา และน้องสาว ซึ่งเป็นที่รัก ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถวายทอดพระสมภารที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ปิยรัตน์ อุ้นกาเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.5 การประมาณค่าการตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณ	15
2.4.6 สัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก	16
2.4.7 ช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์	17
2.5 ระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายหลายเสาอากาศ	18
2.5.1 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก...	20
2.5.1.1 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา	20
2.5.1.2 การมัลติเพล็กซ์ทางปริภูมิ	20
2.5.2 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา	20
2.5.3 รหัสปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ	21
2.5.3.1 การเข้ารหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ	21
2.5.3.2 การถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ	22
2.5.3.3 การถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ กรณีเสาอากาศรับหลายต้น	26
2.5.4 ข้อดีของรหัสปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ	27
2.6 พารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบและความหมายของค่าต่างๆ	28
2.6.1 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล	28
2.6.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน	28
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการจำลองระบบ	29
3.1 โครงสร้างของระบบ	29
3.1.1 แบบจำลองทางด้านภาคส่งและภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็ม ที่ใช้เสาอากาศด้านละ 1 ต้น	29
3.1.2 แบบจำลองทางด้านภาคส่งและภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็ม ที่ใช้เสาอากาศด้านละ 2 ต้น	30
3.2 เทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย	32
บทที่ 4 การหาค่าสมรรถนะของระบบ	38
4.1 ข้อกำหนดในการจำลองผลและพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ	38
4.2 สมรรถนะของระบบ	38
4.2.1 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK	38
4.2.2 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK	40
4.2.3 สมรรถนะของระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK เปรียบเทียบ กับการมอดูเลตแบบ QPSK	41
บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัย	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก.....	46
ประวัติผู้เขียน.....	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สาย.....	5
2.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่.....	6
2.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา.....	7
2.4 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งรหัส.....	7
2.5 การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม.....	8
2.6 โอเอฟดีเอ็มบนแกนความถี่.....	12
2.7 ภาคส่งของระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	14
2.8 ภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	14
2.9 การวางช่วงเวลาป้องกัน.....	15
2.10 คุณสมบัติของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก.....	16
2.11 แบบจำลองช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์.....	17
2.12 การรับส่งข้อมูลแบบเสาอากาศเดี่ยว และหลายเสาอากาศ.....	19
2.13 โครงสร้างการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ.....	22
2.14 โครงสร้างการถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ.....	26
3.1 โครงสร้างของภาคส่งและภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศด้านละ 1 ต้น.....	30
3.2 โครงสร้างระบบโอเอฟดีเอ็มทางด้านภาคส่งที่มีการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ.....	31
3.3 โครงสร้างระบบโอเอฟดีเอ็มทางด้านภาครับที่มีการถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ.....	32
3.4 การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มโดยส่งผ่านระบบสื่อสาร แบบหลายทางเข้าหลายทางออก.....	33
3.5 ประสิทธิภาพของอัตราการผิดพลาดของการส่งข้อมูลของสองช่องสัญญาณย่อยที่ขึ้นอยู่กับค่า สัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อย.....	33
3.6 วิธีการจัดกลุ่มของช่องสัญญาณย่อยในการควบคุมกำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อย เมื่อ G เท่ากับ 3.....	34
4.1 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4.....	39
4.2 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 8.....	39
4.3 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ QPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4.....	40
4.4 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ QPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 8.....	41
4.5 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และ QPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4.....	42
4.6 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และ QPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 8.....	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีของระบบสื่อสารไร้สายนับว่ามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก และยังได้มีการพัฒนาออกมาหลากหลายรูปแบบเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น คุณภาพของระบบที่ดีขึ้น ทั้งนี้ก็เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานที่มีความต้องการในการสื่อสารข้อมูลมัลติมีเดีย ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลภาพ ข้อมูลเสียง และข้อมูลสื่อสารอื่นๆ ได้ในอนาคต

ปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาของการส่งผ่านด้วยอัตราข้อมูลความเร็วสูงในระบบสื่อสารไร้สาย คือ การเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (inter symbol interference: ISI) ซึ่งเกิดขึ้นจากการแพร่กระจายสัญญาณแบบหลายวิถี (multipath signal) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าต่ำลง เทคนิคการส่งสัญญาณแบบโอเอฟดีเอ็ม (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) [1] คือรูปแบบของการสื่อสารแบบหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้ เนื่องจากระบบโอเอฟดีเอ็มเป็นระบบที่สามารถทนทานต่อการเกิดการจางหายของสัญญาณ และสามารถส่งผ่านข้อมูลด้วยอัตราความเร็วข้อมูลสูงมากเมื่อเทียบกับระบบอื่น อีกทั้งยังใช้ย่านความถี่ที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบโอเอฟดีเอ็มจะทำการกระจายข้อมูลที่มีความเร็วสูงให้เป็นชุดข้อมูลหลายๆ ชุดที่มีความเร็วต่ำลงด้วยการแปลงจากข้อมูลอนุกรมเป็นขนาน แล้วส่งผ่านช่องสัญญาณย่อยๆ (subchannel) จำนวนมาก ทำให้ช่วงเวลาของแต่ละสัญลักษณ์มีช่วงเวลากว้างขึ้นทำให้สามารถลดการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ที่มีสาเหตุมาจากการจางหายของสัญญาณได้ ในส่วนของระบบเสาอากาศที่ใช้ในระบบสื่อสารแบบไร้สาย ระบบเสาอากาศแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (multiple-input multiple-output : MIMO) จะเป็นที่ยอมรับใช้ ซึ่งนอกจากจะสามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้งานดังกล่าวข้างต้นในอนาคตได้แล้ว หลักการเบื้องต้นที่ทำให้ระบบเสาอากาศแบบหลายทางเข้าหลายทางออกมีคุณสมบัติดังที่กล่าวมาคือ การใช้งานชุดเสาอากาศที่มีมากกว่าหนึ่งตัวติดตั้งทั้งที่ด้านภาครับและด้านภาคส่ง ในการเพิ่มจำนวนของเสาอากาศนี้จะส่งผลให้ระบบสามารถเพิ่มช่องทางในการสื่อสารและเพิ่มทางเลือกในการส่งข้อมูลได้ในช่องสัญญาณที่ดีที่สุดได้อีกด้วย ซึ่งได้มีงานวิจัยที่นำการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา (space-time coding: STC) มาใช้ในระบบโอเอฟดีเอ็ม โดยนำเสาอากาศที่เพิ่มเข้ามาในระบบมาช่วยกันเข้ารหัส เพื่อให้ได้ไคเวอร์ซิตีทางปริภูมิ-เวลา ซึ่งมีผลทำให้ระบบโอเอฟดีเอ็มมีอัตราความผิดพลาดที่ต่ำลง [2] การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาเป็นวิธีที่อยู่บนพื้นฐานของการทำไคเวอร์ซิตีทางด้านส่ง โดยจะแบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทรลลิส (space-time trellis coding: STTC) รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ (Alamouti space-time codes) และรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก (space-time block coding: STBC) ซึ่งในแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ ซึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา เป็นรหัสที่ได้รับการออกแบบโดยใช้เทคนิคจากการทำไคเวอร์ซิตีเชิงปริภูมิ-เวลา ที่มีรูปแบบเรียบง่ายและให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่า

ระบบที่ใช้เสาอากาศส่งเพียงต้นเดียวภายใต้ช่องสัญญาณที่มีปัญหาเรื่องการจางหายของสัญญาณ [3] รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูตี ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้กับระบบสื่อสารที่ใช้เสาอากาศส่ง 2 ต้นตายตัว ในขณะที่ทางด้านรับสามารถจะติดตั้งเสาอากาศรับจำนวนเท่าใดก็ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งยังมีเสาอากาศรับมากขึ้นจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูตีถูกคิดค้นขึ้นโดย S.M. Alamouti [4] รหัสดังกล่าวนี้มีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจคือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (optimal decoding) และสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน

ทางด้านภาคส่งในระบบโอเอฟดีเอ็ม ข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณย่อยจะถูกส่งผ่านไปยังภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็มในกำลังส่งที่เท่ากัน ดังนั้นจึงถือว่าเป็นการสิ้นเปลืองกำลังงานทางด้านภาคส่งเป็นอย่างมาก แต่ระบบโอเอฟดีเอ็มสามารถที่จะปรับกำลังส่งให้ลดต่ำลงเพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการได้ โดยใช้วิธีการการควบคุมกำลังส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อย [5] ซึ่งการควบคุมกำลังส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อยนั้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย (subchannel power control weighting coefficient: W) เข้าไปทางด้านภาคส่ง โดยจะคำนึงถึงอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ภาครับรับได้อีกทั้งยังมีการจัดสัมประสิทธิ์กลุ่มของช่องสัญญาณย่อย (grouping coefficient: G) ที่เป็นตัวบอกถึงจำนวนของช่องสัญญาณย่อยที่จะถูกใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักดังกล่าว ซึ่งถ้าสัมประสิทธิ์กลุ่มของช่องสัญญาณย่อยมีค่าเท่ากับ 3 [6] จะทำให้ระบบได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของแต่ละช่องสัญญาณย่อยที่ดีที่สุดที่ ซึ่งจะทำให้ในแต่ละช่องสัญญาณย่อยมีกำลังส่งที่เหมาะสม จากวิธีการดังกล่าวมีผลทำให้ระบบโอเอฟดีเอ็มมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น นอกจากนี้การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มนั้น ยังนำไปใช้ในระบบสื่อสารไร้สายในประเภทต่างๆ เช่น ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม [7] ที่ต้องมีการคำนึงถึงการสิ้นเปลืองของกำลังงานทางด้านภาคส่งด้วยเช่นกัน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อศึกษาระบบการทำงานและส่งผ่านข้อมูลแบบโอเอฟดีเอ็มที่มีการใช้ระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่จะถูกนำไปใช้ในการสื่อสารไร้สายในอนาคต อย่างไรก็ตามในระบบการสื่อสารไร้สายมักถูกจำกัดประสิทธิภาพของระบบด้วยสัญญาณรบกวนและการจางหายของสัญญาณในระหว่างการรับส่งข้อมูลทางด้านภาคส่งไปยังภาครับ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยเข้ามาใช้ในระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีการใช้ระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของข้อมูลทางด้านภาคส่งก่อนส่งออกอากาศ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองระบบจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ดีขึ้น และมีอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลน้อยกว่าระบบโอเอฟดีเอ็มที่ไม่ได้ใช้การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานของการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ศึกษาถึงระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีการใช้ระบบเสาอากาศแบบหลายทางเข้าหลายทางออก ซึ่งระบบดังกล่าวจะมีการใช้กำลังส่งทางด้านภาคส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อยที่เท่ากันซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองกำลังงานของระบบ ดังนั้นถ้ามีการนำเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยเข้ามาใช้ในระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีการใช้ระบบเสาอากาศแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายทางเข้าหลายทางออกเพื่อให้มีกำลังส่งที่เหมาะสมนั้น น่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโอเอฟดีเอ็มให้ดีขึ้นได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มนั้น ข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณย่อยจะถูกส่งผ่านไปยังระบบโอเอฟดีเอ็มในกำลังส่งที่เท่ากัน ดังนั้นถ้ามีการควบคุมกำลังของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มเข้ามาใช้งานนั้น กำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อยจะไม่เท่ากันและสามารถปรับค่ากำลังส่งได้ โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับรับได้ของแต่ละช่องสัญญาณย่อย การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยนั้น สามารถทำได้โดยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยเข้าไปก่อนที่จะส่งต่อไปยังขั้นตอนของการแปลงผกผันฟูริเยร์แบบเร็ว (inverse fast Fourier transform: IFFT)

ในส่วนของการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อยนั้น ได้จากการใช้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับรับได้ของแต่ละช่องสัญญาณย่อยมาคำนวณ เพื่อหาค่ากำลังส่งที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลของระบบโอเอฟดีเอ็ม และสามารถจัดกลุ่มของช่องสัญญาณย่อยที่จะนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักเข้าไปเพิ่มได้เท่ากับ N/G เมื่อ N คือ จำนวนช่องสัญญาณย่อย และ G คือ สัมประสิทธิ์กลุ่มของช่องสัญญาณย่อย เมื่อสัมประสิทธิ์กลุ่มเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของระบบจะยิ่งดีขึ้น แต่ในกรณีที่สัมประสิทธิ์กลุ่มมีค่ามากกว่า 3 จะทำให้เกิดค่าความน่าจะเป็นที่ทำให้ระบบด้อยลง (out of range probability: P_o) ที่มีผลให้ประสิทธิภาพของระบบแย่ลงด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกให้สัมประสิทธิ์กลุ่มมีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่ดีที่สุด

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และเสาอากาศทางด้านภาครับ 2 ต้น โดยส่งสัญญาณภายใต้ช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์ (Rayleigh fading channel) และสัญญาณรบกวนขาวววก (additive white Gaussian noise: AWGN) โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองระบบด้วยโปรแกรม matlab ผลที่ได้จะแสดงประสิทธิภาพของอัตราการผิดพลาดของบิตข้อมูลของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยเปรียบเทียบกับระบบโอเอฟดีเอ็มแบบที่ไม่ใช้เทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษาวิจัย และพื้นฐานของระบบโอเอฟดีเอ็ม ซึ่งประกอบด้วยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ (multiplexing technique) พื้นฐานของระบบโอเอฟดีเอ็ม (fundamental of OFDM system) ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และช่องสัญญาณและการจางหายของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการจำลองระบบ โดยจะนำเสนอเทคนิคการควบคุมกำลัง
ส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบเอฟดีเอ็มที่มีการใช้ระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก

บทที่ 4 กล่าวถึงการหาค่าสมรรถนะของระบบ พารามิเตอร์ที่ใช้ และผลที่ได้จากการ
จำลองระบบ เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอ นั้นสามารถที่ช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย



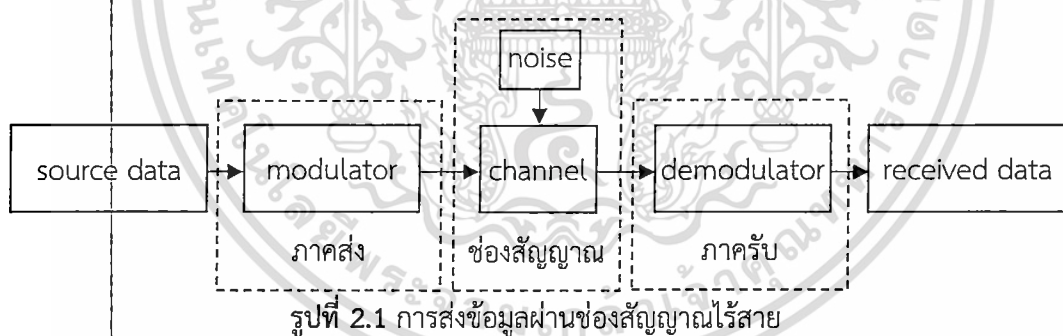
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ในแบบต่างๆ คุณลักษณะของการจางหายของสัญญาณ พื้นฐานของระบบโอเอฟดีเอ็ม (OFDM system) และระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (MIMO system) ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของระบบโอเอฟดีเอ็ม

2.1 หลักการพื้นฐานของระบบสื่อสารไร้สาย

ระบบสื่อสารไร้สายเป็นรูปแบบหนึ่งในหลายๆ วิธีของการสื่อสารที่ใช้สำหรับส่งข้อมูลข่าวสารแบบอนาล็อกหรือดิจิทัลจากภาคส่งไปยังภาครับ โดยผ่านช่องสัญญาณสื่อสารแบบไร้สาย เช่น การส่งข้อมูลโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (microwave) ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม (satellite system) และระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (mobile system) เป็นต้น แต่เนื่องจากคุณลักษณะของช่องสัญญาณไร้สายที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบต่างๆ เช่น สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ด้านรับหรือด้านส่ง รวมถึงอุณหภูมิ สิ่งเหล่านี้เป็นผลให้สัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับมีลักษณะที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีและวิธีการต่างๆ ขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้



ในการออกแบบและใช้งานระบบสื่อสารไร้สายเพื่อรับส่งข้อมูลนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบต่างๆ ของระบบสื่อสาร [8] เช่น ขนาดความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ของช่องสัญญาณที่ใช้งาน อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (data rate) และกำลังส่ง (power) โดยจะต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานระบบสื่อสารนั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เป็นการรบกวนช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงอื่นๆ ดังนั้นข้อมูลจึงต้องผ่านกระบวนการมอดูเลต (modulation) ก่อนถูกส่งผ่านระบบสื่อสารไร้สาย เพื่อแปลงข้อมูลต่างๆ ให้กลายเป็นสัญญาณข้อมูลที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการส่งผ่านไปในช่องสัญญาณที่มีก่จะถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนต่างๆ และเมื่อภาครับสามารถตรวจจับสัญญาณข้อมูลจากที่ถูกส่งมาจากภาคส่งได้ ก็จะนำสัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับได้มาผ่านกระบวนการดีมอดูเลต (demodulation) เพื่อนำไปใช้งานต่อไป ดังแสดงในรูปที่

2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

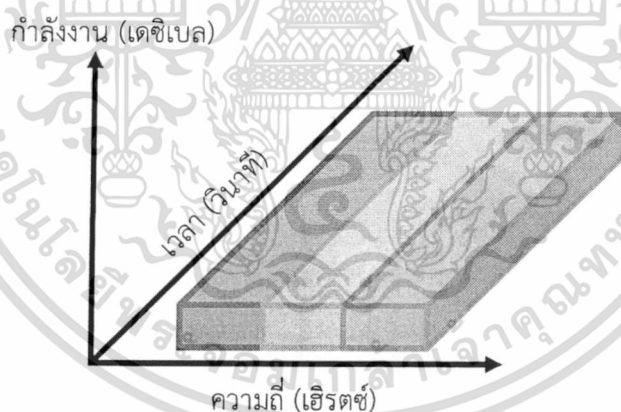
2.2 การมัลติเพล็กซ์

ในระบบการสื่อสารนั้น มักจะมีความจำเป็นที่จะต้องทำการจัดส่งสัญญาณต่างๆ หลายสัญญาณรวมกันไปในตัวกลางหรือสายส่งสัญญาณเดียวกัน โดยจะต้องสามารถที่จะทำการแยกสัญญาณแต่ละสัญญาณที่ส่งรวมกันมานั้นออกจากกันได้ทางด้านภาครับ วิธีการรวมสัญญาณเข้าด้วยกันดังกล่าวจะเรียกว่า การมัลติเพล็กซ์ (multiplexing) และวิธีการจัดแยกสัญญาณเหล่านั้นจะเรียกว่า การดีมัลติเพล็กซ์ (demultiplexing)

การมัลติเพล็กซ์ที่รู้จักกันทั่วไปมีอยู่ 3 แบบ คือ การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ (frequency division multiplex: FDM) การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา (time division multiplex: TDM) และการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งรหัส (code division multiplexing: CDM) ในปัจจุบันการมัลติเพล็กซ์สัญญาณอีกแบบหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจของกลุ่มนักวิจัยคือการมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม ซึ่งเป็นการมัลติเพล็กซ์ที่ทำให้สามารถใช้อย่างมีประสิทธิภาพและรองรับการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง และพื้นฐานของการมัลติเพล็กซ์แบบต่างๆ มีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

2.2.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ วิธีการนี้จะอาศัยการมอดูเลตสัญญาณมาช่วยในการย้ายสเปกตรัมของสัญญาณที่ต้องการจะส่งแต่ละสัญญาณรวมกันไปในนั้นให้เลื่อนไปอยู่ในย่านความถี่ที่ไม่ซ้อนทับกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



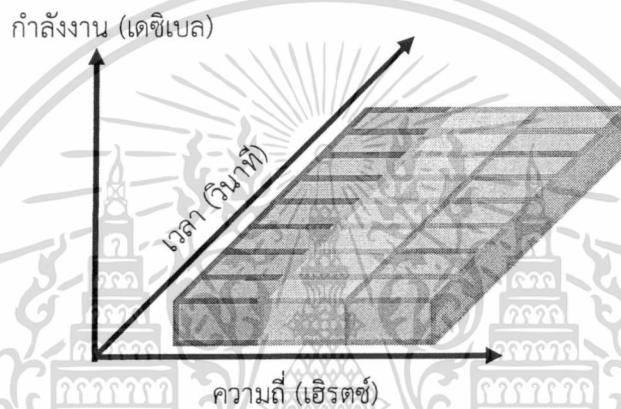
รูปที่ 2.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่

ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการใช้สเปกตรัมของแต่ละสัญญาณเกิดการรบกวนซึ่งกันและกันในแกนความถี่ ทำได้โดยสามารถเลือกใช้คลื่นพาที่มีความถี่เหมาะสมมาทำการมอดูเลตสัญญาณต่างๆ ที่ต้องการส่งรวมกันแต่ละสัญญาณ เพื่อให้สเปกตรัมของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการมอดูเลตแยกเป็นอิสระต่อกันและกันในแกนความถี่ ทำให้สามารถส่งสัญญาณเหล่านี้รวมกันไปในช่องสัญญาณเดียวกันได้ และเมื่อเราใช้วงจรกรองแถบความถี่มาแยกสัญญาณที่รับได้ทางด้านภาครับอย่างเหมาะสมแล้วจะสามารถแยกสัญญาณเหล่านั้นออกจากกันได้และเมื่อนำสัญญาณที่แยกออกมานี้ไปทำการดีมอดูเลตก็จะได้ข้อมูลหรือข่าวสารกลับคืนมา ส่วนมากการมัลติเพล็กซ์แบบเอฟดีเอ็มจะนิยมใช้กับการส่งสัญญาณข้อมูลแบบอนาล็อก เช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคแรกๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา

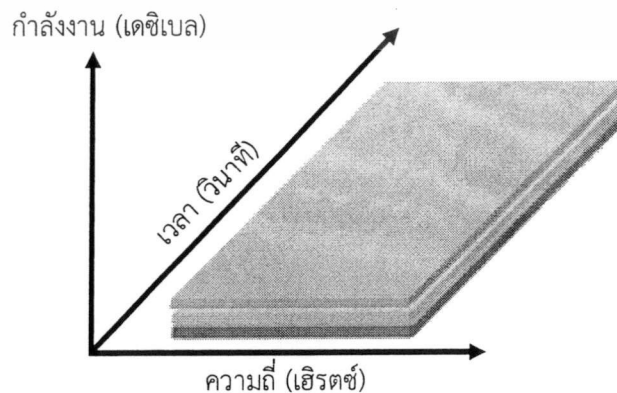
การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบหนึ่งที่ทำให้สามารถส่งสัญญาณข้อมูลจำนวนมากกว่าหนึ่งสัญญาณไปในช่องการสื่อสารช่องเดียว โดยอาศัยการแบ่งช่วงเวลา (time slot) ในการส่งสัญญาณ ซึ่งสัญญาณข้อมูลแต่ละสัญญาณจะทำการมอดูเลตที่ความถี่เดียวกัน แต่ส่งคนละช่วงเวลา จึงทำให้สามารถใช้ช่องสัญญาณช่องเดียวสื่อสารกันได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลานี้นิยมใช้กับการส่งสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล แต่บางครั้งก็พบได้ในระบบอนาลอก เนื่องจากว่าขั้นตอนการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog to digital: A/D) และสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก (digital to analog: D/A) นั้นมีกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากนัก



รูปที่ 2.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา

2.2.3 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งรหัส

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งรหัส เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ที่อาศัยการแบ่งช่องสัญญาณโดยการกำหนดรหัสดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทำให้สามารถทำการสื่อสารกันได้โดยใช้ความถี่เดียวกันพร้อมๆ กันหลายช่องสัญญาณเป็นเทคนิคที่ทำให้มีความจุของช่องสัญญาณสูง แต่เมื่อมีการสื่อสารกันมากๆ จะทำให้คุณภาพของสัญญาณต่ำลงอันเนื่องมาจากเกิดการแทรกสอด (interference) ระหว่างผู้ใช้ด้วยกันเอง

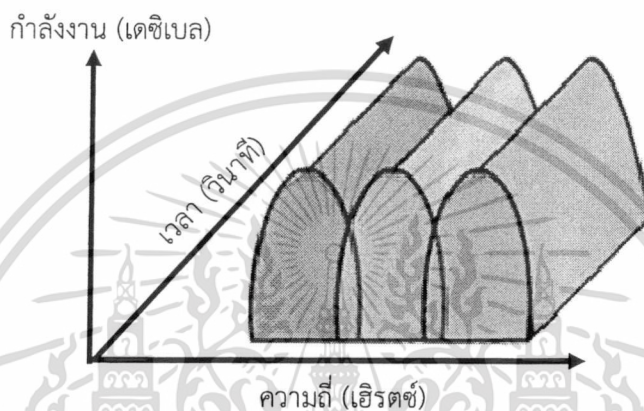


รูปที่ 2.4 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดี

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม เป็นเทคนิคที่ทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็วสูง โดยอาศัยหลักการการส่งผ่านแบบหลายคลื่นพาห์ (multi-carrier) อีกทั้งยังใช้ย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะแต่ละคลื่นพาห์ย่อยที่ใช้ในการส่งสัญญาณจะมีสเปกตรัมเหลื่อมกันโดยมีคุณสมบัติของการตั้งฉาก (orthogonal properties) ซึ่งกันและกันระหว่างคลื่นพาห์ย่อยดังแสดงในรูปที่ 2.5 การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคที่คาดว่าจะนำมาใช้ในการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 4



รูปที่ 2.5 การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม

2.3 คุณลักษณะของการจางหายของสัญญาณ

ในระบบสื่อสารจะประกอบด้วย ภาคส่ง ภาครับ และช่องสัญญาณ ในส่วนของช่องสัญญาณหมายถึง ตัวกลางที่ทำให้สัญญาณผ่านจากภาคส่งไปยังภาครับได้ ซึ่งมีความเป็นไปได้หลายรูปแบบ ทั้งที่เป็นเสาอากาศ เป็นสายทองแดง หรือสายใยแก้วนำแสง โดยที่ช่องสัญญาณนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอินพุตชุดหนึ่งให้เป็นสัญญาณเอาต์พุตชุดหนึ่ง ในส่วนของระบบการสื่อสารไร้สาย สัญญาณที่ถูกส่งออกมาทางด้านภาคส่งจะไม่ได้เดินทางมาถึงยังทางภาครับปลายทางเป็นแนวเส้นตรง เนื่องจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายจะมีลักษณะการส่งไม่สูงจากพื้นดินมากนัก จึงต้องพบกับสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมที่สัญญาณจะต้องเคลื่อนที่ผ่าน โดยสัญญาณที่มาถึงทางภาครับจะเกิดขึ้นจากการรวมกันของสัญญาณจากหลายวิถี (multipath) ซึ่งสัญญาณจากหลายวิถีเหล่านั้นเกิดจากการสะท้อน (reflection) การเลี้ยวเบน (diffraction) และการกระจัดกระจาย (scattering) ผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆ เช่น สิ่งก่อสร้าง ต้นไม้ ยานพาหนะ นอกจากนี้การเคลื่อนที่ขณะที่มีการส่งสัญญาณหรือการที่สภาพแวดล้อมที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อย่างเช่น การเคลื่อนที่ของวัตถุใดๆ ที่อยู่บริเวณรอบๆ ภาคส่งก็จะมีผลต่อสัญญาณที่ปลายทางจะได้รับด้วยเช่นกัน จากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จะทำให้สัญญาณที่มาถึงยังภาครับนั้นมีสัญญาณมากกว่าหนึ่งทิศทาง ซึ่งในแต่ละทิศทางนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่แตกต่างกันไป ทั้งในเชิงแอมพลิจูดและเฟส ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การจางหายของสัญญาณ และในกรณีที่ช่องสัญญาณไร้สายมีการสะท้อนจากทิศทางต่างๆ เป็นจำนวนมาก แต่ไม่มีสัญญาณที่มาจากเส้นทางตรง (line of sight : LOS) ระหว่างภาคส่งกับภาครับ จะเรียกการจางหายของสัญญาณที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นนี้ว่า การจางหายของสัญญาณแบบเรย์ลี ซึ่งจะกล่าวถึงปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหายของสัญญาณและรูปแบบของการจางหายของสัญญาณในหัวข้อถัดไป

2.3.1 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดการจางหายของสัญญาณ

ปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดการจางหายของสัญญาณมีอยู่ 2 ประการ คือ

2.3.1.1 การแผ่แบบประวิงเวลา

เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งมาจากต้นทางไปกระทบกับสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างภาคส่งกับภาครับก็จะเกิดการสะท้อนและหักเห ทำให้สัญญาณที่ภาครับได้รับประกอบด้วยสัญญาณสะท้อนจากหลายทิศทางและมาถึงยังภาครับในเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณรวมที่ภาครับจึงเป็นสัญญาณที่มีการประวิงเวลาไปหรืออาจเรียกได้ว่า สัญญาณเกิดการแผ่ทางเวลา (time spread) ผลของการประวิงเวลานั้นทำให้สัญญาณที่เดินทางไปยังภาครับใช้เวลานานกว่าปกติ ก่อให้เกิดการรบกวนกันเองของสัญญาณในแต่ละสัญลักษณ์หรือการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ทั้งนี้การประวิงเวลาของสัญญาณจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของแต่ละช่องสัญญาณ

2.3.1.2 การแผ่แบบดอปเปลอร์

การเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กันระหว่างสถานีเคลื่อนที่กับสถานีฐาน ส่งผลให้สัญญาณที่เดินทางมาในแต่ละเส้นทางเกิดการเลื่อนทางความถี่เรียกว่า การเลื่อนความถี่แบบดอปเปลอร์ (Doppler shift) ซึ่งความถี่ที่เลื่อนไปจะมีค่าเป็นบวกหรือลบเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ด้วย นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของวัตถุใดๆ ที่อยู่บริเวณรอบๆ สถานีฐานก็ยังส่งผลให้เกิดการเลื่อนความถี่แบบดอปเปลอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเหมือนกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การแผ่แบบดอปเปลอร์นี้ ทำให้ช่องสัญญาณมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (time varying channel) และอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นก็ส่งผลโดยตรงต่อความเร็วของการเกิดการจางหายของสัญญาณด้วย

2.3.2 รูปแบบของการจางหายของสัญญาณ

การจางหายของสัญญาณที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณไร้สายนั้นมีอยู่หลายประเภท การที่จะพิจารณาว่าเป็นการจางหายของสัญญาณแบบใด จะพิจารณาจากลักษณะของสัญญาณที่ส่งเปรียบเทียบกับคุณลักษณะของช่องสัญญาณ (channel characteristic) เป็นหลัก พารามิเตอร์ของสัญญาณที่ใช้พิจารณาได้แก่ ความกว้างแถบความถี่ ช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (symbol period) หรือ อัตราการส่งสัญญาณ (transmission rate) ส่วนปัจจัยของช่องสัญญาณที่ส่งผลต่อลักษณะของการจางหายของสัญญาณ ได้แก่ การแผ่แบบประวิงเวลา และการแผ่แบบดอปเปลอร์ เมื่อทำการพิจารณาลักษณะของการจางหายของสัญญาณจากการแผ่แบบประวิงเวลาจะได้รับการจางหายของสัญญาณ 2 รูปแบบ คือ การจางหายของสัญญาณแบบแนวราบ (flat fading) และการจางหายของสัญญาณแบบเลือกความถี่ (frequency selective fading) ในขณะที่การแผ่แบบดอปเปลอร์จะส่งผลกระทบต่อการจางหายของสัญญาณอีก 2 รูปแบบ คือ การจางหายของสัญญาณแบบเร็ว (fast fading) และการจางหายของสัญญาณแบบช้า (slow fading)

2.3.2.1 รูปแบบของการจางหายของสัญญาณเมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบประวิง

เวลา

การแผ่แบบประวิงเวลา อันเนื่องมาจากสัญญาณจากหลายวิถี ทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณอยู่ 2 รูปแบบ คือ การจางหายของสัญญาณแบบราบ และการจางหายของสัญญาณแบบเลือกความถี่

1. การจางหายของสัญญาณแบบราบ ถ้าช่องสัญญาณมีอัตราขยายคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงเฟสแบบเชิงเส้นในช่วงความกว้างแถบความถี่ที่กว้างกว่าความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณที่ส่งมาแล้ว สัญญาณที่รับได้จะได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณแบบราบ กล่าวคือ สัญญาณที่ปลายทางได้รับจะมีคุณลักษณะเชิงสเปกตรัม (spectrum characteristic) เหมือนเดิม แต่ขนาดของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เนื่องจากผลของสัญญาณจากหลายวิถีที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ ดังนั้นช่องสัญญาณที่เกิดการจางหายของสัญญาณแบบราบนี้ จึงสามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า ช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูด (amplitude varying channel) การแจกแจงของแอมพลิจูดที่มักพบโดยทั่วไปจะเป็นการแจกแจงแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh distribution)

2. การจางหายของสัญญาณแบบเลือกความถี่ ถ้าช่องสัญญาณมีผลตอบสนองอัตราขยายคงที่ และมีผลตอบสนองเฟสที่เป็นเชิงเส้นในช่วงความกว้างแถบความถี่ที่แคบกว่าความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณแล้ว การจางหายของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบเลือกความถี่ กล่าวคือ สเปกตรัมของสัญญาณจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณไม่เท่ากันทั้งหมด โดยส่วนประกอบสเปกตรัมที่อยู่นอกช่วงความกว้างแถบความถี่ของช่องสัญญาณ จะได้รับผลกระทบที่แตกต่างออกไป ซึ่งช่วงพิสัยของความถี่ที่ช่องสัญญาณส่งผลกระทบต่อส่วนประกอบของสเปกตรัมโดยเท่าเทียมกันเรียกว่า ความกว้างแถบความถี่ร่วมนัย (coherent bandwidth) เมื่อช่องสัญญาณเกิดการจางหายของสัญญาณแบบเลือกความถี่ ผลตอบสนองช่องสัญญาณจะเกิดการแผ่ออกทางเวลา ซึ่งยาวกว่าช่วงเวลาของสัญญาณลักษณะ ทำให้สัญญาณที่ได้รับถูกลดทอนขนาดและมีการประวิงทางเวลา ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดระหว่างสัญญาณขึ้น

2.3.2.2 รูปแบบของการจางหายของสัญญาณเมื่อพิจารณาจากการแผ่แบบดอป

เพลอร์

การเลื่อนความถี่แบบดอปเพลอร์อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กันระหว่างสถานีเคลื่อนที่กับสถานีฐานที่ส่งผลต่อความเร็วของการจางหายของสัญญาณ ทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณขึ้นมา 2 รูปแบบ คือ การจางหายของสัญญาณแบบเร็วและการจางหายของสัญญาณแบบช้า

1. การจางหายของสัญญาณแบบเร็ว การแผ่แบบดอปเพลอร์และเวลาร่วมนัย (coherence time) ใช้บ่งบอกถึงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของช่องสัญญาณ ซึ่งมีผลมาจากการเคลื่อนที่ ส่วนเวลาร่วมนัยเป็นช่วงเวลาทางสถิติที่ผลตอบสนองต่อช่องสัญญาณมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ยังเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงความคล้ายคลึงกันของผลตอบสนองช่องสัญญาณในช่วงเวลาหนึ่งอีกด้วย กล่าวคือ สัญญาณที่มาถึงภาครับที่เวลาต่างกันแต่ไม่เกินเวลาร่วมนัยจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณใกล้เคียงกัน ในกรณีของการจางหายของสัญญาณแบบเร็ว ผลตอบสนองช่องสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วภายในช่วงเวลาที่ยังส่งสัญญาณ ดังนั้นเวลาร่วมนัยของช่องสัญญาณจะมี

ค่าน้อยกว่าช่วงเวลาของสัญลักษณ์และคุณลักษณะของการจางหายของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปมาหลายครั้งในขณะที่สัญลักษณ์หนึ่งๆ ถูกส่งไป ส่งผลให้รูปร่างของสัญญาณเบสแบนด์ผิดเพี้ยนไป

2. การจางหายของสัญญาณแบบช้า จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราของสัญญาณมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหรือเวลาร่วมกันมีค่ามากกว่าเวลาของสัญลักษณ์ ในกรณีนี้ช่องสัญญาณจะมีผลตอบสนองคงที่ภายในช่วงเวลาหลายสัญลักษณ์ ทำให้ได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณติดกันเป็นช่วงยาว

2.4 พื้นฐานของระบบโอเอฟดีเอ็ม

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ที่คล้ายกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ โดยที่ระบบโอเอฟดีเอ็มนั้นจะใช้พื้นฐานของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ที่ทำให้สามารถที่จะส่งข่าวสารได้หลายข่าวสารไปในช่องสัญญาณช่องเดียวกันซึ่งเป็นการใช้ย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มจะแตกต่างกับการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ในหลายๆ ด้านคือ การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่เป็นการแบ่งแถบความถี่ออกเป็นหลายๆ ช่องของความถี่ ซึ่งแต่ละช่องความถี่จะถูกกำหนดให้ใช้ในการรับส่งข้อมูลได้เฉพาะสถานีใดสถานีหนึ่งเท่านั้น และจำเป็นที่จะต้องมีการมีแถบป้องกัน (guard band) เพื่อให้แต่ละช่องของความถี่นั้นไม่มีการรบกวนกัน ดังนั้นจึงเป็นการสูญเสียแถบความถี่ระหว่างภาคส่งที่มีไว้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนกันระหว่างภาคส่งข้างเคียง ตัวอย่างของระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่ที่ใช้กัน เช่น การส่งสัญญาณของภาคส่งวิทยุเอฟเอ็ม โดยที่แต่ละภาคส่งจะใช้ช่องความถี่ที่ต่างกันทำให้แต่ละภาคส่งนั้นสามารถที่จะส่งสัญญาณได้พร้อมๆ กันโดยไม่มีการรบกวนซึ่งกันและกันทางด้านภาครับเมื่อรับสัญญาณได้ก็จะเลือกแถบความถี่ที่ต้องการโดยใช้วงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน (band-pass filter) ซึ่งจะสามารถทำการคัดเลือกสัญญาณข่าวสารที่ต้องการกลับมาได้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้การมัลติเพล็กซ์ในเชิงความถี่มีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงมีการเสนอแนวคิดเพื่อที่จะลดช่วงของแถบป้องกัน โดยแนวคิดหนึ่งที่น่าสนใจคือการทำให้แต่ละช่องความถี่ที่มีอยู่เป็นอิสระต่อกันและไม่สามารถที่จะส่งผลกระทบต่อกันและกันได้ ซึ่งการทำให้ช่องความถี่ที่มีอยู่ให้เป็นอิสระต่อกันสามารถทำได้โดยให้แต่ละช่องความถี่มีคุณสมบัติที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทำให้สามารถส่งสัญญาณที่มีช่องความถี่ซ้อนทับกันได้โดยไม่ทำให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน ซึ่งก็คือการมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มนั่นเอง

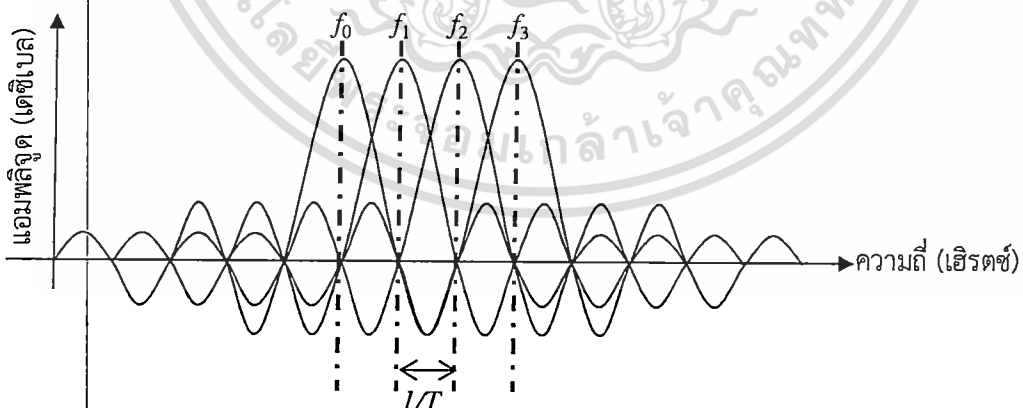
ในระบบการสื่อสารไร้สายนั้นจะเลือกใช้การมอดูเลตแบบต่างๆ ที่เหมาะสม และการพัฒนารูปแบบการมอดูเลตนั้นจะทำการพัฒนาให้เหมาะสมกับสัญญาณข่าวสารที่เป็นสัญญาณอนาล็อกหรือดิจิตอล ในส่วนของรูปแบบการมอดูเลตสัญญาณข่าวสารที่เป็นอนาล็อกแบบทั่วไป ได้แก่ การมอดูเลตทางความถี่ (frequency modulation: FM) การมอดูเลตทางขนาด (amplitude modulation: AM) การมอดูเลตทางมุม (phase modulation: PM) การมอดูเลตแบบเอสเอสบี (single side band: SSB) การมอดูเลตแบบวีเอสบี (vestigial vide band: VSB) และการมอดูเลตแบบดีเอสบีเอสซี (double side band suppressed carrier: DSB-SC) ส่วนการมอดูเลตสัญญาณสำหรับการสื่อสารแบบดิจิตอลทั่วไป ได้แก่ การมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลทางขนาด (amplitude shift keying: ASK) การมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลทางความถี่ (frequency shift keying: FSK) การมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลทางเฟส (phase shift keying: PSK) และการมอดูเลตแบบคิวเอเอ็ม (quadrature amplitude modulation: QAM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละคลื่นพาหะของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่นั้นสามารถที่จะทำการมอดูเลตสัญญาณข่าวสารที่จะส่งเป็นแบบอนาล็อกหรือดิจิตอลก็ได้เนื่องจากการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่นั้นไม่ต้องทำการซิงโครไนซ์ (synchronization) ระหว่างภาคส่งที่ส่ง ดังนั้นภาคส่งสามารถที่จะส่งสัญญาณที่ทำการมอดูเลตแตกต่างกันได้ เช่น ภาคส่งที่ 1 มอดูเลตทางความถี่ ภาคส่งที่ 2 อาจจะมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลทางความถี่ก็ได้ สำหรับการมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มนั้นคลื่นพาหะย่อยๆ ทั้งหมดจะต้องซิงโครไนซ์กันซึ่งเป็นการจำกัดที่จะต้องทำการมอดูเลตแบบดิจิตอลเท่านั้น ระบบโอเอฟดีเอ็มจะส่งสัญญาณเป็นสัญลักษณ์ ซึ่งสามารถส่งสัญญาณจำนวนมากที่มีความเร็วต่ำแบบขนานกันไปในการส่งคลื่นพาหะย่อยๆ นี้จะต้องทำการซิงโครไนซ์ทั้งเวลาและความถี่ และจะต้องรักษาคุณสมบัติของการตั้งฉากเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกันระหว่างคลื่นพาหะย่อยๆ

2.4.1 คุณสมบัติของการตั้งฉาก

สัญญาณจะตั้งฉากกันถ้ามีความเป็นอิสระร่วมกัน (mutually independent) ของแต่ละสัญญาณ คุณสมบัติของการตั้งฉากจะทำให้สามารถที่จะทำส่งสัญญาณหลายๆ สัญญาณรวมกันไปในช่องสัญญาณการสื่อสารเดียวกันและสามารถที่จะกู้สัญญาณกลับมาได้โดยไม่มีการแทรกสอดซึ่งกันและกัน ปกติแล้วส่วนมากการมัลติเพล็กซ์รูปแบบต่างๆ นั้น จะมีคุณสมบัติของการตั้งฉากโดยธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงเวลา สามารถที่จะส่งสัญญาณข่าวสารหลายๆ สัญญาณไปในช่องการสื่อสารเดียวกันโดยอาศัยการส่งคนละช่วงเวลาคือ ในระหว่างที่ส่งสัญญาณข่าวสารสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งนั้นจะไม่มีส่งสัญญาณข่าวสารสัญญาณอื่น ส่วนสัญญาณข่าวสารอื่นๆ นั้น จะส่งที่ช่วงเวลาถัดไปดังนั้นจึงทำให้ไม่เกิดแทรกสอดระหว่างสัญญาณข่าวสารที่ส่งเพราะระบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลานั้นมีลักษณะของการตั้งฉาก ในส่วนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งช่วงความถี่นั้น สัญญาณข่าวสารแต่ละสัญญาณนั้นจะตั้งฉากกันโดยไม่เกิดการแทรกสอดซึ่งกันและกัน โดยการส่งที่คลื่นพาหะคนละความถี่และแถบความถี่ที่ห่างกันเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันระหว่างสัญญาณที่ใช้คลื่นพาหะที่มีความถี่ใกล้กัน



รูปที่ 2.6 สัญญาณโอเอฟดีเอ็มบนแกนความถี่

การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็มนั้น จะมีคุณสมบัติของการตั้งฉากในแกนความถี่ โดยสามารถที่จะส่งสัญญาณข่าวสารไปในคลื่นพาหะย่อยที่ต่างกันโดยไม่เกิดการรบกวนกัน สัญญาณโอเอฟดีเอ็มสามารถสร้างจากผลรวมของสัญญาณไซน์ซอไซด์ (sinusoid signal) หลายๆ สัญญาณ ซึ่งแต่ละ

สัญญาณก็คือคลื่นพาย้อยแต่ละตัวนั่นเอง ความถี่เบสแบนด์ (baseband frequency) ของแต่ละคลื่นพาย้อยจะกำหนดให้เป็นจำนวนเต็มของส่วนกลับของช่วงเวลาของสัญญาณหนึ่งสัญญาณ โดยผลที่ได้จะทำให้แต่ละคลื่นพาย้อยนั้นมีจำนวนของไซเคิล (cycle) เป็นจำนวนเต็มในหนึ่งสัญญาณและผลที่ตามมาจะทำให้แต่ละคลื่นพาย้อยๆ นั้นตั้งฉากกัน ในรูปที่ 2.6 แสดงสัญญาณบนแกนความถี่ของคลื่นพาย้อย f_0, f_1, f_2 และ f_3 ซึ่งจากคุณสมบัติของการตั้งฉากของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใน แต่ละคลื่นพาย้อยจะมีกึ่งกลางยอดคลื่นที่มีตำแหน่งตรงกับตำแหน่งคลื่นพาย้อยอื่นๆ ที่มีระดับสัญญาณเป็นศูนย์ (null) โดยที่จุดยอดคลื่นของแต่ละสัญญาณจะมีระยะห่างกันตามแกนความถี่เท่ากับ $1/T$ เมื่อ T คือช่วงเวลาของสัญญาณ ดังนั้นการซ้อนทับแถบความถี่กันในแต่ละคลื่นพาย้อยจึงสามารถทำได้ โดยในแต่ละคลื่นพาย้อยจะห่างกันเท่ากับ $\Delta f = 1/NT$ ทำให้แต่ละคลื่นพาย้อยมีช่วงห่างกันเป็น $f_1 = f_0 + \Delta f, f_2 = f_0 + 2\Delta f, \dots, f_{N-1} = f_0 + (N-1)\Delta f$

2.4.2 การสร้างสัญญาณโอเอฟดีเอ็ม

ตามรูปที่ 2.7 เป็นภาคส่งของระบบโอเอฟดีเอ็ม เริ่มต้นด้วยการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลทางเฟสหรือมอดูเลตแบบคิวเอเอ็มของแต่ละบิตข้อมูลเป็นจำนวน N สัญญาณ และทำการแปลงสัญญาณดังกล่าวจากอนุกรมเป็นขนาน โดยกำหนดให้ $X_l(k)$ เป็นสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตและการแปลงจากอนุกรมเป็นขนานที่มีการส่งสัญญาณที่ลำดับที่ l -th ในแต่ละคลื่นพาย้อยลำดับที่ k -th ซึ่ง $l = 0, 1, 2, \dots, \infty$ และ $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ หลังจากนั้นจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการแปลงผกผันฟูริเยร์แบบเร็ว ซึ่งจะทำให้ช่วงเวลาของแต่ละสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น N เท่า โดยกำหนดให้ T_{sym} เป็นช่วงเวลาของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นหลังกระบวนการแปลงผกผันฟูริเยร์แบบเร็วที่มีค่าเท่ากับ $T_{sym} = NT$ และ f_k เป็นความถี่ของคลื่นพาย้อย สามารถเขียนเป็นสัญญาณโอเอฟดีเอ็มได้ตามสมการที่ (2.1) [9]

$$\Psi_{l,k}(t) = \begin{cases} \exp(j2\pi f_k (t - lT_{sym})) & , 0 < t \leq T_{sym} \\ 0 & , \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.1)$$

ดังนั้น สามารถเขียนสัญญาณโอเอฟดีเอ็มพาสแบนด์และสัญญาณโอเอฟดีเอ็มเบสแบนด์ ในรูปโดเมนเวลาได้ตามสมการที่ (2.2)

$$x_I(t) = \text{Re} \left\{ \frac{1}{T_{sym}} \sum_{l=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^{N-1} X_l(k) \Psi_{l,k}(t) \right) \right\}$$

และ

$$x_I(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} X_l(k) \exp(j2\pi f_k (t - lT_{sym})) \quad (2.2)$$

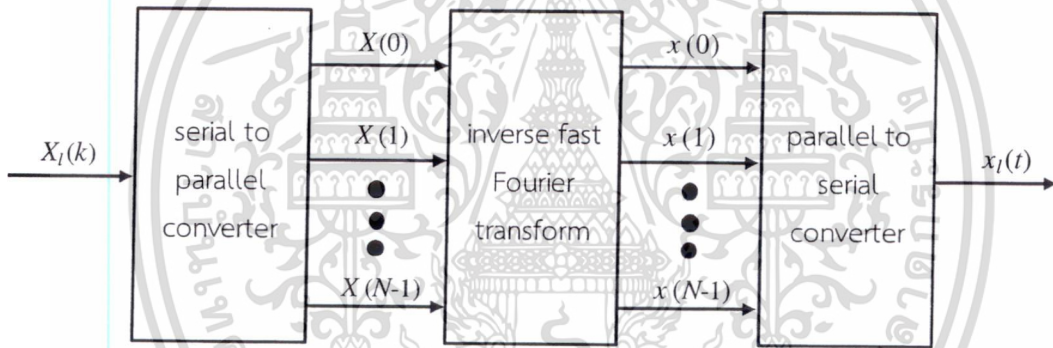
โดยเวลา t ในสมการที่ (2.2) ถูกแทนด้วยการแซมปลิงที่ $t = lT_{sym} + nT$ เมื่อ $T_s = T_{sym} / N$ และ $f_k = k/T_{sym}$

$$x_I(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X_I(k) \exp(j2\pi kn/N), n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.3)$$

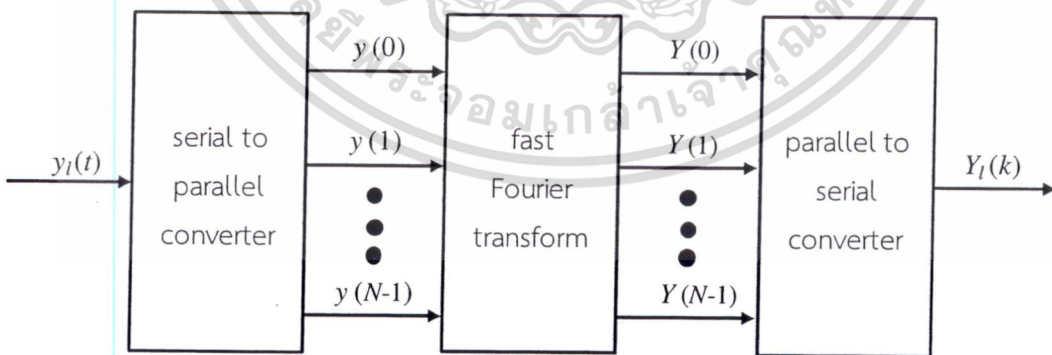
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็มตามรูปที่ 2.8 สัญญาณที่รับได้จะถูกแปลงจากอนุกรมเป็นขนานและส่งต่อมายังกระบวนการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (fast Fourier transform: FFT) และกำหนดให้เป็น $y_l(t) = \sum_{i=0}^{N-1} X_l(k) \exp(j2\pi f_k (t-lT_{sym}))$, $lT_{sym} < t \leq lT_{sym} + nT$ จากนั้นแต่ละ $y_l(t)$ จะทำการอินทิเกรตบนช่วงเวลา T_{sym} ให้ได้เอาต์พุตที่ต้องการคือ $X_l(k)$ สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ของโอเอฟดีเอ็มในภาครับได้ตามสมการที่ (2.4)

$$\begin{aligned}
 Y_l(k) &= \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} y_l(t) \exp(-j2\pi f_k (t-lT_{sym})) dt \\
 &= \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} X_l(i) \exp(j2\pi f_i (t-lT_{sym})) \right\} \exp(-j2\pi f_k (t-lT_{sym})) dt \\
 &= \sum_{i=0}^{N-1} X_l(i) \left\{ \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} \exp(j2\pi(f_i - f_k)(t-lT_{sym})) dt \right\} = X_l(k) \quad (2.4)
 \end{aligned}$$



รูปที่ 2.7 ภาคส่งของระบบโอเอฟดีเอ็ม

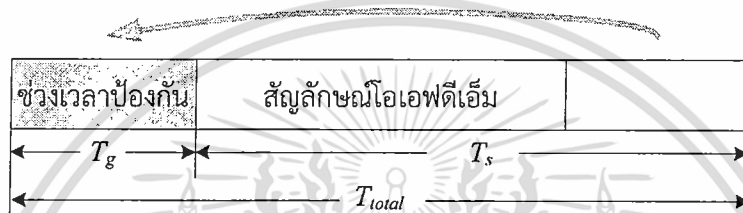


รูปที่ 2.8 ภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็ม

2.4.3 ช่วงเวลาป้องกัน (Guard Interval)

ช่วงเวลาป้องกันเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการต่อต้านการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ และการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณที่มีสาเหตุมาจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่เกิดจากการจางหายแบบหลายวิถี (multipath fading channel) โดยการคัดลอกสัญญาณส่วนท้ายของแต่ละเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละสัญลักษณ์มาวางไว้ที่ส่วนหน้าของสัญลักษณ์เพื่อเป็นช่วงเวลาป้องกัน และช่วงเวลาป้องกันนี้จะต้องมีค่ามากกว่าค่าสูงสุดของดีเลย์สเปรดของช่องสัญญาณแบบหลายวิถี (multipath delay spread) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยที่ $T_{total} = T_g + T_s$ เมื่อ T_g คือค่าของช่วงเวลาป้องกัน T_s คือช่วงเวลาของสัญลักษณ์ (symbol duration) ดังนั้นสัญลักษณ์โอเอฟดีเอ็มจะแบ่งได้เป็นสองส่วน โดยส่วนแรกคือข้อมูลสัญลักษณ์ และส่วนที่สองที่ทำการคัดลอกสัญญาณส่วนท้ายของแต่ละสัญลักษณ์มาวางไว้ที่ส่วนหน้าของสัญลักษณ์เรียกว่า การเสริมไซคลิก (cyclic prefix) ซึ่งการกำหนดค่าช่วงเวลาป้องกันมีขนาดแตกต่างกันไปตามความต้องการของแต่ละระบบ เช่น $\frac{T_s}{4}$, $\frac{T_s}{8}$ หรือ $\frac{T_s}{16}$ ซึ่งถ้าช่วงเวลาป้องกันกว้างมากก็จะทำให้ทรูพุดของระบบลดลงแต่จะป้องกันการเกิดการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ได้ดี



รูปที่ 2.9 การวางช่วงเวลาป้องกัน

2.4.4 การซิงโครไนซ์

การซิงโครไนซ์ (synchronization) นั้นเป็นอุปสรรคที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ทำให้ภาครับสามารถรับข้อมูลได้อย่างถูกต้อง โดยที่การซิงโครไนซ์ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

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

เนื่องจากความแตกต่างของความถี่คลื่นพาห์ของเครื่องส่งและเครื่องรับทำให้การสุ่มสัญญาณแต่ละครั้งที่เวลา t จะประกอบด้วยค่าเฟคเตอร์ของเฟส (phase factor) ที่ไม่รู้ค่าๆ หนึ่งโดยสามารถเขียนได้เป็น $\exp(j2\pi\Delta f_c t)$ โดยที่ Δf_c คือค่าของความถี่ออฟเซตของคลื่นพาห์ (carrier frequency offset) ที่ไม่รู้ค่า ฉะนั้นค่าของเฟคเตอร์ที่รู้ค่านี้อาจจะต้องทำการประมาณค่าและชดเชยสำหรับในการสุ่มแต่ละครั้งก่อนที่จะนำสัญญาณที่ได้จากการสุ่มไปผ่านกระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว ไม่อย่างนั้นจะทำให้สัญญาณสูญเสียคุณสมบัติของการตั้งฉากระหว่างช่องสัญญาณย่อยๆ

2.4.5 การประมาณค่าการตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณ

สำหรับการสื่อสารในรูปแบบของเบิร์สต์เฟรม (burst frame) จะมีการใส่สัญลักษณ์ปริเอมเบิล (preamble symbol) ไว้ที่จุดเริ่มต้นของทุกๆ เบิร์สต์เฟรม เมื่อกำหนดให้ช่องสัญญาณไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลา 1 เบิร์สต์เฟรม และทางด้านภาครับรับรู้ข้อมูลที่ส่งในสัญลักษณ์ปริเอมเบิลแล้ว ดังนั้นทำให้สามารถที่จะทำการประมาณค่าการตอบสนองความถี่ช่องสัญญาณได้โดยกำหนดให้สัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านกระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Y(k) = H(k)a(k) + N(k) \tag{2.5}$$

โดยที่ k คือ จำนวนช่องสัญญาณย่อย $Y(k)$ คือ สัญญาณที่ภาครับรับได้ $H(k)$ คือ ค่าการตอบสนองความถี่ของช่องสัญญาณ $a(k)$ คือ สัญญาณข้อมูลที่อยู่ในสัญลักษณ์ปรีเอมเบิล และ $N(k)$ คือ สัญญาณรบกวน

เมื่อภาครับรับรู้ค่าของสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในสัญลักษณ์ปรีเอมเบิลหรือ $a(k)$ แล้ว ดังนั้นจะสามารถทำการประมาณค่าการตอบสนองความถี่ของสัญญาณ (channel frequency response) ได้ อย่างง่ายตามสมการที่ (2.6)

$$\hat{H}(k) = \frac{Y(k)}{a(k)} \tag{2.6}$$

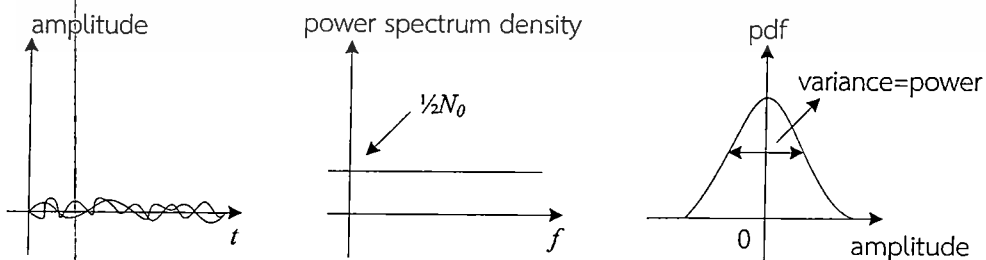
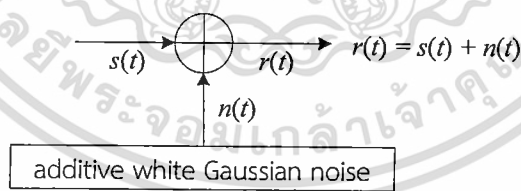
เมื่อ $\hat{H}(k)$ คือ การตอบสนองความถี่ของสัญญาณที่ได้จากการประมาณค่า ในกรณีที่มีปราศจากสัญญาณรบกวนนั้นจะสามารถที่จะทำการประมาณค่าได้อย่างถูกต้องแต่ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนเข้ามาด้วยนั้นก็อาจจะทำให้การประมาณค่าผิดพลาดได้

2.4.6 สัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก

จากรูปที่ 2.10 เป็นการจำลองสัญญาณรบกวนในระบบ โดยจะกำหนดให้เป็นสัญญาณที่ได้รับ คือ

$$r(t) = s(t) + n(t) \tag{2.7}$$

เมื่อ $s(t)$ คือ สัญญาณทางด้านภาคส่ง และ $n(t)$ คือ สัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก



รูปที่ 2.10 คุณสมบัติของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก [3]

โดยที่สัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวกมีค่าความหนาแน่นสเปกตรัมของกำลังงาน (power spectrum density) ดังสมการที่ (2.8) เมื่อ N_0 คือ ค่าคงที่หรือความหนาแน่นของกำลังงานของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนที่มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเฮิรตซ์ โดยที่ $N_0 = KT$ เมื่อ K คือ ค่าคงที่โบลทซ์มานน์ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน และ T คือ อุณหภูมิ 290 องศาเคลวิน

$$\Phi(f) = \frac{1}{2} N_0 \tag{2.8}$$

2.4.7 ช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์

การส่งข้อมูลจากภาคส่งไปยังภาครับในระบบที่จำลองนั้น มีการส่งแบบกระจายสัญญาณ ซึ่งส่งสัญญาณออกไปในทิศทางที่กว้างหรือส่งในแบบที่ไม่เป็นเส้นทางตรงระหว่างภาคส่งกับภาครับ ดังนั้นโอกาสที่สัญญาณเดียวกันหลายๆ สัญญาณจะสะท้อนวัตถุต่างๆ ไปสู่ภาครับนั้นจะมีมาก ปรัชญาการณดังกล่าวจึงสมมุติได้ว่าเป็นช่องสัญญาณของระบบเรลีย์ โดยที่ตัวแปรสำคัญของช่องสัญญาณ คือ จำนวนวิถีและค่าหนึ่งช่วงเวลา ซึ่งในระบบจะกำหนดให้ช่องสัญญาณมีการจางหายแบบช้า เนื่องจากภาครับและภาคส่งมีตำแหน่งที่คงที่ อาจจะเรียกได้ว่าเป็นช่องสัญญาณแบบที่มีการจางหายของสัญญาณเรลีย์แบบแนวราบที่ในเฟรมช่วงข้อมูลเดียวกันจะได้รับผลกระทบจากช่องสัญญาณเหมือนกัน สัญญาณที่ภาครับรับได้จะเป็นผลรวมของสัญญาณในแต่ละเส้นทางที่ได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นเมื่อช่องสัญญาณมีการแกว่งของระดับการจางหาย จะทำให้สัญญาณที่ได้รับอาจจะมีการเสริมหรือหักล้างกัน



รูปที่ 2.11 แบบจำลองช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์

จากรูปที่ 2.11 แสดงการส่งสัญญาณจาก T_x ที่ผ่านช่องสัญญาณ 3 วิถี คือ P_1, P_2 และ P_3 ซึ่งสัญญาณทั้ง 3 วิถีที่มีทั้งขนาดและช่วงเวลาที่แตกต่างกันจะไปรวมกันที่ R_x โดยสัญญาณในเส้นทางที่ n สามารถแสดงได้ดังนี้

$$r_n(t) = Re [a_n(t) \exp(j2\pi f_c t)] \tag{2.9}$$

เมื่อ f_c คือ ความถี่ในการส่งสัญญาณ และ $\alpha_n(t)$ คือค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของช่องสัญญาณ เมื่อสมการที่ (2.9) คือสัญญาณเส้นทางที่ n ดังนั้นสัญญาณรวมจำนวน N เส้นทางที่เครื่องรับรับได้แสดงได้ตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{n=1}^N r_n(t) \\ &= \operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^N \alpha_n(t) \exp(j2\pi f_c t) \right] \\ &= \operatorname{Re} [(x(t) + jy(t)) (\cos 2\pi f_c t + j \sin 2\pi f_c t)] \\ &= x(t) \cos 2\pi f_c t - y(t) \sin 2\pi f_c t \end{aligned} \quad (2.10)$$

เมื่อ $x(t)$ และ $y(t)$ มีการแจกแจงแบบเรลลี และ f_d คือ ความถี่ดอปเปลอร์ที่มีความสัมพันธ์กับความถี่ในการเคลื่อนที่ของภาครับที่มีค่าเท่ากับ $f_d = v/\lambda = v f_c / c$ เมื่อ v คือ ความเร็วของภาครับ c คือ ความเร็วแสง 3×10^8 เมตรต่อวินาที แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองระบบที่ตำแหน่งของภาครับและภาครับที่คงที่ ดังนั้น f_d จึงมีค่าน้อยมาก สามารถแสดงเป็นสมการของช่องสัญญาณจางหายแบบเรลลีในรูปแบบเชิงซ้อนได้ดังสมการที่ (2.11) [3]

$$\begin{aligned} h(t) &= x(t) + jy(t) \\ &= \left[\sqrt{\frac{2}{N+1}} \sum_{n=1}^N \cos\left(\frac{\pi n}{N}\right) \cos\left\{2\pi f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)t\right\} + \frac{1}{\sqrt{N+1}} \cos(2\pi f_d t) \right] \\ &\quad + j \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{n=1}^N \sin\left(\frac{\pi n}{N}\right) \cos\left\{2\pi f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)t\right\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

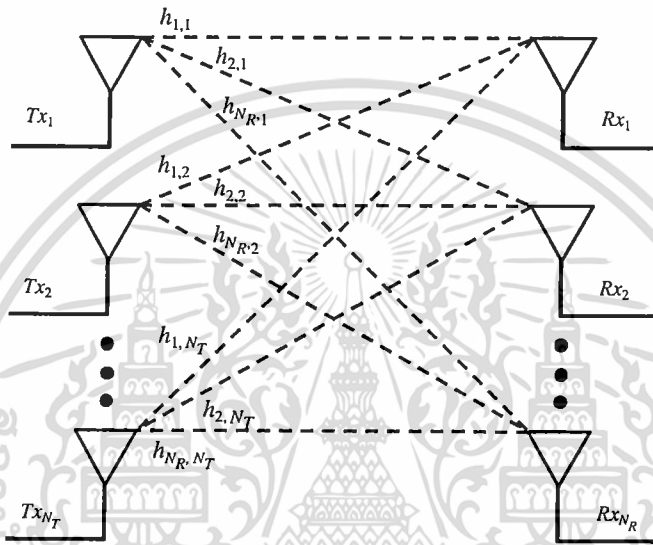
2.5 ระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายเสาอากาศ

ระบบการส่งข้อมูลแบบหลายเสาอากาศ (multiple antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการส่งข้อมูลแบบหลายเสาอากาศนี้ ทำให้ความจุในระบบเพิ่มขึ้น สามารถรับส่งข้อมูลได้มากขึ้น โดยในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายเสาอากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1. ระบบหนึ่งทางเข้าหลายทางออก (single-input multiple-output system: SIMO) คือ ระบบที่ประกอบด้วยเสาอากาศทางภาคส่งหนึ่งเสาอากาศและเสาอากาศทางภาครับหลายเสาอากาศ
2. ระบบหลายทางเข้าหนึ่งทางออก (multiple-input single-output system: MISO) คือ ระบบที่ประกอบด้วยเสาอากาศทางภาคส่งหลายเสาอากาศและเสาอากาศทางภาครับหนึ่งเสาอากาศ

3. ระบบหลายทางเข้าหลายทางออก (multiple-input multiple-output system: MIMO) คือ ระบบที่ประกอบด้วยเสาอากาศทางภาคส่งหลายเสาอากาศและเสาอากาศทางภาครับหลายเสาอากาศ

เมื่อจำนวนเสาอากาศที่ภาคส่งและภาครับมีจำนวนหลายชุด การพิจารณาช่องสัญญาณจะมีความซับซ้อนมากกว่าระบบที่ใช้เสาอากาศเพียง 1 ชุด และการถอดรหัสที่ภาครับจะต้องใช้เทคนิคในการได้เวอร์ซิตีที่มีรูปแบบสัมพันธ์กับทางด้านภาคส่ง ช่องสัญญาณในการรับส่งข้อมูลแบบหลายเสาอากาศมีลักษณะดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การรับส่งข้อมูลแบบเสาอากาศเดี่ยว และหลายเสาอากาศ

จากรูปที่ 2.12 จำนวนของเส้นทางจากเครื่องส่งไปยังเครื่องรับมีค่าเท่ากับ $N_R \times N_T$ เส้นทางเมื่อ N_T คือจำนวนเสาอากาศทางภาคส่ง และ N_R คือจำนวนเสาอากาศทางภาครับ การกำหนดช่องสัญญาณรวมของการรับส่งข้อมูลแบบหลายเสาอากาศจะแสดงอยู่ในรูปของเมทริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับ $N_R \times N_T$ ดังสมการที่ (2.12) เมื่อ \mathbf{H} คือ เมทริกซ์ของช่องสัญญาณของการรับส่งข้อมูลแบบหลายเสาอากาศทุกเส้นทางที่มีสมาชิกภายในคือ $h_{i,j}$ ซึ่งเป็นการตอบสนองของช่องสัญญาณจากเสาอากาศส่งตัวที่ i ไปยังเสาอากาศรับตัวที่ j เมื่อ $h_{i,j}$ มีค่าสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของช่องสัญญาณแบบเรลีย์ โดยในช่วงเฟรมข้อมูลเดียวกันบิตข้อมูลจะได้ผลจากการจางหายของสัญญาณเหมือนกันทุกบิตข้อมูล

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \dots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

ในระบบทั้ง 3 รูปแบบนี้ ระบบหลายทางเข้าหลายทางออกจะให้สมรรถนะทางด้านความจุช่องสัญญาณสูงที่สุด จึงมีการวิจัยและพัฒนา รูปแบบ เพื่อนำมาใช้งานแทนระบบหนึ่งทางเข้าหนึ่งทางออก ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสมรรถนะของระบบ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. อัตราการขยายแถวลำดับ (array gain) การใช้เสาอากาศหลายๆ เสา จะทำให้อัตราการขยายของสัญญาณที่ออกมาจากเสาอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะทาง (range) และพื้นที่ครอบคลุม (coverage) ในการส่งสัญญาณเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ที่ต้องการส่งสัญญาณให้กว้างขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ทำให้กำลังงานส่งจากภาคส่งมีค่าลดลงตามอัตราการขยายของเสาอากาศที่ภาคส่งนั้นมีมากขึ้น หรือค่าความไวที่เสาอากาศแถวลำดับที่ภาคส่งรับได้มีมากขึ้นนั่นเอง

2. อัตราการขยายไดเวอร์ซิตี (diversity gain) ค่ากำลังของสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เทคนิคไดเวอร์ซิตีจึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายของสัญญาณนั้นๆ ดังนั้นระบบสื่อสารหลายทางเข้าหลายทางออก จึงมีการใช้เสาอากาศภาคส่ง N_T เสา และเสาอากาศภาครับ NR เสา ที่มีการจางหายของสัญญาณเป็นอิสระต่อกัน เมื่อส่งสัญญาณออกไปจะทำให้ภาครับสามารถรวมสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยลดปัญหาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของสัญญาณในระบบออกไปได้มาก เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารหนึ่งทางเข้าหนึ่งทางออก

3. กำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (spatial multiplexing gain) ช่องสัญญาณในระบบสื่อสารหลายทางเข้าหลายทางออก จะมีการเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณในระบบเป็นเส้นตรงและมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนเสาอากาศที่ภาคส่งและภาครับ โดยไม่มีผลต่อค่ากำลังงานหรือการใช้ความกว้างแถบความถี่ ค่ากำลังขยายของการส่งหลายระยะทางจะส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการส่งแบบหลายระยะทางนั้น ทางภาคส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันออกจากเสาอากาศแต่ละเสา ภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายของสัญญาณมากพอ (rich scattering) ทำให้ทางภาครับสามารถแยกสัญญาณต่างๆ ออกจากกันได้

4. การลดการแทรกสอด (interference reduction) การแทรกสอดแบบร่วมภายในช่องสัญญาณ (co-channel interference) เกิดจากการใช้ความถี่ซ้ำ (frequency reuse) เมื่อมีการใช้เสาอากาศหลายๆ เสา จะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณข้างเคียง จึงทำให้สามารถลดการแทรกสอดได้

2.5.1 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก

ในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีช่องสัญญาณเป็นแบบหลายทางเข้าหลายทางออกจะมีเทคนิคการส่งข้อมูลอยู่หลายเทคนิค แต่ก็สามารถจัดกลุ่มรวมกันตามเทคนิคหลักๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ

2.5.1.1 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา

เทคนิคนี้จะใช้เสาอากาศที่เพิ่มเข้ามาในระบบมาช่วยกันเข้ารหัส เพื่อให้ได้ไดเวอร์ซิตีทางปริภูมิ-เวลา ทำให้ข้อมูลที่ส่งมีความน่าเชื่อถือและมีความทนทานต่อการผิดพลาดมากขึ้น เมื่อช่องสัญญาณที่ส่งผ่านเป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ซึ่งวิธีการส่งแบบนี้มีข้อดีคือ มีรูปแบบการส่งสัญญาณที่ง่ายและมีความซับซ้อนต่ำ

2.5.1.2 การมัลติเพล็กซ์ทางปริภูมิ

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก ซึ่งเทคนิคการส่งข้อมูลแบบนี้จะให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง โดยขั้นตอนการส่งจะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมด N_T ค่าต่อหนึ่งคาบสัญลักษณ์คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละเสาอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา

การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา เป็นวิธีที่อยู่บนพื้นฐานของวิธีการทำไคเวอร์ซิตีทางด้านส่ง ซึ่งเป็นการรวมเอาการออกแบบรหัสช่องสัญญาณและการใช้เสาอากาศหลายต้นเข้าด้วยกัน โดยจะใช้เสาอากาศส่งหลายๆ ต้น และเสาอากาศรับต้นเดียวหรือหลายๆ ต้น ร่วมกับการใช้ไคเวอร์ซิตีทางเวลา โดยอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าหากตั้งเสาอากาศส่งและรับในปริภูมิให้มีความเป็นอิสระเชิงปริภูมิแล้ว สัญญาณจากเสาอากาศส่งแต่ละตัวที่ส่งไปยังเสาอากาศรับแต่ละตัวจะต้องได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณที่แตกต่างกัน เพื่อให้ข่าวสารที่ถูกส่งไป ณ เวลาหนึ่งๆ ในแต่ละเส้นทางไม่ถูกรบกวนจนทำให้สูญเสียไปพร้อมกันหมดทุกเส้นทาง ดังนั้นการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา จึงมีประสิทธิภาพในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการจางหายของสัญญาณ ทำให้ระบบของการสื่อสารไร้สายมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

โดยทั่วไปแล้ว การเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา จะมีการแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกัน คือ รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อกกับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทอร์ลิส และในรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อกก็ยังมีเรื่องของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติอยู่ด้วย แต่ในบางตำราที่จะแยกออกเป็น 3 วิธีดังกล่าวเพื่อความชัดเจนของเนื้อหา ในงานวิจัยฉบับนี้จะแบ่งการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลา ออกเป็น 3 วิธีด้วยกัน คือ

1. รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทอร์ลิส
2. รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ
3. รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบบล็อก

ซึ่งรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทอร์ลิส เป็นเทคนิคจากการทำไคเวอร์ซิตีทางด้านส่ง ที่มีประสิทธิภาพในการลดผลกระทบที่เกิดจากการจางหายของสัญญาณสูงที่สุดในทั้ง 3 วิธี แต่มีข้อเสียคือ นอกจากต้องมีเสาอากาศรับส่งที่คงที่ตายตัวแล้ว กระบวนการถอดรหัสของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบเทอร์ลิสก็ยังมีข้อซับซ้อนสูงมาก โดยความซับซ้อนในการถอดรหัสจะเพิ่มขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียลตามอัตราความเร็วในการส่ง

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขออธิบายเฉพาะวิธีการของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติเท่านั้น ทั้งนี้ก็เป็นเพราะคุณลักษณะเฉพาะตัวที่น่าสนใจ คือ การถอดรหัสเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน มีรูปแบบที่เรียบง่าย และให้ไคเวอร์ซิตีในระบบสูง

2.5.3 รหัสปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ

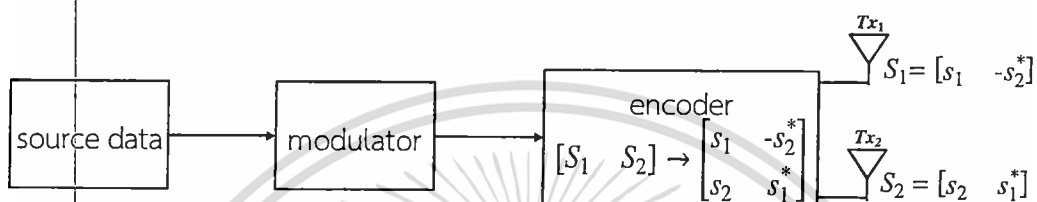
2.5.3.1 การเข้ารหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ

วิธีการเข้ารหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.13 เมื่อแหล่งกำเนิดข่าวสาร (source data) ให้กำเนิดสัญลักษณ์ข้อมูลและส่งเข้าสู่วงจรมอดูเลเตอร์ครึ่งละ 2 สัญลักษณ์ สัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแล้ว ได้แก่ s_1 และ s_2 จะได้รับการแปลงด้วยวงจรรหัสเข้ารหัส (encoder) ให้ได้เป็นสัญญาณที่ใช้ส่งจริงในเสาอากาศแต่ละต้น โดยรูปแบบการส่งสัญญาณสามารถเขียนแสดงในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

การส่งสัญญาณแต่ละครั้งหรือการส่งสัญญาณหนึ่งบิตจะใช้เวลาในการส่ง 2 คาบเวลาต่อเนื่องกัน ในการส่งของคาบเวลาแรกหรือที่เวลา t สัญญาณที่ส่งออกจากเสาอากาศต้นที่ 1 และต้นที่ 2 ได้แก่ s_1 และ s_2 ตามลำดับ ส่วนในคาบเวลาที่ 2 หรือที่เวลา $t+T$ สัญญาณที่ส่งออกจากเสาอากาศที่ 1 และ 2 ได้แก่ $-s_2^*$ และ s_1^* ตามลำดับ

ทั้งนี้ s_1^* คือ ค่าเชิงซ้อนสังยุค (complex conjugate) ของ s_1 จะเห็นว่ารูปแบบการเขียนเมทริกซ์ S นั้น กำหนดให้หมายเลขแถวหมายถึงเสาอากาศที่จะส่งและหมายเลขทางคอลัมน์หมายถึงเวลา



รูปที่ 2.13 โครงสร้างการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ

คุณสมบัติที่น่าสนใจประการหนึ่งของรหัสแบบอะลามูติ คือ การที่เราสามารถกำหนดหรือเลือกชนิดของการมอดูเลตแบบใดก็ได้ เช่น M-PSK, M-QAM หรือ M-ASK เป็นต้น ดังนั้นเราจึงสามารถกำหนดจำนวนบิตข้อมูลที่จะส่งในแต่ละครั้งได้ตามต้องการ ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการส่งข้อมูลให้ได้ 1 บิตต่อหนึ่งคาบเวลา ก็ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK (binary phase shift keying) หรือหากต้องการส่งให้ได้ความเร็วเพิ่มขึ้นเท่าตัวคือ 2 บิตต่อหนึ่งคาบเวลา ก็ต้องใช้การมอดูเลตแบบ QPSK (quadrature phase shift keying) สำหรับกรณีทั่วไปที่ใช้ M-PSK จำนวนบิตที่ระบบสามารถส่งได้ต่อหนึ่งคาบเวลามีค่าเท่ากับ $m = \log_2 M$ การที่เราสามารถกำหนดอัตราบิตในการส่งผ่านข้อมูลได้ตามต้องการนั้น จัดว่าเป็นคุณลักษณะเฉพาะตัวที่เป็นประโยชน์ประการหนึ่งของรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ

2.5.3.2 การถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ

ในส่วนนี้จะพิจารณารวมวิธีการถอดรหัสเชิงปริภูมิเวลาอะลามูติ สำหรับระบบที่ใช้เสาอากาศรับเพียงต้นเดียว ซึ่งมีโครงสร้างการทำงานตามที่แสดงในรูปที่ 2.14 จากรูปสัญญาณที่ส่งออกจากเสาส่งแต่ละต้นมีเส้นทางการเดินทางที่แตกต่างกัน โดยสมมุติให้สัญญาณทั้งสองได้รับผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณในลักษณะที่เป็นอิสระจากกัน และสามารถจำลองได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ $h_1(t)$ และ $h_2(t)$ ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณจะแปรเปลี่ยนตามเวลา t แต่โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณของช่วงเวลา 2 คาบที่ต่อเนื่องกันมักจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ฉะนั้นเราจึงสามารถสมมุติได้ว่า ในการส่งรหัสเชิงปริภูมิเวลาแต่ละครั้งที่มีความยาวเท่ากับ 2 คาบเวลานั้น สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณจะมีค่าคงที่และไม่มีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ

$$h_1(t) = h_1(t+T) = h_1 \quad (2.14)$$

$$h_2(t) = h_2(t+T) = h_2 \quad (2.15)$$

สังเกตว่าความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.14) และ (2.15) ได้มีการละตัวแปรทางเวลาออก เพื่อให้การแสดงความสัมพันธ์มีความกระชับมากขึ้น ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแอมพลิจูดและเฟสได้ดังนี้

$$h_1 = |h_1| e^{j\theta_1} \quad (2.16)$$

$$h_2 = |h_2| e^{j\theta_2} \quad (2.17)$$

โดยที่ $|h_1|$ และ $|h_2|$ แทนอัตราขยายเชิงแอมพลิจูด และ θ_1 กับ θ_2 แทนการเลื่อนเฟสจากเสาอากาศส่งเสาที่ 1 และ 2 ไปยังเสาอากาศรับ และ T แทนช่วงคาบของสัญลักษณ์

เมื่อพิจารณาสัญญาณที่เสาอากาศรับในรูปที่ 2.14 จะได้ความสัมพันธ์ของสัญญาณที่รับได้ r_1 และ r_2 ที่เวลา t และ $t + T$ ตามลำดับดังนี้

$$r_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \quad (2.18)$$

$$r_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + n_2 \quad (2.19)$$

โดยที่ n_1 และ n_2 คือ สัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มเชิงซ้อนแบบเกาส์ที่เป็นอิสระต่อกัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และค่าความหนาแน่นสเปกตรัมของกำลังงานเท่ากับ $N_0/2$

ในขั้นตอนการถอดรหัสเชิงปริภูมิเวลา ให้นำสัญญาณ r_1 และ r_2 ที่ได้รับได้ไปใช้ในการถอดรหัสเพื่อตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ s_1 และ s_2 โดยใช้วิธีการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุด (maximum likelihood encoder) ซึ่งทำได้โดยการกำหนดฟังก์ชันต้นทุนให้อยู่ในรูปของระยะยูคลิเดียน (Euclidean distance) ระหว่างคู่สัญญาณที่รับได้ (r_1, r_2) กับคู่สัญลักษณ์ (s_1, s_2) และทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันต้นทุนของคู่สัญลักษณ์ (s_1, s_2) ที่เป็นไปได้ทั้งหมดให้ครบทุกรูปแบบ จากนั้นให้ตัดสินใจเลือกคู่สัญลักษณ์ โดยเลือกคู่สัญลักษณ์ที่มีค่าฟังก์ชันต้นทุนต่ำสุดหรือเทียบเท่ากับการมีระยะยูคลิเดียนต่ำสุด (minimum Euclidean distance) กระบวนการตัดสินใจเลือกนั้นสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$(\hat{s}_1, \hat{s}_2) = \arg \min_{(s_1, s_2) \in C} |r_1 - h_1 s_1 - h_2 s_2|^2 + |r_2 + h_1 s_2^* - h_2 s_1^*|^2 \quad (2.20)$$

ซึ่งในขั้นตอนการคำนวณนี้จะทำได้ก็ต่อเมื่อภาครับทราบค่าสัมประสิทธิ์ของ h_1 และ h_2 เราสามารถจัดรูปของฟังก์ชันต้นทุน $C(s_1, s_2) = |r_1 - h_1 s_1 - h_2 s_2|^2 + |r_2 + h_1 s_2^* - h_2 s_1^*|^2$ ได้เป็น

$$\begin{aligned} C(s_1, s_2) &= (r_1 - h_1 s_1 - h_2 s_2)(r_1 - h_1 s_1 - h_2 s_2)^* \\ &\quad + (r_2 + h_1 s_2^* - h_2 s_1^*)(r_2 + h_1 s_2^* - h_2 s_1^*)^* \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= |r_1|^2 - h_1 s_1 r_1^* - h_2 s_2 r_1^* - r_1 h_1^* s_1^* + |h_1|^2 |s_1|^2 \\
&\quad + h_1^* h_2 s_1^* s_2 - r_1 h_2^* s_2^* + h_1 h_2^* s_1 s_2^* + |h_2|^2 |s_2|^2 \\
&\quad + |r_2|^2 + h_1 s_2^* r_2^* - h_2 s_1^* r_2^* + h_1^* s_2 r_2 + |h_1|^2 |s_2|^2 \\
&\quad - h_1^* h_2 s_1^* s_2 - h_2^* s_1 r_2 - h_1 h_2^* s_1 s_2^* + |h_2|^2 |s_1|^2
\end{aligned} \tag{2.21}$$

สังเกตว่าพจน์ $|r_1|^2$ และ $|r_2|^2$ ไม่มีผลต่อการตัดสินเลือกความน่าจะเป็นจริงสูงสุดของสัญลักษณ์ $(\tilde{S}_1, \tilde{S}_2)$ เพราะเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ (s_1, s_2) จึงสามารถละออกจากฟังก์ชันต้นทุนได้ นอกจากนี้พบว่า พจน์ $h_1 h_2^* s_1^* s_2^*$ และ $h_1^* h_2 s_1 s_2$ หักล้างกับพจน์ $-h_1 h_2^* s_1 s_2^*$ และ $-h_1^* h_2 s_1^* s_2^*$ ได้ ดังนั้นจึงสามารถเขียนฟังก์ชันต้นทุนใหม่ได้ตามสมการ (2.22) ดังนี้

$$\begin{aligned}
C'(s_1, s_2) &= -h_1 s_1 r_1^* - h_2 s_2 r_1^* - r_1 h_1^* s_1^* + |h_1|^2 |s_1|^2 - r_1 h_2^* s_2^* + |h_2|^2 |s_2|^2 \\
&\quad + h_1 s_2^* r_2^* - h_2 s_1^* r_2^* + h_1^* s_2 r_2 + |h_1|^2 |s_2|^2 - h_2^* s_1 r_2 + |h_2|^2 |s_1|^2
\end{aligned} \tag{2.22}$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (2.22) ใหม่โดยการดึงตัวร่วมได้เป็น

$$\begin{aligned}
C'(s_1, s_2) &= |s_1|^2 (|h_1|^2 + |h_2|^2) + |s_2|^2 (|h_1|^2 + |h_2|^2) \\
&\quad + (-h_1 s_1 r_1^* - h_2^* s_1 r_2 - r_1 h_1^* s_1^* - h_2 s_1^* r_2^*) \\
&\quad + (-h_2 s_2 r_1^* + h_1^* s_2 r_2 + h_1 s_2^* r_2^* - r_1 h_2^* s_2^*)
\end{aligned} \tag{2.23}$$

โดยกำหนดให้ \tilde{S}_1 และ \tilde{S}_2 เป็นสัญญาณที่ได้มาจากตัวรวมสัญญาณ (Combiner)

$$\tilde{S}_1 = h_1^* r_1 + h_2 r_2^* \tag{2.24}$$

$$\tilde{S}_2 = h_2^* r_1 - h_1 r_2^* \tag{2.25}$$

และทำให้จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$C'(s_1, s_2) = |s_1|^2 (|h_1|^2 + |h_2|^2) + |s_2|^2 (|h_1|^2 + |h_2|^2) - \tilde{S}_1^* s_1 - \tilde{S}_1 s_1^* - \tilde{S}_2^* s_2 - \tilde{S}_2 s_2^* \tag{2.26}$$

จากนิยามของระยะยูคลิดีเนียน

$$d^2(A, B) = (A - B)(A^* - B^*) = |A|^2 + |B|^2 - AB^* - A^* B \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.26) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$C'(s_1, s_2) = |s_1|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2) + |s_2|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2) + |\tilde{r}_1 - s_1|^2 - |s_1|^2 - |\tilde{r}_1|^2 + |\tilde{r}_2 - s_2|^2 - |s_2|^2 - |\tilde{r}_2|^2 \quad (2.28)$$

เนื่องจากพจน์ $-|\tilde{r}_1|^2$ และ $-|\tilde{r}_2|^2$ ไม่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ เพราะเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับ $|r_1|^2$ และ $|r_2|^2$ เท่านั้น จึงสามารถละออกได้ ฟังก์ชันต้นทุนที่ใช้ในการเลือกสัญลักษณ์จึงเขียนได้เป็น

$$C'(s_1, s_2) = |s_1|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1) + |s_2|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1) + |\tilde{r}_1 - s_1|^2 + |\tilde{r}_2 - s_2|^2 \quad (2.29)$$

กระบวนการตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ s_1 และ s_2 ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.20) จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2) = \arg \min_{(s_1, s_2) \in C} (|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1)(|s_1|^2 + |s_2|^2) + d^2(\tilde{r}_1, s_1) + d^2(\tilde{r}_2, s_2) \quad (2.30)$$

ในฝั่งทางขวามือของสมการความสัมพันธ์สามารถแบ่งแยกพจน์ออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกมีเฉพาะ s_1 เป็นตัวประกอบและกลุ่มที่สองมีแต่ s_2 เป็นตัวประกอบ ดังนั้นการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันต้นทุน จึงสามารถแยกพิจารณาเป็นสองส่วนได้คือ หาค่าต่ำสุดของพจน์ที่มีเฉพาะ s_1 และหาค่าต่ำสุดของพจน์ที่มีเฉพาะ s_2 ได้ การที่เราสามารถพิจารณา s_1 แยกจาก s_2 ได้ มีความหมายว่าการตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ (s_1, s_2) สามารถทำแยกเป็นอิสระจากกันได้ คุณสมบัติดังกล่าวนี้ ช่วยให้กระบวนการตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์มีความซับซ้อนน้อยลง โดยเกณฑ์การตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์มีรายละเอียด ดังนี้

$$\tilde{r}_1 = \arg \min_{s_1 \in C} |s_1|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1) + d^2(\tilde{r}_1, s_1) \quad (2.31)$$

$$\tilde{r}_2 = \arg \min_{s_2 \in C} |s_2|^2(|h_1|^2 + |h_2|^2 - 1) + d^2(\tilde{r}_2, s_2) \quad (2.32)$$

จากที่กล่าวมาเป็นการแสดงให้เห็นว่า เงื่อนไขการตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ตามสมการที่ (2.20) ซึ่งจะพิจารณาจากความน่าจะเป็นจริงสูงสุดที่จัดว่าเป็นกรรมวิธีที่ซับซ้อนมาก สามารถลดรูปลงจนเหลือเงื่อนไขการตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ที่มีความซับซ้อนน้อยลง ดังสมการที่ (2.31) และ (2.32) กล่าวคือ จากที่ต้องตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ทั้ง 2 เวลาพร้อมกัน มาเป็นการตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ ณ แต่ละเวลาแยกจากกัน ซึ่งหมายความว่า จากเดิมที่ต้องมีการทดสอบค่าฟังก์ชันต้นทุน ที่คำนวณจากระยะยูคลิเดียนจำนวนมากถึง M^2 ครั้ง ลดเหลือเพียง $2M$ เมื่อ M แทนรูปแบบที่เป็นไปได้ของสัญลักษณ์ การที่กระบวนการถอดรหัสมีความซับซ้อนน้อยลงได้นี้เป็นผลมาจากการที่รหัสเชิงปริภูมิเวลาแบบอะลามาตีได้รับการออกแบบมาให้มีคุณสมบัติความตั้งฉากกันของรหัสที่ส่งในแต่ละเสานั้นเอง พิจารณาจากรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงขั้นตอนของระบบการรับส่งสัญญาณที่ใช้รหัสเชิงปริภูมิเวลาผ่านช่องสัญญาณที่มีปัญหาของการจางหายของสัญญาณ การทำงานของภาครับจากในรูปจะเห็นว่ามีการนำสัญญาณ (r_1, r_2) ไปผ่านตัวรวมสัญญาณตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.24) และ (2.25) ได้เป็นคู่สัญญาณ $(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2)$ หากแทนค่า r_1 และ r_2 ลงในสมการทั้งสองแล้ว จะได้ผลลัพธ์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

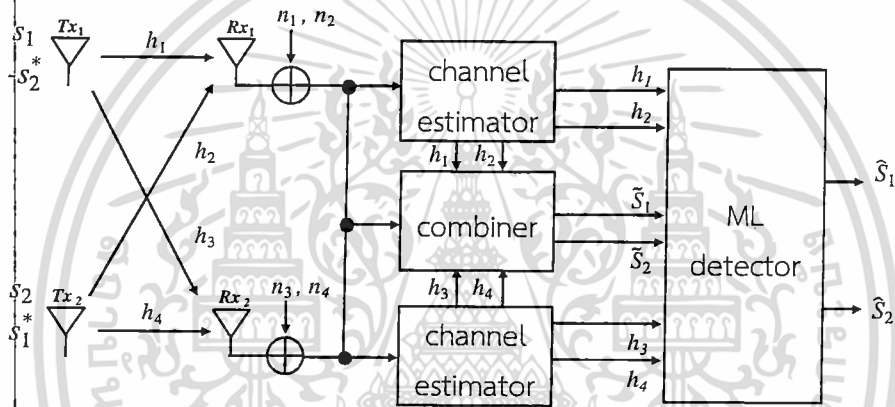
$$\tilde{S}_1 = (|h_1|^2 + |h_2|^2)s_1 + h_1^*n_1 + h_2n_2^* \quad (2.33)$$

$$\tilde{S}_2 = (|h_1|^2 + |h_2|^2)s_2 - h_1n_2^* + h_2^*n_1 \quad (2.34)$$

จากนั้นนำค่าทั้งสองนี้มาใช้ในการตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ โดยวิธีความน่าจะเป็นจริงสูงสุด ตามที่ระบุในสมการที่ (2.31) และ (2.32)

2.5.3.3 การถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาอะลามูติ กรณีเสอากาศรับหลายต้น

ในส่วนนี้จะขยายการพิจารณากระบวนการถอดรหัสอะลามูติ ให้ครอบคลุมถึงกรณีที่ระบบมีการติดตั้งเสอากาศรับหลายเสา โดยสมมุติให้ระบบมีเสอากาศรับจำนวน N_R ต้น และให้ r_1^j และ r_2^j แทนสัญญาณที่รับได้ที่เสอากาศรับเสาที่ j ที่เวลา t และ $t+T$ ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 โครงสร้างการถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ

$$r_1^j = h_{j,1}s_1 + h_{j,2}s_2 + n_{j,1} \quad (2.35)$$

$$r_2^j = -h_{j,1}s_2^* + h_{j,2}s_1^* + n_{j,2} \quad (2.36)$$

โดยที่ $h_{j,i}$ สำหรับ $i = 1, 2$ และ $j = 1, 2, \dots, N_R$ แทนสัมประสิทธิ์การจางหายของสัญญาณจากเสอากาศส่งที่ i ไปยังเสอากาศรับที่ j และ $n_{j,1}$ และ $n_{j,2}$ แทนสัญญาณรบกวนที่เสอากาศรับเสาที่ j ที่เวลา t และ $t+T$ ตามลำดับ ในขั้นตอนการตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ \tilde{S}_1 และ \tilde{S}_2 อาศัยหลักการคำนวณค่าความน่าจะเป็นจริงสูงสุดเหมือนกับในกรณีที่เสอากาศรับเพียงต้นเดียว โดยในกรณีของระบบที่มีเสอากาศรับหลายต้น สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$(\tilde{S}_1, \tilde{S}_2) = \arg \min_{(s_1, s_2) \in \mathcal{C}} \sum_{j=1}^{N_R} |r_1^j - h_{j,1}s_1 - h_{j,2}s_2|^2 + |r_2^j + h_{j,1}s_2^* - h_{j,2}s_1^*|^2 \quad (2.37)$$

การคำนวณตามสมการที่ (2.37) จัดว่ามีความซับซ้อนมาก จึงสามารถประยุกต์แนววิธีการลดรูปสมการให้มีการกระชับขึ้นได้ดังเช่น ในกรณีของระบบที่มีเสอากาศรับเพียงต้นเดียว ตามสมการที่ (2.38) และ ที่ (2.39)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\tilde{S}_1 &= \sum_{j=1}^{N_R} h_{j,1}^* r_1^j - h_{j,2} (r_2^j)^* \\ &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_1 + \sum_{j=1}^{N_R} h_{j,1}^* n_{j,1} + h_{j,2} n_{j,2}^*\end{aligned}\quad (2.38)$$

$$\begin{aligned}\tilde{S}_2 &= \sum_{j=1}^{N_R} h_{j,2}^* r_1^j - h_{j,1} (r_2^j)^* \\ &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{N_R} |h_{j,i}|^2 s_2 + \sum_{j=1}^{N_R} h_{j,2}^* n_{j,1} - h_{j,1} n_{j,2}^*\end{aligned}\quad (2.39)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปทำการถอดรหัสแบบความน่าจะเป็นจริงสูงสุดตามสมการที่ (2.40) และ (2.41) เพื่อตัดสินใจเลือกสัญลักษณ์ \hat{S}_1 และ \hat{S}_2 ที่เป็นอิสระแยกจากกัน

$$\begin{aligned}\hat{S}_1 &= \arg \min_{s_1 \in \mathcal{C}} \left[\left(\sum_{j=1}^{N_R} (|h_{j,1}|^2 + |h_{j,2}|^2) - 1 \right) |s_1|^2 + d^2(\tilde{S}_1, s_1) \right] \\ &= \arg \min_{s_1 \in \mathcal{C}} \left[\left(\sum_{j=1}^{N_R} (|h_{j,1}|^2 + |h_{j,2}|^2) - 1 \right) |s_1|^2 + |\tilde{S}_1|^2 + |s_1|^2 - (\tilde{S}_1 s_1^*) - (\tilde{S}_1^* s_1) \right]\end{aligned}\quad (2.40)$$

$$\begin{aligned}\hat{S}_2 &= \arg \min_{s_2 \in \mathcal{C}} \left[\left(\sum_{j=1}^{N_R} (|h_{j,1}|^2 + |h_{j,2}|^2) - 1 \right) |s_2|^2 + d^2(\tilde{S}_2, s_2) \right] \\ &= \arg \min_{s_2 \in \mathcal{C}} \left[\left(\sum_{j=1}^{N_R} (|h_{j,1}|^2 + |h_{j,2}|^2) - 1 \right) |s_2|^2 + |\tilde{S}_2|^2 + |s_2|^2 - (\tilde{S}_2 s_2^*) - (\tilde{S}_2^* s_2) \right]\end{aligned}\quad (2.41)$$

2.5.4 ข้อดีของรหัสปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูตี

1. ไม่ต้องมีการตอบกลับจากภาครับมายังภาคส่ง ซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับระบบเพื่อที่จะให้ได้ไคเวอร์ซิตีทางด้านส่งสูงสุด
2. กระบวนการถอดรหัสมีความซับซ้อนต่ำ
3. ให้ประสิทธิภาพเสมือนกับวิธีการรวมสัญญาณจากหลายทิศทางแบบปรับค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับรับได้ของแต่ละช่องสัญญาณย่อยให้สูงสุด (maximum ratio combining: MRC)
4. ไม่ต้องมีการออกแบบใหม่สำหรับระบบเดิมที่มีอยู่ จึงเป็นวิธีที่นิยมอย่างมากสำหรับการทำให้คุณภาพการเชื่อมต่อดีขึ้นบนพื้นฐานของเทคนิคเสาอากาศส่งคู่ ซึ่งไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนระบบมากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 พารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบและความหมายของค่าต่างๆ

2.6.1 อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล

อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล คือ อัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูลที่ทางด้านภาครับตัดสินผิดพลาด เมื่อเทียบกับจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งมาจากด้านภาคส่ง เป็นค่าพารามิเตอร์สำคัญในการวัดสมรรถนะของระบบ เป็นค่าที่แสดงถึงค่าความถูกต้องของการรับส่งข้อมูลโดยตรง อัตราความผิดพลาดบิตเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่สนใจในสถานะต่างๆ เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนหรือเมื่อจำนวนผู้ใช้เปลี่ยนไป เป็นต้น

2.6.2 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน คือ อัตราส่วนกำลังงานของสัญญาณที่ต้องการเมื่อเทียบกับกำลังงานของสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ ซึ่งใช้เป็นหน่วยวัดเพื่อทราบถึงประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารว่ามีระดับการใช้กำลังงานในการส่งสัญญาณหรือมีระดับของสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบเท่าใด ส่วนใหญ่ค่ากำลังของสัญญาณจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่ากำลังของสัญญาณรบกวน ดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจึงนิยมวัดกันในหน่วยเดซิเบล (Decibel : dB) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.40) เมื่อ A^2 คือ กำลังงานของสัญญาณที่ไม่พิจารณาการลดทอนของสัญญาณ ระยะห่างระหว่างภาครับและภาคส่ง และไม่คำนึงถึงอัตราขยายของเสาอากาศทั้งในภาคส่งและภาครับ และ σ^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน ซึ่งก็คือกำลังงานของสัญญาณรบกวนนั่นเอง

$$\text{SNR} = 10 \log \left(\frac{A^2}{\sigma^2} \right) \quad (2.40)$$

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการจำลองระบบ

ในบทนี้เป็นการนำเสนอขั้นตอนและวิธีการจำลองระบบของงานวิจัย ซึ่งได้กล่าวถึงระบบโอเอฟดีเอ็มที่นำเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยมารวมใช้งาน เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ส่งผ่านระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกภายใต้ช่องสัญญาณจางหายแบบเรย์ลี โดยใช้เทคนิคการเข้ารหัสและถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะแลมาติที่มีเสาอากาศทางด้านส่ง 2 ต้น และเสาอากาศทางด้านรับ 2 ต้น เป็นตัวกลางในการรับและการส่ง และทำการมอดูเลตแบบ BPSK และ QPSK โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ โครงสร้างของระบบและเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย

3.1 โครงสร้างของระบบ

3.1.1 แบบจำลองทางด้านภาคส่งและภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศด้านละ 1 ต้น

รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบโอเอฟดีเอ็มในกรณีที่ภาคส่งใช้เสาอากาศ 1 ต้น และภาครับใช้เสาอากาศ 1 ต้น เริ่มต้นในการจำลองระบบทางด้านภาคส่ง โดยข้อมูลที่ส่งเข้ามาในระบบโอเอฟดีเอ็มจะเป็นบิตข้อมูลแบบสุ่มที่มีค่าเป็น 2 บิต คือ 0 ถึง 1 และมีค่าเป็น 4 บิต คือ 0 ถึง 3 เพื่อนำไปมอดูเลตแบบ BPSK และ QPSK ตามลำดับ ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2)

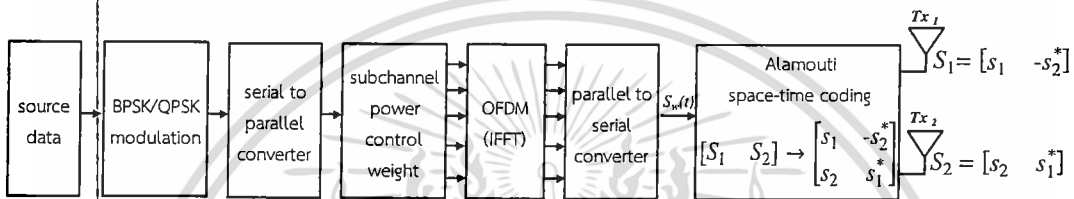
$$\text{source data} = [1010001110001101\dots] \quad (3.1)$$

$$\text{source data} = [3012402234104010\dots] \quad (3.2)$$

จากนั้นบิตข้อมูลจะถูกมอดูเลตในรูปแบบต่างๆ เพื่อเปลี่ยนจากข้อมูลบิตเป็นสัญลักษณ์ ในการจำลองของระบบนี้จะใช้วิธีการมอดูเลตแบบ BPSK และ QPSK ซึ่งหลังจากการมอดูเลตแล้วสัญลักษณ์ที่ได้ของ BPSK จะอยู่ในรูป 1 และ -1 ส่วน QPSK จะอยู่ในรูปแบบส่วนจริง (real part) และส่วนจินตภาพ (imaginary part) คือ $1+j$, $1-j$, $-1+j$ และ $-1-j$ จากนั้นจะถูกส่งผ่านไปยังตัวแปลงสัญญาณจากแบบอนุกรมเป็นแบบขนานเป็นจำนวน N สัญลักษณ์ เพื่อส่งต่อไปยังกระบวนการแปลงผกผันฟูรีเยร์แบบเร็ว โดยแต่ละสัญลักษณ์จะถูกมอดูเลตกับคลื่นพาห้จำนวน N ความถี่ ซึ่งทำให้คาบเวลามีค่ามากขึ้นเท่ากับ N เท่า และทำการแปลงสัญญาณจากแบบขนานเป็นแบบอนุกรมจะได้ $S(t)$ เพื่อส่งออกอากาศ จากนั้นจึงส่งผ่านช่องสัญญาณจางหายแบบเรย์ลี หรือ $h(t)$ และช่องสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก หรือ $n(t)$ ไปยังภาครับ หรือ $r(t)$ ต่อไป

$$S(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp(j2\pi f_k (t-lT)) \quad (3.3)$$

อากาศ 2 ต้น และภาครับใช้เสาอากาศ 2 ต้น ที่ใช้การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย ซึ่งการนำวิธีการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มเข้ามาใช้งาน จะทำโดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยเข้าไปก่อนที่จะส่งต่อไปยังกระบวนการแปลงผกผันฟูรีเยร์แบบเร็ว เพื่อทำการปรับกำลังส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อยให้มีความเหมาะสมซึ่งวิธีการคำนวณนั้นจะอธิบายในหัวข้อถัดไป ดังนั้นในสมการที่ (3.4) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยจะมีค่าเท่ากับ 1 ในกรณีที่ระบบโอเอฟดีเอ็มแบบไม่มีการใช้การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย หลังจากนั้นทำการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูตีที่มีรูปแบบตามที่แสดงไว้ในบทที่ 2 โดยทางด้านภาคส่งจะจัดส่งสัญญาณที่ใช้ส่งจริงในเสาอากาศแต่ละต้น คือ S_1 และ S_2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างระบบโอเอฟดีเอ็มทางด้านภาคส่งที่มีการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูตี

$$S_1 = [s_1 \quad -s_2^*] \quad (3.5)$$

$$S_2 = [s_2 \quad s_1^*] \quad (3.6)$$

ทางด้านภาครับนั้น สัญญาณ S_1 และ S_2 จะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นก่อนที่จะมาถึงภาครับ โดยแทนค่าด้วยสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ คือ h_1, h_2, h_3 และ h_4 และสัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งมาเพื่อทำการถอดรหัสสำหรับรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูตี แสดงได้จากสมการที่ (2.35) และ (2.36) โดยกำหนดให้ r_1^1 และ r_2^1 แทนสัญญาณที่รับได้จากเสาอากาศด้านรับต้นที่ 1 และ r_1^2 และ r_2^2 แทนสัญญาณที่รับได้ที่เสาอากาศด้านรับต้นที่ 2 โดยที่ n_1, n_2, n_3 และ n_4 แทนสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนแบบขาวววก

$$r_1^1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \quad (3.7)$$

$$r_2^1 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + n_2 \quad (3.8)$$

$$r_1^2 = h_3 s_1 + h_4 s_2 + n_3 \quad (3.9)$$

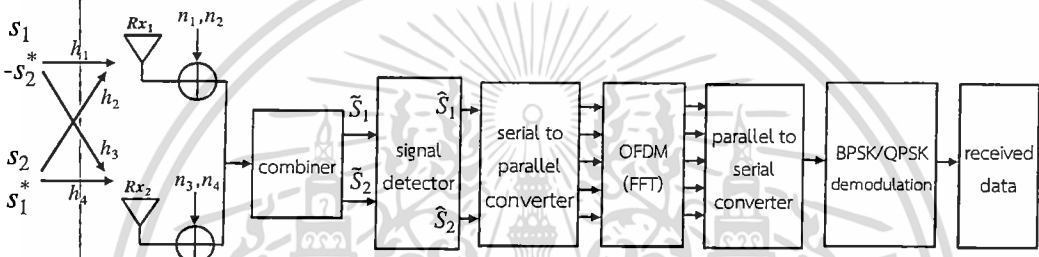
$$r_2^2 = -h_3 s_2^* + h_4 s_1^* + n_4 \quad (3.10)$$

สัญญาณ r_1^1, r_2^1, r_1^2 และ r_2^2 ทั้งหมดจะถูกส่งไปเพื่อทำการรวมสัญญาณ แสดงได้จากสมการที่ (2.38) และ (2.39) ซึ่งสัญญาณที่ได้หลังจากผ่านการรวมสัญญาณแล้วแทนด้วย \tilde{S}_1 และ \tilde{S}_2 ตามสมการ ดังนี้

$$\tilde{S}_1 = h_1^* r_1^1 + h_2 (r_2^1)^* + h_3^* r_1^2 + h_4 (r_2^2)^* \quad (3.10)$$

$$\tilde{S}_2 = h_2^* r_1^1 - h_1 (r_2^1)^* + h_4^* r_1^2 - h_3 (r_2^2)^* \quad (3.11)$$

จากนั้นส่ง \tilde{S}_1 และ \tilde{S}_2 ที่ได้ไปผ่านในขั้นตอนการตัดสินใจเลือกสัญญาณ \tilde{S}_1 และ \tilde{S}_2 ซึ่งจะตัดสินใจเลือกสัญญาณที่มีอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลที่น้อยที่สุดในกรณีของระบบที่มีเสถียรภาพหลายต้น เพื่อมาทำการแปลงจากอนุกรมเป็นขนานก่อนเข้ากระบวนการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วและแปลงสัญญาณจากขนานเป็นอนุกรมเพื่อทำการตีมอดูเลตแบบ BPSK และ QPSK จากนั้นทำการตรวจสอบการรบกวนกลับของการคำนวณค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนแล้วเปรียบเทียบใหม่จนกระทั่งจำนวนบิตข้อมูลหมดจึงสิ้นสุดการทำงาน



รูปที่ 3.3 โครงสร้างระบบโอเอฟดีเอ็มทางด้านภาครับที่มีการถอดรหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะแลมาติ

3.2 เทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย

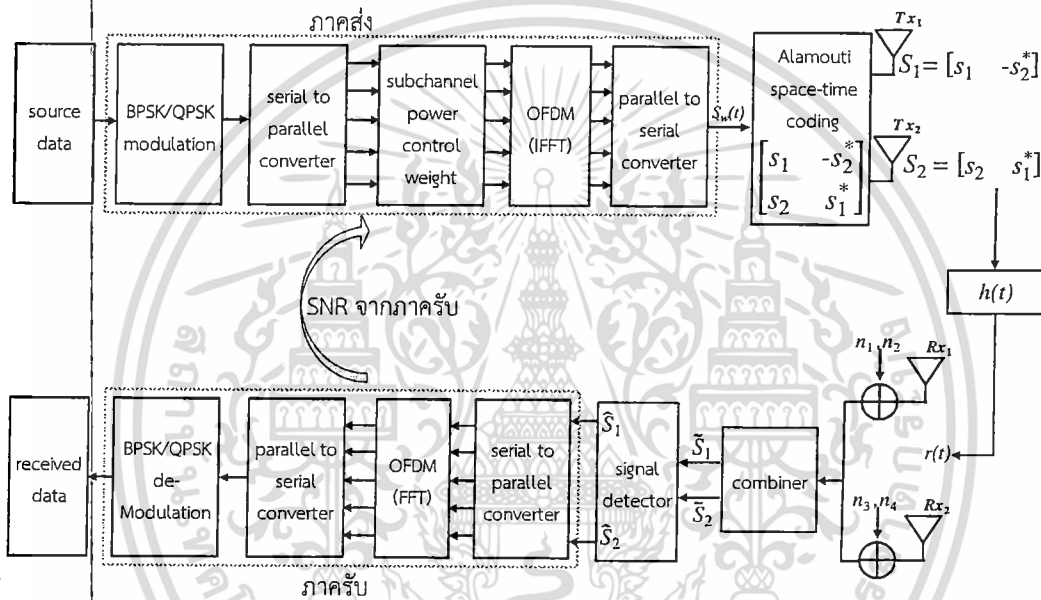
ในการจำลองระบบในครั้งแรกจะกำหนดให้แต่ละช่องสัญญาณย่อยมีกำลังส่งที่เท่ากัน ซึ่งถ้ามีการควบคุมกำลังของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มเข้ามาใช้งานนั้น กำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อยจะไม่เท่ากันโดยการปรับค่ากำลังส่ง สำหรับการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มดังที่กล่าวมานั้น ในงานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อยก่อน โดยการใช้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับรับได้ของแต่ละช่องสัญญาณย่อยมาคำนวณ ซึ่งจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักในแต่ละช่องสัญญาณย่อยและเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักดังกล่าวเข้าไปก่อนทำการกระบวนการแปลงผกผันฟูรีเยร์แบบเร็วทางด้านภาคส่ง ดังนั้นในแต่ละช่องสัญญาณย่อยจึงมีกำลังส่งที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการส่งข้อมูลไปยังด้านภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็มตามรูปที่ 3.4

การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยที่พิจารณาจากอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับรับได้ หรือ S_k นั้น สามารถพิจารณาได้จากการจำลองระบบเพื่อหาอัตราความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูลที่น้อยที่สุด โดยใช้สมการที่ (3.13) ในการจำลองระบบ

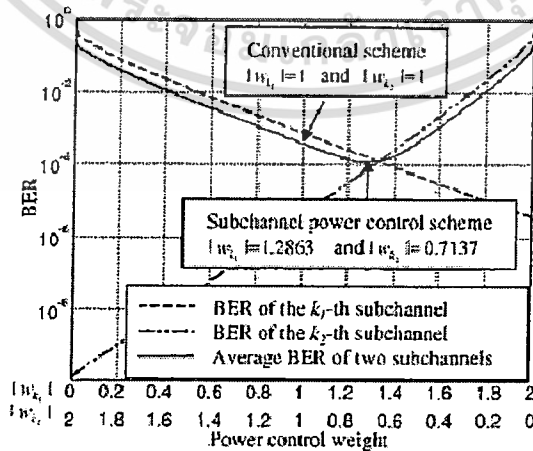
$$P_{B,k} = \frac{1}{2} \exp(-|W_k|S_k) \quad (3.13)$$

โดยการจำลองระบบจะใช้ช่องสัญญาณย่อยจำนวน 2 จำนวน 2 สัญญาณ ที่มีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับรับได้ของช่องสัญญาณย่อยที่ k_1 -th เป็น 7 dB และอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับรับได้ของช่องสัญญาณย่อยที่ k_2 -th เป็น 10 dB ซึ่งถ้าต้องการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มกำลังส่งทางด้านภาคส่งของช่องสัญญาณย่อยที่ k_1 -th ด้วย $|W_{k_1}|$ และลดกำลังส่งทางด้านภาคส่งของช่องสัญญาณย่อยที่ k_2 -th ด้วย $|W_{k_2}|$ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $|W_{k_2}| = 2 - |W_{k_1}|$ ในการทำให้กำลังส่งทางด้านภาคส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อยมีกำลังส่งที่ต่างกันในระบบโอเอฟดีเอ็ม ทำให้เราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการผิดพลาดของการส่งข้อมูลให้ดีขึ้น ดังรูปที่ 3.5 แสดงค่าเฉลี่ยของอัตราการผิดพลาดของการส่งข้อมูลของสองช่องสัญญาณย่อยที่ขึ้นอยู่กับ $|W_{k_1}|$ และ $|W_{k_2}|$ ในกรณีของอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับรับได้ของช่องสัญญาณย่อยที่มีค่าแตกต่างกันเมื่อ $|W_{k_1}|$ เท่ากับ 1.2863 และ $|W_{k_2}|$ เท่ากับ 0.7137 จะทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราการผิดพลาดของการส่งข้อมูลของสองช่องสัญญาณย่อยมีค่าที่น้อยที่สุดและทำให้ระบบมีมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สามารถปรับกำลังส่งของแต่ละช่องสัญญาณย่อยได้นั่นเอง



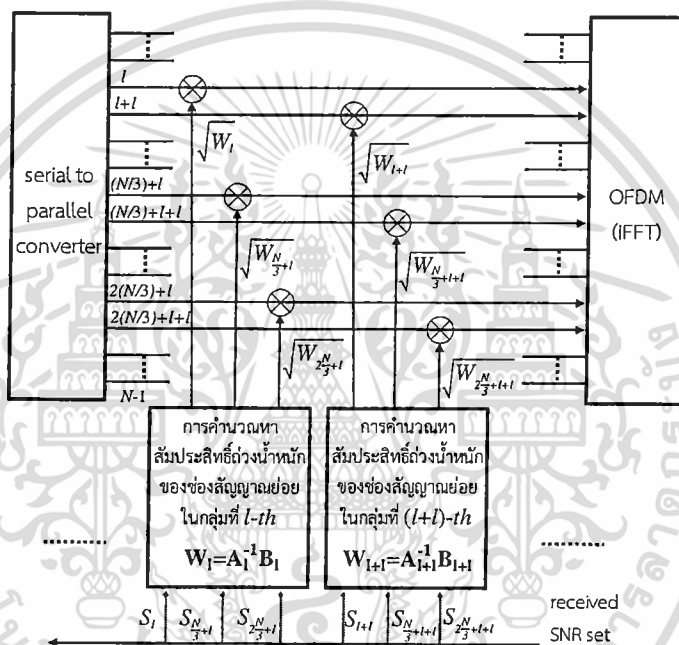
รูปที่ 3.4 การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มโดยส่งผ่านระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก



รูปที่ 3.5 ประสิทธิภาพของอัตราการผิดพลาดของการส่งข้อมูลของสองช่องสัญญาณย่อยที่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อย [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการนำการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยมาใช้งานในระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีหลายช่องสัญญาณย่อยนั้น สามารถทำได้โดยการจัดกลุ่มของช่องสัญญาณย่อยออกเป็นกลุ่มๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ N/G เมื่อ N คือจำนวนช่องสัญญาณย่อย และ G คือจำนวนกลุ่มของช่องสัญญาณย่อย เมื่อ G เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของระบบจะยิ่งดีขึ้น แต่ในกรณีที่ G มีค่ามากกว่า 3 จะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่ทำให้ระบบด้อยลง [5] ที่มีผลให้ประสิทธิภาพของระบบด้อยลงด้วย ดังนั้นจึงเลือกให้ G มีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่ดีที่สุด แสดงตามรูปที่ 3.6 โดยมีค่า W_l เป็นตัวคูณในแต่ละกลุ่มของกลุ่มช่องสัญญาณย่อยที่ l -th ตามลำดับ และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของระบบได้โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละช่องสัญญาณย่อย k -th จากทางด้านภาครับมารวมคำนวณ



รูปที่ 3.6 วิธี การจัดกลุ่มของช่องสัญญาณย่อยในการควบคุมกำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อย เมื่อ G เท่ากับ 3 [5]

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อยนั้น เราจะพิจารณาจากอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเฉลี่ยของช่องสัญญาณย่อยที่ k -th ในภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็มตามสมการที่ (3.13) และเมื่อทำการจัดกลุ่มของช่องสัญญาณย่อยจะได้อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเฉลี่ยที่ถูกจัดกลุ่มของช่องสัญญาณย่อยที่ l -th ตามสมการที่ (3.14)

$$\begin{aligned}
 P_{GB,l} &= \frac{1}{G} \sum_{k=0}^{G-1} P_{B,k \frac{N}{G} + l} \\
 &= \frac{1}{G} \sum_{k=0}^{G-1} \frac{1}{2} \exp(-|W_{k \frac{N}{G} + l}| |S_{k \frac{N}{G} + l}|) \quad (3.14)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของแต่ละช่องสัญญาณย่อยนั้น จะเริ่มจากการทำให้กำลังส่งทั้งหมดจากภาคส่งของระบบมีค่าเท่ากับระบบโอเพนติเอ็มที่ไม่ได้ทำการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย ดังนั้นจึงทำการนอร์มัลไลซ์ (Normalization) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อยของกลุ่มที่ l -th ด้วยค่า G ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$G = \sum_{k=0}^{G-1} |W_{kG+l}^N| \quad (3.15)$$

และใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของแต่ละช่องสัญญาณย่อยจากสมการที่ (3.14) โดยเทียบกับ $|W_{kG+l}^N|$ ซึ่งจะทำให้ระบบมีอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเฉลี่ยที่น้อยที่สุดหรือมีค่าเท่ากับ 0

$$\frac{\partial R_{GB,l}}{\partial |W_{kG+l}^N|} = \left[G \sum_{k=0}^{G-1} -(S_{kG+l}^N) \frac{1}{2} \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N) - \sum_{k=0}^{G-1} \frac{1}{2} \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N) \right] \frac{1}{G^2} = 0$$

ดังนั้น

$$-G \sum_{k=0}^{G-1} (S_{kG+l}^N) \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N) - \sum_{k=0}^{G-1} \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N) = 0$$

$$G \sum_{k=0}^{G-1} (S_{kG+l}^N) \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N) + \sum_{k=0}^{G-1} \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N) = 0$$

$$G S_{(G-1)G+l}^N \sum_{k=0}^{G-1} \frac{S_{kG+l}^N}{S_{(G-1)G+l}^N} \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N) + \sum_{k=0}^{G-1} \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N) = 0$$

$$G S_{(G-1)G+l}^N \sum_{k=0}^{G-1} \frac{S_{kG+l}^N}{S_{(G-1)G+l}^N} \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N) + \sum_{k=0}^{G-1} \frac{S_{kG+l}^N}{S_{(G-1)G+l}^N} \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N)$$

$$= \sum_{k=0}^{G-1} \frac{S_{kG+l}^N}{S_{(G-1)G+l}^N} \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N) - \sum_{k=0}^{G-1} \exp(-|W_{kG+l}^N| S_{kG+l}^N)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} & \left(GS_{(G-1)\frac{N}{G}+l} + 1 \right) \sum_{k=0}^{G-1} \frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} \exp(-|W_{k\frac{N}{G}+l}^N| S_{k\frac{N}{G}+l}^N) \\ &= - \sum_{k=0}^{G-1} \exp(-|W_{k\frac{N}{G}+l}^N| S_{k\frac{N}{G}+l}^N) \left(-\frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} + 1 \right) \end{aligned}$$

ใส่ ln ทั้งสองข้างของสมการ

$$\begin{aligned} & \ln \left[\left(GS_{(G-1)\frac{N}{G}+l} + 1 \right) \sum_{k=0}^{G-1} \frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} \exp(-|W_{k\frac{N}{G}+l}^N| S_{k\frac{N}{G}+l}^N) \right] \\ &= \ln \left[\sum_{k=0}^{G-1} \exp(-|W_{k\frac{N}{G}+l}^N| S_{k\frac{N}{G}+l}^N) \left(-\frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} + 1 \right) \right] \\ & \ln \left[GS_{(G-1)\frac{N}{G}+l} + 1 \right] + \ln \left[\frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} \right] + \ln \left[\sum_{k=0}^{G-1} \exp(-|W_{k\frac{N}{G}+l}^N| S_{k\frac{N}{G}+l}^N) \right] \\ &= \ln \left[- \sum_{k=0}^{G-1} \exp(-|W_{k\frac{N}{G}+l}^N| S_{k\frac{N}{G}+l}^N) \right] + \ln \left[\left(-\frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} + 1 \right) \right] \\ & GS_{(G-1)\frac{N}{G}+l} + \ln \left[\frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} \right] - \sum_{k=0}^{G-1} |W_{k\frac{N}{G}+l}^N| S_{k\frac{N}{G}+l}^N = \sum_{k=0}^{G-1} |W_{k\frac{N}{G}+l}^N| S_{k\frac{N}{G}+l}^N \\ & GS_{(G-1)\frac{N}{G}+l} + \ln \left[\frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} \right] = \sum_{k=0}^{G-1} |W_{k\frac{N}{G}+l}^N| S_{k\frac{N}{G}+l}^N \\ & GS_{(G-1)\frac{N}{G}+l} + \ln \left[\frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} \right] = S_{(G-1)\frac{N}{G}+l} \sum_{k=0}^{G-1} |W_{k\frac{N}{G}+l}^N| \frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} \\ & GS_{(G-1)\frac{N}{G}+l} + \ln \left[\frac{S_{k\frac{N}{G}+l}^N}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+l}^N} \right] = S_{(G-1)\frac{N}{G}+l} \sum_{k=0}^{G-2} |W_{k\frac{N}{G}+l}^N| + |W_{k\frac{N}{G}+l}^N| S_{k\frac{N}{G}+l}^N \quad (3.15) \end{aligned}$$

สามารถแทนค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของการควบคุมกำลังส่งในแต่ละช่องสัญญาณย่อยได้ในรูปแบบเวกเตอร์ได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{W}_1 = \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1 \quad (3.16)$$

เมื่อ \mathbf{W}_1 , \mathbf{A}_1^{-1} และ \mathbf{B}_1 แสดงรูปแบบได้ ดังนี้

$$\mathbf{W}_1 = \left[|W_1| \cdots |W_{(G-2)\frac{N}{G}+1}| \right]^T$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} S_1 + S_{(G-1)\frac{N}{G}+1} & \cdots & S_{(G-1)\frac{N}{G}+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{(G-1)\frac{N}{G}+1} & \cdots & S_{(G-1)\frac{N}{G}+1} + S_{(G-2)\frac{N}{G}+1} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \ln \left(\frac{S_1}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+1}} \right) + GS_{(G-1)\frac{N}{G}+1} \\ \vdots \\ \ln \left(\frac{S_{(G-2)\frac{N}{G}+1}}{S_{(G-1)\frac{N}{G}+1}} \right) + GS_{(G-1)\frac{N}{G}+1} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

แทนค่าสัมประสิทธิ์อีกกลุ่มของช่องสัญญาณย่อยที่มีค่าเท่า 3 และจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของแต่ละช่องสัญญาณย่อยของกลุ่มที่ l -th จากสมการที่ (3.17) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} |W_l| \\ |W_{\frac{N}{3}+1}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 + S_{2\frac{N}{3}+1} & S_{2\frac{N}{3}+1} \\ S_{2\frac{N}{3}+1} & S_{2\frac{N}{3}+1} + S_{\frac{N}{3}+1} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \ln \left(\frac{S_1}{S_{2\frac{N}{3}+1}} \right) + 3S_{2\frac{N}{3}+1} \\ \ln \left(\frac{S_{\frac{N}{3}+1}}{S_{2\frac{N}{3}+1}} \right) + 3S_{2\frac{N}{3}+1} \end{bmatrix}$$

$$W_{2\frac{N}{3}+1} = 3 - \left(|W_l| + |W_{\frac{N}{3}+1}| \right) \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การหาค่าสมรรถนะของระบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการจำลองการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้ระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก โดยส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณจางหายแบบเรย์ลีและพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาสมรรถนะของอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งผลที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของระบบที่ดีขึ้นเมื่อนำวิธีการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยมารวมใช้

4.1 ข้อกำหนดในการจำลองผลและพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ

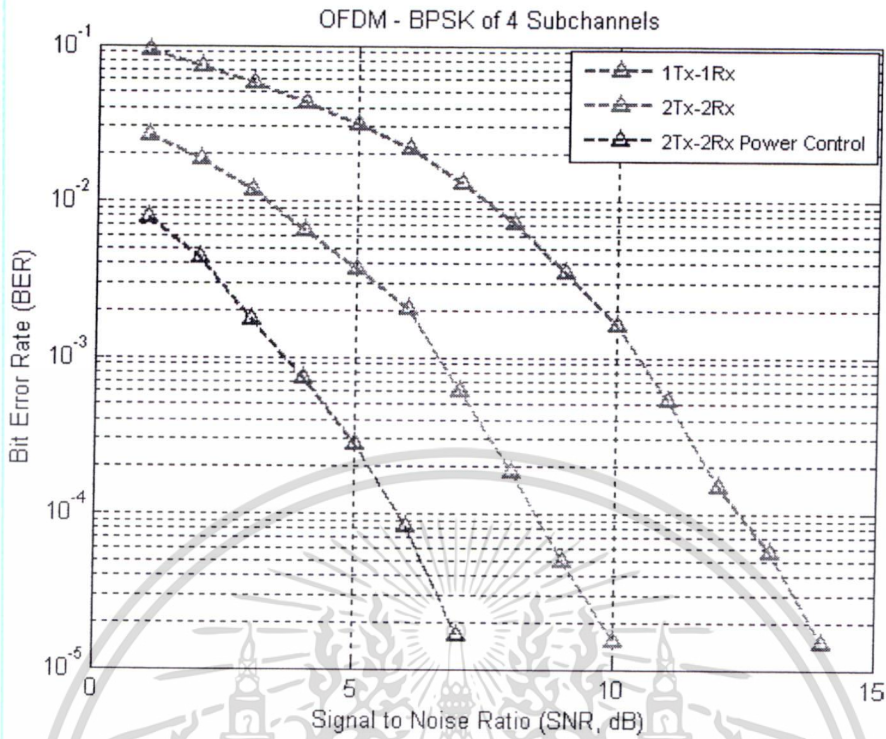
การกำหนดเงื่อนไขในรายละเอียด รวมถึงข้อกำหนดต่างๆ ในการจำลองผลของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะสามารถทำการจำลองผลของระบบในแต่ละสถานการณ์ต่างๆ ด้วยเงื่อนไขเดียวกันดังนี้

1. การมอดูเลต
 - แบบ BPSK
 - แบบ QPSK
2. จำนวนของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มเท่ากับ 4 และ 8 ช่องสัญญาณย่อย
3. ค่าสัมประสิทธิ์ของกลุ่มช่องสัญญาณย่อยมีค่าเท่ากับ 3
4. อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 1 ถึง 15 เดซิเบล
5. เสืออากาศ
 - ด้านภาคส่ง 1 ต้น และด้านภาครับ 1 ต้น
 - ด้านภาคส่ง 2 ต้น และด้านภาครับ 2 ต้น
6. ช่องสัญญาณจางหายแบบเรย์ลี
7. ทดสอบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตจำนวน 100000 รอบ

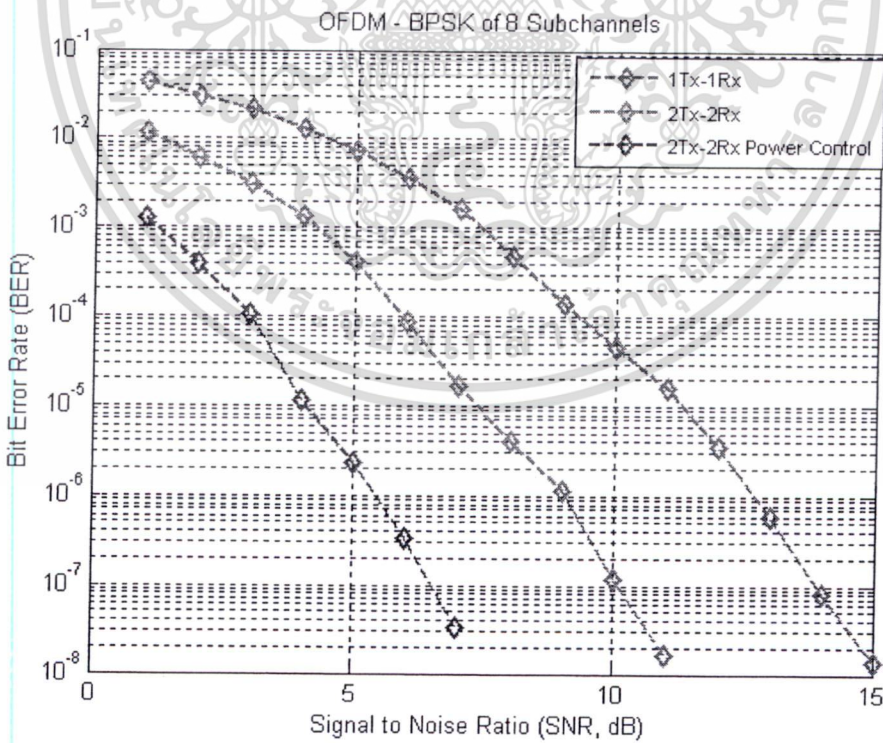
4.2 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็ม

4.2.1 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK

แสดงผลของระบบโอเอฟดีเอ็มใน 2 สถานการณ์ คือ ระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสอากาศทางด้านภาคส่ง 1 ต้น และทางด้านภาครับ 1 ต้น เปรียบเทียบกับระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น และระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น เปรียบเทียบกับระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น ที่มีการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย โดยใช้จำนวนของช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4 และ 8 ช่องสัญญาณย่อย ตามรูปที่ 4.1-4.2



รูปที่ 4.1 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4



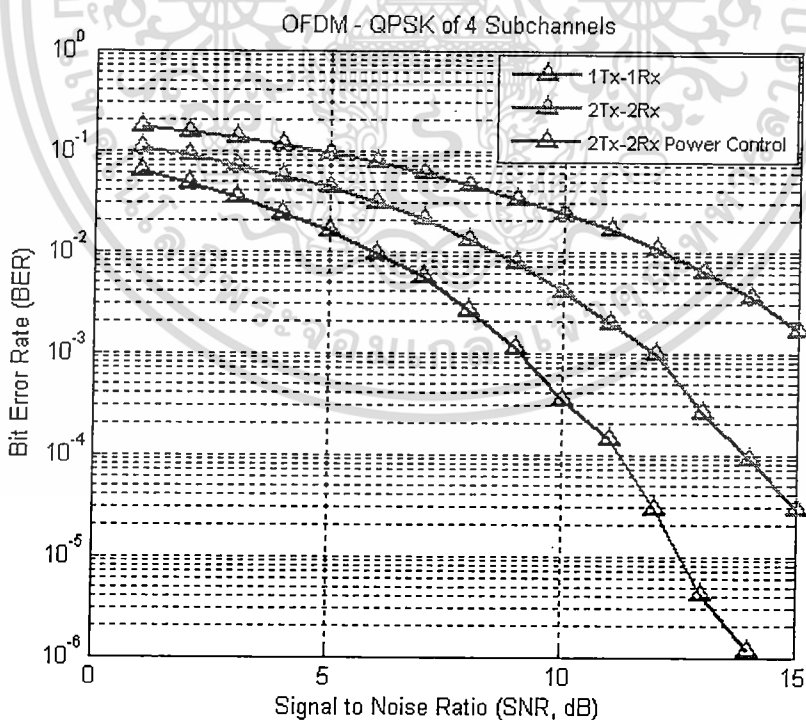
รูปที่ 4.2 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

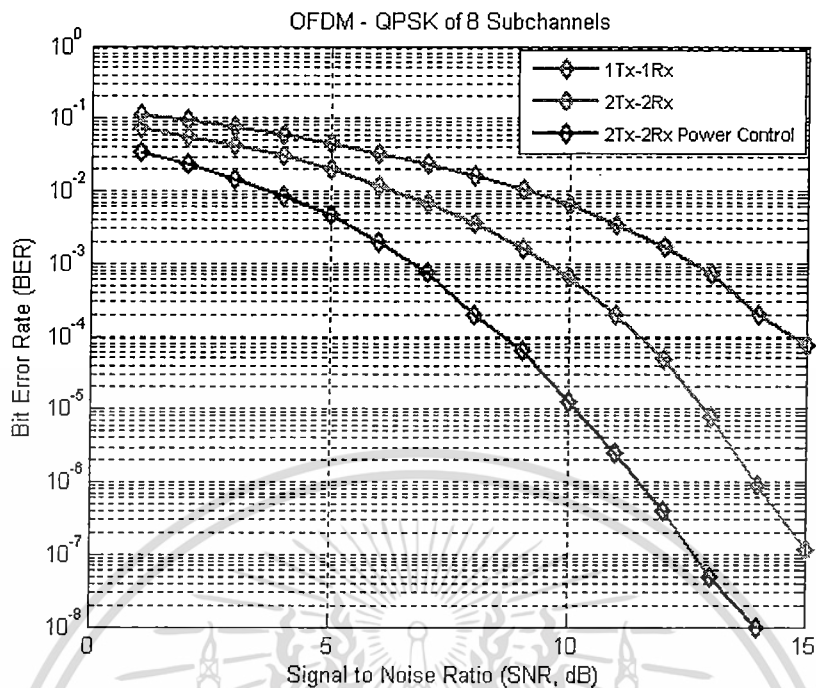
จากรูปที่ 4.1-4.2 แสดงสมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4 โดยยกตัวอย่างที่อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเท่ากับ 10^{-3} ในสถานการณ์แรกจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น จะมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 1 ต้น และทางด้านภาครับ 1 ต้น อยู่ประมาณ 3 เดซิเบล ส่วนในสถานการณ์ที่สองจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น ที่มีการใช้การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยจะมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น อยู่ประมาณ 3 เดซิเบล ซึ่งในระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 8 ผลที่ได้จะเป็นในลักษณะเดียวกันกับระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4

4.2.2 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ QPSK

แสดงผลของระบบโอเอฟดีเอ็มใน 2 สถานการณ์ คือ ระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 1 ต้น และทางด้านภาครับ 1 ต้น เปรียบเทียบกับระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น และระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น เปรียบเทียบกับระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น ที่มีการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย โดยใช้จำนวนของช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4 และ 8 ช่องสัญญาณย่อย ตามรูปที่ 4.3-4.4



รูปที่ 4.3 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ QPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4



รูปที่ 4.4 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ QPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 8

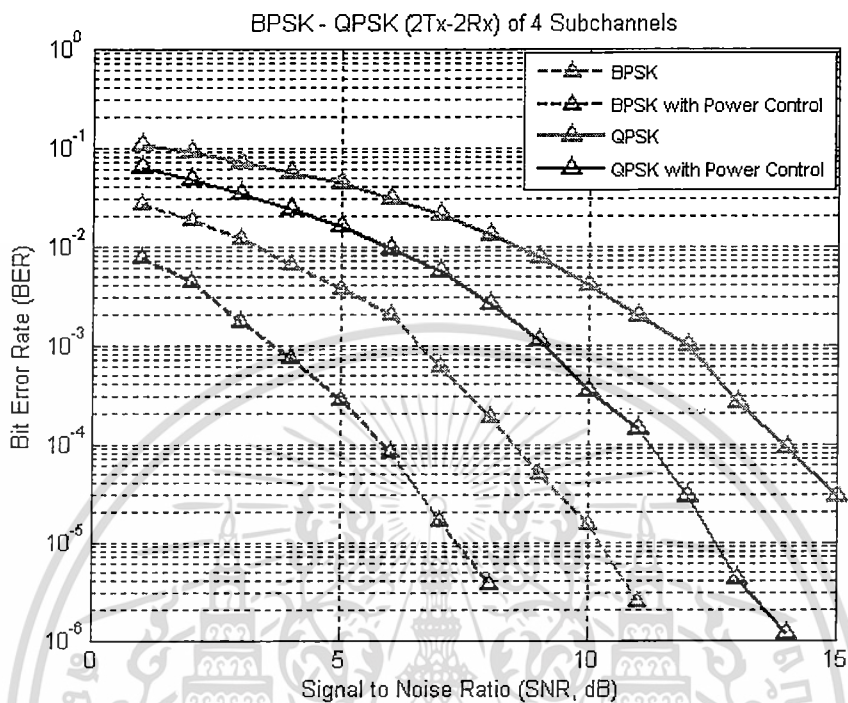
จากรูปที่ 4.3-4.4 แสดงสมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4 โดยยกตัวอย่างที่อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเท่ากับ 10^{-3} ในสถานการณ์แรกจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น จะมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 1 ต้น และทางด้านภาครับ 1 ต้น อยู่ประมาณ 3 เดซิเบล ส่วนในสถานการณ์ที่สองจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น ที่มีการใช้การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยจะมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น อยู่ประมาณ 3 เดซิเบล ซึ่งในระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 8 ผลที่ได้จะเป็นในลักษณะเดียวกันกับระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4

4.2.3 สมรรถนะของระบบที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK เปรียบเทียบกับการมอดูเลตแบบ QPSK

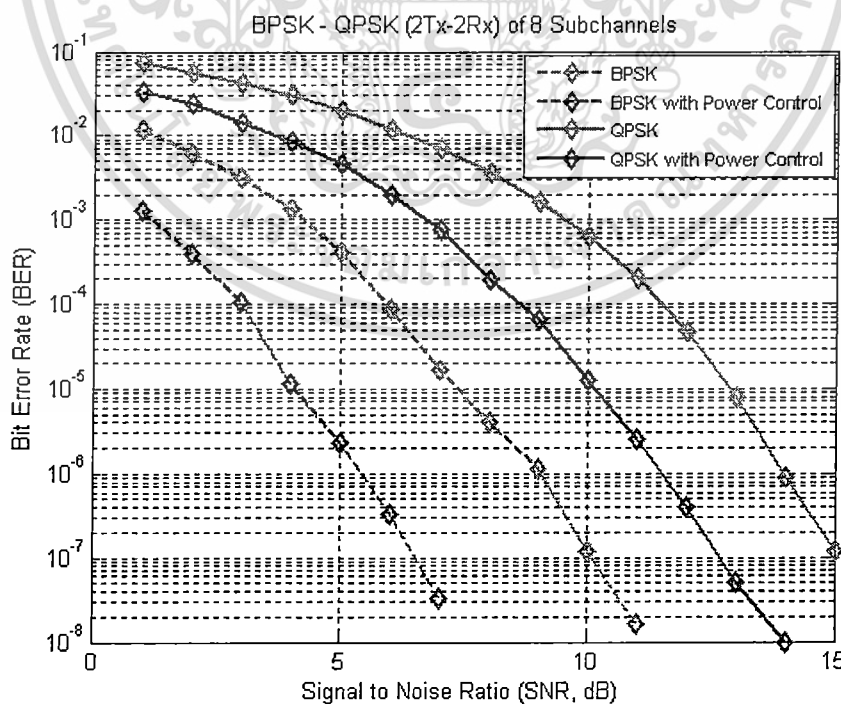
แสดงผลของระบบโอเอฟดีเอ็มใน 2 สถานการณ์ คือ ระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น ที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK เปรียบเทียบกับระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น ที่ใช้การมอดูเลตแบบ QPSK และระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น ที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และมีการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย เปรียบเทียบกับระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น ที่ใช้การมอดูเลตแบบ QPSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย โดยใช้จำนวนของช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4 และ 8 ช่องสัญญาณย่อย ตามรูปที่ 4.5-4.6



รูปที่ 4.5 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และ QPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4



รูปที่ 4.6 สมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้การมอดูเลตแบบ BPSK และ QPSK และใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5-4.6 แสดงสมรรถนะของระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4 โดยยกตัวอย่างที่อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลเท่ากับ 10^{-3} ในสถานการณ์แรกจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีการมอดูเลตแบบ BPSK และใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น จะมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีการมอดูเลตแบบ QPSK ที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น อยู่ประมาณ 5 เดซิเบล ส่วนในสถานการณ์ที่สองจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีการมอดูเลตแบบ BPSK ที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น และมีการใช้การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยจะมีค่าต่ำกว่าค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของระบบโอเอฟดีเอ็มที่มีการมอดูเลตแบบ QPSK ที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่ง 2 ต้น และทางด้านภาครับ 2 ต้น อยู่ประมาณ 5 เดซิเบล ซึ่งในระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 8 ผลที่ได้จะเป็นในลักษณะเดียวกันกับระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้ช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 4



บทที่ 5

บทสรุปผลการวิจัย

ความต้องการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารในแบบไร้สาย (wireless communication) มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G หรือ 4G และในอนาคตรูปแบบของการให้บริการด้านการสื่อสารนั้นจะเปลี่ยนไปสู่การสื่อสารแบบมัลติมีเดียเคลื่อนที่ (mobile multimedia) ที่มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลความด้วยเร็วสูง การส่งข้อมูลในระบบโอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งข้อมูลแบบไร้สายนั้นสามารถกระทำได้เร็วขึ้น และทำให้การใช้งานยาวนานความถี่นั้นๆ มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การส่งข้อมูลในระบบโอเอฟดีเอ็มนั้นจะใช้วิธีการแยกขบวนของข้อมูลอนุกรมที่มีความเร็วสูงออกเป็นข้อมูลที่มีความเร็วต่ำหลายขบวน แล้วทำการมอดูเลตแต่ละขบวนข้อมูลความเร็วต่ำเหล่านั้นด้วยหลายคลื่นพาห่อย่อยที่มีคุณสมบัติของการตั้งฉากซึ่งกันและกัน จึงทำให้แต่ละคลื่นพาห่อย่อยสามารถทับซ้อนกันได้ จากนั้นนำคลื่นพาห่อย่อยต่างๆ มารวมกันแล้วส่งออกอากาศไปพร้อมๆ กัน โดยผ่านตัวกลางในอากาศที่มีทั้งสัญญาณรบกวนและการจางหายของสัญญาณ ซึ่งในตัวกลางเหล่านั้นส่งผลให้สมรรถนะของระบบต้อยลงและทำให้อัตราการผิดพลาดบิตข้อมูลมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการปรับปรุงระบบโอเอฟดีเอ็มดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยได้นำเสนอเทคนิคการเข้ารหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบอะลามูติ ที่ถูกออกแบบมาโดยใช้เทคนิคการไดเวอร์ซิตีเชิงปริภูมิเวลาที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่งและทางด้านภาครับด้านละ 2 ต้น ซึ่งทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่ใช้เสาอากาศทางด้านภาคส่งและทางด้านภาครับเพียงต้นเดียว อีกทั้งยังมีการนำเสนอเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยเข้ามาใช้ โดยมีจุดประสงค์ให้ข้อมูลที่ถูกลงออกอากาศจากทางด้านภาคส่งมีประสิทธิภาพที่ดีและสามารถทนต่อผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นจากการจางหายของสัญญาณได้ และผลจากการจำลองระบบในบทที่ 4 จะแสดงให้เห็นว่าระบบโอเอฟดีเอ็มที่ใช้เทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยนั้น สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบโอเอฟดีเอ็มให้ดีขึ้นได้ประมาณ 3-5 เดซิเบล ถึงแม้ว่าจะมีการใช้การมอดูเลตหรือจำนวนช่องสัญญาณย่อยที่แตกต่างกัน และการนำเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยเพิ่มเข้าไปในระบบโอเอฟดีเอ็มนั้น เป็นเทคนิคที่ไม่ซับซ้อนและไม่ได้ทำให้โครงสร้างของระบบโอเอฟดีเอ็มเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Van Nee R., Prasad R. **OFDM for Wireless Multimedia Communications.** Boston, London : Artech House. 2000.
- [2] Wesolowski K. **Digital Communication Systems.** : John Wiley & Sons. 2009.
- [3] Harada H., Prasad R. **Simulation and Software radio for Mobile Communication.** Boston : Artech House. 2004.
- [4] S.M. Alamouti. "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications" **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol.16, no. 8, pp.1451-1458
- [5] Hongku K., Wooncheol H., Kiseon K. "OFDM systems with subchannel power control under the two-ray multipath channel," **ICC 2001. IEEE International Conference on.**, vol.6, 2002. pp. 1856-1860, August 2002
- [6] Hongku K., Wooncheol H., Kiseon K., Yeongyoon C. "Practical subchannel power controlled OFDM system under time-varying multipath channel" **Wireless Personal Multimedia Communications, 2002. The 5th International Symposium on.**, vol.3, 2002. pp. 1015 - 1018
- [7] Huaxin W., Xinyu D. "Subchannel Power Control in the DT-OFDM System for Satellite Communications in Ka Band" **Microwave and Millimeter Wave Technology, 2007. ICMMT '07. International Conference on.**, 2007. pp.1-3
- [8] Molisch F. **Wideband Wireless Digital Communications.** New Jersey : Prentice Hall PTR. 2001.
- [9] Yong C., Jaekwon K., Won Y., Chung-G K. **MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB.** Singapore : John Wiley & Sons (Asia). 2010.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

**PROCEEDINGS
VOL. 2**

CM : Communication
EL : Electronics
DS : Digital Signal Processing
CT : Control System and Instrument Technology
PH : Photonics
CP : Computer and Information Technology
BE : Biomedical Engineering

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33
1-3 ธันวาคม 2553 ณ โรงแรมเซ็นทารา ดวงตะวัน จ.เชียงใหม่
33rd Electrical Engineering Conference
1-3 December 2010, Centara Duangtawan Hotel, Chiangmai, Thailand



ABB **CSG**
SOLUTION

111 ปี นวัตกรรมเพื่อสร้างสรรค์ เป็นปีที่คณะกรรมการตัดสินผลงาน
50 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
40 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
20 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

CM 009	ผลกระทบของการวางเทคนิควิธีในระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารผ่านเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.15.4 เทวีชโรท มณีรัตน์ สุพิศรา ออมอำไพ และ ชุติมา พรหมมาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	881
CM 010	การสร้างอุปกรณ์รับส่งตามมาตรฐาน IEEE 802.16 โดยใช้เทคโนโลยีการกำหนดสัญญาณวิทยุ ด้วยซอฟต์แวร์ พระศุภวิทย์ ภูงาษา ทวีระพงษ์ อุทราภรตกุล และ มนต์ทิพย์ตา อุทราภรตกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	885
CM 011	การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค FPT สำหรับโปรโตคอลการจองช่องสัญญาณ ในเครือข่ายแบบไร้สาย ฉัตรภา ชัยพันธ์วิเชียรพร พิตรพงศ์ ภูละอวิทย์พร นริวัฒน์ วิเศษมงคล ดิษฐองศา วุฒิสัทธกุลกิจ พิสิษฐ วณิชชานันท์ และ วราภา สวีระวงษ์โพธิ์ 'บูรพาภรณ์มหาวิทยาลัย' 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ' 'สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น'	889
CM 012	The Performance Evaluation of TOA Estimation with Different Transmitted-Reference Transmitter Techniques in UWB Systems Patcharavee Saibumrung and Wisaiyom Lee King Mongkut's University of Technology North Bangkok	893
CM 013	การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณในระบบโอเอทีดีเอ็มแอลส่งผ่านระบบสื่อสารแบบหลายพาหะเข้าหลายทางออก นิชรีศน์ อุ่นกาชื่น และ สุวิมล สิริวิชญากุล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	897
CM 014	Full-Range Undistorted Direct PM on Digital Platforms Karel L Sterckx Bangkok University	901
CM 015	การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่โดยใช้รีโซเนเตอร์แบบกัปเปิ้ล สำหรับระบบสื่อสารย่านไมโครเวฟ ศักดิ์ชัย คันฉิมวิวัฒน์ สมศักดิ์ อรรถนิมากุล และ สมภารดา จำเริญชัย 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ' 'มหาวิทยาลัยบูรพา'	905



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับสู่สารบัญหมวด

CM 013

การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มโดยส่งผ่านระบบสื่อสาร
แบบหลายทางเข้าหลายทางออก
Subchannel Power Control in OFDM over MIMO System

นางสาวปวีรัตน์ อุ่นถนอมชัยยะ สุวิทย์ สิริวิจิตรวิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3 หมู่ที่ 2 ถนนลาดพร้าว แขวงจตุจักร เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์: 0-2526-4550 E-mail: ut_pjyarak@kmitl.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบสื่อสารไร้สายมีบทบาทสำคัญในการติดต่อสื่อสาร การส่งผ่านสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายมักถูกจำกัดด้วยสัญญาณรบกวน (Noise) และการจางหายของสัญญาณ (Fading) ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยขึ้นมาใช้ในระบบโอเอฟดีเอ็ม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้นและช่วยลดอัตราข้อผิดพลาด ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple-Input Multiple-Output: MIMO) โดยลดจากหลายเข้าของระบบ ไปแค่หนึ่งเข้าเป็นระบบสื่อสารแบบหนึ่งเข้าและมีการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย (BER) ของช่องรับระบบโอเอฟดีเอ็มที่ไม่ใช้การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย

คำสำคัญ: การควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย, ระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก

Abstract

Currently, The wireless systems have an important role in communication. The signal transmit in wireless systems is often limited by noise and fading. In this paper was used to subchannel power control in Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for optimize the signal on the transmitter before being sent broadcast and applied that in Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) systems. After using that technique in OFDM system, the result of Bit Error Rate (BER) has been improving the system performance.

Keywords: Subchannel Power Control, Multiple-Input Multiple-Output

1. บทนำ

ระบบสื่อสารแบบ MIMO-OFDM (Multiple Input Multiple Output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [1,2] เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากในหลายระบบการสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (MIMO) ซึ่งถูกใช้โดยมีการใช้การควบคุมกำลังส่งที่ปรับได้อัตโนมัติ อัลกอริทึมที่นิยมใช้กัน ได้แก่ การเข้ารหัส การปรับระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก ไปยังขั้นตอนถัดไป

เทคนิคการที่นิยมใช้กันที่เรียกว่าระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออกมักถูกสมมติตั้งแต่อำนาจส่งเข้ากัน คือ การที่ส่งจุดสายของหลายทางเข้าหลายทางออก และกำลังที่รับจะส่งกลับหรือรับ ซึ่งการปรับกำลังส่งของหลายทางเข้าหลายทางออกจะส่งผลให้ระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกที่หลายทางเข้าหลายทางออกส่งสัญญาณไปยังจุดรับที่ดีที่สุด จึงเป็นที่นิยมกันมาใช้ในการรับส่งข้อมูลไร้สายในปัจจุบัน

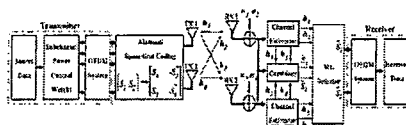
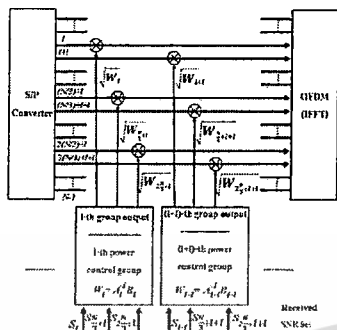
สำหรับเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย นั้นเป็นการปรับกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยที่ให้ออกมาที่ขนาดที่แน่นอน ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกที่รับ ซึ่งเมื่อเทียบกับเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยที่ปรับได้อัตโนมัติแล้ว ระบบโอเอฟดีเอ็มแบบหลายทางเข้าหลายทางออกที่มีประสิทธิภาพของระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกจะดีกว่าระบบโอเอฟดีเอ็มแบบหลายทางเข้าหลายทางออกที่ไม่มีประสิทธิภาพของระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก ซึ่งได้มีบทบาทที่สำคัญในการใช้ในระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกที่ใช้สัญญาณรับส่งข้อมูล 1 สัน (แบนด์วิดท์รับส่ง) ถึง 2 สัน โดยเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของเทคนิคการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยของระบบที่ลดอัตราข้อผิดพลาดที่น้อยที่สุด

2. โครงสร้างและส่วนต่างๆ ของระบบ

2.1 โครงสร้างของระบบ

งานอยู่ที่ 1 แสดงโครงสร้างของระบบการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็ม โดยส่งผ่านระบบสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออก ซึ่งเป็นการควบคุมกำลังส่งของช่องสัญญาณย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 โครงสร้างการรับ-ส่งของระบบที่มีขั้วรับ-ส่งแบบ Alamouti

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

รูปที่ 3 วิศวกรรมการส่งสัญญาณของ การศึกษาครั้งนี้จะรับและ ส่งสัญญาณด้วย ช่อง G-3

ยกค่าขึ้นประสิทธิ์การส่งรับกับในรูปแบบเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$W_1 = A_1^T B_1 \quad (4)$$

เมื่อ W_1, A_1 และ B_1 คือ

$$W_1 = \begin{bmatrix} |W_1| & \dots & |W_1| \end{bmatrix}^T$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} s_1^{(G-1)\frac{N}{G}-1} & \dots & s_1^{(G-1)\frac{N}{G}-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_1^{(G-1)\frac{N}{G}} & \dots & s_1^{(G-1)\frac{N}{G}} \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \text{Im} \left(\frac{s_1}{s_1^{(G-1)\frac{N}{G}-1}} \right) + Gs_1^{(G-1)\frac{N}{G}-1} \\ \vdots \\ \text{Im} \left(\frac{s_1}{s_1^{(G-1)\frac{N}{G}}} \right) + Gs_1^{(G-1)\frac{N}{G}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3 รหัสเชิงปริภูมิ-เวลาแบบ Alamouti

วิศวกรรมการรับ-ส่งที่มีขั้วรับ-ส่งแบบ Alamouti [4] สามารถรับ-ส่งในรูปแบบที่ 1 s_1 และ s_2 เป็นสัญญาณของระบบ 2 เอนทิเนียลและถูกแปลงด้วยรหัส Alamouti ให้เป็นสัญญาณที่ 2 สำหรับโหมดสองสายส่งและรับของระบบ 2 เอนทิเนียลได้ดังนี้

การส่งสัญญาณแต่ละครั้งจะใช้เวลาในการส่ง 2 สายส่ง ต่อเนื่องกัน สัญญาณที่ส่งออกจากระบบที่ 1 และที่ 2 ใน ระยะเวลาแรกคือเวลา t คือ s_1 และ s_2 ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาที่ 2 ที่เวลา $t+T$ คือ $-s_2^*$ และ s_1^* ตามลำดับ ทั้งนี้ s_1^* คือ ค่าสังยุคของ s_1 รูปแบบการเข้ารหัส Alamouti S นั้น สามารถใช้แทนเวลาของสัญญาณสองสายส่งและระยะเวลาของสายส่งกับกันเองเวลา ในระยะเวลาสองครั้งคือ Alamouti จะใช้ระยะเวลาในการรับของสายส่งรับ 2 สาย ให้ r_1^1 และ r_2^1 แทนสัญญาณที่รับได้ทั้งสองสายรับที่ 1 ได้ r_1^2 และ r_2^2 แทนสัญญาณที่รับได้ทั้งสองสายรับที่ 2 ที่เวลา t และ $t+T$ ตามลำดับ

$$r_1^1 = h_{1,1}s_1 + h_{1,2}s_2 + n_{1,1} \quad (7)$$

$$r_2^1 = -h_{1,1}s_2^* + h_{1,2}s_1^* + n_{1,2} \quad (8)$$

$$r_1^2 = h_{2,1}s_1 + h_{2,2}s_2 + n_{2,1} \quad (9)$$

$$r_2^2 = -h_{2,1}s_2^* + h_{2,2}s_1^* + n_{2,2} \quad (10)$$

โดยที่ $h_{1,1}, h_{1,2}, n_{1,1}, n_{1,2}$ และ $h_{2,1}, h_{2,2}, n_{2,1}, n_{2,2}$ แทนสัญญาณรบกวน AWGN ที่รับได้ทั้งสองสายรับที่ 1 และที่ 2 ที่เวลา t และ $t+T$ ตามลำดับ สัญญาณที่รับและถูกส่งไปยังตัวรับสัญญาณ (Combine) และถอดสัญญาณ s_1 และ s_2 ออกจากสัญญาณที่รับได้ทั้งหมดตามสมการ ดังนี้

$$\hat{s}_1 = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 |h_{j,i}|^2 s_1 - h_{1,2}(r_2^1)^*$$

$$= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 |h_{j,i}|^2 s_1 + \sum_{j=1}^2 |h_{j,1}|^2 s_1 + h_{1,2}(n_{1,2})^* \quad (11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวปิยรัตน์ อุ่นกาเย็น
วัน เดือน ปีเกิด	23 ตุลาคม 2525
ที่อยู่	35/180 กิตติชัยคอนโดมิเนียม ซ.อินทามระ1 ถ.สุทธิสาร แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร 10400
ประวัติการศึกษา	2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้