สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลในระบบ OFDM – WLAN ในช่องสัญญาณจางหายโดยวิธีไดเวอร์ซีตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลา

ENHANCEMENT OF DATA TRANSMISSION OVER FADING CHANNEL IN OFDM – WLAN SYSTEM USING SPACE – TIME CODING DIVERSITY

T 0 4 9 3 1 1

ทรรศน์ภณ จิตรังษี

TASAPON JITRANGSRI

เลขหมู่.....................................
เลขทะเบียน......49311
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2547

.b..................................
.i..................................

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-814-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENHANCEMENT OF DATA TRANSMISSION OVER FADING CHANNEL IN OFDM – WLAN SYSTEM USING SPACE – TIME CODING DIVERSITY

TASAPON JITRANGSRI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ISBN 974-324-814-5

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลในระบบ OFDM – WLAN ในช่องสัญญาณจางหายโดยวิธีไดเวอร์ซีตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลา
นักศึกษา	นายทรรศน์ภณ จิตรังษี
รหัสนักศึกษา	43061038
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สิทธิชีวภาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลผ่านช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์โดยใช้วิธีไดเวอร์ซีตีสายอากาศแบบเข้ารหัสทางตำแหน่ง - เวลา โดยวิเคราะห์ค่าอัตราผิดพลาดของบิทด้วยการจำลองผลการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับค่าอัตราผิดพลาดของบิทของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซีตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด และระบบที่ไม่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตี ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีไดเวอร์ซีตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลาจะเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบ OFDM – WLAN ได้ใกล้เคียงกับวิธีการไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด และสามารถเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยพิจารณาจากผลการวิเคราะห์อัตราผิดพลาดบิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Enhancement of Data Transmission over Fading Channel in OFDM - WLAN System using Space - Time Coding Diversity.
Student	Mr.Tasapon Jitrangsri
Student ID.	43061038
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Suvepon Sittichivapak

ABSTRACT

This thesis proposes the applying of Space - Time Coding Diversity (STD) with the OFDM-WLAN system to enhance the efficient of data transmission over Rayleigh fading channel, compared with the maximal ratio combining diversity (MRC) and system without diversity. With the MATLAB simulation, the results of BER analysis show that the Space-Time Coding Diversity can improve the efficient of data transmission in the OFDM-WLAN system while compared with the other diversity schemes and could be an alternative way to improve performance of the system as well as MRC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถเสร็จลุล่วงได้จากคำแนะนำและการช่วยเหลือของบุคคลหลายท่าน และอีกหลายท่านที่ได้ให้กำลังใจและให้ยืมเอกสารหรือแนะนำแหล่งที่มาของข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้เขียนมีความซาบซึ้งและขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สุวิพล สิทธิชีวภาค อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำรวมถึงพยายามกระตุ้นเตือนตลอดระยะเวลาที่อยู่ในความดูแล อีกทั้งยังให้สำเนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ขอบคุณคุณสมัชชา เลาะฟอ ที่ให้กำลังใจและให้คำแนะนำในเรื่องเอกสารและยังได้ใช้เวลาร่วมกันวิเคราะห์ปัญหาของแต่ละคนในประเด็นต่างๆ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ภัทรกุล จริยวิทยานนท์ หัวหน้าภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หัวหน้าของผู้เขียนที่ให้โอกาสในการเรียนและการทำงาน รวมทั้งอนุญาตให้ใช้คอมพิวเตอร์ในภาควิชาสำหรับทำการจำลองระบบในงานวิจัยได้อย่างเต็มที่ ตลอดจนให้กำลังใจเสมอมา ขอบคุณสำหรับเพื่อนๆ ทุกคน ที่เป็นแรงผลักดันสำหรับการเรียน และขอบคุณคุณภาวิตา ไกรทอง สำหรับการตรวจสอบการใช้ภาษาในวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจและกระตุ้นเตือนเสมอมา ทั้งนี้ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ผู้เขียนขอกล่าวขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ ด้วยเช่นกัน

ทรรศน์ภณ จิตรังษี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 สมมติฐาน	1
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น	2
1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
3.1 ระบบ OFDM - WLAN	7
3.1.1 การมอดูเลทสัญญาณดิจิตอล	11
3.1.1.1 การมอดูเลทสัญญาณแบบ BPSK	12
3.1.1.2 การมอดูเลทสัญญาณแบบ QPSK	16
3.1.2 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ	18
3.1.3 การแปลงฟูริเยร์และการแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว	19
3.1.3.1 การแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว	20
3.1.3.2 การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.4 การแทรกสัญลักษณ์เวลาคุม 21

3.2 ช่องสัญญาณ 22

3.2.1 ช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ 23

3.2.2 ช่องสัญญาณเรลีย์ 23

3.3 วิธีการไดเวอร์ซิตี 25

3.3.1 วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด 25

3.3.2 วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลา 27

บทที่ 4 การจำลองระบบ 30

4.1 วิธีการจำลองแบบมอนติคาโล 30

4.1.1 การคำนวณอัตราผิดพลาดบิท 31

4.1.2 การกำเนิดลำดับบิทสุ่ม 32

4.1.3 การกำเนิดสัญญาณรบกวนเข้าแบบเกาส์ 33

4.2 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองระบบ OFDM - WLAN 34

4.2.1 ลำดับบิทสุ่ม 34

4.2.2 การมอดูเลทลำดับบิทสุ่ม 35

4.2.2.1 แบบจำลองการมอดูเลทสัญญาณแบบ BPSK 35

4.2.2.2 แบบจำลองการมอดูเลทสัญญาณแบบ QPSK 35

4.2.3 การแมปคลื่นพาห์ย่อย 36

4.2.4 การแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว 38

4.2.5 การแทรกสัญลักษณ์เวลาคุม 38

4.2.6 ช่องสัญญาณ 39

4.2.6.1 แบบจำลองช่องสัญญาณรบกวนขาวแบบเกาส์ 39

4.2.6.2 แบบจำลองช่องสัญญาณเรลีย์ 41

4.2.7 วิธีการไดเวอร์ซิตี 42

4.2.7.1 แบบจำลองของวิธีการไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด 42

4.2.7.2 แบบจำลองของวิธีการไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลา 43

4.2.8 แบบจำลองการคำนวณอัตราผิดพลาดบิทและแพกเก็ต 44

4.2.9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ OFDM - WLAN 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 ผลการจำลองระบบ 46

5.1 อัตราผิดพลาดบิท 46

5.1.1 อัตราผิดพลาดแพกเก็ตของระบบที่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ในช่องสัญญาณเรลีย์ และมีการมอดูเลทแบบ BPSK 46

5.1.2 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการแทรกสัญลักษณ์เวลาคุม..............................47

5.1.3 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้ช่องสัญญาณแบบเรลีย์ 48

5.1.4 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ไม่มีวิธีไดเวอร์ซิตี...49

5.1.5 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด 50

5.1.6 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ในช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ และมีการมอดูเลทแบบ BPSK 51

5.1.7 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ในช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ และมีการมอดูเลทแบบ QPSK 52

5.1.8 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ในช่องสัญญาณเรลีย์ และมีการมอดูเลทแบบ BPSK 53

5.2 อัตราผิดพลาดแพกเก็ต...54

5.2.1 อัตราผิดพลาดแพกเก็ตของระบบที่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ในช่องสัญญาณเรลีย์ และมีการมอดูเลทแบบ BPSK...55

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการจำลองระบบ..56

6.1 สรุปและวิจารณ์ 56

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา 57

เอกสารอ้างอิง..58

ภาคผนวก 59

ภาคผนวก ก. ข้อมูลรหัสการจำลองระบบ (Source Code) 59

ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์ 104

ประวัติผู้เขียน 110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 มาตรฐานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่มีการใช้งานในปัจจุบัน 5
3.1 ความถี่คลื่นพาห์ย่อยในมาตรฐาน IEEE802.11a ในช่วงความถี่ 5.15 – 5.25 GHz..................8
4.1 ตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองช่องสัญญาณเรลีย์ 41
4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ 45
5.1 จำนวนและคาบของสัญลักษณ์เวลาคุม...47
5.2 ค่าการลดทอนและค่าหน่วงเวลาของสัญญาณหลายวิถี 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1 แผนผังการทำงานของระบบ OFDM – WLAN 10
3.2 พรีเอมเบิลของระบบ OFDM – WLAN ในมาตรฐาน IEEE802.11a 10
3.3 Constellation ของ ก) การมอดูเลทแบบ BPSK ข) การมอดูเลทแบบ QPSK 11
3.4 แสดงบิทที่ถูกมอดูเลทแบบ BPSK 13
3.5 แสดงบิทที่ถูกมอดูเลทแบบ QPSK ในช่องสัญญาณ I และ Q 17
3.6 การเข้ารหัสคอนโวลูชัน 64 (2^6) สเตท อัตรารหัส 1/2 และความยาวบังคับ 7 18
3.7 แผนผังแสดงการแปลงฟูริเยร์ผกผันและการฟูริเยร์แบบเร็วที่เครื่องส่ง และ เครื่องรับ 19
3.8 การแทรกสัญลักษณ์เวลาคุมในระบบ OFDM-WLAN 21
3.9 การปรากฏของสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ที่เครื่องรับ 23
3.10 สิ่งแวดล้อมภายในอาคารที่มีแบบจำลองช่องสัญญาณเรลีย์ 24
3.11 แผนผังวิธีการไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด 25
3.12 แผนผังวิธีการไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลา 27
3.13 ตัวเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลา 27
4.1 แบบจำลองกระบวนการสุ่มของวิธีการมอนติคาโล 30
4.2 แผนผังการคำนวณอัตราผิดพลาดบิท 31
4.3 คุณสมบัติของสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ 33
4.4 ผังขั้นตอนการสร้างลำดับบิทสุ่ม 34
4.5 ผังขั้นตอนการมอดูเลทแบบ BPSK 35
4.6 ผังขั้นตอนการมอดูเลทแบบ QPSK 36
4.7 ผังขั้นตอนการแมปคลื่นพาห์ย่อย 37
4.8 ผังขั้นตอนการแทรกสัญลักษณ์เวลาคุม 38
4.9 ผังขั้นตอนแบบจำลองช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ 40
4.10 ผังขั้นตอนแบบจำลองช่องสัญญาณเรลีย์ 41
4.11 ผังขั้นตอนแบบจำลองวิธีไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด 42
4.12 ผังขั้นตอนแบบจำลองวิธีไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลา 43
4.13 ผังขั้นตอนการคำนวณผิดพลาดบิทและแพกเก็ต 44
5.1 อัตราผิดพลาดบิทที่ได้จากการจำลองระบบและทฤษฎี 46
5.2 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการแทรกสัญลักษณ์เวลาคุมที่แตกต่างกัน 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.3	อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้ช่องสัญญาณแบบเรลีย์และมีจำนวนวิถีแตกต่างกัน	48
5.4	อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ไม่มีวิธีการไดเวอร์ซิตี (1 Tx – 1 Rx)	49
5.5	อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด (2 Tx – 1 Rx)	50
5.6	อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตีเมื่อมีการมอดูเลทแบบ BPSK ในช่องสัญญาณ AWGN	51
5.7	อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตีเมื่อมีการมอดูเลทแบบ QPSK ในช่องสัญญาณ AWGN	52
5.8	อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตีเมื่อมีการมอดูเลทแบบ BPSK ในช่องสัญญาณเรลีย์	53
5.9	อัตราผิดพลาดแพกเก็ตของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตีเมื่อมีการมอดูเลทแบบ BPSK ในช่องสัญญาณเรลีย์	54
5.10	อัตราผิดพลาดแพกเก็ตของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตีเมื่อมีการมอดูเลทแบบ BPSK ในช่องสัญญาณเรลีย์	55

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากความแพร่หลายของระบบสื่อสารไร้สาย เช่น ระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Telephone Network) รวมถึงระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) ซึ่งตอบสนองของผู้ใช้ในเรื่องของความคล่องตัวและความสะดวกสบายในการใช้งาน โดยผู้ใช้สามารถเข้าใช้ระบบในบริเวณต่างๆ ในพื้นที่ครอบคลุมโดยไม่จำเป็นต้องใช้สายเชื่อมต่อ อย่างไรก็ดีข้อด้อยของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่มีต่อระบบมีสายคืออัตราการส่งข้อมูล (Data rate) เนื่องจากระบบไร้สายมีอัตราการส่งข้อมูลต่ำกว่ามากซึ่งเป็นผลมาจากการจางหายหลายวิถีของสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณที่เป็นอากาศและสิ่งแวดล้อมต่างๆ ซึ่งนับว่าเป็นปัญหาใหญ่ที่ได้รับการแก้ไขมาตลอดและยังต้องปรับปรุงต่อไปเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากที่สุดในแง่ของการเพิ่มอัตราการส่งผ่านข้อมูล

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะเสนอวิธีการปรับปรุงระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายโดยใช้การประยุกต์วิธีไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่ง (Transmit Diversity) โดยเปรียบเทียบกับระบบที่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีสายอากาศรับ (Receive Diversity) รวมถึงทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการใช้ไดเวอร์ซิตีเพื่อวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อเสนอการปรับปรุงระบบเครือข่ายไร้สายที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยพิจารณาจากอัตราผิดพลาดบิท ทั้งนี้เพื่อให้ระบบสามารถมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นได้ รวมถึงการศึกษาผลกระทบต่อระบบที่เกิดจากการประยุกต์วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ มาใช้ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย

1.3 สมมติฐาน

ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายจะมีประสิทธิภาพในการส่งผ่านข้อมูลได้ดีขึ้นเมื่อมีการประยุกต์ใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลา เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีและระบบที่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผิดพลาดบิทและอัตราส่วนพลังงานของบิทต่อความหนาแน่นพลังงานของสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการนำวิธีไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่งแบบเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลามาใช้กับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่มีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal Frequency Division Multiplex : OFDM) โดยทำการจำลองระบบ (System Simulation) ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อวิเคราะห์อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ทั้งนี้ได้มีการกำหนดพารามิเตอร์ของระบบโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE802.11a (International of Electrical and Electronic Engineering : IEEE) โดยพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการจางหายของสัญญาณหลายวิถี (Multipath Fading) และสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณเป็นหลักในการจำลองระบบ

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการสืบค้นวรรณกรรม (Literature Review) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในส่วนที่ทำการวิเคราะห์ระบบโดยการพิจารณาอัตราผิดพลาดบิทซึ่งสอดคล้องกับเนื้อวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวกับการปรับปรุงวิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ที่มีการทำการวิจัยอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองระบบจากงานวิจัย ตำราทั้งภาษาไทยและต่างประเทศเพื่อให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้

ในขั้นตอนต่อมาได้ทำการทดลองเขียนชุดคำสั่งในโปรแกรม MATLAB แล้ววิเคราะห์สมรรถนะของระบบจากค่าอัตราผิดพลาดบิท โดยทำการจำลองระบบเปรียบเทียบกับผลที่ได้ตามทฤษฎีและผลงานวิจัยที่มีอยู่เพื่อพิสูจน์ว่าชุดคำสั่งที่เขียนขึ้นทำงานได้ถูกต้องซึ่งผลที่ได้รับพบว่าสอดคล้องกับผลงานวิจัยและทฤษฎีที่มีอยู่ จากนั้นจึงทำการเขียนแผนผังและผังขั้นตอน (Flow Chart) ของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในสภาวะต่างๆ เพื่อจำลองระบบ และวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราบิทผิดพลาดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น

เงื่อนไขในการวิจัยนี้หมายถึงเงื่อนไขในการจำลองระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่มีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉากกัน โดยมีเงื่อนไขคือ

- พิจารณาว่าสิ่งแวดล้อมภายในระบบมีลักษณะที่มีการเคลื่อนที่น้อยจึงเรียกว่าเป็น Wide-Sense Stationary (WSS) หรือ Quasi-Static เนื่องจากส่วนใหญ่ระบบจะใช้ภายในอาคาร จึงสามารถพิจารณาว่าระบบมีการจางหายแบบช้า (Slow Fading)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เนื่องจากระบบเป็น WSS และมีการจางหายแบบช้าจึงถือว่าสัญญาณหลายวิถีแต่ละวิถีมีความเป็นอิสระจากกัน (Independent) และในแต่ละสัญลักษณ์ของ OFDM จะได้รับผลกระทบจากการจางหายของช่องสัญญาณเหมือนกันทุกบิทข้อมูล
- ในการจำลองระบบถือว่าระบบมีการเข้าจังหวะได้สมบูรณ์ (Perfected Synchronization) และไม่ได้นำมาพิจารณาในการจำลองระบบในงานวิจัยนี้

1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา (Limitation of the study)

เนื่องจากในการวิจัยนี้อาศัยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองระบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งมีลักษณะของการจำลองการส่งผ่านข้อมูลผ่านเครื่องรับและเครื่องส่งจริง ดังนั้นเพื่อให้ผลที่ได้มีความถูกต้องจึงจำเป็นจะต้องมีการส่งผ่านสัญลักษณ์ข้อมูลเป็นจำนวนมากในระดับหลายร้อยกิกะบิท ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวทำให้ระยะเวลาที่ใช้ค่อนข้างมากและยังจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูง ทั้งนี้บางครั้งอาจเกิดความผิดพลาดในการประมวลผลและทำให้ต้องเริ่มการจำลองใหม่ การจำลองผลแต่ละครั้งจึงใช้เวลานานทำให้ผู้วิจัยไม่สามารถแสดงผลในช่วงที่กว้างมากได้ อย่างไรก็ดีผลที่ได้ยังทำให้สามารถเปรียบเทียบถึงผลกระทบต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal Frequency Division Multiplex : OFDM) เป็นการมัลติเพล็กซ์ในระบบสื่อสารแถบความถี่กว้าง (Broadband Communication) และถือว่าเป็นกรณีพิเศษแบบหนึ่งของการมอดูเลทแบบหลายคลื่นพาห์ (MultiCarrier Modulation : MCM) โดยมีหลักการในการส่งข้อมูลโดยการแบ่งข้อมูลต่อเนื่อง (Serial bit stream) ให้เป็นสายข้อมูลขนาน (Parallel bit stream) และทำการมอดูเลทแต่ละสายข้อมูลด้วยคลื่นพาห์ย่อยที่เป็นอิสระจากกัน โดยการมอดูเลทแบบหลายคลื่นพาห์ได้ถูกเสนอในช่วงต้นของ ค.ศ. 1950 ถึง 1960 แต่ระบบ OFDM ที่ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันได้ถูกเสนอในช่วงกลางของทศวรรษ 1960 โดย อาร์. ดับบริว ชาง ซึ่งชาง [1] [2] ได้เสนอการส่งผ่านข้อมูลหลายชุดผ่านช่องสัญญาณแถบจำกัดเชิงเส้น (Linear band-limited channel) โดยไม่มีผลกระทบจากการแทรกสอดของช่องสัญญาณ (InterChannel Interference : ICI) และ การแทรกสอดสัญลักษณ์ (InterSymbol Interference : ISI) โดยแบบจำลองช่องสัญญาณของชางมีความแตกต่างจากการมอดูเลทแบบหลายความคลื่นพาห์เดิม คือ สเปกตรัมของคลื่นพาห์ย่อยสามารถที่จะซ้อนทับกันได้ (Overlap) ภายใต้เงื่อนไขที่คลื่นพาห์จะต้องตั้งฉากกัน ซึ่งคุณลักษณะนี้ทำให้สามารถลดภาระของตัวกรองความสามารถสูงที่ใช้ในระบบหลายความถี่แบบเดิมได้

ต่อมาเวิร์นสไตน์ และ เอแบร์ เป็นกลุ่มแรกที่เสนอการแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform : DFT) และ การแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบไม่ต่อเนื่อง (Inverse Discrete Fourier Transform : IDFT) เพื่อใช้ในการมอดูเลทและดีมอดูเลทสัญญาณเบสแบนด์ในปี ค.ศ. 1971 ซึ่งต่างกับในปัจจุบันที่เราใช้วิธีแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) และ การแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform : IFFT) หลังจากนั้นไม่นานซอลท์เบิร์กได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ OFDM และสรุปว่าผลกระทบหลักของระบบนี้คือการแทรกสอดของช่องสัญญาณ และเพื่อขจัดผลกระทบของการแทรกสอดสัญลักษณ์และการแทรกสอดของช่องสัญญาณ เปเรซและรุยส์เสนอแนวคิดในการแทรกไซคลิกพรีฟิก (Cyclic prefix) โดยถ้าความยาวของไซคลิกพรีฟิกมีมากกว่าผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณจะทำให้สามารถกำจัดผลจากการแทรกสอดสัญลักษณ์ได้ แทนที่จะให้ช่วงคุม (Guard space) ว่างเปล่าจึงให้มีสัญลักษณ์ไซคลิกพรีฟิกแทรกเข้าไปแทน และถึงแม้ว่าการแทรกไซคลิกพรีฟิกจะทำให้มีการสูญเสียพลังงานที่เป็นสัดส่วนกับความยาวไซคลิกพรีฟิกที่เพิ่มขึ้น แต่ข้อดีคือการกำจัดผลจากการแทรกสอดสัญลักษณ์นั้นถือว่าทดแทนความสูญเสียในด้านพลังงานได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันมาตรฐานของหลายๆ ระบบได้เริ่มสนใจนำระบบ OFDM เข้าไปใช้โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารไร้สายที่ต้องความอัตราส่งข้อมูลที่สูง เช่น การถ่ายทอดสัญญาณเสียงระบบดิจิตอลภาคพื้นดิน (Digital Audio Broadcast : DAB) และการถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิตอลภาคพื้นดิน (Digital Video Broadcast : DVB-T) ในยุโรป ซึ่งเหตุผลหนึ่งที่ OFDM ถูกเลือกใช้ในระบบเหล่านี้คือการที่ระบบสามารถใช้คลื่นความถี่ย่อยที่แตกต่างกันได้ในระบบหลักที่ใช้ความถี่เดียว ดังนั้นการถ่ายทอดและการทวนสัญญาณสามารถใช้ความถี่เดียวกันได้ ซึ่งระบบ DVB-T เป็นระบบที่ใหม่และน่าสนใจเนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงสามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่งข้อมูลได้ จากการเข้ารหัสช่องสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีการสูญเสียรวมทั้งการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีเข้ามาร่วมด้วย

ในทศวรรษที่ผ่านมาจึงมีการนำระบบ OFDM มาประยุกต์ใช้ในระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) ซึ่งทำให้มีการออกมาตรฐานในรุ่นต่อมาคือ IEEE802.11a มาตรฐานเครือข่ายท้องถิ่นสมรรถนะสูงแบบที่ 2 (High Performance Local Area Network Type 2 : HYPERLAN/2) และ มาตรฐานการสื่อสารมัลติมีเดียเคลื่อนที่ (Mobile Multimedia Access Communication : MMAC) ซึ่งได้นำเอาเทคโนโลยี OFDM ไปใช้ในข้อตกลงในชั้นกายภาพ (Physical Layer Specification) ซึ่งสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่งคือการเกิดการไดเวอร์ซิตีความถี่ซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นของ OFDM

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายที่มีการใช้งานในปัจจุบัน

มาตรฐาน	บริเวณที่ใช้งาน
IEEE802.11a	ยุโรปและอเมริกาเหนือ
HiperLAN/2 (High Performance Local Area Network type 2)	ยุโรปและอเมริกาเหนือ
MMAC (Mobile Multimedia Access Communication)	ญี่ปุ่น

ซึ่งเมื่ออลามูติ [3] ได้เสนอวิธีการไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่งในปี ค.ศ. 1998 โดยการใช้ประโยชน์จากไดเวอร์ซิตีของตำแหน่ง (Space diversity) และ ไดเวอร์ซิตีทางเวลา (Time diversity) ซึ่งพบว่าให้อันดับและอัตราขยายไดเวอร์ซิตีใกล้เคียงกับวิธีการไดเวอร์ซิตีที่ใช้อยู่คือไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนที่สูงที่สุด จึงนับเป็นจุดเริ่มต้นของกลุ่มไดเวอร์ซิตีแบบใหม่ ในปีเดียวกัน ลี เซ ชาดรี และ อริยวิสิทธิตระกูล [4] จากห้องปฏิบัติ AT&T ได้เสนอการใช้งานไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่งในระบบสื่อสารไร้สายสำหรับช่องสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการมัลติเพล็กซ์แบบ OFDM โดยเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของระบบเปรียบเทียบกับระบบ CDMA ที่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการของอลูมาติซึ่งได้เสนอการส่งสัญญาณผ่านสายอากาศส่ง 2 ตัว ไปยังสายอากาศ 1 ตัวที่เครื่องรับโดยทำงานประวิงสัญญาณในเส้นทางหนึ่งเพื่อให้สัญญาณที่ส่งมาทั้งสองเส้นทางได้รับผลกระทบจากการจางหายของช่องสัญญาณแตกต่างกัน ซึ่งทำให้สัญญาณที่รวมได้ที่เครื่องรับมีคุณภาพดีกว่าการส่งสัญญาณที่ไม่มีการประวิงเวลา ซึ่งต่อมาฟุาง ลี และ เคา [5] ได้เสนอการปรับปรุงวิธีการไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่งโดยหาจุดเหมาะสมของอัตราส่วนสัญญาณกำลังงานที่ส่งออกไปทั้งสองเส้นทางซึ่งทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น อย่างไรก็ดีการควบคุมกำลังของระบบนั้นทำให้ระบบมีความซับซ้อนขึ้นเนื่องจากต้องมีการส่งข้อมูลป้อนกลับจากเครื่องรับซึ่งทำให้ทรูพุตของระบบลดลง

ในปี ค.ศ. 2001 บูมาร์ค และ แมมเมลา [6] ได้เสนอการประมาณช่องสัญญาณในระบบ OFDM – WLAN โดยวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่มีการนำการประมาณช่องสัญญาณมาใช้โดยใช้สัญญาณนำ (Pilot Signal) เพื่อประมาณช่องสัญญาณ ซึ่งมีผลให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นแต่ไม่ได้ทำให้ทรูพุตของระบบลดลงเนื่องจากในสัญลักษณ์ OFDM จำเป็นต้องมีช่วงเวลาคุม (Guard interval) อยู่แล้ว ในปีเดียวกัน แบง จอง และ คิม [7] ได้เสนอการจัดวางสัญญาณนำเพื่อภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์ และ ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเปรียบเทียบกับระบบ OFDM ที่ไม่มีการใช้สัญญาณนำไว้ด้วย ซึ่งในปี ค.ศ. 2001 ปอโปวิค [8] ได้เสนอการใช้ไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสทางตำแหน่ง - เวลา ซึ่งทำให้ได้สมรรถนะของระบบที่ดีขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้กับอาเรย์ของสายอากาศที่มากขึ้นได้ อย่างไรก็ตามพบว่าการประมวลผลที่เครื่องรับก็จะมีภาระการคำนวณที่ซับซ้อนมากขึ้นซึ่งถือว่ายังไม่สามารถตอบสนองความต้องการของระบบสื่อสารไร้สายในปัจจุบันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ระบบ OFDM-WLAN มีการประมวลสัญญาณดิจิตอลที่เป็นขั้นตอนตามหลักการซึ่งในงานวิจัยนี้เสนอการประยุกต์วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ มาใช้กับระบบ ดังนั้นจึงเป็นการปรับปรุงระบบในส่วนกลางของระบบกล่าวคือ เปลี่ยนแปลงการการทำงานหลังจากการมอดูเลทและมัลติเพล็กซ์สัญญาณแล้ว ดังนั้นโครงสร้างโดยส่วนใหญ่ของระบบยังคงอ้างอิงจากหลักการเดิม ซึ่งจะได้แสดงในหัวข้อต่างๆ ในบทนี้ ทั้งนี้รวมถึงวิธีการไดเวอร์ซิตีที่นำมาประยุกต์ใช้ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนท้ายของบทนี้

3.1 ระบบ OFDM-WLAN

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก หรือ OFDM เป็นวิธีการที่ใช้เพื่อให้ระบบสื่อสารมีอัตราการส่งข้อมูลสูงและต่อต้านผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณหลายวิถีในระบบสื่อสารไร้สาย โดยเราสามารถพิจารณาได้ว่าวิธีการนี้เป็นการมอดูเลทแบบหลายคลื่นพาห์และการเลื่อนความถี่คีย์ (Frequency Shift Keying : FSK) โดยหลักการมอดูเลทแบบหลายคลื่นพาห์จะทำการแปลงบิทข้อมูลต่อเนื่องให้เป็นข้อมูลขนานหลายๆ ชุด แล้วมอดูเลทแต่ละสายข้อมูลด้วยชุดของคลื่นพาห์ย่อยที่ตั้งฉากกัน สมบัติการตั้งฉากระหว่างคลื่นพาห์ย่อยได้จากการคูณจำนวนเต็มกับส่วนกลับของคาบของสัญลักษณ์ของบิทขนาน

คลื่นพาห์ที่ตั้งฉากกันจะถูกส่งออกไปพร้อมๆ กัน หรือ อีกนัยหนึ่งช่องสัญญาณทั้งหมดจะถูกครอบครองโดยผลรวมของแถบความถี่ของทุกคลื่นพาห์ย่อย ดังนั้นโดยการส่งหลายๆ สัญลักษณ์ออกไปพร้อมกัน คาบของสัญลักษณ์จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นสัดส่วนซึ่งส่งผลให้เกิดลดผลกระทบของการแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ซึ่งจะเกิดในสิ่งแวดล้อมที่มีช่องสัญญาณที่มีการสูญเสียและจางหายแบบเรลีย์ ซึ่งหากพิจารณาหลักการมอดูเลทแบบเลื่อนความถี่คีย์ซึ่งสอดคล้องกับระบบ OFDM แล้วจะพบว่าลำดับข้อมูลที่ถูกส่งไปกับแต่ละคลื่นพาห์ย่อย i คือ

$$s_i(t) = A\exp(2\pi f_i t)\Pi\left(\frac{t}{T}\right) \tag{3.1}$$

$$f_i = f_c + \frac{i}{T}, \qquad i = 0,1,\ldots,N-1 \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Pi\left(\frac{t}{T}\right)=\begin{cases}1, & -\frac{T}{2}\le t\le\frac{T}{2}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \tag{3.3}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.2 เราจะสามารถคำนวณแบนด์วิดของคลื่นพาห์ย่อยได้เมื่อ $N = 48$ **โดยที่แบนด์วิดธ์ของระบบซึ่งจะถูกครอบครอง (Occupied) โดยคลื่นพาห์ย่อยทั้งหมด มีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 100 MHz หรือมีคาบเท่ากับ** $T = 2.0833$ μs **จะได้ค่าความถี่คลื่นพาห์ย่อยแสดงดังตารางที่ 3.1**

ตารางที่ 3.1 ความถี่คลื่นพาห์ย่อยในมาตรฐาน IEEE802.11a ในช่วงความถี่ 5.15 – 5.25 GHz

ลำดับคลื่นพาห์ย่อย (i)	ความถี่คลื่นพาห์ย่อย (MHz)
0	5150.000
1	5152.083
2	5154.166
3	5156.249
4	5158.333
5	5160.416
6	5162.499
7	5164.583
8	5166.666
9	5168.749
10	5170.833
11	5172.916
12	5174.999
⋮	⋮
47	5247.915

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นหากคลื่นพาห์แต่ละตัวไม่รบกวนซึ่งกันและกันระหว่างการตรวจจับสัญญาณ ซึ่งจุดยอดสเปกตรัมของแต่ละคลื่นพาห์จะต้องสอดคล้องกับการข้ามศูนย์ (Zero crossing) ซึ่งความแตกต่างของโลบกลาง (Center lobe) และการข้ามศูนย์แรกจะทำให้เกิดช่วงที่แคบที่สุดเท่ากับ 1/T และสัญลักษณ์ OFDM จะถูกสร้างขึ้นจากคลื่นพาห์ย่อยขนาน นอมอลไรซ์พลังงานของและขยายคาบของบิท คือ

$$s(\tilde{n}) = \frac{A}{N}\sum_{i=0}^{N-1} x_i(n)\exp(2\pi f_i n), \qquad ;0 \le n \le N; \quad 0 \le i \le N \tag{3.4}$$

โดยที่ $x(n_i)$ เป็นบิทที่ n ของสายข้อมูลที่ i ซึ่งได้จากการแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่อง สมการที่ 3.4 เป็นการแปลงผกผันฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่องที่ทำการสเกลด้วยค่า A ลำดับที่ส่งออกไปคือค่า $s(\tilde{n})$ โดยจะถูกส่งออกไปหนึ่งสัญลักษณ์ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งในกรณีที่มีการแทรกสัญลักษณ์ไซคลิกพรีฟิกที่หน้าของสัญลักษณ์ และจะถูกทำซ้ำทุกๆ สัญลักษณ์ของ OFDM โดยนำมาจากส่วนสุดท้ายของสัญลักษณ์ OFDM นั่นเองซึ่งทำให้การส่งสัญลักษณ์มีคาบเท่ากับ N

$$s(n-m) = s(N+n-m), \qquad ;n-m \le p \tag{3.5}$$

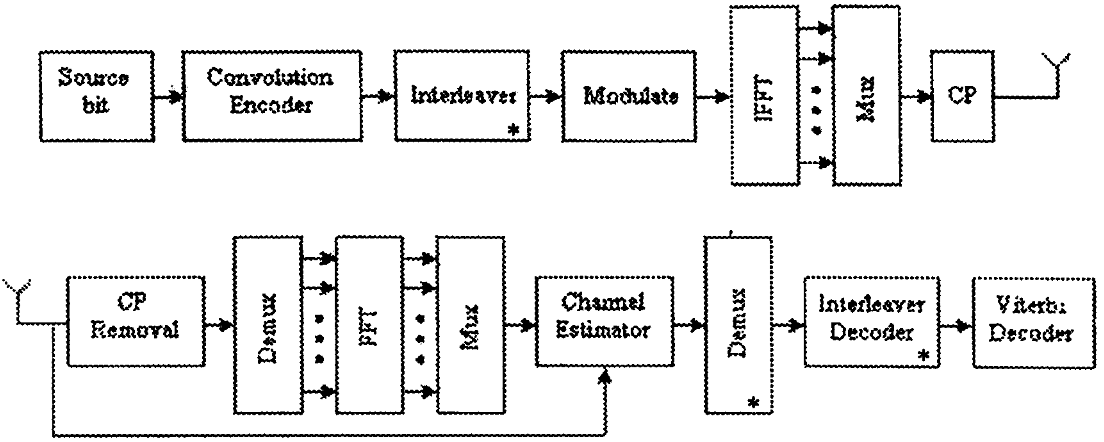
ซึ่ง p เป็นความยาวของไซคลิกพรีฟิก ซึ่งทำให้สัญญาณที่รับได้ในรูปของเวกเตอร์แสดงได้ดังนี้

$$r(n) = s(n) \otimes h(n) + v(n) \tag{3.6}$$

ในระบบ WLAN จะพิจารณาว่าเครื่องรับ (Mobile Terminal : MT) และ สิ่งกีดขวาง (Scatterer) สำหรับสิ่งแวดล้อมภายในอาคารมีการเคลื่อนที่น้อยมาก (Quasi - Stationary) ดังนั้นในวิธีการ STD การส่งสัญญาณซ้ำที่สองช่องเวลา (Time Slot) จะสามารถพิจารณาได้ว่าช่องสัญญาณยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง

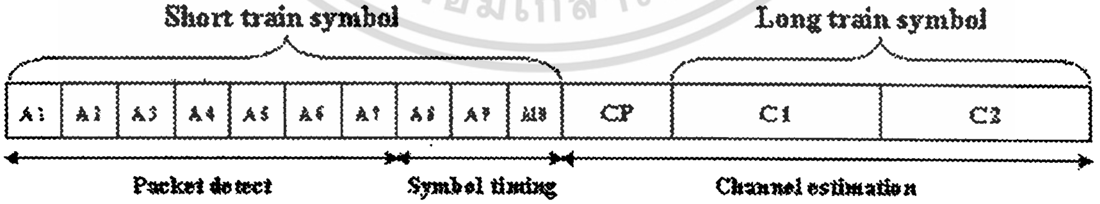
เพื่อความเข้าใจในระบบ WLAN แผนผังการทำงานของการส่งผ่านข้อมูลในระบบ WLAN แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยในรูปเป็นผังการทำงานมาตรฐาน แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ได้มีการละเว้นการพิจารณาบางส่วนซึ่งแผนผังที่ไม่ได้นำมาจำลองระบบจะมีเครื่องหมาย *

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของระบบ OFDM – WLAN (ส่วนที่มีเครื่องหมาย * ไม่ได้นำมาพิจารณาในการจำลองระบบ)

สำหรับงานวิจัยนี้เสนอการจำลองระบบ WLAN โดยสัญญาณเบสแบนด์จะเข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัส (Code rate) 1/2 ซึ่งมีค่า K=7 (Constraint length) ก่อนถูกมอดูเลทแบบ BPSK และ QPSK แล้วแปลงให้เป็นข้อมูลบิทขนานโดยการแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform : IFFT) แล้วจึงมัลติเพล็กแบบ OFDM จากนั้นจะรวมกับพรีเอมเบิลแล้วส่งผ่านสายอากาศส่งที่มีการประยุกต์วิธีไดเวอร์ซิตีต่างๆ ไปสู่เครื่องรับ พรีเอมเบิลของ OFDM แสดงดังรูปที่ 3.2 ช่องสัญญาณของระบบ OFDM WLAN ถือว่าเป็นชนิดไวด์เซนส์สเตชันนารี (Wide Sense Stationary : WSS) นั่นคือพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณไม่เปลี่ยนแปลงใน 1 แพกเกตของสัญลักษณ์ OFDM (OFDM Symbol) ดังนั้นสามารถสมมติได้ว่าช่องสัญญาณเปลี่ยนแปลงอย่างช้ามาก และ มีการจางหายแบบราบ (Flat fading , Non-selective fading) แบบจำลองช่องสัญญาณจึงสมมติเป็นช่องสัญญาณจางหายแบบเรลีย์ (Rayleigh Fading Channel)



รูปที่ 3.2 พรีเอมเบิลของระบบ OFDM - WLAN ในมาตรฐาน IEEE802.11a

แผนผังของเครื่องรับจะแตกต่างกันตามวิธีไดเวอร์ซิตี โดยจะแสดงในหัวข้อที่ 2 แต่มีหลักการที่เหมือนกันคือมีการรวมสัญญาณด้วยวิธีไดเวอร์ซิตีชนิดต่างๆ แล้วผ่านการดีมัลติเพล็กซ์ก่อนแปลงข้อมูลบิทขนานให้เป็นบิทต่อเนื่อง (Serial bit stream) แล้วผ่านตัวถอดรหัสวิเทอร์บี (Viterbi's decoder)

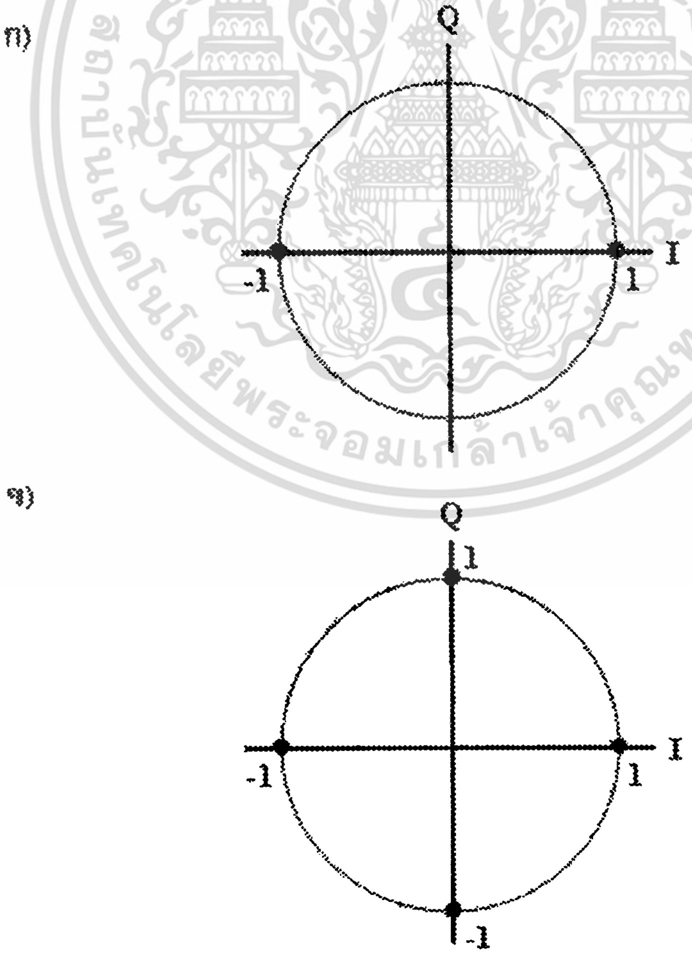
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การมอดูเลทสัญญาณดิจิตอล

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เสนอการวิเคราะห์ระบบ OFDM-WLAN ซึ่งมีการมอดูเลทข้อมูลโดยวิธี PSK (Phase Shift Keying) หรือบางครั้งเรียกว่าการมอดูเลทแบบแอมปริจูดคงที่ ซึ่งในที่นี้เลือกวิธีการมอดูเลทเพื่อวิเคราะห์อัตราบิทผิดพลาด 2 แบบคือ BPSK (Binary Phase Shift Keying) และ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) ซึ่งการมอดูเลทสามารถทำได้ตามโดยสมการ

$$s(t) = A\cos(\omega_c t + \theta_k) \tag{3.7}$$

จะเห็นว่าข้อดีของการมอดูเลทแบบนี้คือค่าอัตราส่วนกำลังงานสูงสุดต่อกำลังงานเฉลี่ย (Peak – to – Average Power Ratio : PAPR) ซึ่งมีทางปฏิบัติจะมีค่าเท่ากับ 1 อย่างไรก็ตามเนื่องจากระบบ OFDM มีคลื่นพาห์ย่อยจำนวนมากทำให้คุณสมบัตินี้ไม่เป็นจริงซึ่งจะต้องอาศัยวิธีการอื่นในการปรับค่ากำลังงานสูงสุดของสัญญาณต่อไป ซึ่งในการมอดูเลทแบบ PSK จะใช้คลื่นพาห์สองชนิดคือ Inphase (I) และ Quadrature (Q) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Constellation ของ ก) การมอดูเลทแบบBPSK ข) การมอดูเลทแบบ QPSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 การมอดูเลทแบบ BPSK

การมอดูเลทแบบ BPSK เป็นการแปลงบิทข้อมูล 0 และ 1 ให้มีเฟสเป็น 0 และ π โดยคลื่นสัญญาณที่ได้จะเป็นตามสมการ

$$s(t) = A\cos(2\pi f_c t + \pi \cdot d_k) \tag{3.8}$$

โดยที่ d_k คือข้อมูลบิทที่ k โดยที่ข้อมูลที่ส่งออกไปคือ

$$\begin{aligned} d(t) &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_k \cdot (g_T(t) \otimes \delta(t - kT_b)) \\ &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_k \cdot g_T(t - kT_b) \end{aligned} \tag{3.9}$$

โดยที่ $g_T(t)$ คือรูปพัลส์ของสัญญาณดิจิตอล และ T_b คือคาบของบิท ส่วนกลับของ T_b คืออัตราบิท และ $\delta(t)$ คือฟังก์ชันเดลต้า

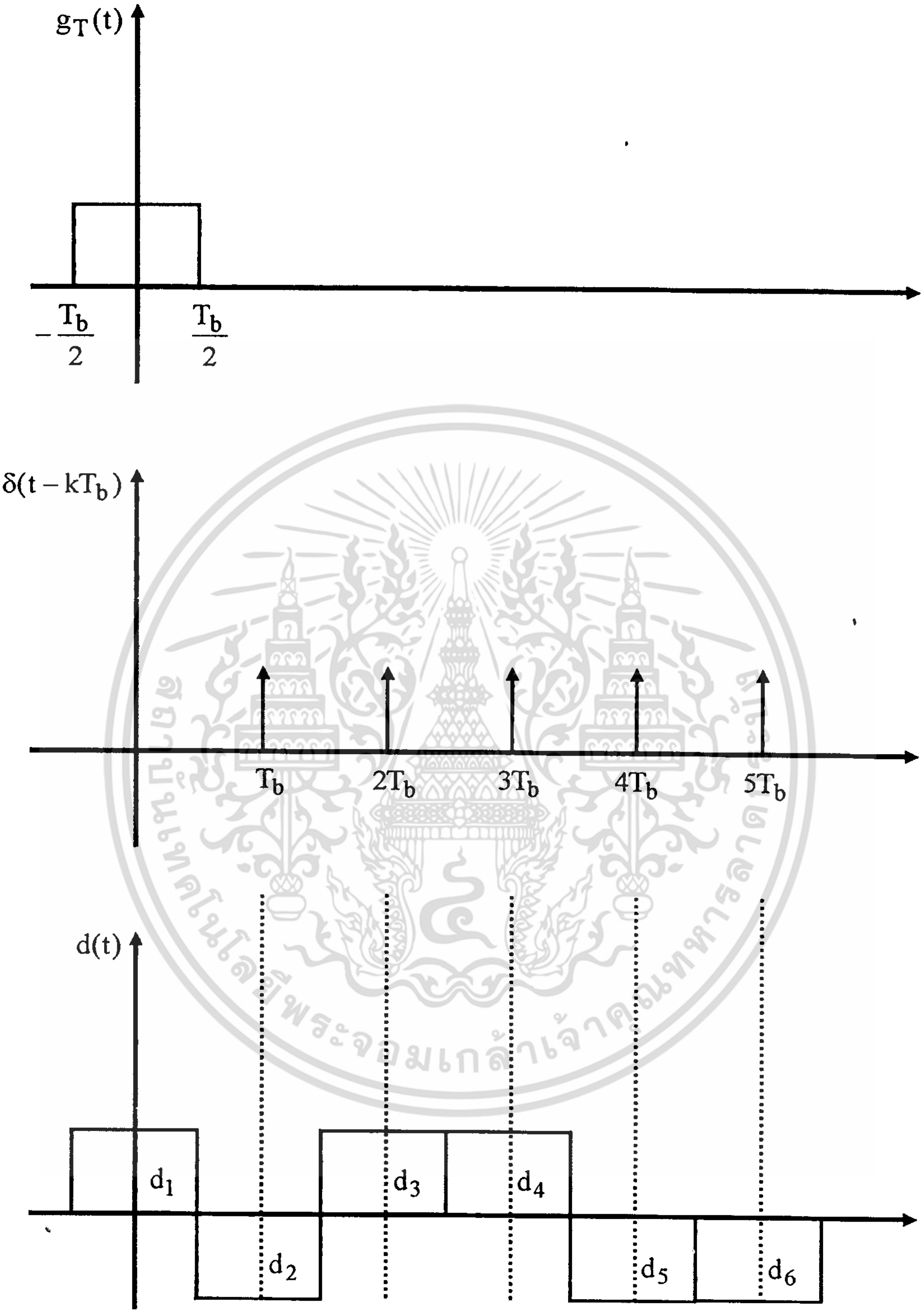
$$\delta(t) = \begin{cases} 1, & ; t = 0 \\ 0, & ; \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.10}$$

และ $g_T(t)$ คือ ฟังก์ชันพัลส์รูปสี่เหลี่ยม

$$g_T(t) = \begin{cases} 1, & ; -\frac{T_b}{2} \le t \le \frac{T_b}{2} \\ 0, & ; \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.11}$$

ดังนั้นหากสมมติให้ให้บิทที่ 1 ถึง 6 มีค่าเป็น [1,0,1,1,0,0] โดยบิทที่มีค่าเป็น 0 จะถูกแปลงเป็นค่า -1 ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงบิทที่ถูกมอดูเลทแบบ BPSK

ตัวกรองที่ใช้ในการลด Spurious signal คือตัวกรองไนควิสต์ โดยตัวกรองไนควิสต์จะมีผลตอบสนองความถี่คือ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_N(f) = \begin{cases} 1, & 0 \le |f| \le \dfrac{1-\alpha}{2T_b} \\ \cos^2\left[\dfrac{T_b}{4\alpha}\left\{2\pi|f| - \dfrac{\pi(1-\alpha)}{T_b}\right\}\right], & \dfrac{1-\alpha}{2T_b} \le |f| \le \dfrac{1+\alpha}{2T_b} \\ 0, & |f| > \dfrac{1+\alpha}{2T_b} \end{cases} \quad (3.12)$$

ซึ่งข้อดีของตัวกรองไนควิสต์คือเราจะได้รับค่าศูนย์ที่เวลา nT_b เสมอ ดังนั้นถ้าเราให้มีการประสานจังหวะ (Synchronization) ที่จุด nT_b สัญลักษณ์แต่ละตัวจะไม่รบกวนกัน ซึ่งได้มีการเสนอว่าจุดที่เหมาะสมระหว่างตัวกรองไนควิสต์ของเครื่องส่งและเครื่องรับจะมีค่าเท่ากัน [9] โดยมีค่าเป็นรากที่สองของผลตอบสนองความถี่ไนควิสต์ บางครั้งจึงเรียกว่าตัวกรองรากของไนควิสต์ (root Nyquist filter) คือ

$$G_T(f) = G_R(f) = \sqrt{G_N(f)} \quad (3.13)$$

และผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองทั้งสองตัวคือ

$$g_T(t) = g_R(t) = \frac{1}{\pi t}\cdot\frac{1}{1-\left(\dfrac{4\alpha t}{T_b}\right)^2}\cdot\sin\left\{2\pi(1-\alpha)\frac{1}{T_b}\right\} + \frac{1}{\pi}\cdot\frac{\dfrac{4\alpha}{T_b}}{1-\left(\dfrac{4\alpha t}{T_b}\right)^2}\cdot\cos\left\{2\pi(1+\alpha)\frac{1}{T_b}\right\} \quad (3.14)$$

ดังนั้นสัญญาณที่ส่งออกไปจากเครื่องรับคือ

$$s(t) = d(t)\cos 2\pi f_c t \quad (3.15)$$

และสัญญาณที่เครื่องรับที่มีการจางหายจากสัญญาณหลายวิถีและสัญญาณรบกวนขาวบวกจะมีค่าเป็น

$$r(t) = \int_0^{\infty} h(\tau,t)\otimes s(t-\tau)d\tau + n(\tau) \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสัญญาณคลื่นพาห์ที่เครื่องรับจะมีการเลื่อนเฟสไป $\theta_1(t)$ เป็น $\cos(2\pi f_c t + \theta_1(t))$ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ถือว่ามีการประสานจังหวะสมบูรณ์ และมีการชดเชยการเลื่อนเฟสแล้ว ดังนั้นจะได้สมการสัญญาณที่ถูกดีมอดูเลทคือ

$$r_{dm}(t) = r(t) \times \cos(2\pi f_c t) \tag{3.17}$$

และจะได้สัญญาณที่ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำตามสมการ 3.18 และจะได้สมการ 3.19 แสดงสัญญาณที่เครื่องรับหลังจากผ่านตัวกรองรากไนควิสต์แล้ว

$$r_{LPF}(t) = \frac{1}{2}\{R(t)dt[\cos\theta_f(t) + n(t)]\} \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned} r_o(t) &= r_{LPF}(t) \otimes g_R(t) \\ &= \frac{1}{2}R(t)\cos\theta_f(t) \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_k \cdot \left(g_T(t) \otimes g_R(t) \otimes \delta(t - kT_b)\right) + \frac{1}{2}n(t) \cdot g_R(t) \\ &= \frac{1}{2}R(t)\cos\theta_f(t) \cdot \sum_{k=-\infty}^{+\infty} d_k \cdot \left(g_T(t) \otimes g_R(t) \otimes \delta(t - kT_b)\right) + n_1(t) \end{aligned} \tag{3.19}$$

เมื่อ $R(t)$ คือการเปลี่ยนแปลงของแอมปลิจูดสัญญาณอันเนื่องมาจากการจางหายหลายวิถี และบิทข้อมูลจะถูกสุ่มกลับได้ตามจังหวะการประสานคือ

$$r_s(t) = r_o\left(k \cdot \frac{T_b}{n}\right), \qquad ; k = 1, 2, 3, \ldots \tag{3.20}$$

และสุดท้ายตรวจจับบิทข้อมูล 1 หรือ 0 กลับคืนมาโดยใช้ค่า threshold ตามเงื่อนไข

$$\hat{d}_k = \begin{cases} 1, & ; r_s\left(\frac{k}{n}\right) > 0 \\ 0, & ; r_s\left(\frac{k}{n}\right) \le 0 \end{cases} \tag{3.21}$$

ดังนั้นเมื่อเราทำการเปรียบเทียบค่า $\hat{d}_k$ และ d_k เราจะสามารถคำนวณหาอัตราผิดพลาดบิทของช่องรบกวนขาวบวกและช่องสัญญาณเรลีย์ได้คือ [9] – [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$BER_{BPSK-AWGN} = \frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\sqrt{E_b / N_0}\right) \quad (3.22)$$

$$BER_{BPSK-Rayleigh} = \frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{E_b/N_0}}}\right] \quad (3.23)$$

โดยที่ค่า E_b ต่อ N_0 เป็นอัตราส่วนของพลังงานต่อบิท ต่อ ความหนาแน่นพลังงานสัญญาณรบกวน

3.1.1.3 การมอดูเลทแบบ QPSK

การมอดูเลทแบบ QPSK เกิดจากการสร้างสัญญาณ BPSK ขึ้นมาสองชุดโดยที่จะแยกสัญญาณทั้งสองชุดเราต้องการให้คลื่นพาห์ทั้งสองชุดตั้งฉากกัน ซึ่งตัวแรกให้เป็น $\cos 2\pi f_c t$ และคลื่นพาห์ตัวที่สองเป็น $\sin 2\pi f_c t$ ทั้งสองคลื่นพาห์จะตั้งฉากกันในคาบ

$$\int_{0}^{T_c} \cos 2\pi f_c t \times \sin 2\pi f_c t = 0 \quad (3.24)$$

โดยที่ เป็นคาบของสัญญาณคลื่นพาห์

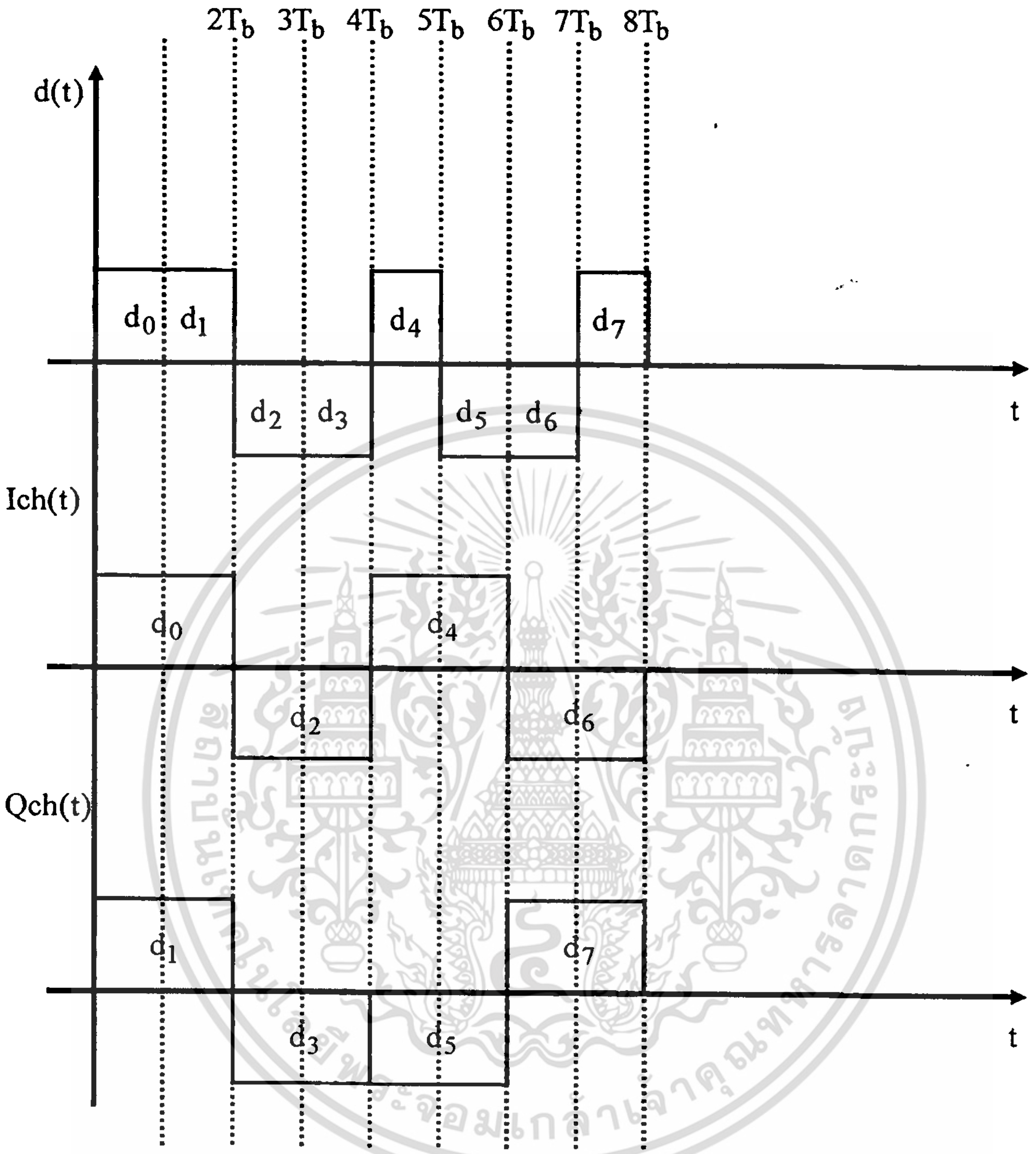
$$f_c = \frac{1}{T_c} \quad (3.25)$$

โดยใช้คลื่นพาห์ดังกล่าวเราสามารถเขียนสัญญาณที่ส่งจากเครื่องส่งได้เป็น

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} d_I(t)\cos 2\pi f_c t + \frac{1}{\sqrt{2}} d_Q(t)\sin 2\pi f_c t \quad (3.26)$$

โดยที่คลื่นพาห์ตัวแรกคือ $\cos 2\pi f_c t$ จะถูกเรียกว่า อินเฟส (Inphase Channel : Ich) และตัวที่ตั้งฉากกัน $\sin 2\pi f_c t$ จะถูกเรียกว่าควอเดรเจอร์เฟส (Quadrature Channel : Qch) โดยในการมอดูเลทแบบนี้บิทข้อมูล จะถูกแปลงให้เป็นข้อมูลขนานสองช่องสัญญาณคือ Ich และ Qch ซึ่งจะใช้ตัวเลื่อนเฟส (Phase shifter) ในการมอดูเลทให้คลื่นพาห์มีเฟสต่างกัน 90° ซึ่งสมมติบิทข้อมูล 8 บิทคือ [1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1] และบิทที่ถูกมอดูเลทแล้วแสดง ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 บิทที่ถูกมอดูเลทแบบ QPSK ในช่องสัญญาณ I และ Q

ซึ่งบิทข้อมูลที่ได้จะมีคาบของบิทเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า และค่าอัตราผิดพลาดบิทจะสามารถหาได้เช่นเดียวกับการมอดูเลทแบบ BPSK ซึ่งแสดงใน [10] และ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบโดยเปรียบเทียบอัตราบิทผิดพลาดตามทฤษฎีและจากการจำลองระบบ OFDM-WLAN ซึ่งแสดงในผลการวิเคราะห์ในบทที่ 5

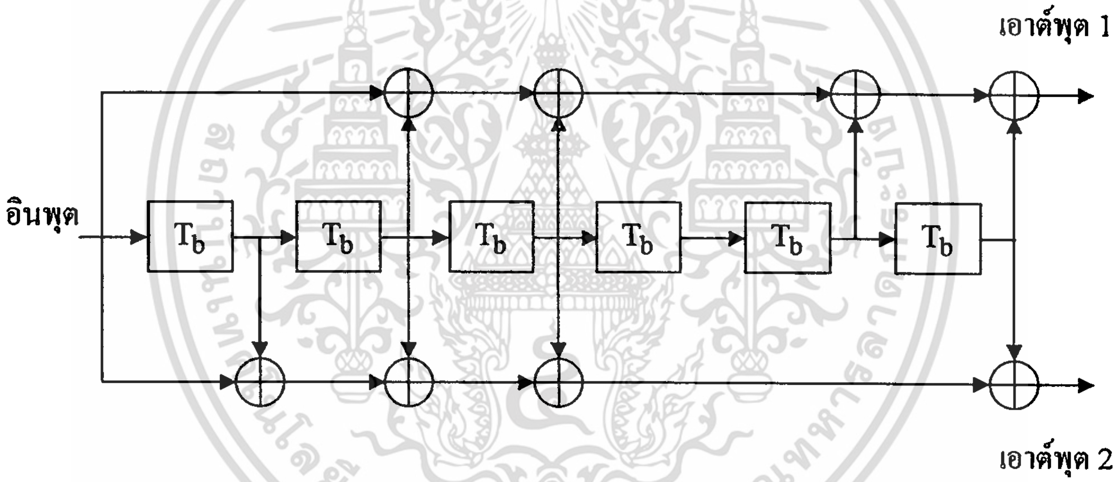
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ

การเข้ารหัสช่องสัญญาณใช้เพื่อให้สัญญาณมีความทนต่อสัญญาณรบกวนและผลจากการจางหายของสัญญาณหลายวิถีและยังให้อัตราขยายรหัส (Coding gain) ซึ่งทำให้อัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งโดยส่วนใหญ่อัตราส่วนที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งและเป็นสัดส่วนระหว่างบิทอินพุต์และบิทเอาต์พุต แต่อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสช่องสัญญาณจำเป็นจะต้องใช้ constellation ของการมอดูเลทที่สูงขึ้นเพื่อให้อัตราผิดพลาดบิทลดลง

การเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolution code) เป็นการเข้ารหัสช่องสัญญาณที่ถูกเลือกใช้ในมาตรฐาน IEEE802.11a รวมทั้งในระบบ GSM และ IS-95 ด้วย ซึ่งข้อดีของการเข้ารหัสคอนโวลูชันคือการที่สามารถปรับค่าอัตรารหัสให้กับระบบได้ด้วยวิธีการที่ไม่ซับซ้อน

ในงานวิจัยนี้ใช้การเข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีความยาวบังคับเท่ากับ 7 (Constraint length : K=7) โดยมีอัตรารหัสเท่ากับ 1/2 ซึ่งการเข้ารหัสลักษณะนี้มีบิทอินพุตเท่ากับ 1 บิท โดยที่มีบิทเอาต์พุต 2 บิท ดังแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 การเข้ารหัสคอนโวลูชัน 64 (2^6) สเตท อัตรารหัส 1/2 และความยาวบังคับ 7

จำนวน shift register ที่ใช้ในการเข้ารหัสเป็นตัวกำหนดอัตราขยายการเข้ารหัสยิ่งมีจำนวนมากยิ่งทำให้มีอัตราขยายสูง อย่างไรก็ตามจำนวน shift register ที่มากจะทำให้การถอดรหัสที่ภาครับยุ่งยากมากขึ้นในลักษณะการเพิ่มที่เป็นเลขชี้กำลังกับจำนวน shift register ดังนั้นในการใช้งานโดยส่วนใหญ่จะใช้ shift register ไม่เกิน 8 ตัว และในมาตรฐานของ IEEE802.11a ได้ระบุให้ใช้เพียง 6 เท่านั้น ซึ่งพบว่าอัตราเข้ารหัสจะมีค่าประมาณ 7.0 dB เมื่อค่าระยะทางอิสระเท่ากับ 10 และอัตรารหัส 1/2 ซึ่งคำนวณได้จาก [12]

$$\text{coding gain} = 10\log_{10}(\text{code rate} \cdot \text{free distance}) \tag{3.27}$$

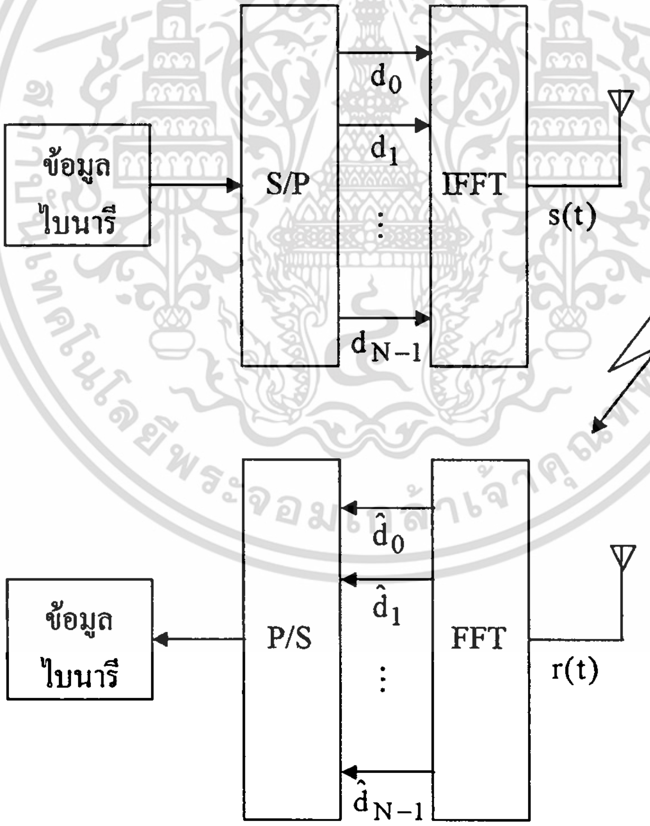
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการถอดรหัสคอนโวลูชันจะใช้อัลกอริทึมของวิเทอร์บิ (Viterbi's decoder) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมนั้นสอดคล้องกับอัลกอริทึมแบบ Maximum likelihood นั่นเอง

3.1.3 การแปลงฟูริเยร์และการแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว

ในระบบ OFDM จำเป็นจะต้องมอดูเลทแต่ละบิทข้อมูลขนานในแต่ช่องสัญญาณด้วยคลื่นพาห์ย่อย ดังนั้นจึงต้องใช้การแปลงฟูริเยร์ผกผันไม่ต่อเนื่อง (Inverse Discrete Fourier Transform : IDFT) และ ในภาครับก็จำเป็นต้องแปลงข้อมูลขนานกลับมาเป็นข้อมูลต่อเนื่องด้วย ดังนั้นจึงใช้การแปลงฟูริเยร์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transfrom : DFT) ซึ่งเทคนิควิธีที่ทำให้การแปลงทั้งสองรูปแบบดังกล่าวคือการแปลงฟูริเยร์ และ การแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว

แผนผังการแปลงข้อมูลบิทต่อเนื่องเป็นบิทขนานที่เครื่องส่ง และ แปลงบิทข้อมูลขนานเป็นข้อมูลต่อเนื่องซึ่งหมายรวมถึงการมอดูเลทและดีมอดูเลทคลื่นพาห์ย่อยออกจากบิทข้อมูล ด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แสดงในรูปที่ 3.7 ทั้งนี้ได้ละวิธีการอื่นๆ ในระบบไว้ไม่ได้แสดงในรูป



รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงการแปลงฟูริเยร์ผกผันและการฟูริเยร์แบบเร็วที่เครื่องส่ง และ เครื่องรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.1 การแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว

เมื่อข้อมูลถูกมอดูเลทเป็นข้อมูลไบนารีและเข้ารหัสช่องสัญญาณ ซึ่งมีส่วนประกอบของช่องสัญญาณ I และ Q คือ

$$d_n = d_{I_n} + d_{Q_n} \tag{3.28}$$

จากนั้นข้อมูลต่อเนื่องจะถูกแปลงให้เป็นข้อมูลบิทขนานหรือมอดูเลทข้อมูลขนานแต่ละตัวด้วยคลื่นพาห์ย่อยซึ่งวิธีการดังกล่าวคือการแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็วที่ดำเนินการที่เครื่องส่ง ซึ่งแสดงได้สมการ

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

$$= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{N-1} \left(d_{I_i}(k) + d_{Q_i}(k)\right)\left(\cos(2\pi f_i (t - kT_s)) + j\sin(2\pi f_i (t - kT_s))\right) f(t - kT_s) \tag{3.29}$$

N คือจำนวนคลื่นพาห์ย่อยที่ใช้ระบบซึ่ง $N = 48$ หมายถึงข้อมูลจะถูกแปลงจากโดเมนความถี่เป็นโดเมนเวลา ค่า T_s คือคาบของสัญลักษณ์ของ OFDM และ f_i เป็นคลื่นพาห์ย่อยตัวที่ i

$$f_i = f_0 + \frac{t}{T_s} \tag{3.30}$$

และ คือรูปสัญญาณพัลส์ของแต่ละสัญลักษณ์ซึ่งนิยามโดย

$$f(t) = \begin{cases} 1, & ; 0 \le t \le T_s \\ 0, & ; \text{otherwise} \end{cases} \tag{3.31}$$

3.1.3.2 การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นว่ากระบวนการในส่วนของเครื่องรับเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อแปลงข้อมูลที่เข้ารหัสกลับมาเป็นข้อมูลข่าวสารเช่นเดิม ดังนั้นในการแปลงข้อมูลในโดเมนเวลากลับมาเป็นข้อมูลบนโดเมนความถี่จะใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ซึ่งแสดงได้เป็น

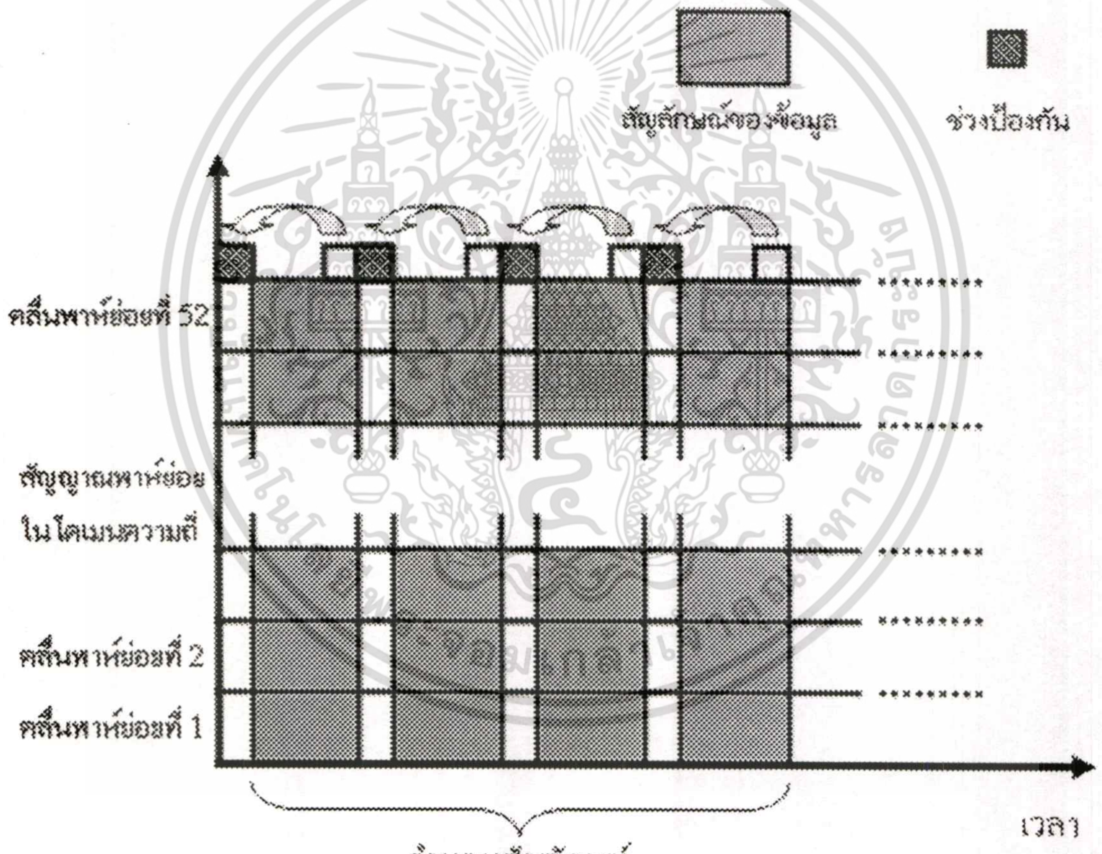
$$r(t) = \int_0^{\infty} h(\tau, t) s(t - \tau) d\tau + n(t) \tag{3.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนเครื่องรับ สัญญาณที่รับได้ถือว่าได้รับการกรองจากตัวกรองที่มีประสิทธิภาพและไม่เกิดการสูญเสียรูปสัญญาณ (Distortion) จากนั้นเมื่อสัญญาณได้รับการดีมอดูเลทสัญญาณคลื่นพาห์แล้วจะถูกส่งเข้าสู่การบวนการแปลงฟูริเยร์แบบเร็วซึ่งทำให้ได้บิทข้อมูลที่ถูกแปลงกลับมาเป็นโดเมนความถี่คือ

$$\hat{d}_i(k) = \frac{1}{T_s} \int_{kT_s}^{T_s + kT_s} r(t) \exp(-j2\pi f_i (t - kT_s)) dt \tag{3.33}$$

ซึ่งบิทข้อมูลต่อเนื่องที่ได้สามารถนำไปดีมอดูเลทแบบ PSK เพื่อให้กลับเป็นบิทข้อมูลเบสแบนด์ต่อไป



รูปที่ 3.8 การแทรกสัญลักษณ์เวลาคุมในระบบ OFDM-WLAN

3.1.4 การแทรกสัญลักษณ์เวลาคุม (Guard interval symbol)

เนื่องจากในทางปฏิบัติระบบ OFDM ไม่ได้ปราศจากการเกิดสัญญาณแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ ดังนั้นจึงต้องวิธีการในการลดผลกระทบจากการแทรกสอดดังกล่าว ซึ่งวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้คือพยายามเพิ่มคาบของสัญลักษณ์ให้มีค่ามากขึ้น โดยการแทรกสัญลักษณ์หรือกลุ่มบิทที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทราบค่าเข้าไปข้างหน้าสัญลักษณ์ OFDM ทุกๆ สัญลักษณ์ในแต่ละคลื่นพาห์ย่อยในโดเมนเวลา ซึ่งจะผลทำให้สัญลักษณ์มีคาบกว้างมากขึ้นคือดังรูปที่ 3.8

$$T_{total} = T_s + T_g \tag{3.34}$$

ซึ่งค่า T_g คือช่วงเวลาคุม ดังนั้นสัญลักษณ์ OFDM จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนแรกจะหมายถึงสัญลักษณ์ทั้งหมด และส่วนที่อยู่ด้านหลังจะถูกคัดลอกมาประกอบที่ด้านหน้าของสัญลักษณ์ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า "ไซคลิกพรีฟิก" อัตราส่วนช่วงเวลาคุมที่ใช้จะขึ้นอยู่กับระบบ แต่โดยส่วนใหญ่ T_g จะมีค่าน้อยกว่า $T_s/4$ เนื่องจากคาบเวลาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ทรูพุตของระบบลดลงนั่นเอง ดังนั้นจากสมการ 3.29 เมื่อถูกแทรกด้วยสัญลักษณ์เวลาคุมแล้วจะเขียนได้เป็น

$$s'(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{N-1} d_i(k) \exp(j2\pi f_i (t - kT_{total})) f'(t - kT_{total}) \tag{3.35}$$

และ $f'(t)$ คือรูปสัญญาณพัลส์ที่ถูกปรับปรุงของแต่ละสัญลักษณ์ซึ่งนิยามโดย

$$f'(t) = \begin{cases} 1, & ; -T_g \le t \le T_s \\ 0, & ; t < -T_g, \quad t > T_s \end{cases} \tag{3.36}$$

และสมการที่ 3.33 จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\hat{d}_i(k) = \frac{1}{T_s} \int_{kT_{total}}^{T_{total}+kT_{total}} r(t) \exp(-j2\pi f_i (t - kT_{total})) dt \tag{3.37}$$

ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว

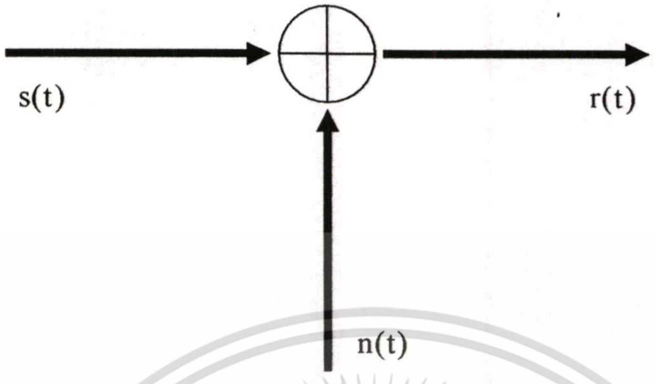
3.2 ช่องสัญญาณ

สิ่งแวดล้อมต่างๆ ระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับทำให้เกิดสัญญาณรบกวน การหน่วงเวลาและการจางหายเนื่องจากสัญญาณที่ถูกสะท้อนภายด้วยสิ่งกีดขวาง (Scaterrer) รวมถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น สัญญาณรบกวนขาวบวก ดังนั้นในการจำลองระบบจึงจำเป็นจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกิดจากช่องสัญญาณด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์

ในระบบสื่อสารเครื่องรับจะได้รับสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การปรากฏของสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ที่เครื่องรับ

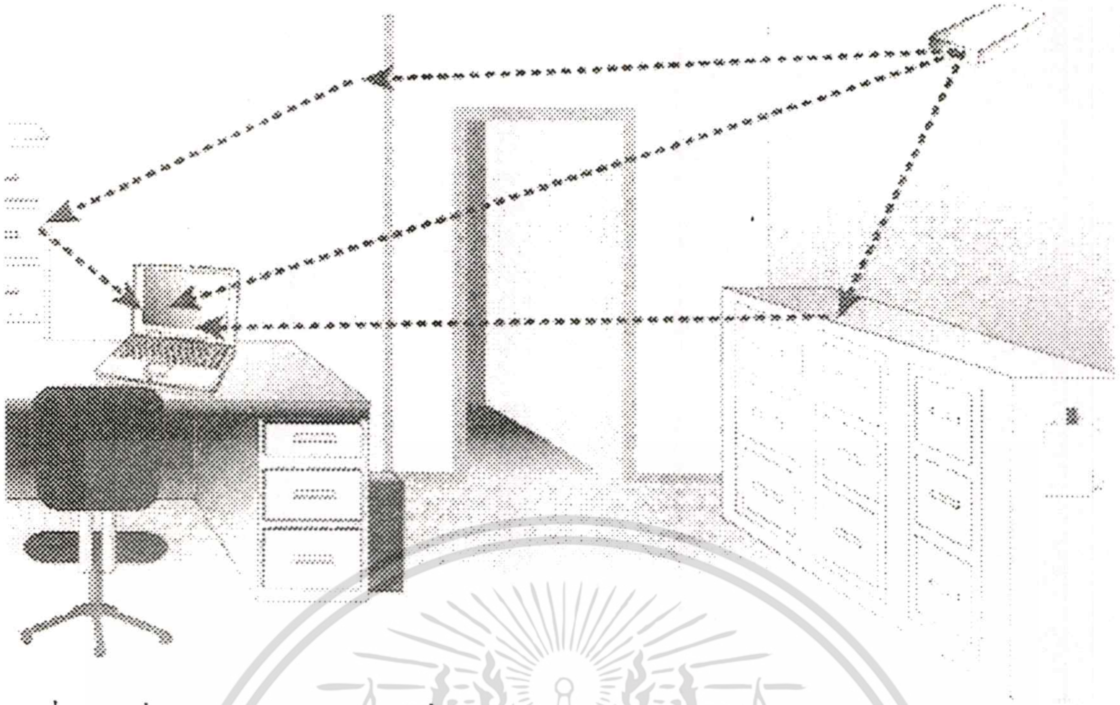
โดยสัญญาณรบกวนขาวบวกจะส่งผลต่อการเกิดการผิดพลาดบิทอันเนื่องมาจากการตรวจจับสัญญาณ ไบนารีที่ผิดพลาด เนื่องจากสัญญาณรบกวนขาวอาจเสริมหรือหักล้างกับสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องส่งก็ได้

3.2.2 ช่องสัญญาณเรลีย์

นอกจากสัญญาณรบกวนขาวที่เกิดขึ้นที่เครื่องรับแล้ว โดยส่วนใหญ่การส่งสัญญาณในระบบสื่อสารจะได้รับผลกระทบจากสัญญาณจางหายหลายวิถีเนื่องจากกรณีที่เป็นการส่งแบบกระจายสัญญาณ (Broadcasting) ซึ่งส่งสัญญาณออกไปในทิศทางที่กว้าง ดังนั้นโอกาสในการสัญญาณเดียวกันหลายๆ สัญญาณจะสะท้อนสิ่งแวดล้อมในระบบไปสู่เครื่องรับจึงมีมาก ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถสมมติได้ว่าช่องสัญญาณของระบบเป็นแบบเรลีย์ โดยที่พารามิเตอร์ที่สำคัญของช่องสัญญาณคือจำนวนวิถี (path) และ ค่าหน่วงเวลา (delay)

สัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับจะเป็นผลรวมของสัญญาณในแต่ละเส้นทาง (superposition) ซึ่งจะได้รับผลกระทบจากการจางหายของช่องสัญญาณต่างกันด้วย ดังนั้นบางครั้งสัญญาณที่รวมกันอาจเสริมกัน หรือหักล้างกันก็ได้ สิ่งแวดล้อมภายในระบบแสดงดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 สิ่งแวดล้อมภายในอาคารที่มีแบบจำลองช่องสัญญาณเรลีย์

เมื่อพิจารณาในโดเมนเวลาจะได้ว่าสัญญาณที่ปรากฏที่เครื่องรับจากเส้นทางที่ n จะสามารถแสดงได้เป็น

$$r_n(t) = \mathrm{Re}\left[\alpha_n(t)\exp j(2\pi f_c t)\right] \tag{3.38}$$

เมื่อจำนวนเส้นทางเท่ากับ N จะสามารถเขียนสมการผลรวมของสัญญาณที่เครื่องรับได้จากผลรวมของสัญญาณทุกเส้นทาง

$$r(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n(t)$$

$$= \mathrm{Re}\left[\left(\sum_{n=1}^{N} A_n(t)\right)\exp j(2\pi f_c t)\right]$$

$$= \mathrm{Re}\left[(x(t) + j\,y(t))(\cos(2\pi f_c t + j\sin 2\pi f_c t)\right]$$

$$= x(t)\cos(2\pi f_c t) - y(t)\sin 2\pi f_c t \tag{3.39}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะได้สมการของการจางหายเชิงซ้อนที่เครื่องรับในรูปของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ที่สมมูลย์กับระบบความถี่ต่ำผ่าน (Equivalent lowpass system) คือ

$$r(t) = x(t) + j \cdot y(t)$$

$$= \left[\sqrt{\frac{2}{N_1+1}} \sum_{n=1}^{N_1} \sin\left(\frac{\pi n}{N_1}\right) \cos\left\{2\pi f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{N_1}\right) t\right\} + \frac{1}{\sqrt{N_1+1}} \cos(2\pi f_d t) \right]$$

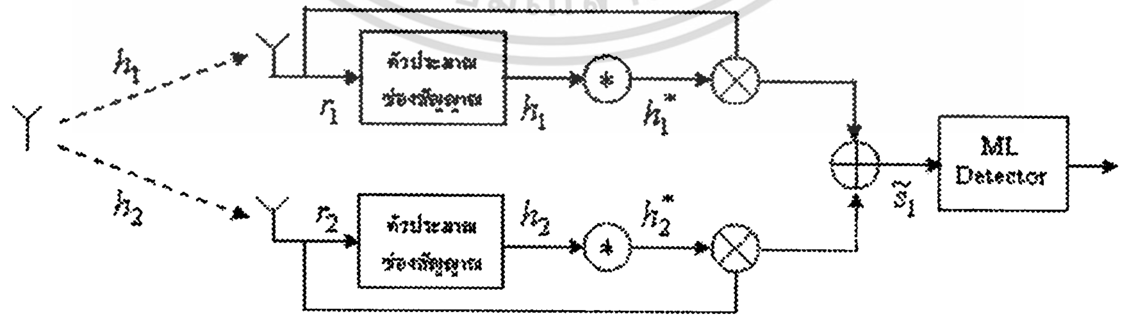
$$+ j\sqrt{\frac{2}{N_1}} \sum_{n=1}^{N_1} \sin\left(\frac{\pi n}{N_1}\right) \cos\left\{2\pi f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{N_1}\right) t\right\} \quad (3.40)$$

ซึ่งสมการที่ 3.40 จะได้นำไปใช้ในการจำลองช่องสัญญาณเรลีย์ในบทที่ 4

3.3 วิธีการไดเวอร์ซิตี

ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเสนอการประยุกต์วิธีไดเวอร์ซิตีเพื่อใช้กับระบบ OFDM - WLAN ดังนั้นจะได้กล่าวถึงวิธีการไดเวอร์ซิตีที่เกี่ยวข้องคือ ไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด และ ไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลา ทั้งนี้ไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุดเป็นตัวแทนของกลุ่มไดเวอร์ซิตีสายอากาศรับ และ ไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลา เป็นตัวแทนของกลุ่มไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่ง

3.3.1 วิธีไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด (Maximal Ratio Combining : MRC)



รูปที่ 3.11 แผนผังวิธีการไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด

การวิเคราะห์ MRC ที่ใช้สายอากาศส่ง 1 ตัว และสายอากาศรับ 2 ตัว แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยกำหนดให้สัญญาณที่ส่งจากเครื่องส่งเป็น s_1 เมื่อพิจารณาเส้นทางระหว่างสายอากาศส่งกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศรับตัวที่ 1 และ 2 กำหนดให้มีตัวแปรของช่องสัญญาณจางหายเป็น h_1 และ h_2 ตามลำดับคือ

$$h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \tag{3.41}$$

$$h_2 = \alpha_2 e^{j\theta_2} \tag{3.42}$$

เมื่อ α_1 และ α_2 เป็นค่าการจางหายของขนาดสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีการแจกแจงแบบเรลีย์ระหว่างสายอากาศส่งกับสายอากาศรับตัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ θ_1 และ θ_2 เป็นเฟสแบบสุ่มที่มีการแจกแจงยูนิฟอร์มบนช่วงปิด $[-\pi, \pi]$ โดยเมื่อสัญญาณถูกส่งผ่านไปที่เครื่องรับปรากฏผลจากสัญญาณรบกวนเชิงซ้อนที่มีการแจกแจงแบบเกาส์ สัญญาณที่รับได้แสดงได้ดังสมการ

$$r_1 = h_1 s_1 + n_1 \tag{3.43}$$

$$r_2 = h_2 s_1 + n_2 \tag{3.44}$$

โดยอาศัยวิธีประมาณช่องสัญญาณ (Channel Estimation) และใช้กระบวนการเชิงเส้นกับสัญญาณที่ได้ในสมการ 3.43 และ 3.44 จะได้

$$h_1^* r_1 = \alpha_1^2 s_1 + h_1^* n_1 \tag{3.45}$$

$$h_2^* r_2 = \alpha_2^2 s_1 + h_2^* n_2 \tag{3.46}$$

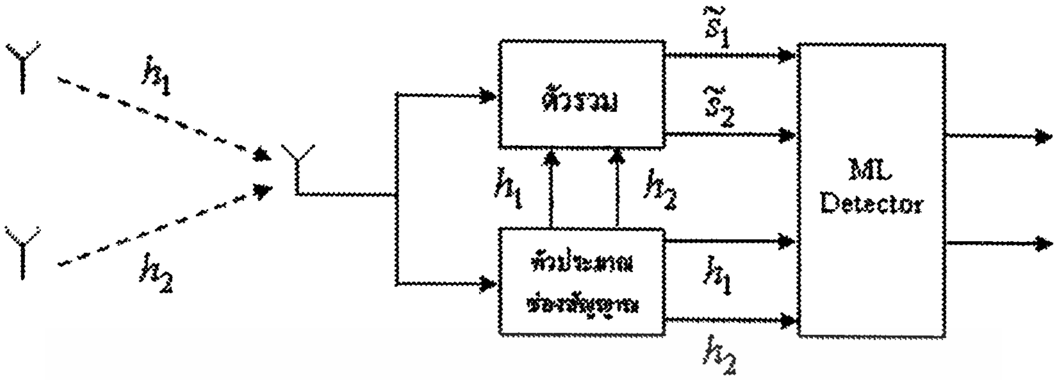
เมื่อ * แสดงถึงการสังยุคเชิงซ้อน (Complex Conjugate Operation) ทำให้ผลรวมของสัญญาณที่เครื่องรับมีค่าตามสมการ

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_1 + h_2^* r_2$$

$$= (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) s_1 + h_1^* n_1 + h_2^* n_2 \tag{3.47}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 วิธีไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง-เวลา (Space-Time Coding Diversity)

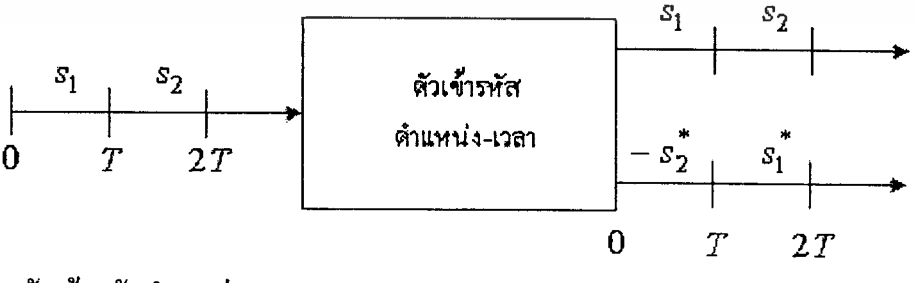


รูปที่ 3.12 แผนผังวิธีการไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลา

ไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง-เวลา อาศัยการส่งข้อมูลผ่านช่องเวลา (Time slot) ที่ห่างกันโดยในบทความนี้จะส่งข้อมูลผ่านสายอากาศส่ง 2 ตัวและใช้สายอากาศรับ 1 ตัว ดังรูปที่ 3.12 โดยหลักการการจางหายอย่างช้าสามารถสมมติได้ว่าในช่วง 2 ช่องเวลา ที่ส่งสองสัญลักษณ์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ [3] [5] [13]โดยสัญญาณจะผ่านเมทริกซ์ส่งผ่าน (Transmission matrix) ในตัวเข้ารหัสตำแหน่ง-เวลา คือ

$$G = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \tag{3.48}$$

ซึ่งเมทริกซ์ดังกล่าวได้จากตัวเข้ารหัสดังรูปที่ 3.13 โดยเมื่อผ่านเข้าสู่สายอากาศส่งจะทำให้ที่ช่องเวลาที่ 1 สายอากาศตัวที่ 1 และ 2 ส่ง s_1 และ $-s_2^*$ ตามลำดับ เช่นเดียวกันในช่องเวลาที่ 2 สายอากาศตัวที่ 1 และ 2 ส่ง s_2 และ s_1^* ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 ตัวเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรับที่ปรากฏที่เครื่องรับจากสายอากาศส่งตัวที่ 1 และ 2 จะได้รับผลจากสัญญาณรบกวนสุ่มคือ

$$r_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \tag{3.49}$$

$$r_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + n_2 \tag{3.50}$$

โดยอาศัยการประมาณช่องสัญญาณ จะทำให้ได้สัญญาณที่เป็นผลรวมจากวิธีไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลาคือ

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_1 + h_2 r_2^*$$

$$= (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) s_1 + h_1^* n_1 + h_2 n_2^* \tag{3.51}$$

$$\tilde{s}_2 = h_2^* r_1 - h_1 r_2^*$$

$$= (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) s_2 - h_1 n_2^* + h_2^* n_1 \tag{3.52}$$

ค่าพลังงานเฉลี่ยของสัญญาณ และ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์แสดงด้วยค่าความแปรปรวนดังสมการที่ 3.53 และ 3.54 โดยที่ $i = 1$, 2 แทนสายอากาศส่งตัวที่ 1 และ 2 ซึ่งค่า SNR เป็นอัตราส่วนของค่าทั้งสอง

$$E(|s_i|^2) = \sigma_s^2 \tag{3.53}$$

$$E(|n_i|^2) = \sigma_n^2 \tag{3.54}$$

$$\mathrm{SNR} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \tag{3.55}$$

โดยอาศัยวิธี STD จะสังเกตได้ว่าอัตราขยายไดเวอร์ซิตี (Diversity gain) จะมีค่าเป็น 2 เท่าของวิธี MRC โดยเปรียบเทียบจากสมการ 3.46 3.50 และ 3.51 หากสายอากาศแต่ละตัวมีกำลังส่งเท่ากัน และ เท่ากับกำลังงานที่สายอากาศส่งของวิธี MRC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากพิจารณาจากวิธี STD จะเห็นได้ว่าเส้นทางของสัญญาณจะมี 2 เส้นทาง โดยเราสามารถเพิ่มสายอากาศส่งเป็น 4 เส้นทางทำให้มีไดเวอร์ซิตีเพิ่มขึ้นได้ โดยใช้สายอากาศส่ง 4 ตัว และสายอากาศรับ 2 ตัว แต่นั่นหมายความว่าเมทริกซ์ส่งผ่าน และการถอดรหัสข้อมูลก็จะมีความยุ่งยากมากขึ้นด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การจำลองระบบ

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบสามารถทำได้สามวิธี หนึ่งคือการคำนวณจากสูตรที่ซับซ้อน (Evaluation of complex formula) วิธีการที่สองคือการสร้างและทดลองวัด (Fabricating and Measurement) และวิธีการสุดท้ายคือการจำลองระบบ (Simulation of system) ซึ่งในกรณีหลังจะทำให้การวิเคราะห์ระบบทำได้รวดเร็วอีกทั้งยังเหมาะกับระบบที่มีความซับซ้อนและวิเคราะห์สูตรหรือสมการออกมาได้ยาก ทั้งนี้การจำลองระบบมักจะใช้ในส่วนแรกของการออกแบบ เนื่องจากใช้เวลาและค่าใช้จ่ายน้อยกว่าอีกสองวิธีการ อย่างไรก็ตามการที่จะจำลองระบบให้ได้รับผลการวิเคราะห์แม่นยำและถูกต้องจำเป็นต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้วิธีการที่ถูกต้องด้วย

เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้อง ในบทนี้จะได้แสดงการจำลองระบบ โดยทำการสร้างแบบจำลองของแต่ละวิธีการขึ้นมาให้สอดคล้องกับระบบ OFDM-WLAN โดยทำการทดสอบการทำงานของแต่ละแบบจำลอง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบโดยพิจารณาจากค่าอัตราผิดพลาดบิทที่มีการรวมเอาแบบจำลองทั้งหมดมาประกอบกับแบบจำลองของช่องสัญญาณแบบต่างๆ

กระบวนการทั้งหมดจะกระทำบนโปรแกรม MATLAB โดยอาศัยการจำลองระบบโดยวิธีการมอนติคาโล (Montecarlo Simulation : MC) สำหรับวิธีการจำลองแบบมอนติคาโลจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

รูปที่ 4.1 แบบจำลองกระบวนการสุ่มของวิธีการมอนติคาโล

4.1 วิธีการจำลองแบบมอนติคาโล

วิธีการมอนติคาโลเกี่ยวข้องกับการกำเนิดเลขสุ่ม (Random number generator) โดยยังแบ่งออกเป็นอีกหลายวิธีการย่อย แต่โดยพื้นฐานแล้ววิธีมอนติคาโลจะสอดคล้องกับการทดลองหรือจำลองเหตุการณ์สุ่มโดยใช้ค่าเฉลี่ยสังเคราะห์ (Artificial mean) โดยไม่จำเป็นต้องทำการทดลองสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

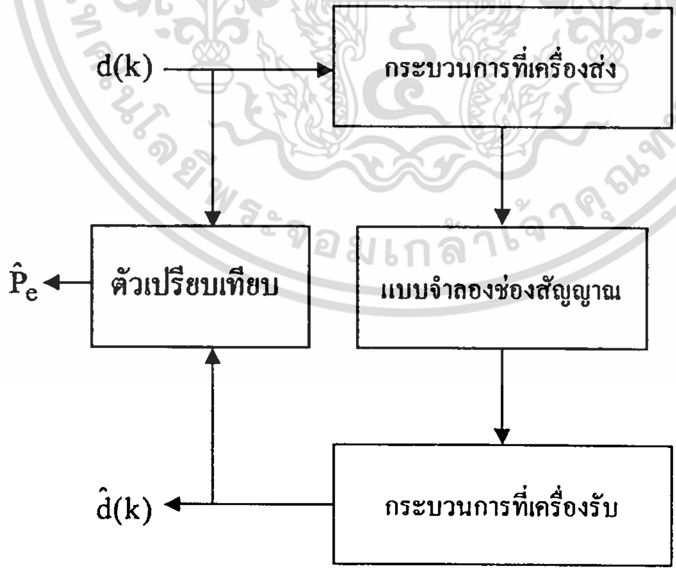
ทั้งหมด ซึ่งการประยุกต์ใช้งานอย่างหนึ่งคือการประมาณค่าอัตราผิดพลาดบิทในระบบสื่อสาร ตัวอย่างดังรูปที่ 4.1 ให้ U(t) V(t) และ W(t) เป็นอินพุตของเหตุการณ์สุ่ม ในกระบวนการสุ่ม (Random process) สิ่งที่เราต้องการหาคือค่าสถิติของเอาต์พุต Y(t) ซึ่งมักจะเป็นค่าคาดหวัง E(Y(t)) ของ Y(t) นั่นเอง โดยการทดลองส่งอินพุตที่แปรตามเวลาเข้าไปในระบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวกำเนิดแปรสุ่มเพื่อสร้างอินพุตนั่นเอง ดังนั้นผลการประมาณหรือค่าคาดหวังที่ได้จากวิธีการมอนติคาโลคือ

$$E\left\{g(\hat{Y}(t))\right\} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} g(Y(i)) \tag{4.1}$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะวิเคราะห์หาค่าอัตราผิดพลาดบิทของระบบในสถานะต่างๆ ดังนั้นเราสามารถใช้ขั้นตอนของวิธีการมอนติคาโลในการหาอัตราผิดพลาดบิทในระบบสื่อสารซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

4.1.1 การคำนวณอัตราผิดพลาดบิท

ในการคำนวนอัตราผิดพลาดบิทของระบบสื่อสารจากการจำลองระบบโดยวิธีการมอนติคาโลมีซึ่งจะสอดคล้องตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนผังการคำนวณอัตราผิดพลาดบิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สร้างลำดับบิทข้อมูลสุ่ม (Random bit sequence) โดยจะใช้ตัวกำเนิดตัวแปรสุ่มแสดงได้เป็น $(\{d(k)\}, k = 1, 2, \ldots, N)$ และ สัญญาณรบกวน $\{n(k)\}, k = 1, 2, \ldots, N$

2. ป้อนบิทข้อมูลสุ่มให้กับระบบโดยผ่านกระบวนการในระบบซึ่งรวมถึงการรวมกับสัญญาณรบกวนแล้วประมาณค่าเอาต์พุตบิท $\hat{d}(k)$

3. ประมาณค่าคาดหวังจาก [14]

$$\hat{P}_e = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} g(\hat{d}(k)) \tag{4.2}$$

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

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

ความแม่นยำของการจำลองระบบของวิธีการมอนติคาโลจะขึ้นอยู่กับวิธีการประมาณขนาดของตัวอย่าง N รวมถึงการประมาณค่า และ การตั้งสมมติฐานของระบบ ซึ่งความแม่นยำของวิธีการจะเป็นสัดส่วนกับค่า $1/\sqrt{N}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความแม่นยำจะแปรผันตามจำนวนบิทที่ส่งเข้าสู่ระบบซึ่งหมายความว่าถ้าต้องการให้มีความแม่นยำสูงจะต้องใช้เวลาในการจำลองระบบนานขึ้น

4.1.2 การกำเนิดลำดับบิทสุ่ม

การกำเนิดบิทสุ่ม $\{b_k\}$ ซึ่งมีค่าเป็น 0 หรือ 1 สามารถทำได้โดยใช้ตัวกำเนิดยูนิฟอร์ม (Uniform Generator)

$$b_k = \begin{cases} 1, & ; U_k > p_1 \\ 0, & ; U_k > p_0 \end{cases} \tag{4.3}$$

โดยที่ค่าความน่าจะเป็น $p_0 = P[b_k = 0]$ คือค่าสุ่มของตัวแปรสุ่มไบนารี ซึ่งสามารถสร้างขึ้นได้ตามสมการ

$$X(kN + m) = (2b_k - 1)p(mT_b) \tag{4.4}$$

โดยที่ $p(mT_b)$ คือค่าสุ่มของพัลส์ขนาดหนึ่งหน่วย (Unit-amplitude pulse) ที่มีคาบของบิทเท่ากับ T_b และอัตราสุ่มเท่ากับ N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

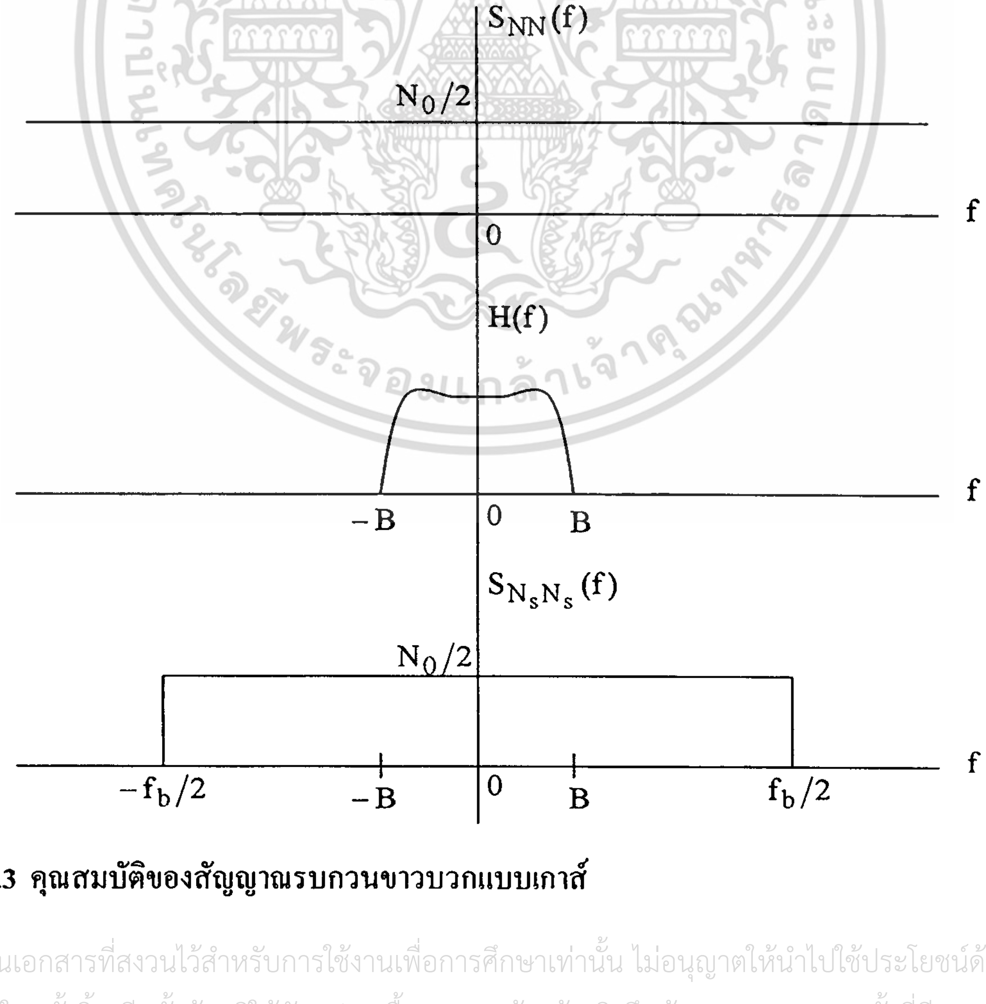
4.1.3 การกำเนิดสัญญาณรบกวนขาวแบบเกาส์

สัญญาณรบกวนขาวบวก (Additive white Gaussian noise) เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสาร โดยเป็นสัญญาณที่มีความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลังงานคงที่ (Constant power spectral density : PSD) สำหรับทุกๆ ความถี่

$$S_{NN}(f) = \frac{N_0}{2} \qquad ; -\infty < f < \infty \tag{4.5}$$

แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติระบบจะเป็นระบบแถบจำกัดดังนั้นถ้าระบบมีแถบความถี่ B และเมื่อความถี่ที่ใช้สุ่มถูกเลือกให้มีค่ามากกว่า 2B ดังนั้นสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ที่ใช้ในการจำลองระบบจะมีความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังงานคงที่บนช่วงความถี่ $-f_s/2 < f < f_s/2$ ดังนั้นสมการที่ 4.5 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$S_{N_sN_s}(f) = \frac{N_0}{2} \qquad ; -f_s/2 < f < f_s/2 \tag{4.6}$$



รูปที่ 4.3 คุณสมบัติของสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการจำลองระบบสัญญาณรบกวนขาวจะถูกสร้างขึ้นตามสมการดังกล่าวซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะทำให้ฟังก์ชันสหอัตสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ที่มีการข้ามศูนย์ที่ $\tau = kT_b$ โดยที่ $T_b = 1/f_b$ และมีค่าความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มที่สอดคล้องกับค่ากำลังงานของบิทและความถี่คือ

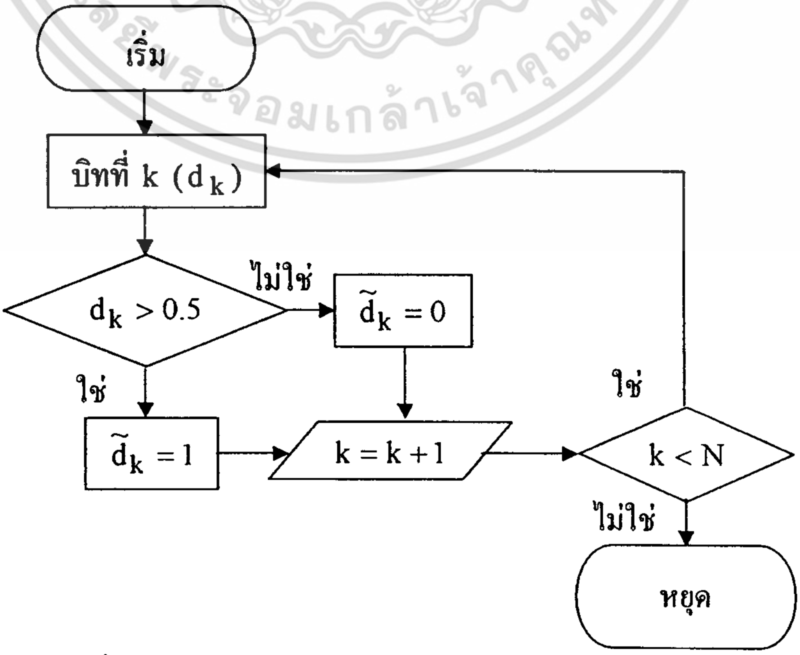
$$\sigma_{N_s}^2 = \frac{N_0 f_b}{2} \tag{4.7}$$

4.2 แบบจำลองที่ใช้ในการจำลองระบบ OFDM-WLAN

ในการจำลองระบบ ได้อาศัย MATLAB ในการจำลองระบบดังนั้นจะได้มีการกล่าวและอ้างถึงอัลกอริทึมบางส่วนที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อความเข้าใจ และรหัสข้อมูล (Source code) ที่สมบูรณ์ได้ดังแสดงไว้ในภาคผนวกต่อจากเอกสารอ้างอิง ทั้งนี้จะได้ละแบบจำลองในส่วนของภาครับเนื่องจากกระบวนการในภาครับจะเป็นกระบวนการที่ตรงกันข้ามกับภาคส่ง ดังนั้นจึงแสดงเฉพาะแบบจำลองในภาคส่ง แบบจำลองช่องสัญญาณ และแบบจำลองการคำนวณอัตราผิดพลาดบิทและแพคเก็ต

4.2.1 ลำดับบิทข้อมูลสุ่ม

ลำดับบิทข้อมูลสุ่มสามารถสร้างขึ้นได้ตามสมการที่ 4.4 โดยฟังก์ชัน rand() ในโปรแกรม MATLAB โดยบิทข้อมูลที่ได้จะมีลักษณะการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มในช่วง [0,1) จากนั้นจะถูกแปลงให้เป็น $\tilde{d}(k)$ ซึ่งมีค่า 0 หรือ 1 จากการตัดสินโดยค่า threshold 0.5



รูปที่ 4.4 ผังขั้นตอนการสร้างลำดับบิทสุ่ม

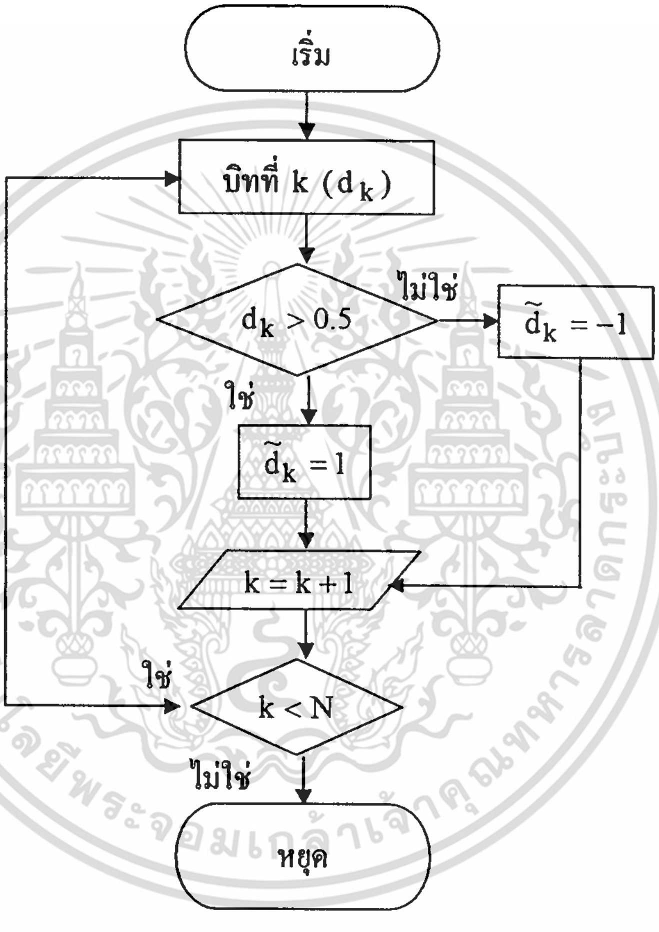
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การมอดูเลทลำดับบิทสุ่ม

ลำดับบิทข้อมูลสุ่มที่สร้างขึ้นได้ตามหัวข้อ 4.2.1 จะถูกมอดูเลทแบบ BPSK และ QPSK โดยอาศัยค่า threshold ในการตัดสินบิทเพื่อทำการแปลงค่าบิท

4.2.2.1 แบบจำลองการมอดูเลทแบบ BPSK

บิทข้อมูลจะถูกตัดสินว่ามีค่าเป็น -1 หรือ 1 โดยค่า threshold คือ 0 ตามรูปที่ 4.5

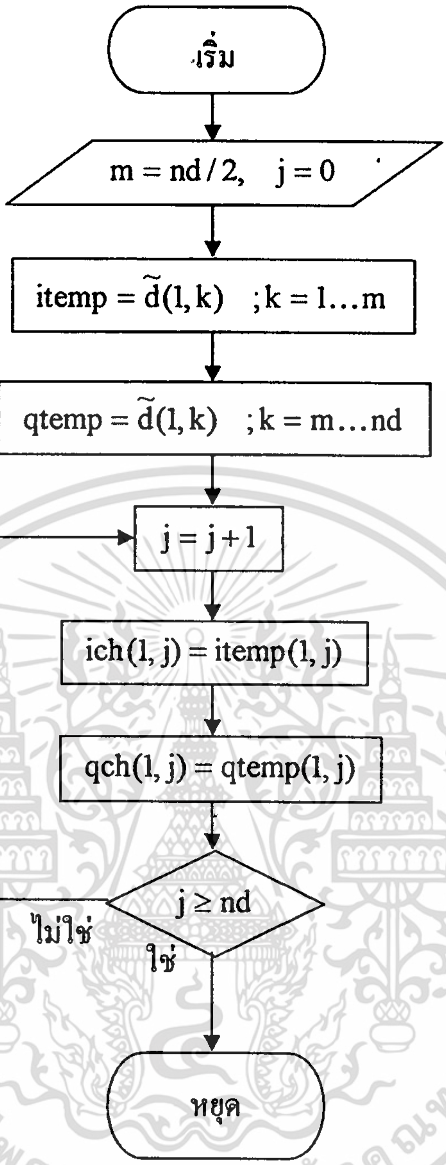


รูปที่ 4.5 ผังขั้นตอนการมอดูเลทแบบ BPSK

4.2.2.2 แบบจำลองการมอดูเลทแบบ QPSK

ในการมอดูแลทแบบ QPSK ลำดับบิทข้อมูลสุ่มจะถูกสร้างขึ้นเช่นเดียวกับการมอดูเลทแบบ BPSK แต่จะถูกแบ่งออกเป็นสองช่องสัญญาณขนานเรียกว่า Ich และ Qch ดังแสดงในหัวข้อ 3.1.1.3 ในบทที่ 3 และจะถูกมอดูเลทโดยแผนผังดังรูปที่ 4.6 โดยให้ลำดับข้อมูลสุ่มมีจำนวนเท่ากับ nd บิท และ ให้ ml = 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

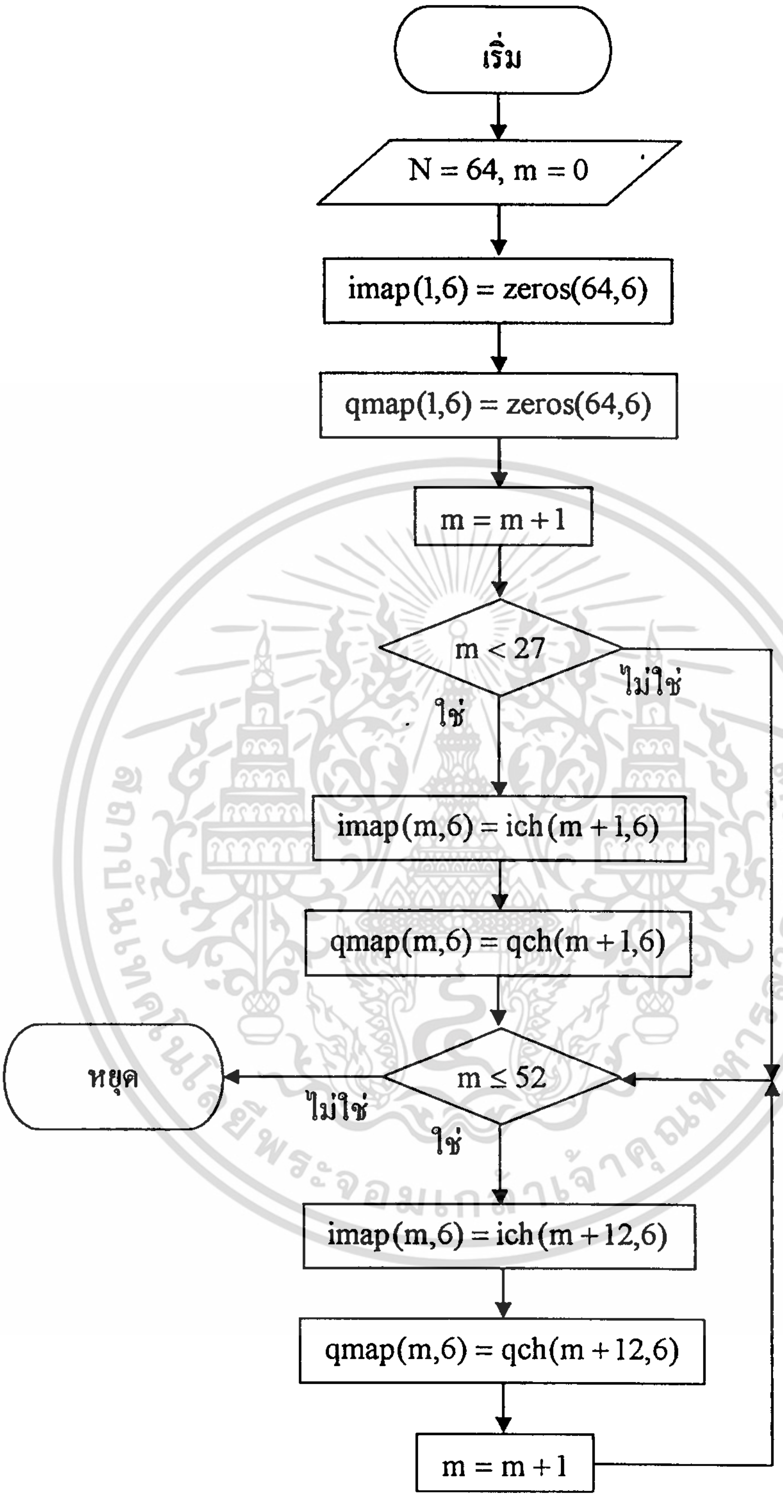


รูปที่ 4.6 ผังขั้นตอนการมอดูเลทแบบ QPSK

4.2.3 การแมปคลื่นพาห์ย่อย

เนื่องจากในระบบ OFDM-WLAN จะใช้คลื่นพาห์ย่อยเท่ากับ 48 คลื่นพาห์ และสำหรับในกรณีที่ไม่มีการใช้สัญลักษณ์ช่วย (Pilot symbol aid) จะใช้คลื่นพาห์ย่อย 52 คลื่นพาห์ โดยข้อมูลที่อยู่ช่องสัญญาณของคลื่นพาห์ที่เหลือจะถูกแทรกด้วยบิทศูนย์ การแมปคลื่นพาห์ย่อยแสดงได้ดัง flow chart ตามรูปที่ 4.7 โดยที่สัญญาณ ich และ qch จะเป็นข้อมูลแบบอาเรย์ที่มีขนาดเท่ากับ 52×6 และ หลังจากทำการแมปสัญญาณที่มอดูเลทแล้วดังกล่าวเข้ากับคลื่นพาห์ย่อยแล้วจะได้สัญญาณ imap และ qmap ที่มีอาเรย์ขนาด 64×6 ซึ่งจะเป็นอินพุตของกระบวนแปลงฟูริเยร์ผกผันต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผังขั้นตอนการแมปคลื่นพาห์ย่อย

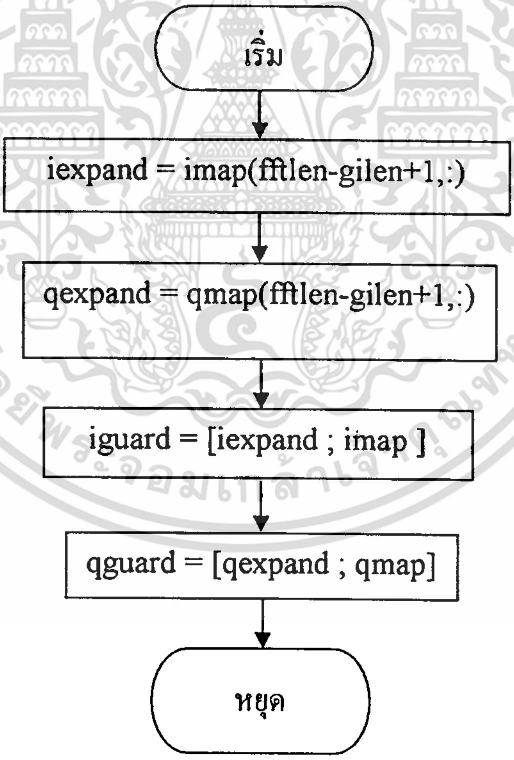
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็ว

สำหรับการแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็วสามารถใช้ฟังก์ชันภายในโปรแกรม MATLAB ได้ คือ ifft() โดยอินพุตที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบเร็วจะเป็นข้อมูลขนาน imap และ qmap ที่เป็นข้อมูลอาเรย์ขนาด 64×6 และ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสัญญาณเชิงซ้อนที่มีขนาดเท่ากัน คือ itran และ qtran

4.2.5 การแทรกสัญลักษณ์เวลาคุม

การแทรกสัญลักษณ์เวลาคุมสามารถทำได้โดยการทำซ้ำส่วนหลังของสัญลักษณ์ OFDM มาวางไว้ด้านหน้าของสัญลักษณ์โดยเลือกความยาวที่เหมาะสม และเนื่องจากในการแปลงฟูริเยร์ผกผันมีค่า $N = 64$ แต่เราต้องการให้มีช่วงเวลาคุมเท่ากับ $T_s / 4$ ดังนั้นจะกำหนดให้มีช่วงเวลาคุม $T_g = 16$ หรืออีกนัยหนึ่งเราสามารถบอกได้ว่า อัตราส่วน $T_g : T_s$ มีค่าเท่ากับ $1:4$ นั่นเอง จากรูปที่ 3.8 จะสามารถเขียนผังขั้นตอนได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผังขั้นตอนการแทรกสัญลักษณ์เวลาคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ช่องสัญญาณ

โมเดลของช่องสัญญาณแบ่งเป็นสองส่วนคือช่องสัญญาณเรลีย์ และ ช่องสัญญาณรบกวนขาวบวก โดยช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์จะแสดงถึงระบบที่ยังไม่มีการพิจารณาผลกระทบจากการจางหายของช่องสัญญาณหลายวิถี

4.2.6.1 แบบจำลองช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์

ในช่องสัญญาณนี้เราจะใช้ฟังก์ชันสร้างลำดับบิทข้อมูลสุ่มที่มีความยาวเท่ากับข้อมูลที่เท่ากับสัญญาณที่ถูกแทรกสัญลักษณ์เวลาคุมแล้วโดยสัญญาณที่ได้จะมีคุณสมบัติสอดคล้องกับสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ในหัวข้อ 4.1.3 โดยมีแผนผังการสร้างลำดับบิทดังรูปที่ 4.9 ทั้งนี้ความยาวของ iguard จะแตกต่างออกไปตามแบบจำลองที่มีการใช้ไดเวอร์ซิตีที่แตกต่างกัน โดยจะต้องหากำลังงานเฉลี่ยของลำดับบิทต่อเนื่องออกมาก่อน ค่าพลังงานต่อบิท และค่าความหนาแน่นกำลังงานของสัญญาณรบกวน E_b และ N_0 แสดงได้เป็น

$$E_b = \frac{P_b}{br} \tag{4.8}$$

$$N_0 = \frac{P_n}{sr} \tag{4.9}$$

โดยที่ค่า P_b และ P_n คือกำลังงานสัญญาณต่อสัญลักษณ์ และกำลังงานสัญญาณรบกวนต่อสัญลักษณ์ตามลำดับ ส่วนค่า br และ sr คืออัตราบิทและอัตราสัญลักษณ์ตามลำดับ ดังนั้นค่า E_b/N_0 จะคำนวณได้จาก

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_b}{br} \cdot \frac{sr}{P_n} \tag{4.10}$$

และเราสามารถหากำลังงานสัญญาณรบกวน P_n ได้จาก

$$P_n = \frac{P_b}{br} \cdot \frac{sr}{E_b/N_0} \tag{4.11}$$

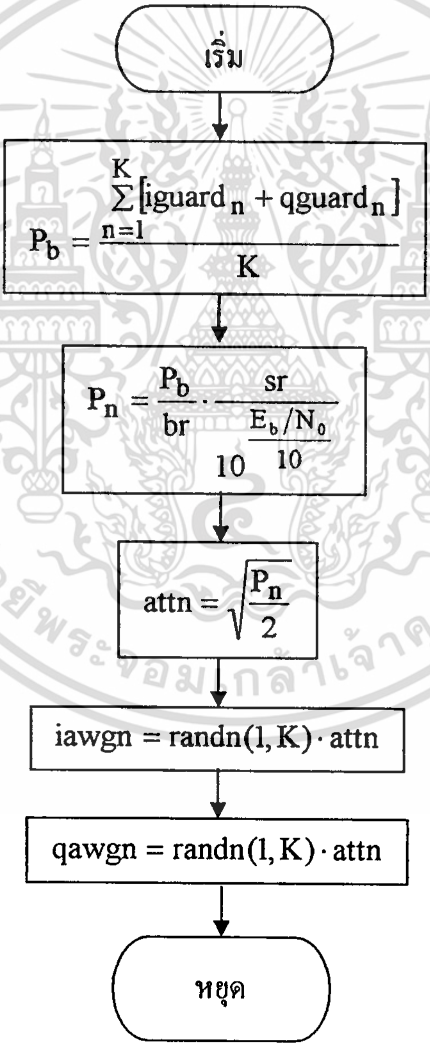
และเนื่องจากค่า E_b/N_0 อยู่ในหน่วยเดซิเบลดังนั้นจะเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_n = \frac{P_b}{br} \cdot \frac{sr}{10^{\frac{E_b/N_0}{10}}} \tag{4.12}$$

เนื่องสัญญาณที่ใช้ในการจำลองอยู่ในรูปแรงดัน ดังนั้นค่าการลดทอนที่ได้จะต้องแปลงให้อยู่ในรูปของแรงดันแสดงตามสมการที่ 4.13 และการสร้างสัญญาณรบกวนขาวบวกแสดงดังรูปที่ 4.9

$$\text{attn} = \sqrt{\frac{P_n}{2}} \tag{4.13}$$



รูปที่ 4.9 ผังขั้นตอนแบบจำลองช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์

โดยที่ค่า K คือจำนวนบิททั้งหมดที่ส่งผ่านช่องสัญญาณในระบบ

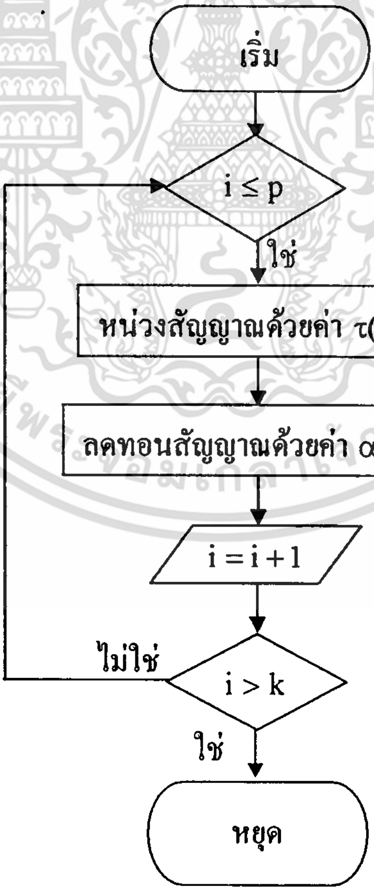
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6.2 แบบจำลองช่องสัญญาณเรลีย์

สำหรับช่องสัญญาณเรลีย์จะเป็นการพิจารณาระบบที่มีการพิจารณาถึงผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณหลายวิถี ซึ่งสอดคล้องกับสิ่งแวดล้อมภายในอาคาร ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาแบบจำลองที่มีจำนวนวิถี (path) คือ 1 2 และ 4 วิถี โดยตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.1 และแบบจำลองช่องสัญญาณเรลีย์แสดงในรูปที่ 4.10 และ โดยแบบจำลองที่ได้จะสอดคล้องกับสมการในหัวข้อที่ 3.9 โดยมีรายละเอียดของโปรแกรมในภาคผนวก

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองช่องสัญญาณเรลีย์

จำนวนวิถี p	1 วิถี	2 วิถี	3 วิถี
ค่าหน่วงเวลา $\tau(k)$ (μs)	0	0, 2	0, 2, 3, 4
ค่าอัตราการลดทอน $\alpha(k)$ (dB)	0	0, 20	0, 20, 30, 40
ความถี่ดอปเปลอร์ (Hz)	160		



รูปที่ 4.10 ผังขั้นตอนแบบจำลองช่องสัญญาณเรลีย์

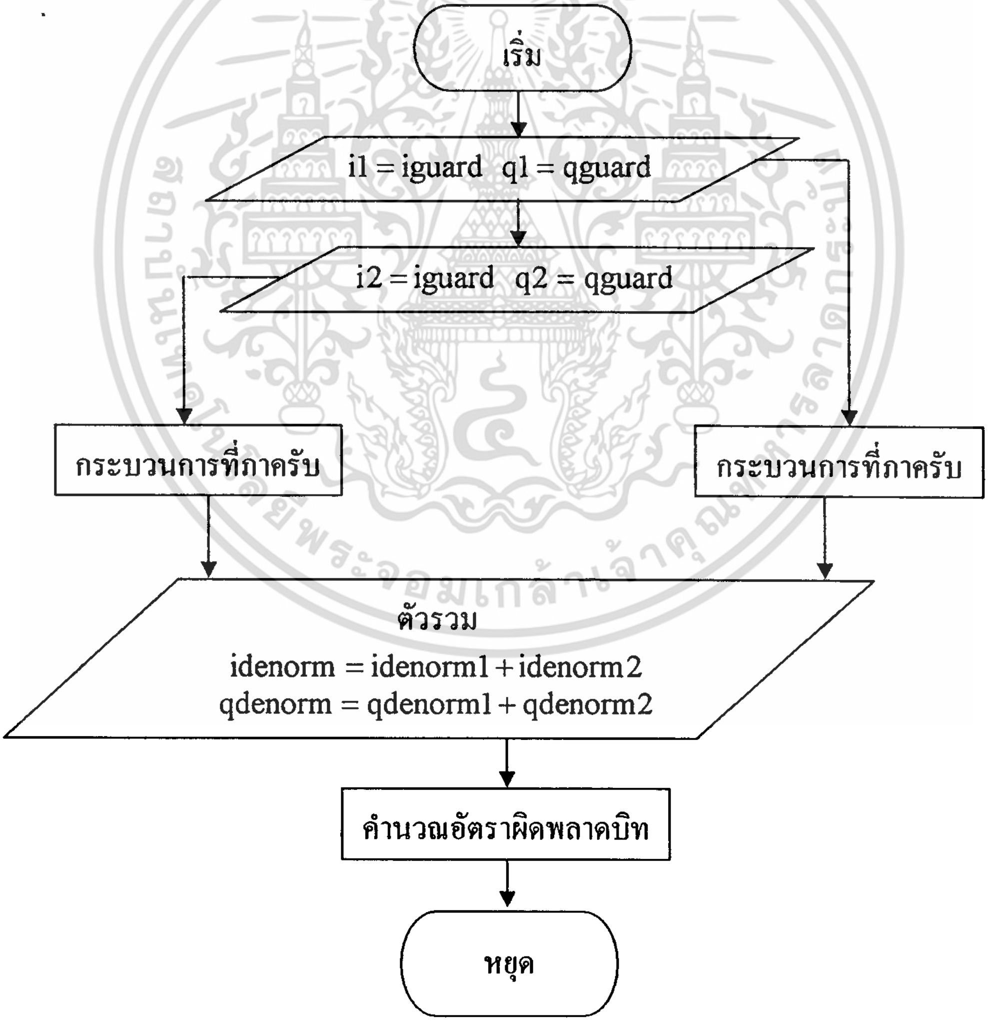
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 วิธีการไดเวอร์ซิตี

จากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ที่ต้องการวิเคราะห์ผลกระทบของการประยุกต์ใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีทั้งสองวิธีที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.3 ดังนั้นในการวิเคราะห์ระบบจึงจำเป็นจะต้องสร้างแบบจำลองของวิธีการไดเวอรซิตีทั้งสองวิธีด้วย

4.2.7.1 แบบจำลองของวิธีการไดเวอร์วิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด

ตามคุณสมบัติของวิธีการไดเวอร์วิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุดในหัวข้อ 3.3.1 สามารถเขียนแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.11 โดยทำการรวม (Combine) สัญญาณทั้งสองสาขาที่ผ่านช่องสัญญาณแบบต่างๆ เข้าด้วยกัน ก่อนผ่านกระบวนการของภาครับ ทั้งนี้สัญญาณทั้งสองสาขาจะได้รับผลกระทบจากสัญญาณจางหายหลายวิถีแตกต่างกัน ซึ่งเราสามารถทำได้โดยให้อัตราการลดทอนที่แตกต่างกันและถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนขาวที่แตกต่างกัน

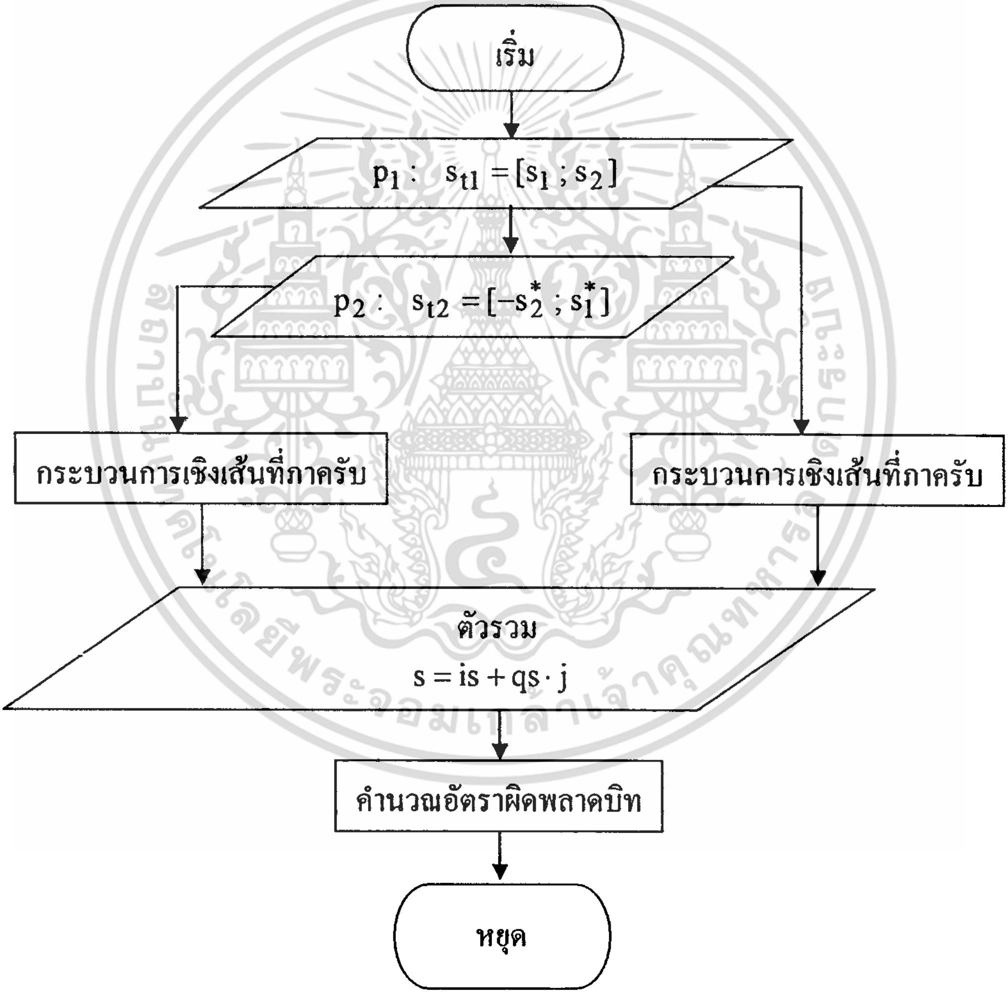


รูปที่ 4.11 ผังขั้นตอนแบบจำลองวิธีไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7.2 แบบจำลองของวิธีการไดเวอร์วิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลา

จากคุณสมบัติของวิธีการไดเวอร์วิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลาในหัวข้อ 3.3.2 สามารถเขียนแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.12 โดยทำการเข้ารหัสและหน่วงสัญญาณก่อนส่งออกไปในโดเมนเวลา และเช่นเดียวกับวิธีการรวมอัตราส่วนสูงที่สุด สัญญาณทั้งสองวิถีจะมีการลดทอนที่แตกต่างกันจากคุณสมบัติของการสร้างสัญญาณรบกวนสุ่ม และ ช่องสัญญาณที่แปรตามเวลา โดยกำหนดให้ $s_1 = is_1 + qs_1 \cdot j$ และ $s_2 = is_2 + qs_2 \cdot j$ เป็นสัญลักษณ์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และเมื่อถูกเข้ารหัสด้วย transmission matrix ตามรูปที่ 3.11 แล้วจะได้แบบจำลองดังรูป และให้ p_1 และ p_2 แทนตำแหน่งเส้นทางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

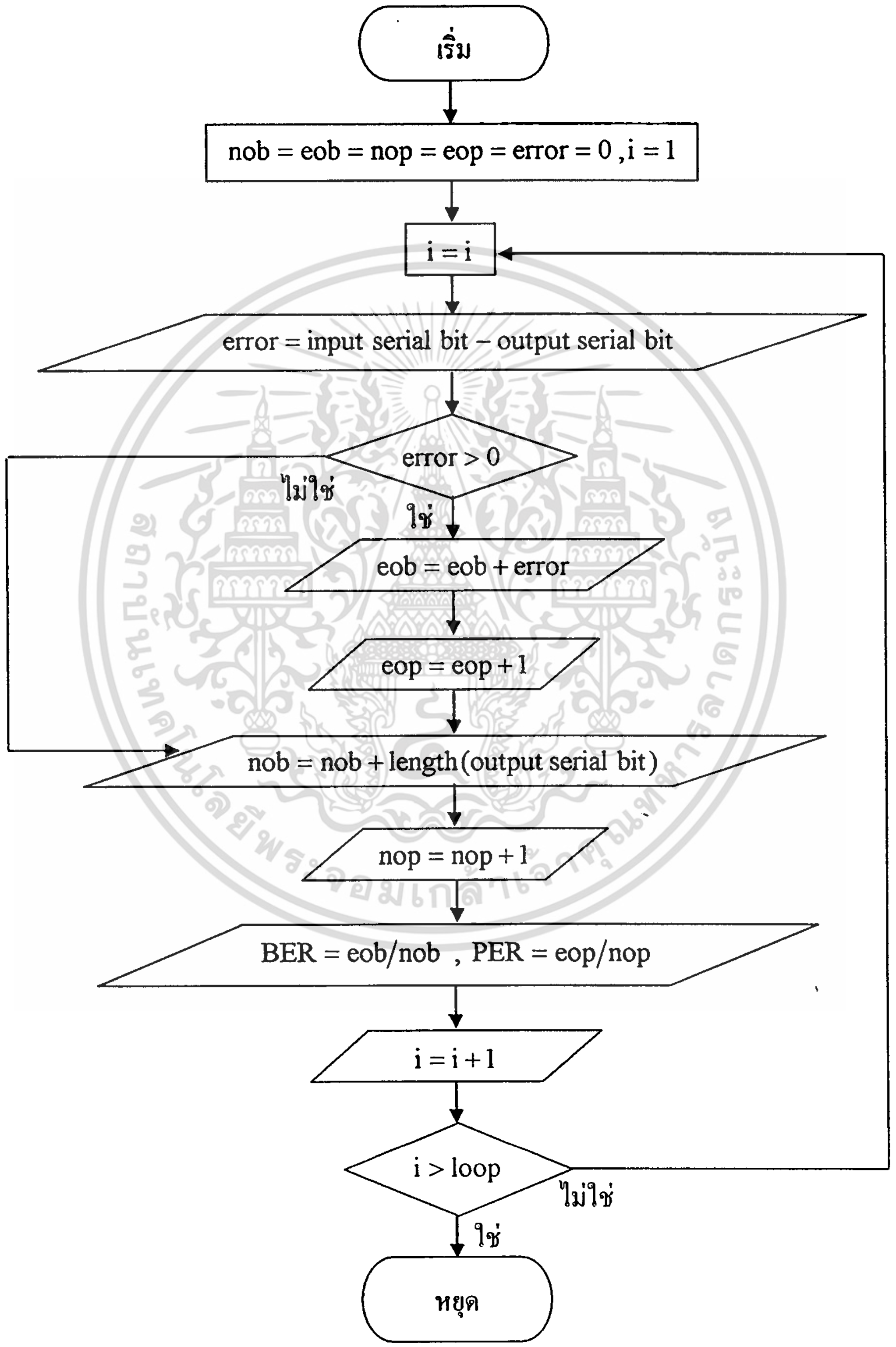


รูปที่ 4.12 ผังขั้นตอนแบบจำลองวิธีไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 แบบจำลองการคำนวณอัตราผิดพลาดบิทและแพกเก็ต

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจการคำนวณอัตราผิดพลาดบิทและแพคเก็ต จะได้กล่าวถึงเฉพาะการคำนวณสำหรับระบบใดๆ เท่านั้นดังรูปที่ 4.13 โดยในการจำลองระบบ ตัวแปรสุ่มที่นำมาคำนวณและได้รับจะแตกต่างกันออกไปตามกระบวนที่ใช้ในระบบ



รูปที่ 4.13 ผังขั้นตอนการคำนวณผิดพลาดบิทและแพกเก็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ OFDM – WLAN

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบจะอ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE802.11a [15] ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากนั้นโดยทำการสร้างแบบจำลองของระบบแล้วนำมาทำงานร่วมกัน

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ

วิธีการ	**พารามิเตอร์**
การเข้ารหัส (FEC)	รหัสคอนโวลูชัน 1/2 (Constraint length : K=7)
การมอดูเลท	BPSK และ QPSK
คลื่นพาห์ย่อย	48 คลื่นพาห์
สัญญาณนำ	4 คลื่นพาห์
คาบของสัญลักษณ์	3.2 us
คาบของช่วงเวลาคุม	0.8 us
แพกเก็ต OFDM	6 สัญลักษณ์ (ต่อหนึ่งแพกเก็ต)
อัตราสุ่ม	20 MHz
ช่องสัญญาณ	ช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ และ เรลีย์

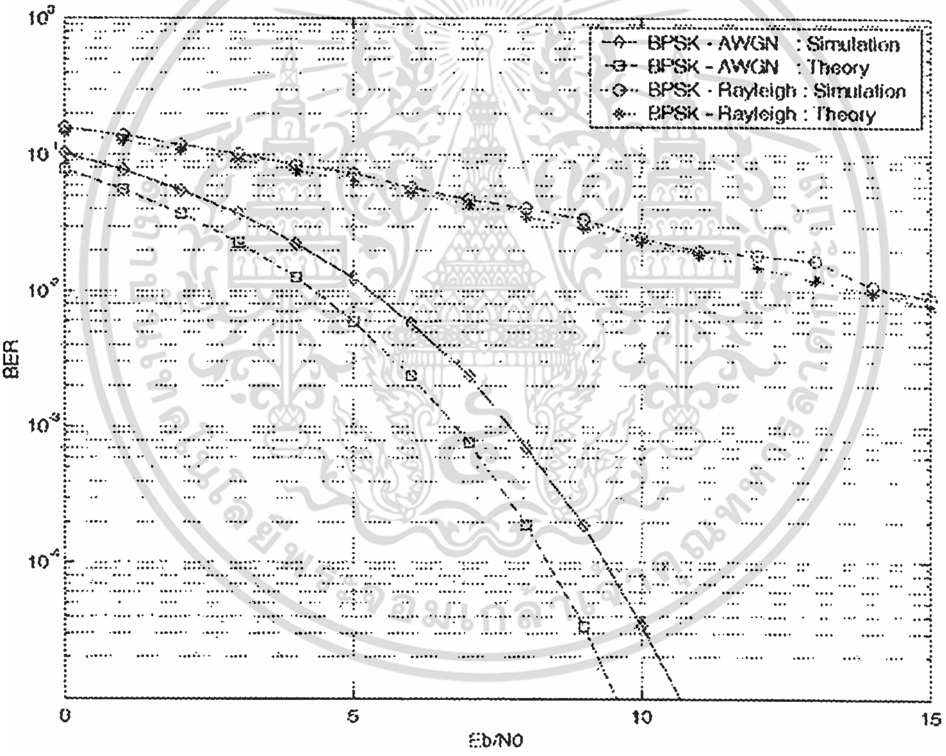
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการจำลองระบบ

ในบทนี้ได้ทำการวิเคราะห์และผลการจำลองระบบ OFDM-WLAN ในสภาวะที่แตกต่างกัน คือ การมอดูเลทสัญญาณ แบบจำลองช่องสัญญาณ การแทรกสัญลักษณ์เวลาคุม และ การใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ

5.1 อัตราผิดพลาดบิท (Bit Error Rate : BER)

5.1.1 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ได้จากทฤษฎีและการจำลองระบบ



รูปที่ 5.1 อัตราผิดพลาดบิทที่ได้จากการจำลองระบบและทฤษฎี

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าผลที่จากการจำลองระบบ (Simulation) และ ผลที่ได้จากทฤษฎี (Theory) มีค่าที่สอดคล้องกัน ทั้งนี้สำหรับกรณีของช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกจะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เนื่องมาจากจากการแทรกสัญลักษณ์เวลาสุ่มเพราะว่าในช่องสัญญาณ AWGN ไม่มีการหน่วงเวลาเกิดขึ้นจากสัญญาณหลายวิถีทำให้ลำดับบิทดังกล่าวทำให้มีค่าอัตราผิดพลาดบิทเพิ่มขึ้น ทั้งนี้จะเห็นว่าการมอดูเลทแบบ BPSK จะมีอัตราผิดพลาดบิทน้อยกว่า QPSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

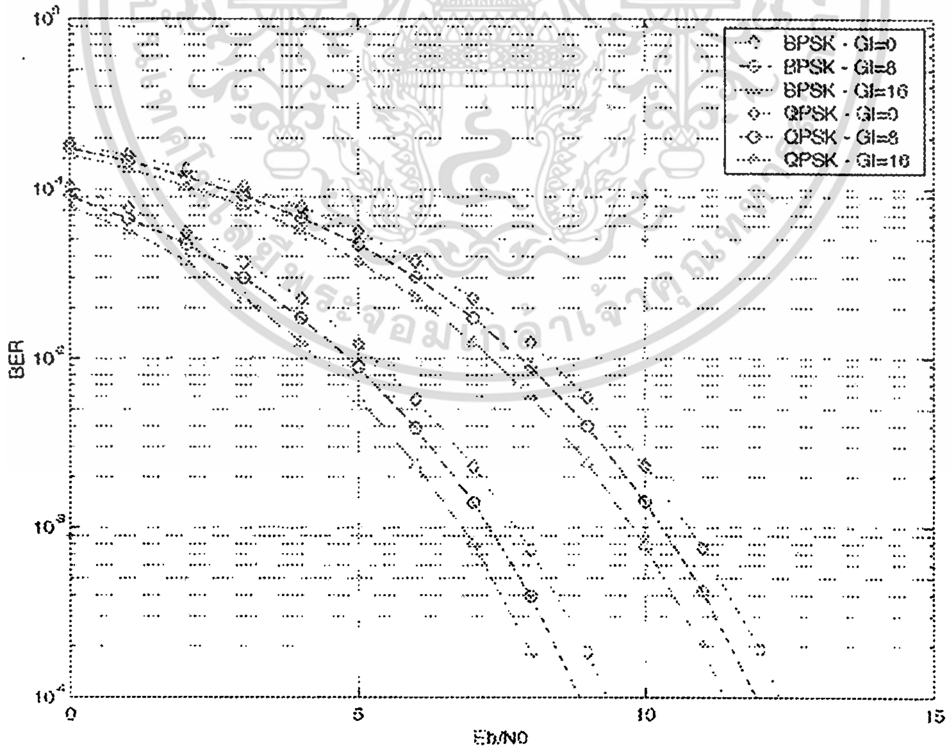
5.1.2 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการแทรกสัญลักษณ์เวลาคุม

เราทำการวิเคราะห์ระบบที่มีการแทรกสัญลักษณ์เวลาคุมที่มีจำนวณสัญลักษณ์ หรือคาบเวลาแตกต่างกันดังตารางโดยถ้าให้ช่องสัญญาณที่ใช้ในตัวแปลงฟูริเยร์เท่ากับ 64 สัญลักษณ์เราทราบว่าคาบของสัญลักษณ์เวลาคุมที่ใช้ $T_g < T_s/4$ หรือ $\frac{T_g}{T_s} < \frac{1}{4}$ ดังนั้นจึงให้สัญลักษณ์ที่ยาวที่สุดคือ 16 ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนที่สูงที่สุดและเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่น้อยกว่า

ตารางที่ 5.1 จำนวนและคาบของสัญลักษณ์เวลาคุม

จำนวนสัญลักษณ์	อัตราส่วน $T_g : T_s$
8	1:8
16	1:4

จากรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าการแทรกเวลาคุมในระบบจะทำให้อัตราผิดพลาดบิทลดลงเนื่องจากการแทรกสัญลักษณ์จะทำให้ลดผลกระทบจากการแทรกสอดสัญลักษณ์เนื่องจากสัญญาณมาถึงเครื่องรับไม่พร้อมกัน



รูปที่ 5.2 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการแทรกสัญลักษณ์เวลาคุมที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

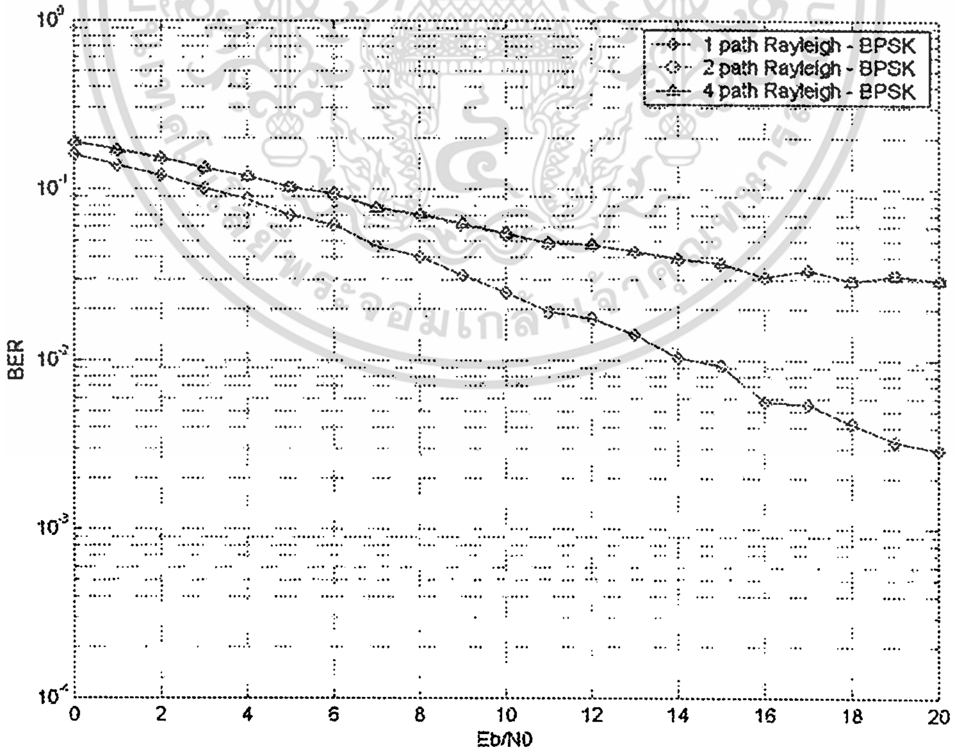
5.1.3 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้ช่องสัญญาณแบบเรลีย์

เมื่อวิเคราะห์ระบบที่ใช้ช่องสัญญาณเรลีย์จะพบว่าจำนวนวิถีของสัญญาณที่เข้าสู่เครื่องรับจะมีผลต่ออัตราผิดพลาดบิทของระบบ เมื่อพิจารณาจากผลรวมที่เสริมหรือหักล้างกันของสัญญาณแต่ละวิถี ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกันคืออัตราลดทอนหรือการจางหาย และ ค่าหน่วงเวลาของสัญญาณแต่ละวิถี โดยที่เวลาหน่วงในตารางที่ 5.2 จะเป็นเวลาที่เปรียบเทียบกับสัญญาณแรก

ตารางที่ 5.2 ค่าการลดทอน และ ค่าหน่วงเวลาของสัญญาณหลายวิถี

จำนวนวิถี	ค่าลดทอน (dB)	เวลาหน่วง (μs)
1	0	0
2	0, 20	0, 2
4	0, 20, 30, 40	0, 2, 3, 4

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นว่าอัตราผิดพลาดบิทจะแปรตามจำนวนวิถีในช่องสัญญาณเรลีย์ โดยเมื่อมีจำนวนวิถีมากขึ้นและสัญญาณที่เข้าถึงช้ามีขนาดสัญญาณเนื่องจากอัตราลดทอนที่ต่ำจะมีผลกระทบต่ออัตราผิดพลาดบิทน้อยลงมากดังกราฟในรูปที่ 5.3



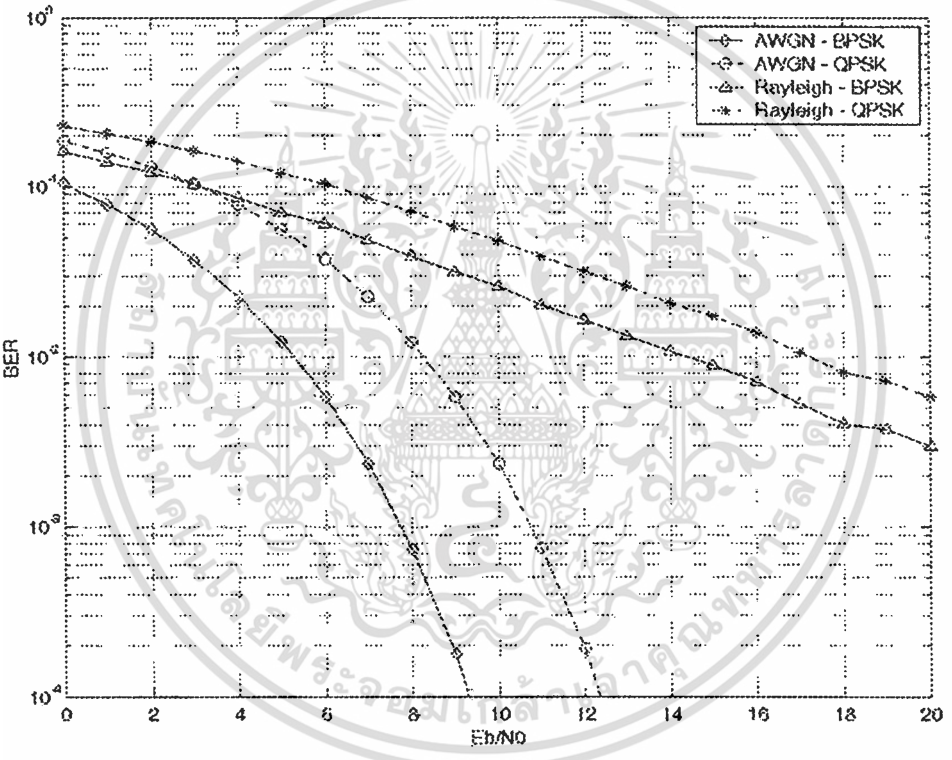
รูปที่ 5.3 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้ช่องสัญญาณแบบเรลีย์และมีจำนวนวิถีแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ไม่มีวิธีการไดเวอร์ซิตี

เมื่อวิเคราะห์ระบบที่ไม่มีการประยุกต์ใช้วิธีไดเวอร์ซิตีจะพบว่าแนวโน้มของเส้นกราฟในรูปที่ 5.4 สอดคล้องกับการวิเคราะห์อัตราผิดพลาดบิทในรูปที่ 5.1 นั่นคือการมอดูเลทแบบ BPSK จะให้อัตราบิทผิดพลาดน้อยกว่า และ ในช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ก็จะมีอัตราผิดพลาดบิทน้อยกว่าช่องสัญญาณเรลีย์เนื่องจากไม่มีผลกระทบจากการจางหายของสัญญาณหลายวิถีนั่นเอง

ช่องสัญญาณที่ใช้เป็นช่องสัญญาณเรลีย์ 1 วิถี และใช้การแทรกช่วงเวลาคุมที่มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 1 : 4



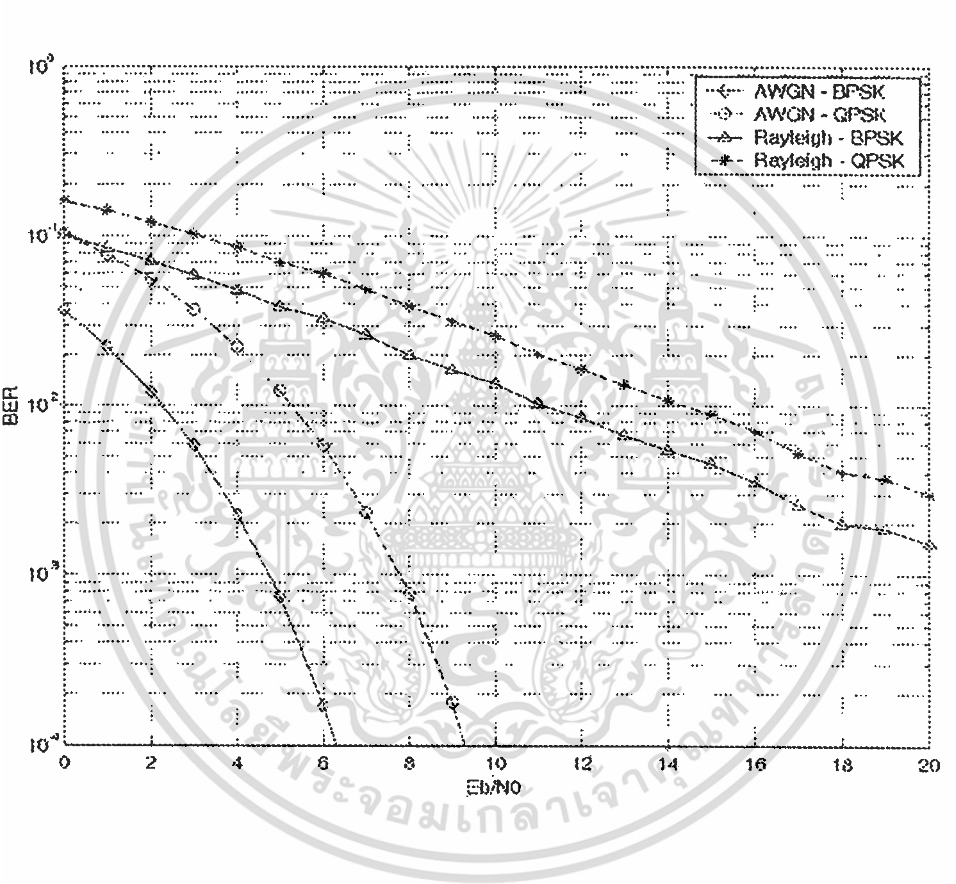
รูปที่ 5.4 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ไม่มีวิธีการไดเวอร์ซิตี (1 Tx – 1 Rx)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.5 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด

อัตราบิทผิดพลาดจะมีค่าลดลงประมาณ 2dB สำหรับในช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ ส่วนในช่องสัญญาณเรลีย์การประยุกต์วิธีการไดเวอร์ซิตีก็มีแนวโน้มของกราฟเช่นเดียวกันคือมีค่าอัตราผิดพลาดบิทลดลงประมาณ 2.5dB เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตี

ช่องสัญญาณที่ใช้เป็นช่องสัญญาณเรลีย์ 1 วิถี และใช้การแทรกช่วงเวลาคุมที่มีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 1 : 4

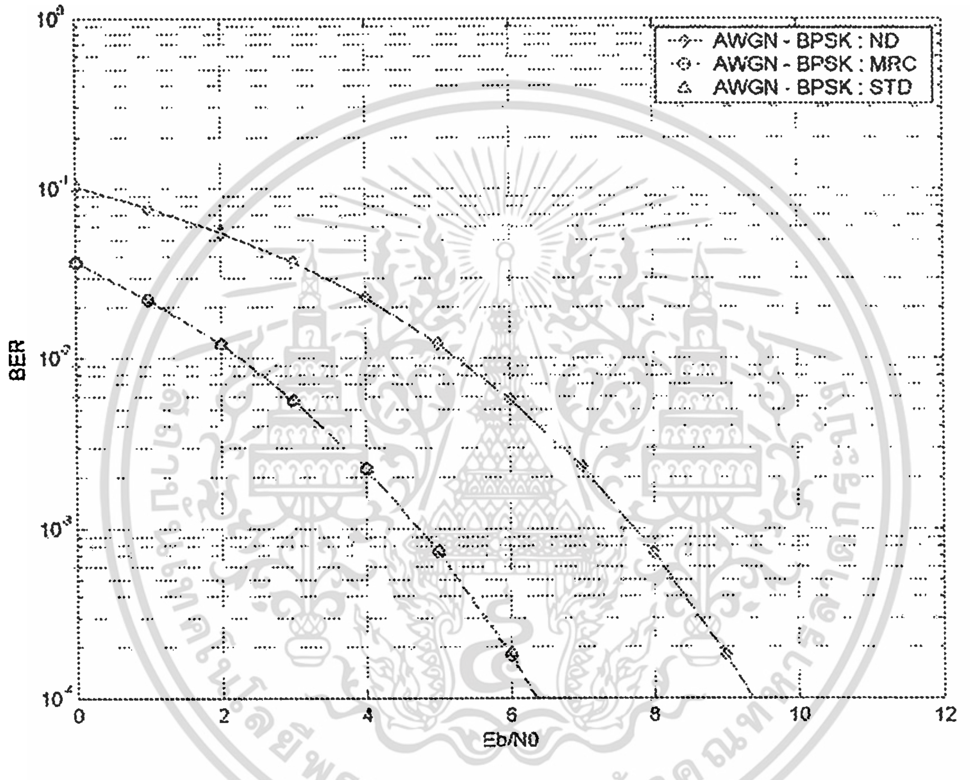


รูปที่ 5.5 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด (2 Tx – 1 Rx)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.6 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ในช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ และ มีการมอดูเลทแบบ BPSK

จากการจำลองระบบพบว่าอัตราบิทผิดพลาดของการประยุกต์วิธีการไดเวอร์ซิตีที่มีจำนวนสาขา 2 สาขา พบว่าสามารถลดอัตราผิดพลาดบิทได้ในระดับเดียวกัน โดยจะเห็นว่าทั้งวิธีรวมอัตราส่วนสูงที่สุด และ การเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลา สามารถทำให้ Eb/N0 ลดลงประมาณ 2.5dB เมื่อพิจารณาที่ค่าอัตราผิดพลาดบิทเท่ากับ 10^{-3}

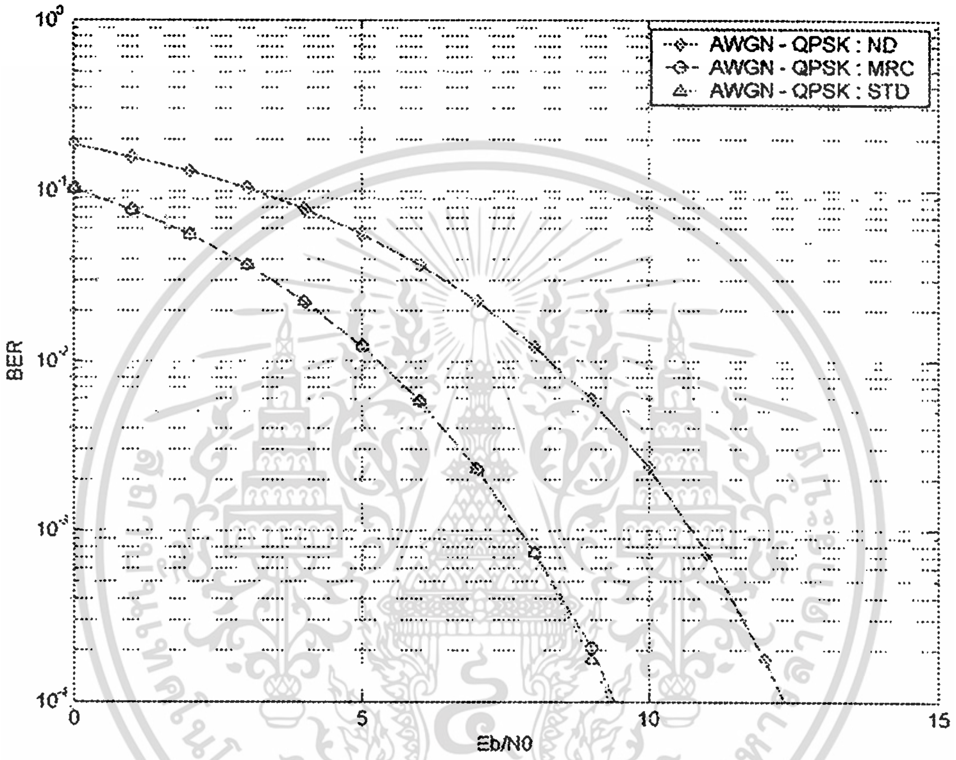


รูปที่ 5.6 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตีเมื่อมีการมอดูเลทแบบ BPSK ในช่องสัญญาณ AWGN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.7 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ในช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ และ มีการมอดูเลทแบบ QPSK

สำหรับกรณีของระบบที่มีการมอดูเลทแบบ QPSK เส้นกราฟของอัตราผิดพลาดบิทที่ทำการจำลองระบบที่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ เปรียบเทียบกันในช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์จะมีแนวโน้มเหมือนกันระบบมอดูเลทแบบ BPSK แต่จะมีอัตราผิดพลาดบิทที่สูงกว่า

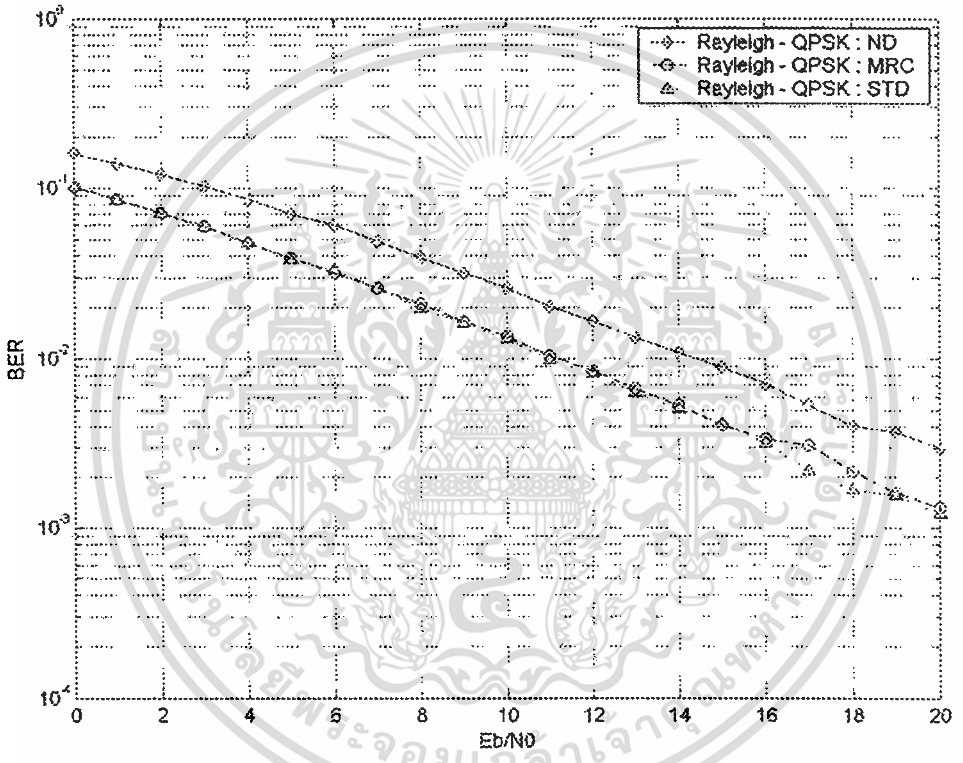


รูปที่ 5.7 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการใช้วิธีการ ไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตีเมื่อมีการมอดูเลทแบบ QPSK ในช่องสัญญาณ AWGN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.8 อัตราผิดพลาดบิทของระบบที่ใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ในช่องสัญญาณเรลีย์ และ มีการมอดูเลทแบบ BPSK

ในกรณีที่ทำการจำลองระบบในช่องสัญญาณเรลีย์ซึ่งสอดคล้องกับสิ่งแวดล้อมจริงมากกว่า จะพบว่าแนวโน้มที่ได้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ นั่นคือวิธีการไดเวอร์ซิตีทั้งสองแบบสามารถลดอัตราผิดพลาดบิทของระบบได้ และ สังเกตได้ว่าวิธีการไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่งหรือวิธีเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลา นั้นสามารถใช้ทดแทนวิธีการไดเวอร์ซิตีสายอากาศรับได้โดยให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก



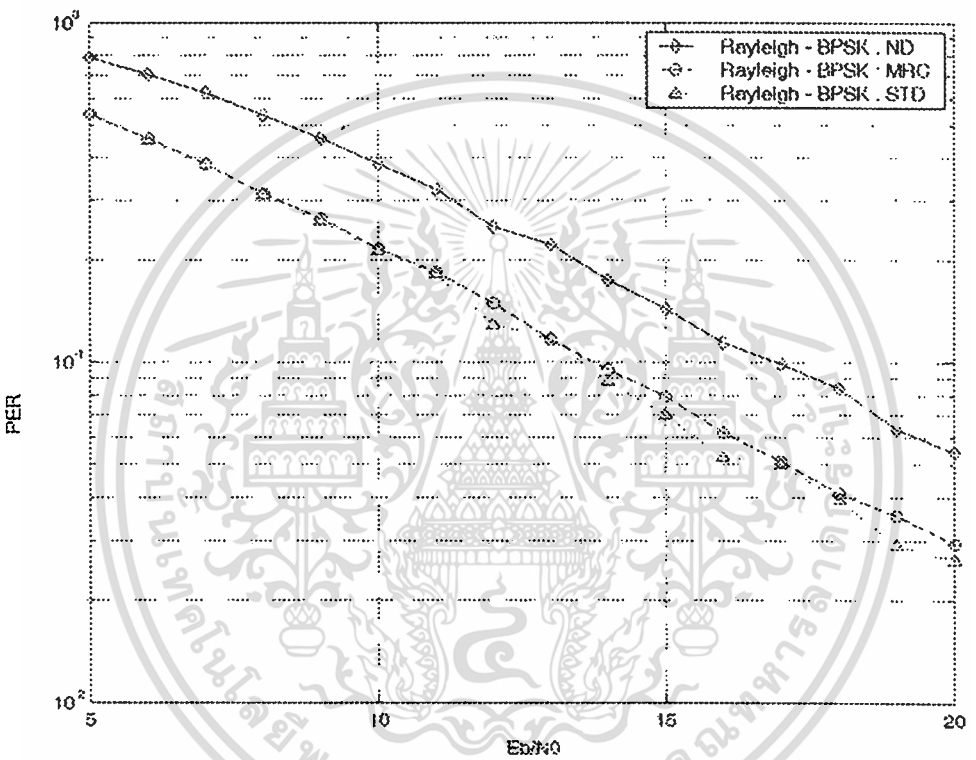
รูปที่ 5.8 ตราผิดพลาดบิทของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตีเมื่อมีการมอดูเลทแบบ BPSK ในช่องสัญญาณเรลีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 อัตราผิดพลาดแพกเก็ต (Packet Error Rate : PER)

ค่าอัตราผิดพลาดแพกเก็ตจะเกิดขึ้นเมื่อใน 1 แพกเก็ตที่รับมาสามารถถูกตรวจจับได้ว่ามีบิทที่ผิดพลาดเกิดขึ้นตั้งแต่ 1 บิทขึ้นไป

5.2.1 อัตราผิดพลาดแพกเก็ตของระบบที่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ ในช่องสัญญาณเรลีย์ และมีการมอดูเลทแบบ BPSK

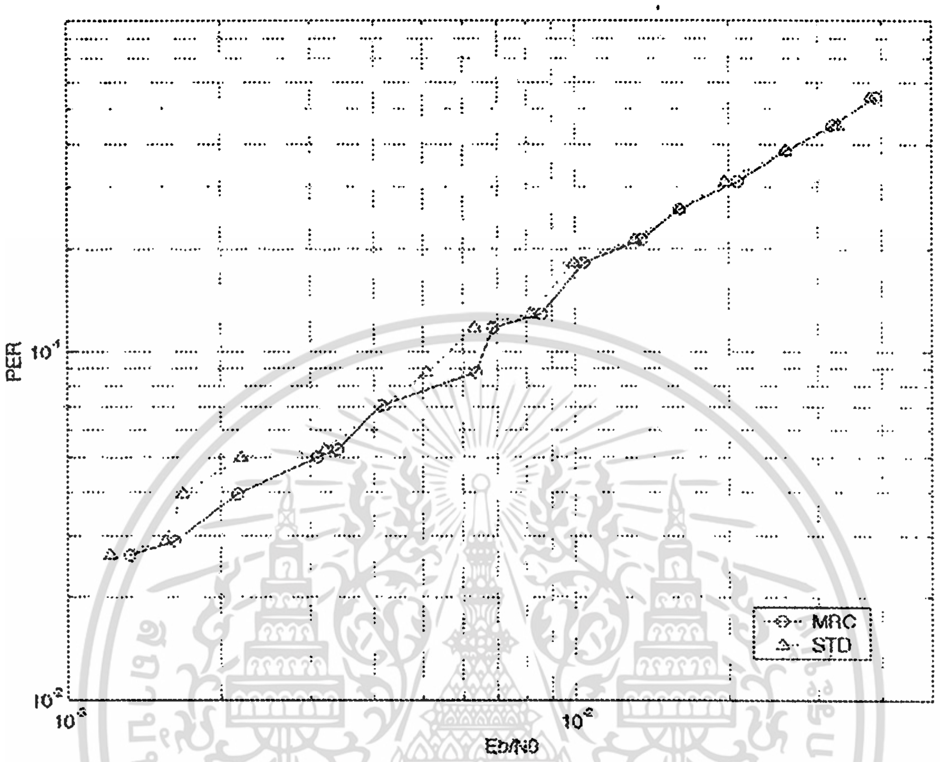


รูปที่ 5.9 อัตราผิดพลาดแพกเก็ตของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไดเวอร์ซิตีเมื่อมีการมอดูเลทแบบ BPSK ในช่องสัญญาณเรลีย์

จากรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของผลการวิเคราะห์อัตราผิดพลาดแพกเก็ตจะคล้ายคลึงกับอัตราผิดพลาดบิทในรูปที่ 5.8 โดยพบว่าเมื่อมีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลา จะทำให้ค่า E_b/N_0 ลดลงประมาณ 3 dB ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด และ มีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีวิธีไดเวอร์ซิตี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 เปรียบเทียบอัตราผิดพลาดบิท และ อัตราผิดพลาดแพกเก็ตของระบบที่มีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีแบบ MRC และ STD



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบอัตราผิดพลาดแพกเก็ต และ อัตราผิดพลาดบิตของระบบที่มีการใช้วิธีการไดเวอร์ซิตีแบบ MRC และ STD

จากรูปที่ 5.10 จะพบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผิดพลาดแพ็กเกต และ อัตราผิดพลาดบิท แปรผันตามกันและมีลักษณะที่ค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นโดยที่เมื่อค่าอัตราผิดพลาดบิทเพิ่มขึ้น อัตราความผิดพลาดแพ็กเกตจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปและวิจารณ์ผลการจำลองระบบ

6.1 สรุปและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลในชั้นกายภาพ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ในระบบรวมถึงวิธีการไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลาที่นำมาใช้

โดยเริ่มจากผลการจำลองระบบเปรียบเทียบจากสมการอัตราผิดพลาดบิททางทฤษฎีและจากการจำลองระบบพบว่าแนวโน้มของอัตราผิดพลาดบิทที่ได้จากการจำลองระบบจะสอดคล้องกับผลที่ได้ทางทฤษฎี ถึงแม้ว่าในช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์จะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1 dB แต่สามารถทำการชดเชยในการจำลองระบบได้

และเมื่อพิจารณาระบบที่มีการแทรกสัญลักษณ์เวลาคุมที่มีคาบแตกต่างกันพบว่าระบบจะมีอัตราผิดพลาดบิทลดลงเมื่อช่วงของคาบสัญลักษณ์ที่แทรกเข้าไปเพิ่มขึ้น และมีอัตราผิดพลาดบิทต่ำที่สุดเมื่ออัตราส่วนของคาบสัญลักษณ์เวลาคุมต่อคาบสัญลักษณ์ OFDM มีค่าเท่ากับ 1 : 4 และเรายังสามารถสังเกตได้ว่าการมอดูเลทแบบ BPSK จะมีอัตราส่วนของพลังงานบิทต่อความหนาแน่นสัญญาณรบกวน E_b/N_0 น้อยกว่าการมอดูเลทแบบ QPSK อยู่ประมาณ 3.5 dB

พิจารณาช่องสัญญาณเรลีย์ที่มีวิถีแตกต่างกัน พบว่าจำนวนวิถีเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 วิถีจะทำให้อัตราผิดพลาดบิทเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อจำนวนวิถีเพิ่มเป็น 4 วิถีผลกระทบจากการหน่วงเวลาและลดทอนแอมปลิจูดจะน้อยลงเนื่องจากสัญญาณที่มีการหน่วงเวลามากกว่าการหน่วงเวลาสูงสุด (Exceed delay) จะถือว่ามีผลกระทบต่อระบบน้อยมาก สังเกตได้จากผลการจำลองระบบเนื่องจากจำนวนวิถี 2 และ 4 วิถีมีเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกันมาก

และสุดท้ายทำการจำลองระบบที่มีวิธีไดเวอร์ซิตีแบบต่างๆ โดยที่วิธีไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุดเป็นตัวแทนของไดเวอร์ซิตีสายอากาศรับ และไดเวอร์ซิตีแบบเข้ารหัสตำแหน่ง – เวลาเป็นตัวแทนของไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่ง จากการจำลองระบบจะเป็นได้ว่าการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีทั้ง 2 ประเภทสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลกับระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายได้ และยังพบว่าวิธีไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่งสามารถให้ประสิทธิภาพแก่ระบบได้ใกล้เคียงกับวิธีการไดเวอร์ซิตีแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุดซึ่งเป็นวิธีที่ใช้มานาน โดยอัตราผิดพลาดบิทและอัตราผิดพลาดแพกเก็ตที่ได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

เนื่องมากจากข้อดีของวิธีการไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่ง (2 Tx – 1 Rx) ต่อวิธีการไดเวอร์ซิตีสายอากาศรับ (1 Tx – 2 Rx) คือเมื่อพิจารณาสายอากาศที่เครื่องส่ง (Access point) มีจำนวนน้อยกว่า ดังนั้นหากใช้สายอากาศมากกว่าที่เครื่องส่งจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในระบบได้ มากกว่าการใช้สายอากาศจำนวนมากกว่าที่เครื่องรับ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้พิจารณาให้มีการไดเวอร์ซิตีสายอากาศส่งจากเครื่องส่งไปสู่เครื่องรับของผู้ใช้โดยยังไม่ได้พิจารณาถึงไดเวอร์ซิตีจากเครื่องรับมาสู่เครื่องส่ง ทั้งนี้สามารถกระทำได้ถ้าใช้สายอากาศส่งและรับเป็นแบบอาเรย์หรือเป็นระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (Multi Input – Multi Output : MIMO) แต่ทั้งนี้ความยุ่งยากในกระบวนการประมวลสัญญาณก็จะมีมากขึ้นด้วย

นอกจากนี้อาจมีการวิเคราะห์ระบบที่มีการประมาณช่องสัญญาณ หรือการชดเชยสัญญาณในลักษณะต่างๆ เพื่อให้ระบบมีความสมรรถนะที่ดีขึ้นได้ รวมทั้งวิเคราะห์ค่าทรูพุตของระบบเพิ่มเติมเนื่องจากวิธีการต่างๆ ที่นำมาใช้จะมีผลต่อทรูพุตของระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Chang R.W. and Gibby R.A. "A Theoretical Study of the Performance of and Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme." IEEE Trans. Commu., Vol.COM-16, No.4, pp.527-540, Aug 1968.

[2] Chang R.W. "Synthesis of band – limited orthogonal signals for multichannel data transmission." Bell System Tech, Journal, Vol.45 pp.1775-1796, Dec. 1966.

[3] Alamouti S.M, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communication.", IEEE J. Sel. Areas Commu. Vol.16, No.8, pp.1451-1458, Oct. 1998.

[4] Li. Y., Seshadri N. and Ariyavisitakul. "Transmit Diversity for OFDM System with Mobile Wireless Channels." IEEE, 1998.

[5] Fan P.Y., Li J. and Cao Z. "Transmit Diversity Scheme with Power Control for Wireless Communication." IEICE Trans. Commu. Vol.E84-B, No.7, Jul. 2001.

[6] Boumard S. and Mammela A. "Channel Estimation Versus Equalization in an OFDM WLAN System." IEEE, 2001.

[7] Bang Y.J., Jeong G.Y and Kim C.J. "Performance analysis and design of pilot-symbol aided TCM a Rayleigh fading channel" IEE Proc. Commu., Vol.146, No.3, Jun. 1999.

[8] Popovic B.M. "New Complex Space – Time Block Codes for Efficient Transmit Diversity." IEEE 6th Symp. On Spread Spectrum Tech. & Appli, NJIT, USA, Sep. 2000.

[9] Sampei S. **Application of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Communication.**, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.

[10] Prasad R., **Universal Wireless Personal Communication,** Norwood, MA: Artech House, 1996.

[11] Proakis J.G. **Digital Communication.**, 3rd Edition., New York: McGraw – Hill, 1995.

[12] Heiskala. J. and Terry. J. **OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide.**,Indianapolis: Sams Publishings, 2002.

[13] Jitrangsri T. and Sitichivapak S. "Enhancement of Data Transmission in OFDM – WLAN System Using Transmit Diversity Method," Proceeding of IEEE International Symposium on Circuit and System, vol.1, [CD-ROM] , May. 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] Jeruchim M.C., Balaban P. and Shanmugan K.S. **Simulation of Communication Systems : Modeling Methodology and Techniques.** Second Edition, New York: Plenum Publishers, 2000.

[15] IEEE P802.11a. "High Speed Physical Layer (PHY) in 5 GHz band," Nov., 2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

Source Code

ก.1 ชุดคำสั่งที่ใช้เรียกชุดคำสั่งย่อยและเขียนกราฟ

```
clear
pom=cputime;
init=0; fin=20; step=1;
loopa=5000; loopr=200000; pathr=1;
ebn0=[init:step:fin];
ber1=bpsk_rayleigh(init,fin,step,loopr,pathr);
ber2=br_mrc(init,fin,step,loopr,pathr);
ber3=br_std(init,fin,step,loopr,pathr);

semilogy(ebn0,ber1,'r-d',ebn0,ber2,'b--o',ebn0,ber3,'k:^');   %'r:s','m-.^'
legend('Rayleigh - QPSK : ND','Rayleigh - QPSK : MRC','Rayleigh - QPSK : STD');
axis([0 fin 0.0001 1]);
xlabel('Eb/N0'); ylabel('BER'); grid;
tauw=cputime;
period=tauw-pom;
fprintf('%c\%4.2d\%c\n','Simulation time is ',period,' seconds')
```

ก.2 ชุดคำสั่งจำลองระบบในช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ที่มีการมอดูเลทแบบ BPSK

```
function ber=bpsk_awgn(init,fin,step,loopa)
%clear
%init=0; step=1; fin=15;

s1=cputime;
%---------------------------------------
%       OFDM parameters set up
%---------------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
para=52;
fftlen=64;
noc=53;
gilen=16;

%---------------------------------------
%        parameters set up
%---------------------------------------
nsym=21;
nsamp=8;
%pack=16;
nd=6;
total=nd*para;
ml=1;
sr=256000;
br=ml*sr;
rollfac=0.5;
ebn0=[init:step:fin];
m=length(ebn0);
fprintf('\n')

t=1;
while t<=m

noe=0; nob=0; iii=1; loop=loopa;
while iii<=loop
serial=rand(1,total)>0.5;

%---------------------------------------
%        BPSK modulation
%---------------------------------------
map=2.*serial-1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%--------------------------------------
%              S/P
%--------------------------------------
parallel=reshape(map,para,nd);

%--------------------------------------
%        Carrier Mapping
%--------------------------------------
qdata=zeros(fftlen,nd);
[imap,qmap]=crmap1(parallel,qdata,fftlen,nd);

%--------------------------------------
%        Complex signaling
%--------------------------------------
z1=imap+qmap.*i;
z2=ifft(z1);
iout=real(z2);
qout=imag(z2);

%--------------------------------------
%     Guard interval insertion
%--------------------------------------
fftlen2=fftlen+gilen;
[iguard,qguard]=guard1(iout,qout,fftlen,gilen,nd);

%--------------------------------------
%     Define Power of signal
%--------------------------------------
sp=sum(iguard.^2+qguard.^2)/(nd*para);   %para*nsamp*nsym
amp_fade=0.5*sp*sr/(br*10^(ebn0(1,t)/10));
amp_fade=sqrt(amp_fade);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%---------------------------------------
% Additive White Gaussian Noise Adding
%---------------------------------------
iawgn=randn(1,length(iguard)).*amp_fade;
qawgn=randn(1,length(qguard)).*amp_fade;
inoise_add=iguard+iawgn;
qnoise_add=qguard+qawgn;

%---------------------------------------
%    Guard interval removed
%---------------------------------------
[igrem,qgrem]=guardrem1(inoise_add,qnoise_add,fftlen2,gilen,nd);

%---------------------------------------
%       Decomplex signaling
%---------------------------------------
v=fft(igrem+(qgrem.*i));
iin=real(v);
qin=imag(v);

%---------------------------------------
%         Carrier demapping
%---------------------------------------
[idemap,qdemap]=crdemap1(iin,qin,fftlen,nd);

%---------------------------------------
%              P/S
%---------------------------------------
d=reshape(idemap,1,para*nd);

%---------------------------------------
%        Demodulation
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%--------------------------------------
demo=d>0;

%--------------------------------------
%     Bit Error Rate Calculation
%--------------------------------------

   error=sum(abs(demo-serial));
   noe=noe+error;
   nob=nob+length(serial);
   %fprintf('%d\t%d\t%e\n',i-1,error,noe/nob);
   if mod(loop,iii)==0
   fprintf('%c','#');
   else
   end
   iii=iii+1;
end %end of simulation loop

fprintf('\n');
ber(1,t)=noe/(nob);
fprintf('%d\t%d\t%e\n',t,ebn0(1,t),ber(1,t))
t=t+1;

end %end of plot loop

ber1=ber;
s2=cputime;
period=s2-s1;
fprintf('%c\%4.2d\%c\n','Simulation time is ',period,' seconds')
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 ชุดคำสั่งจำลองระบบในช่องสัญญาณรบกวนขาวบวกแบบเกาส์ที่มีการมอดูเลท แบบ QPSK

```
function [ber3]=qpsk_awgn(init,fin,step,loopa)
%clear
%init=0; step=1; fin=20;
s1=cputime;
%---------------------------------------
%       OFDM parameters set up
%---------------------------------------
para=52;
fftlen=64;
noc=53;
gilen=16;

%---------------------------------------
%       parameters set up
%---------------------------------------
nsym=21;
nsamp=8;
pack=16;
nd=6;
ml=2;
total=nd*para*ml;
sr=256000;
br=ml*sr;
rollfac=0.5;
ebn0=[init:step:fin];
m=length(ebn0);
fprintf('\n')

t=1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
while t<=m

noe=0; nob=0; iii=1; loop=loopa;
while iii<=loop
serial=rand(1,total)>0.5;

%--------------------------------------
%              S/P
%--------------------------------------
stp=reshape(serial,para,nd*ml);

%--------------------------------------
%         QPSK modulation
%--------------------------------------
[imod,qmod]=qpskmod3(stp,para,nd,ml);

%--------------------------------------
%     Normalize by Mod. Coeff
%--------------------------------------
kmod=1/sqrt(2);
inorm=imod.*kmod;
qnorm=qmod.*kmod;

%--------------------------------------
%        Carrier Mapping
%--------------------------------------
[imap,qmap]=crmap3(inorm,qnorm,fftlen,nd);

%--------------------------------------
%        Complex Signal
%--------------------------------------
z1=imap+qmap.*i;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
z2=ifft(z1);
itran=real(z2);
qtran=imag(z2);

%--------------------------------------
%     Guard interval insertion
%--------------------------------------
fftlen2=fftlen+gilen;
[iguard,qguard]=guard3(itran,qtran,fftlen,gilen,nd);

%--------------------------------------
%     Define Power of signal
%--------------------------------------
sp=2*sum(iguard.^2+qguard.^2)/(para*nd);  %nd*para*pack
amp_fade=0.5*sp*sr/(br*10^(ebn0(1,t)/10));
amp_fade=sqrt(amp_fade);

%--------------------------------------
% Additive White Gaussian Noise Adding
%--------------------------------------
iawgn=randn(1,length(iguard)).*amp_fade;
qawgn=randn(1,length(qguard)).*amp_fade;
inoise_add=iguard+iawgn;
qnoise_add=qguard+qawgn;

%--------------------------------------
%     Guard interval removed
%--------------------------------------
[igrem,qgrem]=guardrem3(inoise_add,qnoise_add,fftlen2,gilen,nd);

%--------------------------------------
%     Complex signal
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%---------------------------------------
y1=igrem+qgrem.*i;
y2=fft(y1);
ire=real(y2);
qre=imag(y2);

%---------------------------------------
%        Carrier demapping
%---------------------------------------
[idemap,qdemap]=crdemap3(ire,qre,fftlen,nd);
idenorm=idemap./kmod;
qdenorm=qdemap./kmod;

%---------------------------------------
%        QPSK Demodulation
%---------------------------------------
[demod]=qpskdemod3(idenorm,qdenorm,para,nd,ml);

%---------------------------------------
%              P/S
%---------------------------------------
pts=reshape(demod,1,para*nd*ml);

%---------------------------------------
%     Bit Error Rate Calculation
%---------------------------------------

   error=sum(abs(pts-serial));
   noe=noe+error;
   nob=nob+length(serial);
   %fprintf('%d\t%d\t%e\n',i-1,error,noe/nob);
   if mod(loop,iii)==0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  fprintf('%c','#');
  else
  end
  iii=iii+1;
end %end of simulation loop

fprintf('\n');
ber(1,t)=noe/(nob);
fprintf('%d\t%d\t%e\n',t,ebn0(1,t),ber(1,t))
t=t+1;

end %end of plot loop

ber3=ber;
s2=cputime;
period=s2-s1;
fprintf('%c\%4.2d\%c\n','Simulation time is ',period,' seconds')
```

ก.4 ชุดคำสั่งจำลองระบบในช่องสัญญาณเรลีย์ที่มีการมอดูเลทแบบ BPSK

```
function [ber2]=bpsk_rayleigh(init,fin,step,loopr,pathr)
%clear
%init=0; step=1; fin=20;

s1=cputime;
%----------------------------------------
%       OFDM parameters set up
%----------------------------------------
para=52;
fftlen=64;
noc=53;
gilen=16;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%--------------------------------------
%       parameters set up
%--------------------------------------
nsym=21;
nsamp=8;
pack=16;
nd=6;
total=nd*para;
ml=1;
sr=256000;
br=ml*sr;
rollfac=0.5;
ebn0=[init:step:fin];
m=length(ebn0);
fprintf('\n')

%--------------------------------------
%       Fading parameters
%--------------------------------------
fd=160;
flat=1;
tstp=1/sr/nsamp;
path=pathr;   %  <-- select 1-path 2,2-path 3,4-path

switch path
case 1
delay=[0];
th=[0.0];
ppow=[0];
n0=[6];
counter=1000;
itn0=nd*nsamp;   %nd*nsamp;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
itn1=[counter];
now=1;

case 2
delay=[0,2];
th=[0.0,0.0];
ppow=[0,10];
n0=[6,7];
counter=1000;
itn0=nd*nsamp;
itn1=[counter,2000];
now=2;

case 3
delay=[0,2,3,4];
th=[0.0,0.0,0.0,0.0];
ppow=[0,10,20,30];
n0=[6,7,6,7];
counter=1000;
itn0=nd*nsamp;
itn1=[counter,2000,3000,4000];
now=4;
end
%----------------------------------------

t=1;
while t<=m

noe=0; nob=0; iii=1; loop=loopr;
while iii<=loop
serial=rand(1,total)>0.5;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%---------------------------------------
%          BPSK modulation
%---------------------------------------
map=2.*serial-1;

%---------------------------------------
%               S/P
%---------------------------------------
parallel=reshape(map,para,nd);

%---------------------------------------
%         Carrier Mapping
%---------------------------------------
qdata=zeros(fftlen,nd);
[imap,qmap]=crmap2(parallel,qdata,fftlen,nd);

%---------------------------------------
%        Complex signaling
%---------------------------------------
z1=imap+qmap.*i;
z2=ifft(z1);
iout=real(z2);
qout=imag(z2);

%---------------------------------------
%      Guard interval insertion
%---------------------------------------
fftlen2=fftlen+gilen;
[iguard,qguard]=guard2(iout,qout,fftlen,gilen,nd);

%---------------------------------------
%    Define Power of signal
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%--------------------------------------
sp=sum(iguard.^2+qguard.^2)/(nd*para);   %para*nsamp*nsym
amp_fade=0.5*sp*sr/(br*10^(ebn0(1,t)/10));
amp_fade=sqrt(amp_fade);

%--------------------------------------
%     Rayliegh Fading Channel
%--------------------------------------
[iray,qray]=sefade2(iguard,qguard,delay,ppow,th,n0,itn1,now,length(iguard),tstp,fd,flat);
itn1=itn1+itn0;

%--------------------------------------
% Additive White Gaussian Noise Adding
%--------------------------------------
iawgn=randn(1,length(iray)).*amp_fade;
qawgn=randn(1,length(qray)).*amp_fade;
inoise_add=iray+iawgn;
qnoise_add=qray+qawgn;

%--------------------------------------
%    Guard interval removed
%--------------------------------------
[igrem,qgrem]=guardrem2(inoise_add,qnoise_add,fftlen2,gilen,nd);

%--------------------------------------
%       Decomplex signaling
%--------------------------------------
v=fft(igrem+(qgrem.*i));
iin=real(v);
qin=imag(v);

%--------------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%        Carrier demapping
%---------------------------------------
[idemap,qdemap]=crdemap2(iin,qin,fftlen,nd);

%---------------------------------------
%             P/S
%---------------------------------------
d=reshape(idemap,1,para*nd);

%---------------------------------------
%        Demodulation
%---------------------------------------
demo=d>0;

%---------------------------------------
%     Bit Error Rate Calculation
%---------------------------------------

    error=sum(abs(demo-serial));
    noe=noe+error;
    nob=nob+length(serial);
    %fprintf('%d\t%d\t%e\n',i-1,error,noe/nob);
    if mod(loop,iii)==0
    fprintf('%c','#');
    else
    end
    iii=iii+1;
end %end of simulation loop

fprintf('\n');
ber(1,t)=noe/(nob);
fprintf('%d\t%d\t%e\n',t,ebn0(1,t),ber(1,t))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
t=t+1;

end %end of plot loop

ber2=ber;
s2=cputime;
period=s2-s1;
fprintf('%c\%4.2d\%c\n','Simulation time is ',period,' seconds')
```

ก.5 ชุดคำสั่งจำลองระบบในช่องสัญญาณเรลีย์ที่มีการมอดูเลทแบบ QPSK

```
function [ber4]=qpsk_rayleigh(init,fin,step,loopr,pathr)
%clear
%init=0; step=1; fin=20;

s1=cputime;
%---------------------------------------
%       OFDM parameters set up
%---------------------------------------
para=52;
fftlen=64;
noc=53;
gilen=16;

%---------------------------------------
%       parameters set up
%---------------------------------------
nsym=21;
nsamp=8;
pack=16;
nd=6;
ml=2;
total=nd*para*ml;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
sr=256000;
br=ml*sr;
rollfac=0.5;
ebn0=[init:step:fin];
m=length(ebn0);
fprintf('\n')

%-----------------------------------------
%       Fading parameters
%-----------------------------------------
fd=160;
flat=1;
tstp=1/sr/nsamp;    % tstp=1/sr/nsamp;
path=pathr;   %  <-- select 1-path 2,2-path 3,4-path

switch path
case 1
delay=[0];
th=[0.0];
ppow=[0];
n0=[6];
counter=1000;
itn0=nd*nsamp;    %nd*nsamp; %itn0=nd*(fftlen+gilen)*10;
itn1=[counter];
now=1;

case 2
delay=[0,2];
th=[0.0,0.0];
ppow=[0,10];
n0=[6,7];
counter=1000;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
itn0=nd*nsamp;
itn1=[counter,2000];
now=2;

case 3
delay=[0,2,3,4];
th=[0.0,0.0,0.0,0.0];
ppow=[0,10,20,30];
n0=[6,7,6,7];
counter=1000;
itn0=nd*nsamp;
itn1=[counter,2000,3000,4000];
now=4;
end
%---------------------------------------

t=1;
while t<=m

noe=0; nob=0; iii=1; loop=loopr;
while iii<=loop
serial=rand(1,total)>0.5;

%---------------------------------------
%              S/P
%---------------------------------------
stp=reshape(serial,para,nd*ml);

%---------------------------------------
%          QPSK modulation
%---------------------------------------
[imod,qmod]=qpskmod4(stp,para,nd,ml);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%---------------------------------------
%     Normalize by Mod. Coeff
%---------------------------------------
kmod=1/sqrt(2);
inorm=imod.*kmod;
qnorm=qmod.*kmod;

%---------------------------------------
%       Carrier Mapping
%---------------------------------------
[imap,qmap]=crmap4(inorm,qnorm,fftlen,nd);

%---------------------------------------
%        Complex Signal
%---------------------------------------
z1=imap+qmap.*i;
z2=ifft(z1);
itran=real(z2);
qtran=imag(z2);

%---------------------------------------
%     Guard interval insertion
%---------------------------------------
fftlen2=fftlen+gilen;
[iguard,qguard]=guard4(itran,qtran,fftlen,gilen,nd);

%---------------------------------------
%     Define Power of signal
%---------------------------------------
sp=2*sum(iguard.^2+qguard.^2)/(para*nd);   %nd*para*pack
amp_fade=0.5*sp*sr/(br*10^(ebn0(1,t)/10));
amp_fade=sqrt(amp_fade);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%--------------------------------------
%    Rayliegh Fading Channel
%--------------------------------------
[iray,qray]=sefade4(iguard,qguard,delay,ppow,th,n0,itn1,now,length(iguard),tstp,fd,flat);
itn1=itn1+itn0;

%--------------------------------------
% Additive White Gaussian Noise Adding
%--------------------------------------
iawgn=randn(1,length(iray)).*amp_fade;
qawgn=randn(1,length(qray)).*amp_fade;
inoise_add=iray+iawgn;
qnoise_add=qray+qawgn;

%--------------------------------------
%    Guard interval removed
%--------------------------------------
[igrem,qgrem]=guardrem4(inoise_add,qnoise_add,fftlen2,gilen,nd);

%--------------------------------------
%        Complex signal
%--------------------------------------
y1=igrem+qgrem.*i;
y2=fft(y1);
ire=real(y2);
qre=imag(y2);

%--------------------------------------
%        Carrier demapping
%--------------------------------------
[idemap,qdemap]=crdemap4(ire,qre,fftlen,nd);
idenorm=idemap./kmod;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
qdenorm=qdemap./kmod;


%---------------------------------------
%         QPSK Demodulation
%---------------------------------------
[demod]=qpskdemod4(idenorm,qdenorm,para,nd,ml);


%---------------------------------------
%              P/S
%---------------------------------------
pts=reshape(demod,1,para*nd*ml);


%---------------------------------------
%    Bit Error Rate Calculation
%---------------------------------------

  error=sum(abs(pts-serial));
  noe=noe+error;
  nob=nob+length(serial);
  %fprintf('%d\t%d\t%e\n',i-1,error,noe/nob);
  if mod(loop,iii)==0
  fprintf('%c','#');
  else
  end
  iii=iii+1;
end %end of simulation loop


fprintf('\n');
ber(1,t)=noe/(nob);
fprintf('%d\t%d\t%e\n',t,ebn0(1,t),ber(1,t))
t=t+1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end %end of plot loop

ber4=ber;
s2=cputime;
period=s2-s1;
fprintf('%c\%4.2d\%c\n','Simulation time is ',period,' seconds')
```

ก.6 ชุดคำสั่งจำลองระบบในช่องสัญญาณเรลีย์ที่มีการมอดูเลทแบบ QPSK และมีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีสายอากาศรับแบบรวมอัตราส่วนสูงที่สุด

```
function [ber4]=qr_mrc(init,fin,step,loopr,pathr)
%clear
%init=0; step=1; fin=20;

s1=cputime;
%---------------------------------------
%       OFDM parameters set up
%---------------------------------------
para=52;
fftlen=64;
noc=53;
gilen=16;

%---------------------------------------
%       parameters set up
%---------------------------------------
nsym=21;
nsamp=8;
pack=16;
nd=6;
ml=2;
total=nd*para*ml;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
sr=256000;
br=ml*sr;
rollfac=0.5;
ebn0=[init:step:fin];
m=length(ebn0);
fprintf('\n')

%-----------------------------------------
%        Fading parameters
%-----------------------------------------
fd=160;
flat=1;
tstp=1/sr/nsamp;   % tstp=1/sr/nsamp;
path=pathr;  %  <-- select 1-path 2,2-path 3,4-path

switch path
case 1
delay=[0];
th=[0.0];
ppow=[0];
n0=[6];
counter=1000;
itn0=nd*nsamp;   %nd*nsamp; %itn0=nd*(fftlen+gilen)*10;
itn1=[counter];
now=1;

case 2
delay=[0,2];
th=[0.0,0.0];
ppow=[0,10];
n0=[6,7];
counter=1000;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
itn0=nd*nsamp;
itn1=[counter,2000];
now=2;

case 3
delay=[0,2,3,4];
th=[0.0,0.0,0.0,0.0];
ppow=[0,10,20,30];
n0=[6,7,6,7];
counter=1000;
itn0=nd*nsamp;
itn1=[counter,2000,3000,4000];
now=4;
end
%---------------------------------------

t=1;
while t<=m

noe=0; nob=0; iii=1; loop=loopr;
while iii<=loop
serial=rand(1,total)>0.5;

%---------------------------------------
%              S/P
%---------------------------------------
stp=reshape(serial,para,nd*ml);

%---------------------------------------
%        QPSK modulation
%---------------------------------------
[imod,qmod]=qpskmod4(stp,para,nd,ml);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%---------------------------------------
%    Normalize by Mod. Coeff
%---------------------------------------
kmod=1/sqrt(2);
inorm=imod.*kmod;
qnorm=qmod.*kmod;

%---------------------------------------
%      Carrier Mapping
%---------------------------------------
[imap,qmap]=crmap4(inorm,qnorm,fftlen,nd);

%---------------------------------------
%       Complex Signal
%---------------------------------------
z1=imap+qmap.*i;
z2=ifft(z1);
itran=real(z2);
qtran=imag(z2);

%---------------------------------------
%    Guard interval insertion
%---------------------------------------
fftlen2=fftlen+gilen;
[iguard,qguard]=guard4(itran,qtran,fftlen,gilen,nd);

%---------------------------------------
%  Maximal Ratio Combining Diversity
%---------------------------------------
I1=iguard;
I2=iguard;
Q1=qguard;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Q2=qguard;

%---------------------------------------
%    Define Power of signal
%---------------------------------------
sp=2*sum(I1.^2+Q1.^2)/(para*nd);   %nd*para*pack
amp_fade=0.5*sp*sr/(br*10^(ebn0(1,t)/10));
amp_fade=sqrt(amp_fade);

%---------------------------------------
%     Rayliegh Fading Channel #1
%---------------------------------------
[iray1,qray1]=sefade4(I1,Q1,delay,ppow,th,n0,itn1,now,length(iguard),tstp,fd,flat);
itn1=itn1+itn0;

%---------------------------------------
% Additive White Gaussian Noise Adding #1
%---------------------------------------
iawgn1=randn(1,length(iray1)).*amp_fade;
qawgn1=randn(1,length(qray1)).*amp_fade;
inoise_add1=iray1+iawgn1;
qnoise_add1=qray1+qawgn1;

%---------------------------------------
%    Guard interval removed #1
%---------------------------------------
[igrem1,qgrem1]=guardrem3(inoise_add1,qnoise_add1,fftlen2,gilen,nd);

%---------------------------------------
%         Complex signal #1
%---------------------------------------
x1=igrem1+qgrem1.*i;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
x2=fft(x1);
ire1=real(x2);
qre1=imag(x2);

%---------------------------------------
%       Carrier demapping #1
%---------------------------------------
[idemap1,qdemap1]=crdemap3(ire1,qre1,fftlen,nd);
idenorm1=idemap1./kmod;
qdenorm1=qdemap1./kmod;

%---------------------------------------
%   Rayliegh Fading Channel #2
%---------------------------------------
[iray2,qray2]=sefade4(I2,Q2,delay,ppow,th,n0,itn1,now,length(iguard),tstp,fd,flat);
itn1=itn1+itn0;

%-----------------------------------------
% Additive White Gaussian Noise Adding #2
%-----------------------------------------
iawgn2=randn(1,length(iray2)).*amp_fade;
qawgn2=randn(1,length(qray2)).*amp_fade;
inoise_add2=iray2+iawgn2;
qnoise_add2=qray2+qawgn2;

%---------------------------------------
%   Guard interval removed #2
%---------------------------------------
[igrem2,qgrem2]=guardrem3(inoise_add2,qnoise_add2,fftlen2,gilen,nd);

%---------------------------------------
%       Complex signal #2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%---------------------------------------
y1=igrem2+qgrem2.*i;
y2=fft(y1);
ire2=real(y2);
qre2=imag(y2);

%---------------------------------------
%       Carrier demapping #2
%---------------------------------------
[idemap2,qdemap2]=crdemap3(ire2,qre2,fftlen,nd);
idenorm2=idemap2./kmod;
qdenorm2=qdemap2./kmod;

%---------------------------------------
%        MRC at reciever
%---------------------------------------
idenorm3=idenorm1+idenorm2;
qdenorm3=qdenorm1+qdenorm2;

%---------------------------------------
%       QPSK Demodulation
%---------------------------------------
[demod]=qpskdemod3(idenorm3,qdenorm3,para,nd,ml);

%---------------------------------------
%            P/S
%---------------------------------------
pts=reshape(demod,1,para*nd*ml);

%---------------------------------------
%    Bit Error Rate Calculation
%---------------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  error=sum(abs(pts-serial));
  noe=noe+error;
  nob=nob+length(serial);
  %fprintf('%d\t%d\t%e\n',i-1,error,noe/nob);
  if mod(loop,iii)==0
  fprintf('%c','#');
  else
  end
  iii=iii+1;
end %end of simulation loop

fprintf('\n');
ber(1,t)=noe/(nob);
fprintf('%d\t%d\t%e\n',t,ebn0(1,t),ber(1,t))
t=t+1;

end %end of plot loop

ber4=ber;
s2=cputime;
period=s2-s1;
fprintf('%c\%4.2d\%c\n','Simulation time is ',period,' seconds')
```

ก.7 ชุดคำสั่งจำลองระบบในช่องสัญญาณเรลีย์ที่มีการมอดูเลทแบบ QPSK และมีการใช้วิธีไดเวอร์ซิตีสายอากาศรับแบบเข้ารหัสตำแหน่ง - เวลา

```
function [ber4]=qr_std(init,fin,step,loopr,pathr)
%clear
%init=0; step=1; fin=10;

%s1=cputime;
%----------------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%	OFDM parameters set up
%---------------------------------------
para=52;
fftlen=64;
noc=53;
gilen=16;

%---------------------------------------
%	parameters set up
%---------------------------------------
nsym=21;
nsamp=8;
pack=16;
nd=6;
ml=2;
total=nd*para*ml;
sr=256000;
br=ml*sr;
rollfac=0.5;
ebn0=[init:step:fin];
m=length(ebn0);
fprintf('\n')

%---------------------------------------
%	Fading parameters
%---------------------------------------
fd=160;
flat=1;
tstp=1/sr/nsamp;    % tstp=1/sr/nsamp;
path=pathr;   %  <-- select 1-path 2,2-path 3,4-path

switch path
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
case 1
delay=[0];
th=[0.0];
ppow=[0];
n0=[6];
counter=1000;
itn0=nd*nsamp;    %nd*nsamp; %itn0=nd*(fftlen+gilen)*10;
itn1=[counter];
now=1;

case 2
delay=[0,2];
th=[0.0,0.0];
ppow=[0,10];
n0=[6,7];
counter=1000;
itn0=nd*nsamp;
itn1=[counter,2000];
now=2;

case 3
delay=[0,2,3,4];
th=[0.0,0.0,0.0,0.0];
ppow=[0,10,20,30];
n0=[6,7,6,7];
counter=1000;
itn0=nd*nsamp;
itn1=[counter,2000,3000,4000];
now=4;
end
%----------------------------------------
t=1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
while t<=m

noe=0; nob=0; iii=1; loop=loopr;
while iii<=loop
serial1=rand(1,total)>0.5;
serial2=rand(1,total)>0.5;

comp=[serial1 serial2];

%----------------------------------------
%                S/P
%----------------------------------------
stp1=reshape(serial1,para,nd*ml);
stp2=reshape(serial2,para,nd*ml);

%----------------------------------------
%        QPSK modulation
%----------------------------------------
[imod1,qmod1]=qpskmod3(stp1,para,nd,ml);
[imod2,qmod2]=qpskmod3(stp2,para,nd,ml);

%----------------------------------------
%    Normalize by Mod. Coeff
%----------------------------------------
kmod=1/sqrt(2);
inorm1=imod1.*kmod;
qnorm1=qmod1.*kmod;
inorm2=imod2.*kmod;
qnorm2=qmod2.*kmod;

%----------------------------------------
%    Carrier Mapping
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%----------------------------------------
[imap1,qmap1]=crmap3(inorm1,qnorm1,fftlen,nd);
[imap2,qmap2]=crmap3(inorm2,qnorm2,fftlen,nd);

%----------------------------------------
%       Complex signaling
%----------------------------------------
A=imap1+qmap1.*i;
S1=ifft(A);
iin1=real(S1);
qin1=imag(S1);

B=imap2+qmap2.*i;
S2=ifft(B);
iin2=real(S2);
qin2=imag(S2);

is1=[iin1 iin2];   % ic time slot1
qs1=[qin1 qin2];   % qc time slot1
is2=[-iin2 iin1];  % ic time slot2
qs2=[qin2 -qin1];  % qc time slot2

%----------------------------------------
%    Guard interval insertion
%----------------------------------------
fftlen2=fftlen+gilen;
[iguard1,qguard1]=guard3(is1,qs1,fftlen,gilen,nd*2);
[iguard2,qguard2]=guard3(is2,qs2,fftlen,gilen,nd*2);

%----------------------------------------
%    Define Power of signal #1
%----------------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
sp=sum(iguard1.^2+qguard1.^2)/(nd*para*2);  %para*nsamp*nsym
amp_fade=0.5*sp*sr/(br*10^(ebn0(1,t)/10));
amp_fade=sqrt(amp_fade);

%----------------------------------------
%    Define Power of signal #2
%----------------------------------------
sp=sum(iguard2.^2+qguard2.^2)/(nd*para*2);  %para*nsamp*nsym
amp_fade=0.5*sp*sr/(br*10^(ebn0(1,t)/10));
amp_fade=sqrt(amp_fade);

%----------------------------------------
%    Rayliegh Fading Channel #1
%----------------------------------------
[iray1,qray1]=sefade2(iguard1,qguard1,delay,ppow,th,n0,itn1,now,length(iguard1),tstp,fd,flat);
itn1=itn1+itn0;

%----------------------------------------
%    Rayliegh Fading Channel #2
%----------------------------------------
[iray2,qray2]=sefade2(iguard2,qguard2,delay,ppow,th,n0,itn1,now,length(iguard2),tstp,fd,flat);
itn1=itn1+itn0;

%----------------------------------------
% Additive White Gaussian Noise Adding #1
%----------------------------------------
iawgn1=randn(1,length(iray1)).*amp_fade;
qawgn1=randn(1,length(qray1)).*amp_fade;
inoise_add1=iray1+iawgn1;
qnoise_add1=qray1+qawgn1;

%----------------------------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
% Additive White Gaussian Noise Adding #2
%-----------------------------------------
iawgn2=randn(1,length(iray2)).*amp_fade;
qawgn2=randn(1,length(qray2)).*amp_fade;
inoise_add2=iray2+iawgn2;
qnoise_add2=qray2+qawgn2;

%---------------------------------------
%     Guard interval removed #1
%---------------------------------------
[igrem1,qgrem1]=guardrem3(inoise_add1,qnoise_add1,fftlen2,gilen,nd*2);  %inoise_add1,2

%---------------------------------------
%     Guard interval removed #2
%---------------------------------------
[igrem2,qgrem2]=guardrem3(inoise_add2,qnoise_add2,fftlen2,gilen,nd*2);

%---------------------------------------
%        Decomplex signaling #1
%             STD decoder
%---------------------------------------
iin11=zeros(fftlen,nd);
iin11=igrem1(1:fftlen,1:nd);        % irx1 from ic time slot1
iin21=zeros(fftlen,nd);
iin21=igrem1(1:fftlen,nd+1:2*nd);   % irx2 from ic time slot1
qin11=zeros(fftlen,nd);
qin11=qgrem1(1:fftlen,1:nd);        % qrx1 from qc time slot1
qin21=zeros(fftlen,nd);
qin21=qgrem1(1:fftlen,nd+1:2*nd);   % qrx2 from qc time slot1

iin22=zeros(fftlen,nd);
iin22=-igrem2(1:fftlen,1:nd);       % irx1 from ic time slot2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
iin12=zeros(fftlen,nd);
iin12=igrem2(1:fftlen,nd+1:2*nd);   % irx2 from ic time slot2
qin22=zeros(fftlen,nd);
qin22=qgrem2(1:fftlen,1:nd);        % qrx1 from qc time slot2
qin12=zeros(fftlen,nd);
qin12=-qgrem2(1:fftlen,nd+1:2*nd);  % qrx2 from qc time slot2

iout1=iin11+iin12;
iout2=iin21+iin22;
qout1=qin11+qin12;
qout2=qin21+qin22;

v1=fft(iout1/2+(qout1/2*i));
iout1=real(v1);
qout1=imag(v1);

v2=fft(iout2/2+(qout2/2.*i));
iout2=real(v2);
qout2=imag(v2);

%---------------------------------------
%       Carrier demapping #1
%---------------------------------------
[idemap1,qdemap1]=crdemap3(iout1,qout1,fftlen,nd);
idenorm1=idemap1./kmod;
qdenorm1=qdemap1./kmod;

%---------------------------------------
%       Carrier demapping #2
%---------------------------------------
[idemap2,qdemap2]=crdemap3(iout2,qout2,fftlen,nd);
idenorm2=idemap2./kmod;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
qdenorm2=qdemap2./kmod;

%--------------------------------------
%         QPSK Demodulation
%--------------------------------------
[demod1]=qpskdemod3(idenorm1,qdenorm1,para,nd,ml);
[demod2]=qpskdemod3(idenorm2,qdenorm2,para,nd,ml);

%--------------------------------------
%                 P/S
%--------------------------------------
pts1=reshape(demod1,1,para*nd*ml);
pts2=reshape(demod2,1,para*nd*ml);

%--------------------------------------
%        STD decoder at reciever
%--------------------------------------
pts3=[pts1 pts2];

%--------------------------------------
%    Bit Error Rate Calculation
%--------------------------------------

   error=sum(abs(pts3-comp));
   noe=noe+error;
   nob=nob+length(comp);
   %fprintf('%d\t%d\t%e\n',i-1,error,noe/nob);
   if mod(loop,iii)==0
   fprintf('%c','#');
   else
   end
   iii=iii+1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
end %end of simulation loop

fprintf('\n');
ber(1,t)=noe/(nob);
fprintf('%d\t%d\t%e\n',t,ebn0(1,t),ber(1,t))
t=t+1;

end %end of plot loop

ber4=ber;
%s2=cputime;
%period=s2-s1;
%fprintf('%c\%4.2d\%c\n','Simulation time is ',period,' seconds')
```

ก.8 ชุดคำสั่งจำลองการมอดูเลทสัญญาณแบบ QPSK

```
% subroutine QPSK modulation
function [idata,qdata]=qpskmod(parallel,para,nd,ml)

m=ml/2;
source1=parallel.*2-1;
count=0;
new=nd;

for i=1:new

   isi=zeros(para,1);
   isq=zeros(para,1);

   for j=1:m

      isi=isi+2.^(m-j).*source1((1:para),j+count);
      isq=isq+2.^(m-j).*source1((1:para),m+j+count);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    end

    idata((1:para),i)=isi;
    qdata((1:para),i)=isq;
    count=count+ml;
end
```

ก.9 ชุดคำสั่งจำลองการดีมอดูเลทสัญญาณแบบ QPSK

```
% subroutine QPSK demodulation
function [demod]=qpskdemod(idenorm,qdenorm,para,nd,ml)

demod=zeros(para,ml*nd);
demod((1:para),(1:ml:ml*nd-1))=idenorm((1:para),(1:nd))>=0;
demod((1:para),(2:ml:ml*nd)) = qdenorm((1:para),(1:nd))>=0;
```

ก.10 ชุดคำสั่งจำลองการแมปคลื่นพาห์ย่อย

```
% subroutine carrier mapping
% (DC=0)

function [iout,qout]=crmap(idata,qdata,fftlen,nd);

%****************** variables *************************
% idata     : Input Ich data
% qdata     : Input Qch data
% iout      : Output Ich data
% qout      : Output Qch data
% fftlen    : Length of FFT (points)
% nd        : Number of OFDM symbols
% *****************************************************

iout=zeros(fftlen,nd);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
qout=zeros(fftlen,nd);

iout(2:27,:)=idata(1:26,:);
qout(2:27,:)=qdata(1:26,:);
iout(39:64,:)=idata(27:52,:);
qout(39:64,:)=qdata(27:52,:);
```

ก.11 ชุดคำสั่งจำลองการดีแมปคลื่นพาห์ย่อย

```
% subroutine carrier demapping

function [iout,qout]=crdemap(idata,qdata,fftlen,nd);

%****************** variables *************************
% idata    : Input Ich data
% qdata    : Input Qch data
% iout     : Output Ich data
% qout     : Output Qch data
% fftlen   : Length of FFT (points)
% nd       : Number of OFDM symbols
% ********************************************************

iout(1:26,:)=idata(2:27,:);
qout(1:26,:)=qdata(2:27,:);
iout(27:52,:)=idata(39:64,:);
qout(27:52,:)=qdata(39:64,:);
```

ก.12 ชุดคำสั่งจำลองการแทรกสัญลักษณ์เวลาคุม

```
% subroutine guard interval

function [iout,qout]= guard(idata,qdata,fftlen,gilen,nd);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
%***************** variables ************************
% idata    : Input Ich data
% qdata    : Input Qch data
% iout     : Output Ich data
% qout     : Output Qch data
% fftlen   : Length of FFT (points)
% gilen    : Length of guard interval (points)
% ****************************************************

idata1=reshape(idata,fftlen,nd);
qdata1=reshape(qdata,fftlen,nd);
idata2=[idata1(fftlen-gilen+1:fftlen,:); idata1];
qdata2=[qdata1(fftlen-gilen+1:fftlen,:); qdata1];

iout=reshape(idata2,1,(fftlen+gilen)*(nd));
qout=reshape(qdata2,1,(fftlen+gilen)*(nd));
```

ก.13 ชุดคำสั่งจำลองถอดสัญลักษณ์เวลาคุม

```
% subroutine guard interval removed

function [iout,qout]= guardrem(idata,qdata,fftlen2,gilen,nd);

%***************** variables ************************
% idata    : Input Ich data
% qdata    : Input Qch data
% iout     : Output Ich data
% qout     : Output Qch data
% fftlen2  : Length of FFT (points)
% gilen    : Length of guard interval (points)
% nd       : Number of OFDM symbols
% ****************************************************
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
idata2=reshape(idata,fftlen2,nd);
qdata2=reshape(qdata,fftlen2,nd);

iout=idata2(gilen+1:fftlen2,:);
qout=qdata2(gilen+1:fftlen2,:);
```

ก.14 ชุดคำสั่งการหน่วงเวลาในช่องสัญญาณ

```
% subroutine delay
function [iout,qout] = delay( idata, qdata , nsamp , idel )

%****************** variables *************************
% idata  input Ich data
% qdata  input Qch data
% iout   output Ich data
% qout   output Qch data
% nsamp  Number of samples to be simulated
% idel   Number of samples to be delayed
%******************************************************

iout=zeros(1,nsamp);
qout=zeros(1,nsamp);

if idel ~= 0
  iout(1:idel) = zeros(1,idel);
  qout(1:idel) = zeros(1,idel);
end

iout(idel+1:nsamp) = idata(1:nsamp-idel);
qout(idel+1:nsamp) = qdata(1:nsamp-idel);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.15 ชุดคำสั่งของช่องสัญญาณจางหาย

```
function [iout,qout,ramp,rcos,rsin]=fade(idata,qdata,len,tstp,fd,no,counter,flat)
len=length(idata);
if fd ~= 0.0
   ac0 = sqrt(1.0 ./ (2.0.*(no + 1)));  % power normalized constant(ich)
   as0 = sqrt(1.0 ./ (2.0.*no));        % power normalized constant(qch)
   ic0 = counter;                       % fading counter

   pai = 3.14159265;
   wm = 2.0.*pai.*fd;
   n = 4.*no + 2;
   ts = tstp;
   wmts = wm.*ts;
   paino = pai./no;

   xc=zeros(1,len);
   xs=zeros(1,len);
   ic=[1:len]+ic0;

  for nn = 1: no
          cwn = cos( cos(2.0.*pai.*nn./n).*ic.*wmts );
          xc = xc + cos(paino.*nn).*cwn;
          xs = xs + sin(paino.*nn).*cwn;
  end

  cwmt = sqrt(2.0).*cos(ic.*wmts);
  xc = (2.0.*xc + cwmt).*ac0;
  xs = 2.0.*xs.*as0;

  ramp=sqrt(xc.^2+xs.^2);
  rcos=xc./ramp;
  rsin=xs./ramp;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  if flat ==1
   iout = sqrt(xc.^2+xs.^2).*idata(1:len);    % output signal(ich)
   qout = sqrt(xc.^2+xs.^2).*qdata(1:len);    % output signal(qch)
  else
   iout = xc.*idata(1:len) - xs.*qdata(1:len);   % output signal(ich)
   qout = xs.*idata(1:len) + xc.*qdata(1:len);   % output signal(qch)
  end

else
 iout=idata
 qout=qdata
end
```

ก.16 ชุดคำสั่งของช่องสัญญาณจางหายที่มีการลดทอน

```
function[iout,qout,ramp,rcos,rsin]=sefade2(idata,qdata,itau,dlvl,th,n0,itn,n1,len,tstp,fd,flat)
len=length(idata);

iout = zeros(1,len);
qout = zeros(1,len);

total_attn = sum(10 .^( -1.0 .* dlvl ./ 10.0));

for k = 1 : n1

        atts = 10.^( -0.05 .* dlvl(k));

        if dlvl(k) >= 40.0
              atts = 0.0;
        end

        theta = th(k) .* pi ./ 180.0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    [itmp,qtmp] = delay ( idata , qdata , len , itau(k));
    [itmp3,qtmp3,ramp,rcos,rsin] = fade (itmp,qtmp,len,tstp,fd,n0(k),itn(k),flat);

iout = iout + atts .* itmp3 ./ sqrt(total_attn);
qout = qout + atts .* qtmp3 ./ sqrt(total_attn);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

[1] T. Jitrangsri and S. Sitichivapak. "Enhancement of Data Transmission in OFDM – WLAN System Using Transmit Diversity Method." Proceeding of IEEE International Symposium on Circuit and System, vol.1, [CD-ROM] , May. 2003.

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENHANCEMENT OF DATA TRANSMISSION IN OFDM - WLAN SYSTEM USING TRANSMIT DIVERSITY METHOD

T. Jitrangsri[1,2], *S. Sittichivapak*[1]

[1] Department of Telecommunication Engineering
King Mongkut's Institue of Technology, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
[2] Department of Mathematics
Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530, Thailand

ABSTRACT

Currently, the OFDM-WLAN system becomes the interesting topic since wireless technology is very successful at present. Although the advantage of wireless system is the moveable terminal but wireless channel itself needs more advanced techniques to combat the effect of multipath, as the data is transmitted through the channel. Diversity technique is considered to be one of the method to improve efficiency of data tranmission in physical layer. In this paper we present the applying of transmit diversity to the OFDM-WLAN system. The Space Time Diversity (STD) is simulated, compared with Maximal Ratio Combining (MRC). The simulation result shows that STD can improve efficiency of the system by decreasing Packet Error Rate (PER) as well as MRC.

1. INTRODUCTION

Presently, the wireless technology plays an important role in communication system. The data transmission in wireless channel is limited by noise and scatterer which is considered from the multipath fading. Since the WLAN system has an indoor-environment characteristic which is assumed to be a very slow fading channel. The OFDM scheme is used in WLAN system which provides higher bit rate and can be considered as multi-carrier modulation. The OFDM divides the serial bit stream into parallel bit streams. Each stream is modulated by different subcarrier then all parallel bit streams are converted to serial bit stream again before tramsmitted through the channel. The channel bandwidth is occupied by the summation of all narrowband subcarriers.

The well-known technique to combat the effect of the multipath fading is the antenna diversity. Two example of the receive diversity are selective diversity and maximal ratio combining. The other technique is transmit diversity such as, delay diversity, space time diversity (STD) and space time coding (STC) diversity. The simple scheme for transmit diversity using two transmit antennas and single receive antenna which is less complicated compared with STC is proposed [1]. The effect of power control to the antenna of transmit diversity is also proposed later in [2].

In WLAN system, it is considered as quasi-stationary since the movement of both mobile terminal (MT) and all scatterer in an indoor-environment rarely occurs, then the two transmit symbols are not affected by channel fading. The block diagram of OFDM-WLAN is shown in figure 1.

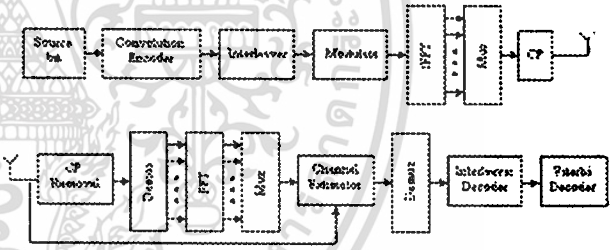


Figure 1. Block diagram of the OFDM-WLAN system.

In this paper we present the simulation result of WLAN which baseband is encoded by convolution code with code rate ½ and constraint length K=7, then modulated and converted to parallel bit stream by Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) with total number of subcarriers. After that all parallel bit streams are converted into serial bit and combined with short and long train symbols. Both train symbols are used for several techniques in OFDM system but they are not included in our work here.

The channel of WLAN system can also be considered as Wide Sense Stationary (WSS) where the parameters of the channel do not change between one OFDM symbol or one packet. The channel is considered as non-selective fading or flat fading and channel model is assumed to be Rayleigh fading channel.

The receiver diagrams of each diversity technique are different in estimation scheme but they are similar in the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

0-7803-7762-1/03/$17.00 ©2003 IEEE

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

second part which is Maximum Likelihood (ML) detector, where the signal pass through the Viterbi's decoder which parameters depend on modulation scheme. The linear process is used to estimate the channel at the receiver by using the information from the long train symbol.

The preemble which is also call cyclix prefix is represented in figure 2 to show the utilization of each part.

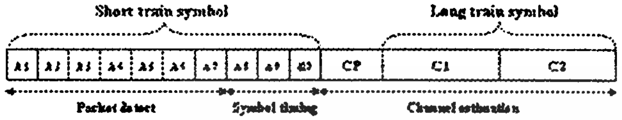


Figure 2. The OFDM Preemble structure in IEEE802.11a standard.

The paper is organized as follows. In section 2 the two different diversity schemes STD and MRC are discussed. In section 3 simulation results are presented and disscused. Finally in section 4 we summarize the comparison of receive and transmit diversity and conclude the effect of STD scheme in OFDM-WLAN system.

2. DIVERSITY SCHEME

2.1 Maximal Ratio Combining (MRC)

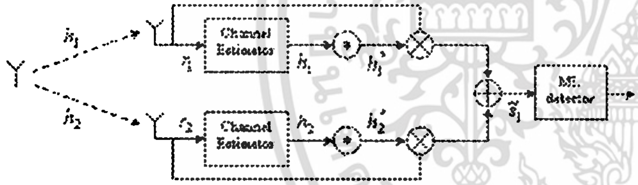


Figure 3. Block diagram of MRC Receiver.

In this paper we use one transmit antenna and two receive antenna for MRC scheme as shown in figure 3. The signal from the transmitter denoted by s_1. When we consider the paths from the transmit antenna to the first and the second receive antenna we can assume the channel fading parameter to be h_1 and h_2 respectively.

$$h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \tag{1}$$

$$h_2 = \alpha_2 e^{j\theta_2} \tag{2}$$

Where α_1 and α_2 are fading amplitudes in the channel with Rayleigh distribution in the first and the second path respectively. θ_1 and θ_2 are random phase with uniform distribution on the close interval $[-\pi, \pi]$. Hence the signal which appear at the receiver are affected by complex random noise with Gaussian distribution then the receive signals are given by.

$$r_1 = h_1 s_1 + n_1 \tag{3}$$

$$r_2 = h_2 s_1 + n_2 \tag{4}$$

Applying channel estimation and linear process with equation (3) and (4), we obtain.

$$h_1^* r_1 = \alpha_1^2 s_1 + h_1^* n_1 \tag{5}$$

$$h_2^* r_2 = \alpha_2^2 s_1 + h_2^* n_2 \tag{6}$$

Where * represents the complex conjugate operation then the combined signal which is input for ML detector is

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_1 + h_2^* r_2$$
$$= (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) s_1 + h_1^* n_1 + h_2^* n_2 \tag{7}$$

2.2 Space-Time Diversity (STD)

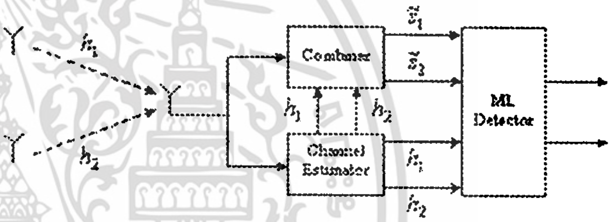


Figure 4. Block diagram of STD Receiver.

Space-time diversity uses two symbols s_1 and s_2 which transmit twice in two time slots. We transmit a pair of symbols from two transmit antennas to one receive antenna as shown in figure 4. Since the channel is very slow fading channel then two pair symbols which transmit in two time slots also is assumed to affect by the same channel fading parameter. The signal is transmitted through the transmission matrix as space time encoder [1] [2]. The transmission matrix is given by.

$$\begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \tag{8}$$

The matrix which obtain from the space time encoder is presented in figure 5.

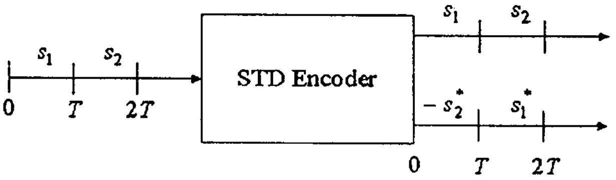


Figure 5. Space time encoder.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The receive signal appears at the receiver which are affected by random noise is then given by.

$$r_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1 \quad (9)$$

$$r_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + n_2 \quad (10)$$

Using channel estimation and linear process with equation (9) and (10), we obtain.

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_1 + h_2 r_2^*$$

$$= (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) s_1 + h_1^* n_1 + h_2 n_2^* \quad (11)$$

$$\tilde{s}_2 = h_2^* r_1 - h_1 r_2^*$$

$$= (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) s_2 + h_1 n_2^* + h_2^* n_1 \quad (12)$$

The average energy of the signal and Gaussian random noise are the variance given by equation (13) and (14) where i =1,2 is the order of transmit antennas. The signal to noise ratio (SNR) is then given by equation (15).

$$E(|s_i|^2) = \sigma_s^2 \quad (13)$$

$$E(|n_i|^2) = \sigma_n^2 \quad (14)$$

$$SNR = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \quad (15)$$

In STD diversity scheme from equations (7) (11) and (12) we note that diversity gain is twice with MRC when the total power at two transmit antennas in STD is equal to transmit antenna in MRC. In order to increase diversity, we can increase the number of transmit antenna but that mean the transmission matrix is more complicated [6].

3. SIMULATION RESULT

The parameters we use in this simulation are referred to the IEEE802.11a standard [3] [4] and [5] which is shown in table 1. The baseband in binary data is coded by ½ code rate convolution code with constraint length k=7 then modulated by BPSK QPSK 16-QAM or 64-QAM and converted to parallel bit stream by IFFT with N=64 replace for Inverse Discrete Fourier Tranform (IDFT) to reduce the computation complexity. Each bit stream which is modulated by 48 different subcarriers combine with extra 4 pilot signal, totally 52 subcarriers are used. Then all parallel streams are converted into serial bits and the preamble are added. In the MRC scheme the serial bits stream pass to the transmit antenna. But in the STD scheme, It needs to process the data in space time encoder before they pass through the transmit antenna.

At the transmit antenna, in both diversity schemes we assume the total power is equal for all simulations to compare the performance of bit error rate (BER). The receive signal is retrieve from channel estimation and maximum likelihood estimator. Then the signal pass through the Viterbi's decoder in which the data is converted to baseband again.

The whole simulations are using MONTECARLO method which MATLAB scripts are used to simulate the BER [7] and packet error rate (PER) of each diversity scheme in different factors. The actual bit errors which are affected by random noise are counted at the output compared with the real transmit bits. In this paper we transmit 19200 bits through the system to generate the output.

Parameter	Values
Coding (FEC)	Convoluton code rate ½ Constraint lingth k=7
Modulation	BPSK, QPSK, 16-QAM and 64-QAM
Number of subcarrier	48
Number of pilot signal	4
Symbol period	4 us
Cyclic prefix (Symbol)	16
OFDM data (Symbol)	80
Sampling rate	20 MHz
Channel model	Rayleigh

Table 1. OFDM-WLAN simulation parameters.

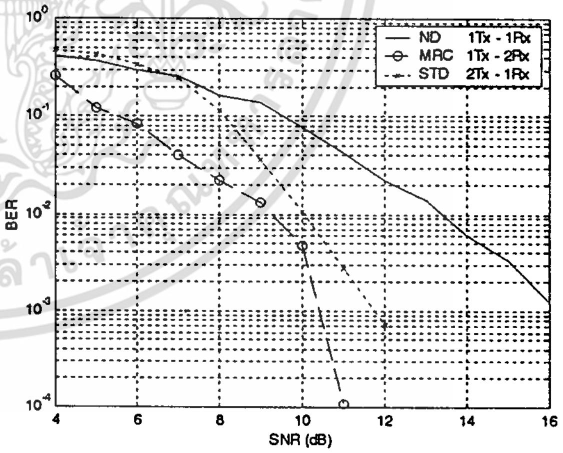


Figure 6. BER of non-diversity (ND), MRC and STD diversity scheme.

From the simulation results, in figure 6 we found that the diversity techniques decrease the SNR about 4-5 dB, while compared with non-diversity system (ND) when consider at BER equal to 10^{-3} and if we compare SNR between STD and MRC, the MRC has only 1.5 dB over STD.

0-7803-7762-1/03/$17.00 ©2003 IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Refer to IEEE802.11a standard, the bit rate of system depends on modulation methods. In figure 7 we simulate the different modulation techniques, BPSK QPSK 16-QAM and 64-QAM then we found that the BPSK has more efficiency at lower SNR, and is 3-4 dB less than the QPSK. However in modern communication system which needs a high bit rate (more than 5 Mbps) the QPSK may be use to reach the requirement. For the 16-QAM and 64-QAM, we need more techniques to reduce the BER in the low SNR for the higher bit rate application.

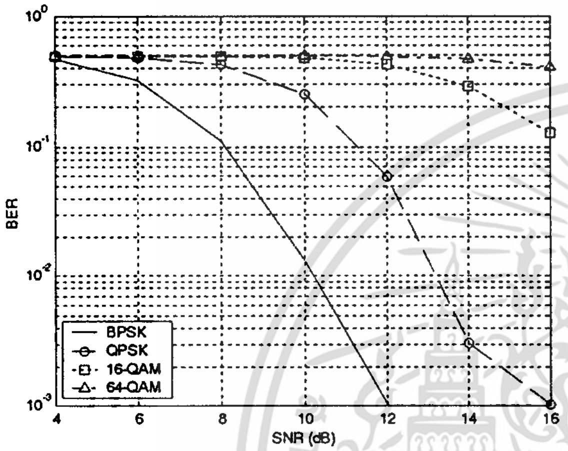


Figure 7. BER of BPSK QPSK 16-QAM and 64-QAM modulation.

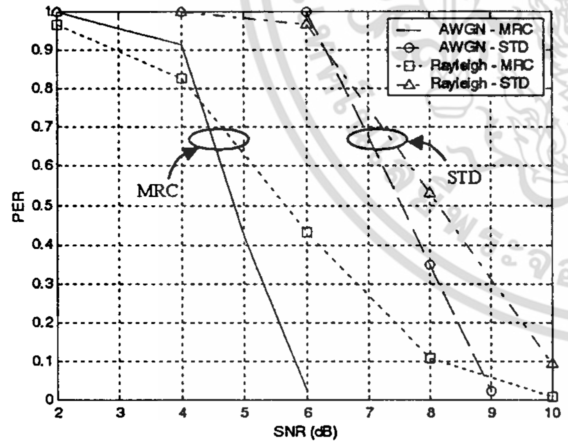


Figure 8. BER of STD and MRC diversity scheme in AWGN and Rayleigh channel.

In figure 8, when consider at the PER equal to 10 percent (PER=0.1) we note that in both channel models, AWGN and Rayleigh channel, the results are similar but in Rayleigh channel the STD and MRC scheme converge to each other at low PER (about 0.1) and there is only about 2 dB different between STD and MRC.

4. SUMMARY

In the applying of space-time diversity with OFDM-WLAN we found that the system is more efficient compare with the system without diversity. At 2 branches of both schemes, the STD can improve the BER of the system in the similar way as MRC. At the low bit rate BPSK modulation is recommended and there is trade-off between bit rate and BER depending on the decision of designing engineer.

Since changing the device in any system is cost effective then transmit diversity is maybe one way to avoid complexity in changing all user terminals but only change at the transmitter device. The further research is focussed on another technique to improve the efficiency of transmit diversity such as channel estimation and phase tracking technique.

5. REFERENCES

[1] Alamouti S.M. "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communcation". *IEEE J. Sel. Areas Commu.* Vol.16, No.8, pp.1451-1458, Oct. 1998.

[2] Fan P.Y., Li J., Cao Z. "Transmit Diversity Scheme with Power Control for Wireless Communication". *IEICE Trans. Commu.* Vol.E84-B, No.7, Jul. 2001.

[3] Boumard S., Mammela A. "Channel Estimation Versus Equalization in an OFDM WLAN System". *IEEE* , 2001.

[4] Li. Y., Seshadri N., Ariyavisitakul. "Tranmit Diversity for OFDM Systems with Mobile Wireless Channels". *IEEE. 1998.*

[5] IEEE P802.11a. "High Speed Physical Layer (PHY) in 5 GHz band". 1999.

[6] Popovic B.M. "New Complex Space-Time Block Codes for Efficient Transmit Diversity". *IEEE 6 th Symp. On Spread-Spectrum Tech. & Appli, NJIT, USA*, Sep.4-6, 2000.

[7] Proakis J.G., Salehi M. "Contemporary Communication Systems Using MATLAB" Brook/Cole 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ทรรศน์กณ จิตรังษี เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2518 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้าปี พ.ศ. 2536 จบการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมจากมหาเทคโนโลยีมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2543 และในปีเดียวกันเข้าทำงานเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จนกระทั่งปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้